

RESSALVA

Atendendo a solicitação da autora, Thariany Sanches Leme de Moraes, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 27/03/2026.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Ciências - Campus de Bauru

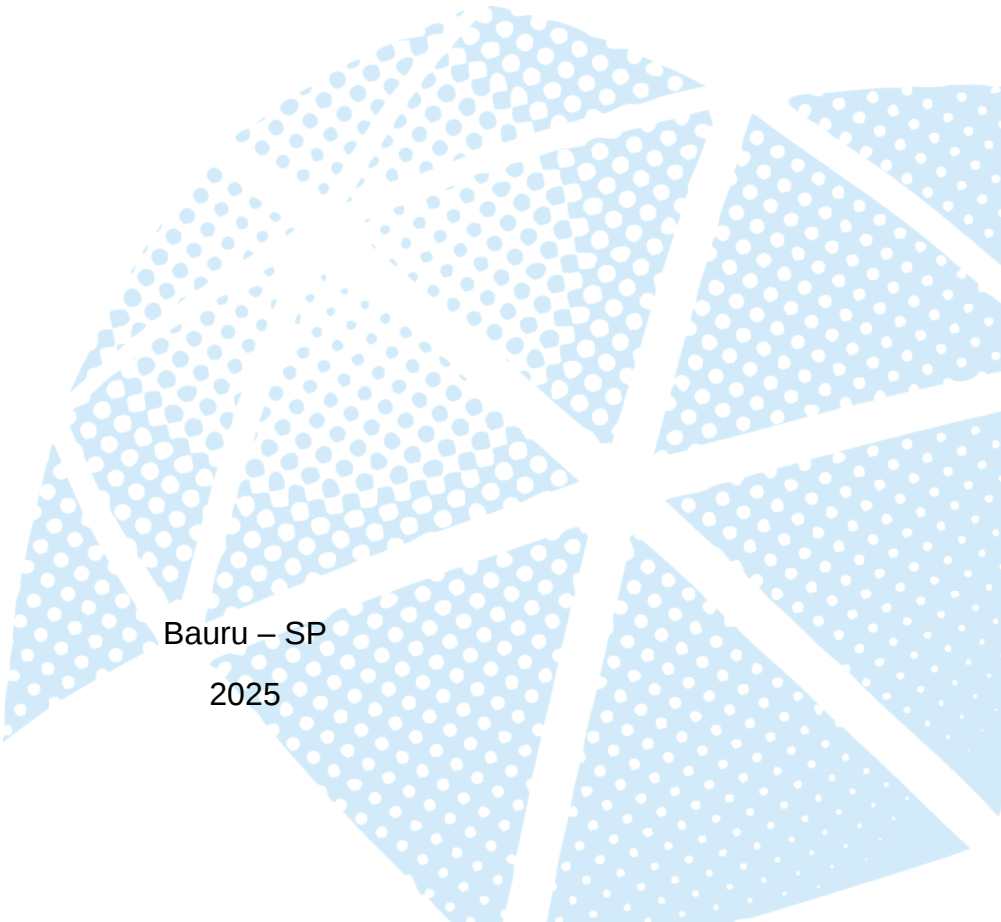
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DE
MATERIAIS (POSMAT)**

THARIANY SANCHES LEME

**VIDROS E VITROCERÂMICAS DO SISTEMA $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ CONTENDO
 BaTiO_3 , CaTiO_3 e SrTiO_3**

Bauru – SP

2025



THARIANY SANCHES LEME

**VIDROS E VITROCERÂMICAS DO SISTEMA $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ CONTENDO
 BaTiO_3 , CaTiO_3 e SrTiO_3**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais (POSMAT) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciência e Tecnologia de Materiais, sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Agda Eunice de Souza Albas.

Bauru – SP

2025

L551v Leme, Thariany Sanches
Vidros e vitrocerâmicas do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ contendo BaTiO_3 , CaTiO_3 e SrTiO_3 / Thariany Sanches Leme. -- Bauru, 2025
110 p.

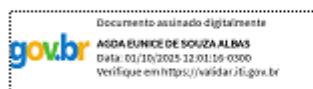
Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),
Faculdade de Ciências, Bauru
Orientadora: Agda Eunice de Souza Albas

1. Vidros. 2. Vitrocerâmica. 3. Cinética de cristalização. 4.
Nefelina. 5. Titanatos. I. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE THARIANY SANCHES LEME, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de setembro do ano de 2025, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de THARIANY SANCHES LEME, intitulada **Vidros e vitrocerâmicas do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ contendo BaTiO_3 , CaTiO_3 e SrTiO_3** . A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Física / Faculdade de Ciências e Tecnologia - Unesp/Câmpus de Presidente Prudente, Prof. Dr. ALISSON MENDES RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Instituto de Engenharia, Ciência e Tecnologia (IECT) / Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Prof. Dr. VICTOR CIRO SOLANO REYNOSO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, Prof. Dr. SILVIO RAINHO TEIXEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Física, Química e Biologia / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP, Prof. Dr. WAGNER DA SILVEIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Francisco Beltrão. Após a exposição pela doutoranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. AGDA EUNICE DE SOUZA ALBAS



AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, pela saúde, força e sabedoria concedidas ao longo desses anos, permitindo-me perseverar diante dos desafios.

Aos meus pais, sou imensamente grata pelos valores e pelo alicerce que me ensinaram, pelo apoio incondicional e pelo incentivo constante para nunca desistir, independentemente das dificuldades do caminho.

A toda minha família, expresso minha gratidão pelo suporte essencial na concretização desta nova etapa.

Aos meus amigos, expresso minha profunda gratidão pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e pelos momentos de descontração que tornaram essa jornada mais leve e motivadora.

Em especial, agradeço a Bruno Potensa e Renata Magalhães pelo auxílio e apoio constante, pela disposição em discutir o tema, bem como pela troca de ideias e conhecimentos que tanto contribuíram para o meu crescimento.

Um agradecimento especial a Gleyson Tadeu, por toda a ajuda na fusão de vidros e pela constante disposição em colaborar e compartilhar seus conhecimentos. Sou grata por ter ao meu lado, amigos que compartilharam desafios e conquistas comigo.

À minha orientadora, Agda Eunice de Souza Albas, expresso minha profunda gratidão por todas as oportunidades, pela orientação, pelo apoio incansável, pela paciência e pela confiança depositada em mim, tornando essa jornada mais leve e enriquecedora.

