

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA AVALIAR
PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE CERÂMICAS REFRAATÁRIAS A
ALTAS TEMPERATURAS PELO MÉTODO DE RESSONÂNCIA DE BARRAS**

Antonio Ernandes Macêdo Paiva

**São Carlos - SP
2002**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA AVALIAR
PROPRIEDADES ELÁSTICAS DE CERÂMICAS REFRAATÁRIAS A
ALTAS TEMPERATURAS PELO MÉTODO DE RESSONÂNCIA DE BARRAS**

Antonio Ernandes Macêdo Paiva

**Tese apresentada ao Programa
de Pós- Graduação em Ciência
e Engenharia de Materiais como
requisito parcial à obtenção do
título de Doutor em Ciência e
Engenharia de Materiais.**

Orientador: Prof. Dr. José de Anchieta Rodrigues

Agência Financiadora: CAPES-PICDT

São Carlos - SP

2002

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária/UFSCar**

P149de

Paiva, Antônio Ernandes Macêdo.

Desenvolvimento de um equipamento para avaliar propriedades elásticas de cerâmicas refratárias a altas temperaturas pelo método de ressonância de barras / Antônio Ernandes Macêdo Paiva. -- São Carlos : UFSCar, 2005.

161 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2002.

1. Materiais refratários. 2. Cerâmica. 3. Concretos refratários. 4. Esponja cerâmica. 5. Ressonância de barras. 6. Propriedades elásticas. I. Título.

CDD: 620.143 (20^a)

Dedicatória

À minha mãe Etelvina (*in memoriam*)

À minha esposa Ana e ao meu filho André.

VITAE DO CANDIDATO

Mestre em Engenharia de Materiais pela UFSCar (1996), Engenheiro Mecânico pela UEMA (1987).

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO
DE
ANTONIO ERNANDES MACÊDO PAIVA

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO
CARLOS, EM 12/09/2002

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José de Anchieta Rodrigues
Orientador
PPG-CEM

Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli
(DEMa – UFSCar)

Prof. Dr. Walter Libardi
(DEMa – UFSCar)

Prof. Dr. José Carlos Bressiani
(IPEN – São Paulo)

Prof. Dr. Dirceu Spinelli
(USP – São Carlos)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho de pesquisa. Em especial, digo obrigado àqueles que mais me ajudaram ao longo destes anos:

- Ao Prof. Dr. José de Anchieta Rodrigues pela compreensão, orientação, e discussão dos trabalhos realizados;
- Ao Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli, pelas contribuições, correções e incentivos prestados;
- Ao GEMM (Grupo de Engenharia de Microestrutura de Materiais), pela sua estrutura de trabalho e pesquisa e a todos os seus membros e companheiros, pelo excelente ambiente de amizade e qualidade de seus trabalhos;
- Ao Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, na pessoa do seu Diretor Geral, pelo apoio e oportunidade de realizar este trabalho.
- Ao Prof. Dr. Alberto Moreira Jorge e ao Prof. Dr. Walter Libardi, pelas várias discussões e contribuições prestadas ao desenvolvimento do trabalho;
- Ao Prof. Dr. José Antonio Eiras pela confecção dos transdutores e pelas diversas discussões sobre o equipamento;
- Ao técnico Gil Masson pela sua valiosa contribuição no desenvolvimento do forno;
- Aos Professores, amigos e colegas do CEFET-MA, UEMA e UFMA, pela amizade e companheirismo.
- Ao DEMa e PPG-CEM, pelo apoio recebido de seus colaboradores, em particular à Oceania e ao Geraldo;
- Aos técnicos, Beto, Leomar, Marcos, Binoto, Walter e Silvio pela amizade e apoio técnico;
- A Alcoa pelas matérias-primas fornecidas.
- À Engenheira Leila Costa (UNIFRAX) pelo fornecimento dos refratários do forno;
- À CAPES, pelo apoio financeiro e pela concessão da bolsa de estudo.
- À FAPESP, pelo suporte financeiro concedido a este projeto.