Ao Prof. Dr. Silvio Rainho Teixeira, sou grato pela paciência, pelo compartilhamento de conhecimento e pela confiança em meu trabalho.

Aos membros da banca, agradeço por se dedicarem à leitura, correção e discussão criteriosa de cada ponto desta tese.

LEME, T. S. **VIDROS E VITROCERÂMICAS DO SISTEMA $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ CONTENDO BaTiO_3 , CaTiO_3 e SrTiO_3** . 2025. 110f. Tese (Doutora em Ciência e Tecnologia de Materiais) – UNESP, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Bauru, 2025.

RESUMO

Neste estudo, foi desenvolvida fritas de vidro pelo processo de fusão e resfriamento, utilizando o sistema ternário $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$, com o objetivo de obter a fase cristalina da nefelina ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Posteriormente, três novas composições vítreas foram preparadas seguindo o mesmo processo, porém com a adição dos precursores BaCO_3 , SrCO_3 e CaCO_3 à mistura, visando a formação das fases cristalinas BaTiO_3 , SrTiO_3 e CaTiO_3 . As fritas foram obtidas por meio do processo de fusão e resfriamento rápido (melt-quenching), sendo fundidos nas seguintes temperaturas conforme a composição: 1500 °C para o vidro base (NEF), 1450 °C para a composição com BaTiO_3 e 1400 °C para as com a presença de precursores para obtenção de SrTiO_3 e CaTiO_3 . As amostras vítreas foram caracterizadas por difração de raios X (DRX), para avaliar a desordem estrutural e análise térmica diferencial (DSC/DTA) para determinar as regiões associadas à transição vítrea e à temperatura máxima de cristalização. Com base nos dados obtidos por DSC/DTA, pastilhas de vidro foram produzidas e submetidas a tratamentos térmicos controlados para promover a cristalização e a obtenção das vitrocerâmicas. Esses materiais foram caracterizados por DRX, espectroscopia micro-Raman, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microdureza Vickers e submetidos a ensaios para determinar sua porosidade aparente (PA), massa específica aparente (MEA) e absorção de água (AA). Além disso, foi realizado um estudo de cinética de cristalização não isotérmica utilizando os métodos propostos por Kissinger, Augis-Bennett, Kazumasa Matusita e Ligerio.

Palavras-chave: Vidro; vitrocerâmica; nefelina; BaTiO_3 ; SrTiO_3 ; CaTiO_3 ; cinética de cristalização.

LEME, T. S. **GLASS AND GLASS-CERAMICS OF THE $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$ SYSTEM CONTAINING BaTiO_3 , CaTiO_3 AND SrTiO_3 .** 2025. 110p. Thesis (PhD in Materials Science and Technology) – UNESP, Bauru, 2025.

ABSTRACT

In this study, glass frits were developed by the melting and quenching process using the ternary system $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$, with the objective of obtaining the crystalline phase of nepheline ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Subsequently, three new glass compositions were prepared following the same procedure, but with the addition of BaCO_3 , SrCO_3 , and CaCO_3 precursors, aiming to form the crystalline phases BaTiO_3 , SrTiO_3 , and CaTiO_3 , respectively. The frits were obtained through a rapid melting-quenching process, with melting temperatures adjusted according to composition: 1500 °C for the base glass (NEF), 1450 °C for the composition containing BaTiO_3 , and 1400 °C for those with precursors intended for the formation of SrTiO_3 and CaTiO_3 . The glass samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) to assess crystallinity and by differential thermal analysis (DSC/DTA) to determine the regions associated with the glass transition and the maximum crystallization temperature. Based on the DSC/DTA data, glass pellets were produced and subjected to controlled heat treatments to promote crystallization and obtain the glass-ceramics. These materials were further characterized by XRD, micro-Raman spectroscopy, scanning electron microscopy (SEM), Vickers microhardness testing, and additional tests to determine apparent porosity (PA), apparent specific gravity (MEA), and water absorption (AA). Furthermore, a non-isothermal crystallization kinetics study was carried out using the models proposed by Kissinger, Augis–Bennett, Kazumasa Matusita, and Ligeró.

Keywords: Glass; glass-ceramic; nepheline; BaTiO_3 ; SrTiO_3 ; CaTiO_3 ; crystallization kinetics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação do volume específico de um material em função da temperatura.	17
Figura 2 - Efeito da taxa de resfriamento em relação à transição vítrea.....	19
Figura 3 - Unidade básica estrutural de vidros de silicatos	20
Figura 4 - Comparação entre estrutura cristalina e modelo estrutural de Zachariasen para vidros.....	22
Figura 5 - Representação da rede vítrea com formadores (Si), e modificadores (Ca ⁺²)	24
Figura 6 - Processo de cristalização de um material vítreo	25
Figura 7 - Representação esquemática da energia livre de Gibbs em relação ao raio crítico	26
Figura 8 - Representação estrutural do Ti ⁺⁴ ocasionando a descontinuidade na rede Si ⁴⁺	30
Figura 9 - Processo de cristalização do vidro precursor para obter materiais vitrocerâmicos	33
Figura 10 - Diagrama de fases do sistema SiO ₂ - Al ₂ O ₃ - Na ₂ O.....	35
Figura 11 - Estrutura da Nefelina.	36
Figura 12 - A) Forno de fusão, B) amostra no cadinho de alumina, C) amostra sendo vertida.....	50
Figura 13 - A) Vidro I (NEF), B) Vidro II (NEF + BT), C) Vidro III (NEF + ST), D) Vidro IV (NEF + CT).....	51
Figura 14 - Termograma de DSC do pó de Vidro I	57
Figura 15 - Termograma de DSC do pó de Vidro II	58
Figura 16 - Termograma de DSC do pó de Vidro III	58
Figura 17 - Termograma de DSC do pó de Vidro IV	59
Figura 18 - Difratoograma de raios X dos materiais vítreos após a fusão	61
Figura 19 - Difratoogramas de raios X da vitrocerâmica I (NEF) com diferentes temperaturas de tratamento térmico	62
Figura 20 - Difratoogramas de raios X da vitrocerâmica II (NEF + BT) com diferentes temperaturas de tratamento térmico	63
Figura 21 - Difratoogramas de raios X da vitrocerâmica III (NEF + ST) com diferentes temperaturas de tratamento térmico	64