RESUMO

O conhecimento das propriedades elásticas tem sido de fundamental importância para o entendimento da limitação da vida útil de cerâmicas refratárias com fins estruturais. Essas propriedades caracterizam a rigidez elástica dos materiais e representam, em primeiro lugar, um pressuposto para a classificação específica dos materiais e suas características mecânicas. A determinação de propriedades, tais como, módulo de Young, E , módulo de cisalhamento, G , e razão de Poisson, μ , são importantes na determinação de várias outras importantes propriedades mecânicas. Neste trabalho utilizou-se o método dinâmico de ressonância de barras para a obtenção dessas três propriedades elásticas, que consiste no estímulo de um corpo de prova com frequência variável, a fim de se obter a frequência fundamental e seus harmônicos de vibração natural do corpo. Dessa frequência, considerando ainda a densidade e a geometria do corpo de prova, obtêm-se as propriedades elásticas do material. Portanto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um equipamento automático para medir E , G e μ em função da temperatura, utilizando a técnica de ressonância de barras e um software de controle e análise dos resultados. Como exemplificação do uso do software e deste equipamento, um estudo da influência do tamanho de agregado ($D_L = 2800, 4750$ e $8000 \mu\text{m}$) e do coeficiente de distribuição de Andreasen de tamanho de partículas ($q = 0,21, 0,26$ e $0,31$) sobre o dano causado por choque térmico em concretos refratários aluminosos foi realizado. Além disso, foi realizado outro estudo sobre a influência da porosidade nas propriedades elásticas de cerâmicas celulares processadas por gelcasting. A dependência de E e G com a porosidade segundo modelos encontrados na literatura foi confirmada. Avaliou-se também o comportamento dos módulos elásticos em função da temperatura nestas esponjas.

DEVELOPMENT OF AN EQUIPMENT TO EVALUATE ELASTIC PROPERTIES OF REFRACTORY CERAMICS AT HIGH TEMPERATURES USING THE METHOD OF BAR RESONANCE

ABSTRACT

The knowledge of the elastic properties has been of fundamental importance for the understanding of the limitation of the useful life of structural refractory ceramics. Those properties characterize the elastic rigidity of the materials and represent a requirement for the specific classification of the materials and their mechanical characteristics. The determination of properties, such as, Young's modulus (E), shear modulus (G) and Poisson's ratio (μ) are important for the determination of several important mechanical properties. In this work the dynamic method of bar resonance was used to obtain those three elastic properties. It consists in the stimulation of a sample with variable frequency, in order to obtain the fundamental frequency and their harmonics of natural vibration of the body. Considering the density and the geometry of the sample the elastic properties of the material are obtained. Therefore, the objective of this work was to develop an automatic equipment to measure E , G and μ as a function of the temperature using the technique of bar resonance and a software that controls the system. As exemplification of the use of that software and of that equipment, a study of the influence of the aggregate's size ($D_L = 2800, 4750$ and $8000 \mu\text{m}$) and of the Andreasen's coefficient of particle size distribution ($q = 0,21; 0,26$ and $0,31$) on the thermal shock damage in alumina refractory castables was accomplished. Besides, other study about the influence of the porosity on the elastic properties of cellular ceramics processed by gelcasting was also carried out. The dependence of E and G on the porosity according to models found in the literature was confirmed. The dependence of the elastic moduli on the temperature of for those foams was also evaluated.

PUBLICAÇÕES

Internacionais

- [1] PILEGGI, R. G.; PAIVA, A. E. M.; GALLO, J.; PANDOLFELLI, V. C. Novel rheometer for refractory castables. *American Ceramic Society Bulletin*, v. 79, n. 1, p. 54 -58 , 2000.

Nacionais

- [1] PAIVA, A. E. M., RODRIGUES, J. A. Projeto e Construção de um Equipamento para a Determinação do Módulo Elástico pelo Método de Ressonância de Barras. In: 45. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA. **Anais** do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis, SC, junho de 2001.
- [2] PAIVA, A. E. M.; VILLABOIM, E.; PILLEGI, R. G.; RAMAL JUNIOR, F.; RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C. Aplicação da ressonância de barras para o estudo da degradação mecânica de concretos refratários afetados por choque térmico In. 46. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2002, S. Paulo **Anais** do 46. Congresso Brasileiro de Cerâmica, S. Paulo ABC, 2002, p. 371-382
- [3] PAIVA, A. E. M.; VILLABOIM, E.; ORTEGA, F. S.; RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C. Módulo elástico de cerâmicas celulares caracterizado por ressonância de barras In. 46. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2002, S. Paulo **Anais** do 46. Congresso Brasileiro de Cerâmica, S. Paulo ABC, 2002, p. 384-395
- [4] NASCIMENTO, L.; INNOCENTINI, M.; RIZZI, A. C.; PAIVA, A. E. M.; PANDOLFELLI, V. C.; MENEGAZZO, B.; BITTENCOURT, L. R.; RETTORE, R. Desenvolvimento de aparato experimental para estudo

cinético de geração de H₂ em concretos refratários com adição de pó de alumínio metálico In. 46. CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 2002, S. Paulo. **Anais** do 46. Congresso Brasileiro de Cerâmica, S. Paulo ABC, 2002, p. 1482-1493

- [5] PILLEGI, R. G.; STUDART, A.; PAIVA, A. E. M.; GALLO, J.; PANDOLFELLI, V. C. Desenvolvimento de um reômetro para concretos refratários In. 55. CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2000, Rio de Janeiro. **Anais** do 55 Congresso Anual da ABM, São Paulo ABM, 2000, v. 1, n. , p. 1671-1680

Patentes

- [1] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS. ALCOA ALUMÍNIO S.A. FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO. R. G. Pileggi; A. E. M. Paiva; V. C. Pandolfelli; J. Gallo; J. C. de Carvalho; B. A. Menegazzo. ***Equipamento para avaliação do comportamento reológico de materiais, sistema de controle de um equipamento para avaliação do comportamento reológico de materiais e método para avaliação do comportamento reológico de materiais***. 2002. PI 0201287-1, Depósito: 12/04/2002.

ÍNDICE DE ASSUNTOS

	Pág.
BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO	i
AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
PUBLICAÇÕES	ix
ÍNDICE DE ASSUNTOS	xi
ÍNDICE DE TABELA	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
SÍMBOLOS E ABREVIações	xxv
1 INTRODUÇÃO	30
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Métodos Estáticos	6
2.2 Métodos Dinâmicos	8
2.2.1 Método de Ressonância Mecânica de Barras.....	9
2.3 Teoria de Vibração Livre de Barras à Temperatura Ambiente	10
2.3.1 Equações de Movimento para a Frequência Natural de Vibração	11
2.3.2 Vibração Longitudinal de Barras	14
2.3.2 Vibração Flexional de Barras	19
2.3.3 Vibração Torcional de Barras	26
2.3.4 Cálculo da Razão de Poisson	31
2.4 Medidas dos Módulos Elásticos a Altas Temperaturas.....	32
2.5 Medidas dos Módulos Elásticos com a Porosidade	36
2.6 Arranjos Experimentais para a Determinação dos Módulos Elásticos através da Frequência de Ressonância de Barras.....	38
2.7 Teoria do Amplificador Operacional	45
2.7.1 Modos de Operação de um Amplificador Operacional.....	50

2.7.2 Curva de Resposta em Malha Aberta e em Malha Fechada	53
2.7.3 Taxa de Variação do Amplificador Operacional (SR)	54
2.7.4 Saturação pela Tensão de Alimentação	55
2.7.5 Ruído	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1 Projeto e Desenvolvimento do Equipamento para Medir Módulo Elástico em Temperaturas Elevadas	60
3.1.1 Projeto Eletrônico.....	61
3.1.2 Projeto do Forno para Altas Temperaturas.....	62
3.1.3 Concepção Mecânica do Equipamento	67
3.2 Descrição do Funcionamento do Equipamento	70
3.3 Testes Preliminares e Calibração	72
3.4 Desenvolvimento do Software de Controle, Aquisição de Dados e Cálculo das Propriedades Elásticas.....	74
3.5 Avaliação das Propriedades Elásticas de um Concreto Refratário após Choque Térmico.....	77
3.6 Avaliação das Propriedades Elásticas de Espumas Cerâmicas em Altas Temperaturas.....	79
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
4.1 Descrição dos Componentes do Equipamento	82
4.1.1 Condicionamento do Sinal	82
4.1.2 Transdutores e Acoplamento	89
4.1.3 Forno	90
4.1.4 Dispositivos de Regulagem da Pressão e do Posicionamento dos Transdutores na Amostra	96
4.1.5 Ligação dos Módulos ao Microcomputador.....	98
4.2 Calibração do Equipamento	100
4.3 Desenvolvimento do Software de Controle, Aquisição de Dados e Análise	114
4.3.1 Módulo de Informações dos Ensaios Realizados.....	115
4.3.2 Módulo de Criação de um Novo Ensaio	116