Figura 22 - Difrátogramas de raios X da vitrocerâmica IV (NEF + CT) com diferentes temperaturas de tratamento térmico	65
Figura 23 - Comparação dos Espectros Raman entre a vitrocerâmica de nefelina e o Espectro de referência da nefelina no Banco de dados RRUFF (ID: R060581), registrado na região espectral entre 100 e 1100 cm^{-1}	66
Figura 24 - Espectro Raman da vitrocerâmica II (nefelina com BaTiO_3) registrado na região espectral entre 100 e 1100 cm^{-1}	67
Figura 25 - Espectro Raman da vitrocerâmica III (nefelina com SrTiO_3) registrado na região espectral entre 80 e 1500 cm^{-1}	68
Figura 26 - Espectros Raman da vitrocerâmica IV (nefelina com CaTiO_3), registrado na região espectral entre 800 e 1500 cm^{-1}	69
Figura 27 - Micrografias de MEV da pastilha vitrocerâmica I (NEF)	70
Figura 28 - Espectro de EDS da pastilha da vitrocerâmica I (NEF)	71
Figura 29 - Micrografias de MEV da pastilha vitrocerâmica II (nefelina + BT)	72
Figura 30 - Espectro de EDS da pastilha da vitrocerâmica II (nefelina + BT)	72
Figura 31 - Micrografias de MEV da pastilha vitrocerâmica III (nefelina + ST)	73
Figura 32 - Espectro de EDS da pastilha da vitrocerâmica III (nefelina + ST)	74
Figura 33 - Micrografia de MEV da pastilha vitrocerâmica IV (nefelina + CT)	75
Figura 34 - Espectro de EDS da pastilha da vitrocerâmica IV (nefelina + CT)	75
Figura 35 - DRX dos pós das fritas trituradas (Vidro I)	79
Figura 36 - DRX dos pós das fritas trituradas (Vidro II)	80
Figura 37 - DRX dos pós das fritas trituradas (Vidro III)	80
Figura 38 - DRX dos pós das fritas trituradas (Vidro IV)	81
Figura 39 - Função linear do gráfico $\ln(\phi/T_p^2)$ pelo inverso da temperatura ($1/T_p$), obtido pelo método de Kissinger. (A) Vidro I - Pico 1, (B) Vidro I - Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III - Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1	82
Figura 40 - Gráfico de $\ln(\phi/T_p-300)$ em função de ($1/T_p$), para determinar a energia de ativação. (A) Vidro I – Pico 1, (B) Vidro I – Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III – Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1.	86
Figura 41 - Gráfico de $\ln(\phi)$ em função de $1/T_p$, utilizado para determinar a energia de ativação local (E_a) nas frações de cristalização variando de 0,2 a 0,8. (A) Vidro I – Pico 1, (B) Vidro I – Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III – Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1.	89

Figura 42 - Gráfico de $\ln(-\ln(1-x))$ em função de $\ln(\phi)$ utilizado para determinar o índice de Avrami. A) Vidro I – Pico 1, (B) Vidro I – Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III – Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1...	90
Figura 43 - Gráfico de $\ln(-\ln(1-x))$ em função de $1/T_p$, utilizado para determinar o m. A) Vidro I – Pico 1, (B) Vidro I – Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III – Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1.	92
Figura 44 - Variação de $\ln[K_0 f(x)]$ em função da fração cristalizada x para diferentes taxas de aquecimento (10, 15, 20, 25 e 30 °C·min ⁻¹): A) Vidro I – Pico 1, (B) Vidro I – Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III – Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1.	95
Figura 45 - Valores de $\ln(dx/dt)$ plotados em função do $1/T_p$, para cada vidro com seus respectivos picos: A) Vidro I – Pico 1, (B) Vidro I – Pico 2, (C) Vidro II – Pico 1, (D) Vidro II – Pico 2, (E) Vidro III – Pico 1, (F) Vidro III – Pico 2, (G) Vidro IV – Pico 1.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de n e m para diferentes mecanismos de cristalização	46
Tabela 2 - Reagentes precursores utilizados na composição dos vidros e vitrocerâmicos	48
Tabela 3 - Composição química em %de massa e % em mol elaborada para a obtenção dos vidros.	49
Tabela 4 - Temperaturas de fusão estimadas.	50
Tabela 5 - Temperaturas dos eventos térmicos dos vidros.....	60
Tabela 6 - Valores de massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água.....	76
Tabela 7 - Microdureza Vickers das vitrocerâmicas	77
Tabela 8 - Valores de EK e R2 obtidos pelo método de Kissinger.	85
Tabela 9 - Valores da EAB, R2 e nAB obtidos pelo método de Augis-Bennett	88
Tabela 10 - Valores de EKM,nKM e m obtidos pelo método de Matusita Kazumasa.	94
Tabela 11 - Valores da EL e nL para os diferentes vidros e seus respectivos picos de cristalização.....	98
Tabela 12 - Relação $t_{(x=0,75)}/t_{(x=0,25)}$ para os diferentes vidros e seus respectivos picos de cristalização.....	99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	15
3.1 Vidro	15
3.1.1 Definição do Vidro	16
3.2 Transição Vítrea	16
3.2.1 A importância da transição vítrea.....	18
3.3 Estrutura dos vidros de silicatos	20
3.4 Teorias estruturais da formação de vidro	20
3.5 Óxidos na estrutura dos vidros.....	22
3.5.1 Óxidos Formadores de Rede	23
3.5.2 Óxidos Modificadores de Rede	23
3.6 Processo de Cristalização	24
3.6.1 Nucleação.....	25
3.6.2 Crescimento.....	27
3.7 Agentes Nucleantes.....	28
3.8 Vitrocerâmicas	31
3.8.1 Definição.....	31
3.8.2 Processo de Obtenção de Vitrocerâmicas.....	32
3.9 Diagrama de fases ternário $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$	34
3.9.1 A estrutura cristalina da fase nefelina	35
3.9.2 Vitrocerâmicas a base de nefelina	37
3.10 Titanatos: propriedades e aplicações	38
3.10.1 Vitrocerâmicas contendo titanatos	41
3.11 Modelos Teóricos Cinéticos	43
3.11.1 Modelo de Kissinger	44
3.11.2 Modelo de Augis-Bennett	45
3.11.3 Modelo de Kazumasa Matusita	46
3.11.4 Modelo de Ligerio	47