4.3.3 Módulo de Controle e Execução do Ensaio	119
4.3.4 Módulo de Análise dos Ensaios	120
4.3.4.1 Etapa de Suavização dos Dados	122
4.3.4.2 Etapa de Identificação dos Picos de Ressonância.	123
4.3.4.3 Etapa de Identificação dos três Primeiros Picos de Flexão e Torção.....	124
4.3.4.4 Etapa de Cálculo das Propriedades Elásticas	124
4.4 Avaliação das Propriedades Elásticas de Alguns Materiais.	127
4.4.1 Avaliação do Módulo de Young em Função da Temperatura Utilizando Método Estático e Dinâmico.....	127
4.4.2 Avaliação das Propriedades Elásticas de Concretos Refratários Afetados por Choque Térmico	129
4.4.3 Avaliação das Propriedades Elásticas de Cerâmicas Porosas.....	138
5 CONCLUSÕES	143
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	147
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	149
<u>ANEXO A</u>	159
<u>ANEXO B</u>	161
<u>ANEXO C</u>	162

ÍNDICE DE TABELA

Tabela 2.1 - Fator de correção K_n para vibrações longitudinais de ressonância de barras cilíndricas como função da razão de Poisson, μ , e razão d/λ [7].	16
Tabela 2.2 - Valores de B_n (equação (2.22)), K_n (equação (2.18)), K_n' (equação (2.18) e $B_n \cong 1$) e d/λ para n variando de 1 a 20. Foi usado uma amostra padrão de aço com $l = 149,85\text{mm}$, $d = 6,38\text{mm}$ e $\mu = 0,28$ [21].	17
Tabela 3.1 - Propriedades físicas típicas do revestimento cerâmico do forno, segundo o fabricante [49]	66
Tabela 3.2 - Composição química (em %-p) e algumas características físicas da alumina técnica.	72
Tabela 3.3 - Características físicas de uma alumina técnica e de um refratário alumina-carbono	73
Tabela 3.4 - Densidade geométrica, porcentagem em volume de matriz, porosidade total e dimensões dos corpos de prova dos concretos estudados.	78
Tabela 3.5 - Características e propriedades físicas das esponjas cerâmicas.	80
Tabela 4.1 - Desvio padrão entre medidas de freqüência de cada um dos picos de ressonância por flexão para três amostras de alumina (Poros.Tot. = 10%).	109
Tabela 4.2 - Comparação (teórica e experimental) da razão entre os picos de ressonância de harmônicos superiores e o fundamental por flexão e torção das amostras de alumina AI90-1, AI90-2 e AI90-3.	110
Tabela 4.3 - Módulo elástico, módulo de cisalhamento e razão de Poisson obtidos por ressonância de barras para as amostras de alumina (poros. tot. = 10%).	111

Tabela 4.4 - Reprodutibilidade nas frequências de ressonância para uma amostra padrão de aço, utilizando um equipamento comercial (coleta manual) no modo longitudinal de vibração [21].....	113
Tabela 4.5 - Reprodutibilidade nas frequências de ressonância para uma amostra padrão de aço, utilizando o equipamento desenvolvido (coleta automático) no modo longitudinal de vibração.....	113

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 - Curva tensão - deformação no regime elástico [4].....	7
Figura 2.2 - Curva tensão - deformação não-linear [4].....	8
Figura 2.3 - Modelo básico de um sistema oscilatório com amortecimento [13].	11
Figura 2.4 - Modelo básico de um sistema oscilatório sem amortecimento [13].	12
Figura 2.5 - Valores calculados do módulo de Young de vidros empregando-se a ressonância fundamental, $n = 1$, adaptado das equações (2.26 – 2.35) [26].	23
Figura 2.6 - Valores calculados do módulo de Young de vidros pelas equações (2.26) – (2.34) para os dois primeiros harmônicos [26].	24
Figura 2.7 - Fluxograma para a determinação da razão de Poisson [28], na qual F_f e F_t são as frequências de ressonância flexional e torcional respectivamente, E é o módulo de Young e G é o módulo de cisalhamento.	32
Figura 2.8 - Mudança relativa do modulo elástico com a temperatura de uma alumina policristalina segundo vários autores [32].	34
Figura 2.9 - Comparação do módulo elástico com o método dinâmico e estático para uma amostra de vidro em função da temperatura [9].....	35
Figura 2.10 - Comparação do módulo elástico com o método dinâmico e estático para uma amostra de magnésia dopada por zircônia em função da temperatura [34].	36
Figura 2.11 - Diagrama de bloco de um sistema usado na ressonância de barras [5].	39

Figura 2.12 - Posição dos nós de vibração para os modos de ressonância longitudinal, transversal, flexional e torcional.....	41
Figura 2.13 - Posicionamento da amostra para a medida das freqüências de ressonância flexional e torcional usando suspensão de fios.	42
Figura 2.14 - Posicionamento da amostra para medida da freqüência de ressonância flexional e torcional, usando o método de contato	43
Figura 2.15 - Posicionamento da amostra para a medida da freqüência de ressonância torcional, usando autofalante como excitador.	44
Figura 2.16 - Posicionamento da amostra para a medida da freqüência de ressonância flexional, usando autofalante como excitador.	44
Figura 2.17 - Posicionamento da amostra para a medida da freqüência de ressonância longitudinal, usando o método de acoplamento direto.	45
Figura 2.18 - Representação esquemática de um amplificador operacional na sua forma original (a) e na sua forma comercial mais usual (b).....	47
Figura 2.19 - Ajuste da tensão de OFFSET de um amplificador operacional comercial por meio de um potenciômetro externo [45].	48
Figura 2.20 - Ajuste da tensão de OFFSET através da inserção de um resistor de equalização na entrada não inversora do amplificador operacional [45].....	49
Figura 2.21 - Operação sem realimentação de um amplificador operacional.....	51
Figura 2.22 - Operação com realimentação positiva de um amplificador operacional.	51

Figura 2.23 - Operação com realimentação Negativa de um amplificador operacional.	52
Figura 2.24 - Ganho de tensão de malha aberta versus a frequência.	53
Figura 2.25 - Respostas de malha fechada e de malha aberta [46].	54
Figura 2.26 - Distorção do sinal senoidal de saída influenciada pela SR.	55
Figura 2.27 - Nível de Saturação de um amplificador operacional (a) e a forma de saída do sinal senoidal ceifado (b).	56
Figura 2.28 - Método de proteção contra os ruídos para um amplificador operacional.	57
Figura 3.1 - Resistividade elétrica do elemento de aquecimento de MoSi_2 , em função da temperatura, segundo o fabricante [48].	64
Figura 3.2 - Formas de controle de potência para serem utilizadas em elementos de aquecimento de MoSi_2	65
Figura 3.3 - Curva de Condutividade Térmica em função da temperatura para a placa Duraboard 1600 [49].	66
Figura 3.4 - Curva de Condutividade Térmica em função da temperatura para a placa Duraboard 1200 [49].	67
Figura 3.5 - Representação esquemática dos dispositivos para posicionamento dos transdutores na amostra. Obs. (1) Suportes, (2) reguladores do posicionamento dos transdutores, (3) molas, (4) transdutores, (5) hastes de acoplamento, (6) tubos de posicionamento dos transdutores, (7) resistências elétricas, (8) amostra, (9) apoios, (10) bases refratárias, (11) paredes do forno, (12) chapa de aço inox.	68
Figura 3.6 - Vista superior do forno, mostrando os tubos que proporcionam o posicionamento dos transdutores na amostra.	69