4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1 Preparo das amostras vítreas	48
4.2 Preparo do material vitrocerâmico	51
4.3 Caracterizações das vitrocerâmicas	52
4.3.1 Caracterização térmica.....	52
4.3.2 Caracterização estrutural	52
4.3.3 Difração de raios X (DRX).....	53
4.3.4 Espectroscopia micro-Raman	53
4.3.5 Caracterização microestrutural	53
4.3.6 Caracterização Mecânica.....	54
4.3.7 Caracterização física.....	54
4.4 Estudo da cinética de cristalização não isotérmica	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1 Caracterizações dos vidros	57
5.1.1 Análise térmica	57
5.1.2 DRX dos pós das fritas vítreas.....	60
5.2 Caracterizações dos materiais vitrocerâmicos	61
5.2.1 Identificação das fases cristalinas das pastilhas tratadas termicamente ...	61
5.2.2 Caracterização vibracional da amostra.....	65
5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura das pastilhas vitrocerâmicas	70
5.2.4 Método de Arquimedes	76
5.2.5 Microdureza de Vickers.....	77
5.3 Caracterização não isotérmica – Identificação das fases cristalinas	78
5.4 Cinética de Cristalização não isotérmica.....	82
5.3.1 Cálculo de <i>EK</i> pelo Método de Kissinger.....	82
5.3.2 Cálculo de <i>EAB</i> e <i>nAB</i> pelo Método de Augis-Bennett	86
5.3.3 Cálculo de <i>EKM</i> , <i>m</i> e <i>nKM</i> pelo método de Kazumasa Matusita.....	89
5.3.4 Cálculo de <i>EL</i> e <i>nL</i> n pelo método do Ligerio.....	95
6. CONCLUSÕES.....	101
REFERÊNCIAS.....	102
APÊNDICE A	112

1. INTRODUÇÃO

Os materiais vitrocerâmicos têm se destacado como materiais de grande interesse tecnológico devido às suas propriedades mecânicas, ópticas e elétricas diferenciadas. Em comparação com os vidros precursores, elas apresentam vantagens como maior resistência mecânica, maior resistência ao desgaste e melhores propriedades termofísicas, tornando-se ideais para aplicações odontológicas, revestimentos, componentes aeroespaciais entre outros (Kokubo, 2021; Tan, 2018). Sua obtenção ocorre por meio de um processo de cristalização controlada, no qual a escolha da composição química, as condições de tratamento térmico e, quando aplicável, a pressão exerce influência direta as características finais do material (Dias et., 2023).

Dentre os diversos sistemas vitrocerâmicos reportados na literatura, aqueles baseados na cristalização da fase nefelina têm despertado interesse em função das propriedades estruturais conferidas ao material. Embora a nefelina, como mineral natural, seja utilizada principalmente como matéria-prima na indústria de vidros e cerâmicas tradicionais, quando cristalizada de forma controlada em vitrocerâmicas, pode contribuir para elevada resistência química, mecânica e ao impacto. Além disso, sua presença em matrizes vitrocerâmicas abre perspectivas de aplicação em áreas avançadas, como odontologia, eletrônica e óptica, especialmente quando combinada a agentes nucleantes, como o TiO_2 , que otimizam o processo de cristalização e refinam a microestrutura, resultando em propriedades finais superiores (Deceanne et al., 2022).

Entre os diversos sistemas vitrocerâmicos descritos na literatura, não foram encontrados estudos sobre vitrocerâmicas contendo fases nefelina-titanatos. Neste contexto, esta tese tem como objetivo geral obter um material vitrocerâmico a partir da cristalização de vidros contendo fases predominantes de nefelina-titanatos. Para isso, foram preparados vidros do sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$, adicionando TiO_2 e BaCO_3 , SrCO_3 , CaCO_3 para a formação das fases – nefelina e titanatos de bário, estrôncio e cálcio. O processo de cristalização foi conduzido por meio de tratamentos térmicos específicos e os materiais resultantes foram caracterizados quanto à sua estrutura cristalina, microestrutura e propriedades, mecânicas e físicas.

Além da caracterização estrutural, foram determinados os parâmetros cinéticos da cristalização não isotérmica utilizando modelos propostos por Kissinger, Augis-Bennett, Kazumasa Matusita e Ligerio. A comparação dos valores de energia de ativação e do índice de Avrami obtidos por diferentes métodos permitiu avaliar os mecanismos de nucleação e crescimento das fases cristalinas formadas.

6. CONCLUSÕES

Nesta tese, foi possível obter um material vitrocerâmico a partir da cristalização de vidros com fases predominantes de nefelina-titanatos. A preparação dos vidros do sistema $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Na}_2\text{O}$, contendo BaCO_3 , SrCO_3 , CaCO_3 e TiO_2 como precursores, permitiu a formação das fases cristalinas BaTiO_3 , SrTiO_3 e CaTiO_3 juntamente com a nefelina (NaAlSiO_4) na matriz vitrocerâmica, como esperado. As vitrocerâmicas apresentaram microdureza da ordem de 4 GPa, com algumas variações naquelas contendo titanatos. Não foi possível medir a microdureza da vitrocerâmica contendo nefelina- SrTiO_3 devido ao crescimento dos grãos na matriz vítrea. A porosidade aparente das vitrocerâmicas contendo nefelina e nefelina- BaTiO_3 foram próximas de 0%, enquanto aquelas contendo SrTiO_3 e CaTiO_3 apresentaram porosidade da ordem de 4,5%. A massa específica aparente das vitrocerâmicas ficou em torno de $2,7 \text{ g/cm}^3$.

Os estudos cinéticos realizados com base nos modelos não isotérmicos de Kissinger, Augis-Bennett, Kazusama Matusita e Liger permitiram a determinação dos parâmetros de ativação da cristalização. De modo geral, observou-se uma boa correspondência entre os valores de energia de ativação (E_a) obtidos pelos diferentes modelos cinéticos. Embora tenham ocorrido pequenas diferenças nos valores absolutos, todos os métodos apresentaram a mesma tendência hierárquica entre as amostras: a composição do vidro IV exibiu as menores energias de ativação, situadas na faixa de 96 a $166 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; a amostra do vidro I apresentou valores médios, entre 150 e $190 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; a amostra do vidro II mostrou valores intermediários, próximos de $240 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$; e, já, a amostra do vidro III exibiu os maiores valores de E_a , em torno de $320 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$. De modo geral, os diferentes métodos cinéticos forneceram valores distintos de n , o que já era esperado devido às aproximações matemáticas e às hipóteses específicas de cada modelo. Apesar dessas diferenças numéricas, todos os resultados situaram n na faixa de 2 a 5, o que indica mecanismos de cristalização heterogêneos, envolvendo nucleação em volume e crescimento bidimensional ou tridimensional. Assim, mais importante que o valor absoluto obtido por cada método é a coerência na interpretação global do processo, validando a confiabilidade dos modelos empregados.

REFERÊNCIAS

- ADAM, G.; GIBBS, J. H. On the temperature dependence of cooperative relaxation properties in glass-forming liquids. **Journal of Chemical Physics**, v. 43, p. 139–146, 1965.
- AKERMAN, M. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. CETEV, 2000. (Apostila – Centro Técnico de Elaboração do Vidro).
- ALLIX, M.; CORMIER, L. Structure and crystallization of oxide glasses. **Comptes Rendus Chimie**, v. 16, n. 6, p. 623–634, 2013.
- ALZHRANI, A. S. A review of glass and crystallizations of glass-ceramics. **Advances in Materials Physics and Chemistry**, v. 12, n. 11, p. 265–277, 2022.
- ARAÚJO, E. B. Vidro: uma breve história, técnicas de caracterização e aplicações na tecnologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 19, n. 3, p. 325–329, 1997.
- ARVIND, A. et al. The effect of TiO_2 addition on the crystallization and phase formation in lithium aluminum silicate (LAS) glasses nucleated by P_2O_5 . **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 69, n. 11, p. 2622–2627, nov. 2008.
- ASSIREY, E. A. R. Perovskite synthesis, properties and their related biochemical and industrial application. **Saudi Pharmaceutical Journal**, v. 27, p. 817–829, 2019.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C373-18 – Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products**. West Conshohocken: ASTM International, 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/c0373-18.html>. Acesso em: 9 nov. 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard Terminology of Glass and Glass Products**. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 1945.
- AUGIS, J. A.; BENNETT, J. E. Calculation of the Avrami parameters for heterogeneous solid state reactions using a modification of the Kissinger method. **Journal of Thermal Analysis**, v. 13, p. 283–292, 1978.
- AVANCINI, T. G. **Reciclagem de garrafas de vidro transparentes sob forma de frita cerâmica**. 2016. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- AVRAMI, M. Kinetics of phase change. I. General theory. **The Journal of Chemical Physics**, v. 7, n. 12, p. 1103–1112, 1939.
- BADAPANDA, T. et al. Diffuse phase transition behavior of dysprosium doped barium titanate ceramic. **Journal of Electroceramics**, 2013. DOI: 10.1007/s10832-013-9808-X.

BANERJEE, S. et al. Observation of Fano asymmetry in Raman spectra of SrTiO_3 and $\text{Ca}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ perovskite nanocubes. **Applied Physics Letters**, v. 89, p. 223130-1–3, 2006.

BHALLA, A. S.; GUO, R.; ROY, R. The perovskite structure – a review of its role in ceramic science and technology. **Materials Research Innovations**, v. 4, p. 3–26, 2000.

CAMPOS, A. L. et al. Crystallization kinetics of orthorhombic mullite from diphasic gels. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 304, p. 19–24, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)00995-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)00995-5).

CASSAR, D. R. **Nucleação, crescimento de cristais, relaxação e escoamento viscoso em vidros de diopsídio e diborato de lítio**. 2014. 222 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

CASTRO, W. B.; LUCIANO, B. A. Vidros metálicos: uma nova classe de materiais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 4, n. 2, p. 20–25, 2009.

CHEN, J. et al. Effect of the Ba/Ti ratio on the microstructures and dielectric properties of Ba-titanate-based glass ceramic. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 92, p. 1350–1353, 2009.

CHENGYU, W.; YING, T. Calculation of the melting temperatures of silicate glasses. **Glass Technology**, v. 24, n. 5, p. 278–282, 1983.

CHIANG, Y.-M.; BIRNIE, D. III; KINGERY, W. D. **Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 1997. cap. 1, p. 1–95.

CHO, W. S. Structural evolution and characterization of BaTiO_3 nanoparticles synthesized from polymeric precursor. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 59, p. 659–666, 1998.

COSTA, F. B. **Resolução de sobreposição de picos de cristalização, pelo método de Kurajica, caso não-isotérmico, em vidros teluretos e fosfatos**. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

CUZZATI, F. L. et al. CaTiO_3 : Influence of Ag doping on photocatalytic activity for application in Rhodamine B dye removal. **Materials Research**, v. 27, supl. 2, p. e20240201, 2024.

DECEANNE, A. V. et al. Examining the role of nucleating agents within glass-ceramic systems. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 591, p. 121714, 2022.

DEMIRÖRS, A. F.; IMHOF, A. BaTiO_3 , SrTiO_3 , CaTiO_3 , and $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ particles: A general approach for monodisperse colloidal perovskites. **Chemistry of Materials**, v. 21, p. 3002–3007, 2009.

DEUBENER, J. et al. Updated definition of glass-ceramics. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 501, p. 3–10, 2018.

DIAS, et al. Glass-ceramic: Controlled crystallization of glasses obtained from biomass ash. **International Journal of Ceramic Engineering and Science**, 2023.

DOREMUS, R. H. **Glass Science**. 2. ed. New York: Wiley, 1994.

DONALD, I. W. Crystallization kinetics of a lithium zinc silicate glass studied by DTA and DSC. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 345–346, p. 120–126, 2004.

DONG, W. et al. General approach to well-defined perovskite MTiO_3 (M = Ba, Sr, Ca, Mg) nanostructures. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 115, p. 3918–3925, 2011.

DUKE, D. A.; MACDOWELL, J. F.; KARSTETTER, B. R. Crystallization and chemical strengthening of nepheline glass-ceramic. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 50, p. 67–74, 1967.

FANFONI, M.; TOMELLINI, M. The Johnson–Mehl–Avrami–Kolmogorov model: a brief review. **Il Nuovo Cimento D**, v. 20, n. 7–8, p. 1171–1182, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03185542>.

GARCÍA-MENDOZA, M. F. et al. CaTiO_3 perovskite synthesized by chemical route at low temperatures for application as a photocatalyst for the degradation of methylene blue. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, 2023.

GOLDSCHMIDT, V. M. Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. **Skrifter Norske Videnskaps-Matematisk-Naturwiss. Akad.**, p. 67, 1926.

GRALIK, G. Quantification of Calcium Titanate (CaTiO_3) by the Rietveld Method in different molar proportions. **Revista Processos Químicos**, jul./dez. 2020.