Figura 3.7 - Diagrama esquemático do equipamento desenvolvido para medir as propriedades elásticas de cerâmicas refratárias em temperaturas elevadas.....	71
Figura 4.2 - Resposta em frequência do filtro ativo e passivo “passa-alta” para uma frequência de corte abaixo de 1 kHz.	84
Figura 4.3 - Resposta em Frequência do filtro ativo “passa-baixa”.	86
Figura 4.4 - Resposta em frequência do amplificador de instrumentação para uma largura de banda de 0 a 80 kHz	87
Figura 4.5 - Amplitude do sinal DC de saída em função da frequência do retificador de onda completa, alimentado por sinais AC de diversas amplitudes.....	88
Figura 4.6 - Conjunto de suporte, transdutor, mola, reguladores e haste de acoplamento para altas temperaturas.	90
Figura 4.7 - Forno elétrico para realização dos ensaios a altas temperaturas.	91
Figura 4.8 - Detalhes construtivos das paredes do forno elétrico para altas temperaturas. (a) vista lateral, (b) vista superior e (c) vista frontal.....	92
Figura 4.9 - Esquema de interligação das resistências elétricas.....	93
Figura 4.10 - Diagrama de ligação e controle de potência para as resistências elétricas do forno.....	94
Figura 4.11 - Detalhes do posicionamento do termopar, da amostra e das hastes acopladoras dos transdutores na amostra. 1 - resistências elétricas, 2 - termopar, 3 - hastes acopladoras, 4 - amostra e 5 - base de apoio.....	95
Figura 4.12 - Dispositivo para fixação, regulador de pressão e posicionamento dos transdutores. (1) suporte metálico de sustentação, (2) haste polimérica de deslocamento, (3) molas helicoidais, (4) transdutores, (5) tubo cerâmico cônico e (6) tubo cerâmico cilíndrico.....	96

Figura 4.13 - Peças cerâmicas utilizadas para a passagem das hastes acopladoras ligando os transdutores à amostra e diminuir	98
Figura 4.14 - Fotografia do equipamento construído para medir as propriedades elásticas de cerâmicas refratárias a altas temperaturas. (1) microcomputador, (2) osciloscópio, (3) amplificador, filtros e retificador de onda completa, (4) gerador de ondas e (5) forno elétrico.....	99
Figura 4.15 - Correlação entre a voltagem aplicada no transdutor excitador e a voltagem de saída para os três primeiros picos de ressonância por flexão.....	100
Figura 4.16 - Largura do pico para a freqüência fundamental de um refratário de Alumina-carbono e de uma cerâmica técnica á base de alumina.	101
Figura 4.17 - Influência do valor do incremento na freqüência e no tempo de duração da freqüência na identificação do pico fundamental por flexão para uma alumina técnica. Tempo de duração da freqüência : (a) 100 ms, (b) 200 ms e (c) 500 ms.	103
Figura 4.18 - Desvio padrão percentual do primeiro pico em função do intervalo da freqüência e do tempo entre cada sinal gerado, para uma alumina densa.	104
Figura 4.19 - Curva de resposta em freqüência do transdutor excitador e do transdutor detector.....	105
Figura 4.20 - Espectros de três amostras de alumina (Porosidade Total. = 10%) excitadas por flexão e torção simultaneamente, variando-se a sua largura. F1, F2 e, F3, T1, T2 e T3 são os três primeiros picos de flexão e torção, respectivamente.....	107
Figura 4.21 - Influência da haste de acoplamento no espectro de ressonância de uma amostra refratária de alumina-carbono.....	108