GREER, A. L.; MA, E. Glass as a state of matter — The “newer” glass families from organic, metallic, ionic to non-silicate oxide and non-oxide glasses. **Reviews in Mineralogy and Geochemistry**, v. 87, n. 1, p. 1039–1088, maio 2022.

GREER, A. L.; COSTA, M. B.; HOUGHTON, O. S. Metallic glasses. **MRS Bulletin**, v. 48, p. 1054–1061, 2023.

GUTZOW, I.; SCHMELZER, J. **The Vitreous State: Thermodynamics, Structure, Rheology and Crystallization**. Berlin: Springer, 1995.

HAMZAWY, E. M. A.; EL-MELIEGY, E. A. M. Preparation of nepheline glass-ceramics for dental applications. **Materials Chemistry and Physics**, v. 112, n. 2, p. 432–435, 2008.

HARIZANOVA, R. et al. Barium titanate-based glass–ceramics crystallized from multicomponent oxide glasses: phase composition and microstructure. **Materials**, v. 18, n. 3783, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma18103783>.

HENDERSON, D. W. Experimental analysis of non-isothermal transformations involving nucleation and growth. **Journal of Thermal Analysis**, v. 15, p. 325–331, 1979.

HINOSTROZA, J. J. et al. Synthesis and characterization of calcium titanate (CaTiO_3) as a potential electrochemical sensor of organic pollutants in aqueous solution. **Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)**, v. 7, n. 1, p. e312, 2024. ISSN 2594-1925.

HÖLAND, W.; BEALL, G. **Glass-Ceramic Technology**. 2. ed. Westerville, OH: The American Ceramic Society, 2012.

HONMA, T.; MAEDA, K.; NAKANE, S.; SHINOZAKI, K. Unique properties and potential of glass-ceramics. **Journal of the Ceramic Society of Japan**, v. 130, n. 8, p. 545–551, 2022.

HUANG, K.; YUAN, L.; FENG, S. **Inorganic Chemistry Frontiers**, v. 2, p. 965, 2013.

JIN, Z. et al. From window panes to bone regeneration: structure, viscosity and bioactivity of soda-lime silicate glasses. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 13, p. 3448–3459, 2025.

KAZMINA, O. V.; TOKAREVA, A. Y.; VERESHCHAGIN, V. I. Using quartzofeldspathic waste to obtain foamed glass material. **Resource-Efficient Technologies**, v. 2, n. 1, p. 23–29, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reffit.2016.05.001>.

KIM, D.; KIM, K. Effect of complex nucleating agents on crystallization behavior of $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ glass-ceramics. **International Journal of Applied Glass Science**, 2024.

KISSINGER, H. E. Variation of peak temperature with heating rate in differential thermal analysis. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 57, n. 4, p. 217–221, 1956.

KISSINGER, H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 29, n. 11, p. 1702–1706, 1957.

KLEEBUSCH, E. et al. The effect of TiO_2 on nucleation and crystallization of a $\text{Li}_2\text{O-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass investigated by XANES and STEM. **Scientific Reports**, v. 8, n. 2929, 2018.

KOKUBO, T. Crystallization of $\text{BaO-TiO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ glasses and dielectric properties of their crystallized products. **Bulletin of the Institute for Chemical Research, Kyoto University**, v. 47, p. 572–583, 1969.

KOKUBO, T.; YAMAGUCHI, S. Development of novel glass-ceramics for dental applications by the Höland group. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 558, p. 120656, 2021.

KRZMAJC, M.; DOSLER, U.; SUVOROV, D. Effect of a TiO_2 nucleating agent on the nucleation and crystallization behavior of $\text{MgO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 1, p. 1–7, 2012.

LAWLESS, N. W. Some low-temperature properties and applications of SrTiO_3 crystallized from glass. **Ferroelectrics**, v. 7, p. 379–381, 1974.

LEE, H.; CHUNG, W. J. Eu-doped oxyfluoride glass-ceramic with nepheline as an efficient 400 nm UV-LED color converter. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 105, n. 10, p. 6412–6423, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/jace.18477>.

LICHTENSTEIN, L.; HEYDE, M.; FREUND, H.-J. Atomic arrangement in two-dimensional silica: from crystalline to vitreous structures. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 116, n. 38, p. 20426–20432, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp3062866>.

LIGERO, R. A.; VAZQUEZ, J.; VILLARES, P.; JIMÉNEZ-GARAY, R. A study of the crystallization kinetics of some Cu-As-Te glasses. **Journal of Materials Science**, v. 26, p. 211–215, 1991.

LORETZ, R. A.; LORETZ, T. J. Corrections to theoretical glass transition temperature models and interpretations with application examples to chalcogenide glass. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 628, p. 122845, 2024.

MAGALHÃES, R. S. et al. Síntese de BaTiO_3 e SrTiO_3 pelo método hidrotermal assistido por micro-ondas utilizando anatase como precursor de titânio. **Química Nova**, v. 40, n. 2, p. 166–170, 2017.

MAGALHÃES, R. S. **Desenvolvimento e caracterização de material vitrocerâmico através de vitrificação e cristalização controlada de areia descartada de fundição e calcário**. 2023. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – UNESP, FCT, Presidente Prudente, 2023.

MARCIAL, J.; CRUM, J.; NEILL, O.; MCCLOY, J. Crystal structure of nepheline: analysis of ring configurations and framework distortions. **American Mineralogist**, no prelo, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2138/am-2016-5370>. Acesso em: 9 nov. 2025.

MATSON, D. W.; SNYDER, S. K.; FERGUSON, J. A. Raman spectra of some tectosilicates and of glasses along the orthoclase–anorthite and nepheline–anorthite joins. **American Mineralogist**, v. 71, p. 694–704, 1986.

MATUSITA, K.; SAKKA, S. Kinetic study on crystallization of glass by differential thermal analysis: criterion on application of Kissinger plot. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 38–39, p. 741–746, 1980.

MATUSITA, K.; KOMATSU, T.; YOKOTA, R. Kinetics of non-isothermal crystallization process and activation energy for crystal growth in amorphous materials. **Journal of Materials Science**, v. 19, p. 291–296, 1984.

MCCAULEY, D.; NEWNHAM, R. E.; RANDALL, C. A. Intrinsic size effects in a BaTiO₃ glass ceramic. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 81, p. 979–987, 1998.

MCCLOY, J. S. et al. Nepheline crystallization in boron-rich alumino-silicate glasses as investigated by multi-nuclear NMR, Raman, and Mössbauer spectroscopies. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 409, p. 149–165, 2015.

MEWADA, D. Barium titanate (BaTiO₃): A study of structural, optical and dielectric properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 54, p. 923–926, 2022.

MIKHAILOVA, J. et al. Iron in nepheline: crystal chemical features and petrological applications. **Minerals**, v. 12, n. 10, p. 1257, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12101257>.

MONTAZERIAN, M. et al. Glass-ceramics in dentistry: fundamentals, technologies, experimental techniques, applications, and open issues. **Progress in Materials Science**, v. 132, p. 101023, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.101023>.

MOURE, C.; PENA, O. Recent advances in perovskites: processing and properties. **Progress in Solid State Chemistry**, v. 43, n. 4, p. 123–148, 2015.

MULLIN, J. W. **Crystallization**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 594 p.

NASCIMENTO, M. L. F.; FERREIRA, E. B.; ZANOTTO, E. D. Kinetics and mechanisms of crystal growth and diffusion in a glass-forming liquid. **Journal of Chemical Physics**, v. 121, p. 8924–8928, 2004.

NAVARRO, J. M. F. **El vidrio**. 3. ed. Madrid: Colección Textos Universitarios, 2003.

NIENHUIS, E. T. et al. Effect of Ti⁴⁺ on the structure of nepheline (NaAlSiO₄) glass. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 290, p. 333–351, 2020. DOI: [10.1016/j.gca.2020.09.015](https://doi.org/10.1016/j.gca.2020.09.015).

NILSEN, W. G.; SKINNER, J. G. Raman spectrum of strontium titanate. **Journal of Chemical Physics**, v. 48, p. 2240–2248, 1968. DOI: [10.1063/1.1669418](https://doi.org/10.1063/1.1669418).

PADILLA, I.; LÓPEZ-DELGADO, A.; ROMERO, M. Kinetic study of the transformation of sodalite to nepheline. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 105, n. 6, p. 4336–4347, 2022. DOI: [10.1111/jace.18365](https://doi.org/10.1111/jace.18365).

RABUFFETTI, F. A. et al. Synthesis-dependent first-order Raman scattering in SrTiO₃ nanocubes at room temperature. **Chemistry of Materials**, v. 20, p. 5628–5635, 2008.

RAO, C. N. R. Perovskites. In: MEYERS, R. A. (ed.). **Encyclopedia of Physical Science and Technology**. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2003. p. 707–714.

RIAÑO, S. M.; RINCÓN, J. M. Vidrios y vitrocerámicos en sistemas aluminosilicatos modificados con óxidos nucleantes. **Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio**, v. 45, n. 4, p. 188–196, 2006.

RINCON, J. Ma. Principles of nucleation and controlled crystallization of glasses. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, v. 31, p. 309–357, 1992.

RINCÓN, J. M. **Principles of Nucleation and Controlled Crystallization of Glasses**. Arganda del Rey, Madrid: Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, 2006.

SARKAR, D. Synthesis and properties of BaTiO₃ nanopowders. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 94, p. 213–217, 2011.

SHE, W. et al. Microstructure and crystallization behavior of Na₂O–Al₂O₃–SiO₂ glass-ceramics with MgO additions. **Ceramics International**, v. 49, n. 14 (Parte A), p. 22644–22653, 15 jul. 2023.

SHELBY, J. E. **Introduction to Glass Science and Technology**. 2. ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 2005.

SIDEL, S. M.; IDALGO, E.; SANTOS, F. A. et al. Expoente de Avrami pela equação de JMAK para método não-isotérmico de análise térmica. JETI. **Journal of Engineering and Technology Innovations**, v. 1, n. 2, 2018.

SILVA, F. B. da. **Cinética de cristalização de vidro produzido com areia descartada de fundição**: abordagem não-isotérmica e obtenção da fase nefelina. 2024. 126f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2024.

SILVEIRA, W. da. **Desenvolvimento e caracterização de vitrocerâmicas com nanopartículas de titanatos de cálcio e bário**. 2021. 311f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2021.

SILVEIRA, W. et al. Crystallization kinetics and structure refinement of CaTiO₃ glass-ceramics produced by melt-quenching technique. **Materials Research**, v. 24, supl. 1, p. e20210027, 2021.

SOUZA, A. E. **Fotoluminescência e mecanismo de crescimento em titanatos nanoestruturados**. 2011.154f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru, 2011.

STOOKEY, S. D. **Method of making ceramics and products thereof**. U.S. Patent 2,920,971, 12 jan. 1960.

SWARTZ, S. L.; BHALLA, A. S. Dielectric properties of SrTiO₃ glass-ceramics. **Ferroelectrics**, v. 87, p. 141–154, 1988.

TAQIEDDIN, A.; ALLSHOUSE, M. R.; ALSHAWABKEH, A. N. Review—Mathematical formulations of electrochemically gas-evolving systems. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 165, n. 13, p. E694–E711, 2018. DOI: 10.1149/2.1431813jes.

TAYARI, F.; TEIXEIRA, S. S.; GRAÇA, M. F.; NASSAR, K. I. A comprehensive review of recent advances in perovskite materials: electrical, dielectric, and magnetic properties. **Inorganics**, v. 13, n. 3, p. 67, 2025.

TAKAV, P. et al. Influence of TiO_2 content on phase evolution, microstructure and properties of fluorcanasite glass-ceramics prepared through sintering procedure for dental restoration applications. **Ceramics International**, v. 44, n. 6, p. 7057–7066, 15 abr. 2018.

TAN, Y.; ZHU, Z.; XIANG, Q. **Glass ceramic as well as preparation method and application thereof**. 2018.

TEME, D. A. et al. Raman study of oxygen-reduced and re-oxidized strontium titanate. **Physical Review B**, v. 76, p. 024303-1–7, 2007.

TEIXEIRA, S. R. et al. Characterization of a wollastonite glass-ceramic material prepared using sugar cane bagasse ash (SCBA) as one of the raw materials. **Materials Characterization**, v. 98, p. 209–214, 2014.

TEIXEIRA, S. R.; ROMERO, M.; RINCÓN, J. M. Crystallization of $\text{SiO}_2\text{--CaO--Na}_2\text{O}$ glass using sugarcane bagasse ash as silica source. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 93, n. 2, p. 450–455, 2010.

TEJUCA, L. G.; BELTRÁN, A. M.; WEWERS, M. Structure and reactivity of perovskites. In: TEJUCA, L. G.; FIERRO, J. L. G. (eds.). **Catalysis by Ceramics**. Amsterdam: Elsevier, 1989. p. 341–383.

TEWATIA, K.; SHARMA, A.; SHARMA, M. Factors affecting morphological and electrical properties of barium titanate: a brief review. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 4548–4556, 2021.

TRACH, A.; VALARINHO, P. M.; SENOS, A. M. R.; KHOLKIN, A. L. Effect of nonstoichiometry on the microstructure and dielectric properties of strontium titanate ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 25, p. 2769–2772, 2005.

TSUZUKU, K.; COUZI, M. In situ investigation of chemical reactions between BaCO_3 and anatase or rutile TiO_2 . **Journal of Materials Science**, v. 47, p. 4481–4487, 2012. DOI: 10.1007/s10853-012-6310-9.

VÁZQUEZ, J. et al. An alternative method for analyzing the non-isothermal glass-crystal transformation kinetics: application to the crystallization of some alloys of Ge-Sb-Se and Sb-As-Se glassy systems. **Journal of Alloys and Compounds**, 2006.

VEERAPANDIYAN, V. K. et al. **Dielectric and structural studies of ferroelectric phase evolution in dipole pair substituted barium titanate ceramics**. 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2011.07872>. Acesso em: 9 nov. 2025.

VENKATESWARAN, U. D.; NAIK, V. M.; NAIK, R. High-pressure Raman studies of polycrystalline BaTiO_3 . **Physical Review B**, v. 58, n. 21, p. 14256–14264, 1998.

WARREN, B. E.; BISCOE, J. The structure of glass. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 21, n. 7, p. 259–265, 1938.

WANG, Z.; XU, R. A kinetic study on crystallization in $\text{TiO}_2\text{--SiO}_2\text{--CaO--Al}_2\text{O}_3$ glass under nucleation saturation conditions for the high value-added utilization of CaO--SiO_2 -based solid wastes. **Materials** (Basel), v. 16, n. 11, p. 4165, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16114165>.

WANG, Z.; XU, R. Effects of particle size on the crystallization kinetics characterization in CaO--SiO_2 -based glass. Part 1: in a simple crystallization process with only one crystal phase. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 12, n. 2, 2024.

WEI, Y. et al. Influence of high field strength ions on the crystallization characteristics and properties of slag glass-ceramics. **Ceramics International**, v. 50, p. 39516–39527, 2024.

WU, X. W.; WU, D. J.; LIU, X. J. Negative pressure effects in SrTiO_3 nanoparticles investigated by Raman spectroscopy. **Solid State Communications**, v. 145, p. 255–258, 2008.

WYPYCH, G. Fillers – Origin, chemical composition, properties, and morphology. In: WYPYCH, G. **Handbook of Fillers**. 5. ed. Toronto: ChemTec Publishing, 2021.

YADAV, A. K.; GAUTAM, C. R.; SINGH, P. Effect of donor and acceptor dopants on crystallization, microstructural and dielectric behaviors of barium strontium titanate glass-ceramics. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 672, p. 52–58, 2016.

YADAV, A. K.; GAUTAM, C. R. A review on crystallisation behaviour of perovskite glass-ceramics. **Advances in Applied Ceramics**, v. 113, n. 4, 2014.

YANG, Y.; YOU, J. Make perovskite solar cells stable. **Nature**, v. 544, n. 7649, p. 155–156, 2017.

ZACHARIASEN, W. H. The atomic arrangement in glass. **Journal of the American Chemical Society**, v. 54, p. 3841–3851, 1932.

ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, p. 1–6, 2017.

ZARZYCKI, J. **Glasses and the vitreous state**. New York: Cambridge University Press, 1991.

ZHANG, Y.; CHEN, X.; LIU, H.; LI, B.; ZHAO, Y. Structures and electronic properties of perovskite oxides: a review. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 6, p. 1891–1906, 2007.

ZHENG, H. et al. Raman spectroscopy and microwave properties of CaTiO_3 -based ceramics. **Journal of Applied Physics**, v. 94, p. 2948–2956, 2003.

ZHOU, B.; YAN, D. Glassy inorganic-organic hybrid materials for photonic applications. **Matter**, v. 7, p. 1950–1976, 5 jun. 2024.

ZHU, X.; WANG, J.; ZHANG, Z.; ZHU, J.; ZHOU, S.; LIU, Z.; MING, N. Perovskite nanoparticles and nanowires: microwave-hydrothermal synthesis and structural characterization by high-resolution transmission electron microscopy. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 91, p. 2683–2689, 2008.

ZHU, J. et al. Dependence of crystallization behavior on particle size in barium strontium titanate glass-ceramics. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 98, 2015.

ZHU, X. et al. Preparation and characterization of glass-ceramics containing SrTiO_3 . **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 678, 2019. DOI: 10.1088/1757-899X/678/1/012132.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Valores de energia de ativação (E_a) e índice de Avrami (n) obtidos por diferentes métodos cinéticos.

Kissinger			Augis-Bennett		K. Matusita		Ligero	
Vidros	Pico	E_K [kJ/mol]	E_{AB} [kJ/mol]	n	E_{KM} [kJ/mol]	n	E_L [kJ/mol]	n
Vidro I	T_{p1}	$191 \pm 3,97$	$203 \pm 6,5$	3,5	$187 \pm 3,0$	3,5	$137 \pm 8,8$	2,0
	T_{p2}	$166 \pm 3,9$	$172 \pm 3,9$	3,0	$120 \pm 3,5$	3,4	$134 \pm 8,2$	2,0
Vidro II	T_{p1}	$162 \pm 12,5$	$166 \pm 12,5$	5,0	$112 \pm 8,0$	3,0	$281 \pm 9,0$	2,0
	T_{p2}	$134 \pm 5,7$	$137 \pm 5,7$	3,0	$96 \pm 3,0$	3,4	$52 \pm 4,7$	2,0
Vidro III	T_{p1}	$321 \pm 20,7$	$326 \pm 20,7$	2,5	$215,5 \pm 11,5$	2,7	$321 \pm 20,7$	1,8
	T_{p2}	$241 \pm 24,6$	$214 \pm 24,6$	3,0	139 ± 17	3,0	225 ± 24	1,9
Vidro IV	T_{p1}	$240 \pm 8,3$	$246 \pm 8,3$	4,0	$158,5 \pm 6,5$	3,5	$195 \pm 17,5$	2,0