Figura 4.22 - Influência da largura da amostra nos três primeiros picos de ressonância para os modos de flexão e torção.	109
Figura 4.23 - Tela de abertura do software de controle e aquisição do equipamento para medir as propriedades elásticas a altas temperaturas.....	115
Figura 4.24 - Tela para um novo ensaio do software de controle e aquisição do equipamento para medir as propriedades elásticas a altas temperaturas.....	117
Figura 4.25 - Tela de resultados do ensaio do software de controle e aquisição do equipamento para medir as propriedades elásticas a elevadas temperaturas.	119
Figura 4.26 - Tela de análise dos ensaios.....	121
Figura 4.27 - Fluxograma para cálculo do módulo de Young, módulo de cisalhamento e razão de Poisson.....	126
Figura 4.28 - Módulo de Young em função da temperatura obtido por um método estático [57], método dinâmico (equip. construído) para uma alumina técnica, e por um método ultra-sônico) [58] para uma alumina pura.....	128
Figura 4.29 - Variação das propriedades elásticas, E e G, com o diâmetro máximo de agregado, D_L , para composições com $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$	131
Figura 4.30 - Variação da razão de Poisson μ , com o diâmetro máximo de agregado, D_L , para composições com $q = 0,21, 0,26$ e $0,31$	131
Figura 4.31 - Efeito da variação da temperatura de choque térmico, para um único ciclo, no módulo de Young do concreto $q=0,26$. As curvas estão parametrizadas pelo D_L	133
Figura 4.32 - Efeito da variação da temperatura de choque térmico, para um único ciclo, no módulo de Young relativo do concreto com $q = 0,26$	134

Figura 4.33 - Efeito do número de ciclos de choque térmico, para $\Delta T=900^{\circ}\text{C}$, no módulo de Young do concreto com $q=0,26$	135
Figura 4.34 - Comportamento da razão de Poisson antes e após vários ciclos de choque térmicos para o concreto com $q = 0,26$ e diferentes tamanhos máximos de agregado.	136
Figura 4.35 - Efeito do número de ciclos de choque térmico, para $\Delta T=900^{\circ}\text{C}$, no módulo de Cisalhamento do concreto com $q=0,26$	137
Figura 4.36 - Influência da porosidade nas propriedades elásticas das esponjas cerâmicas à temperatura ambiente. As linhas tracejadas são apenas para indicar uma tendência.....	138
Figura 4.37 - Influência da porosidade na razão de Poisson de uma esponja cerâmica à base de alumina, na temperatura ambiente.	140
Figura 4.38 - Influência da porosidade no módulo elástico segundo modelos de Mackenzie e Boccaccini (curvas contínuas) e os resultados experimentais (pontos) desta tese.....	141
Figura 4.39 - Influência da correção do coeficiente de dilatação térmica linear no módulo de cisalhamento relativo de uma alumina celular com porosidade total de 61,34 %.....	142
Figura 4.40 - Variação do módulo de Young relativo com a temperatura parametrizada pela porosidade de esponjas cerâmicas de alumina.	143

SÍMBOLOS E ABREVIações

A	Fator dependente da razão r/l , k e μ .	[ad.]
AC	Corrente alternada.	[I]
A_{CL}	Ganho de tensão em malha fechada.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
A/D	Analógico / Digital	[ad.]
AOP	Amplificador operacional	[ad.]
A_v	Ganho do AOP.	[ad.]
A_1	Constante da equação do movimento harmônico	[ad.]
a	Espessura do corpo	[L]
B	Fator dependente da razão r/l , k e μ .	[ad.]
B_1	Constante da equação do movimento harmônico	[ad.]
B_L	Largura de banda.	$[T^{-1}]$
B_n	Fator de correção para o n-ésimo termo do fator K_n	[ad.]
B	Susceptância do material piezoelétrico	[ad.]
\dot{b}	Vetor de Burgers	[ad.]
b	Largura do corpo	[L]
C	Capacitores	$[L^{-2}M^{-1}T^4I^2]$
c_i	Metade do comprimento de um defeito interno crítico	[L]
C_F	Fator dependente da forma e tamanho do corpo, modo de vibração e razão de Poisson	[ad.]
\dot{c}	Coeficiente de amortecimento	[ad.]
C^{++}	Linguagem de programação.	[ad.]
cc	Corrente contínua	[ad.]
CMRR	Razão de rejeição em modo comum	[ad.]
d	Diâmetro da barra	[L]
d_{eq}	Diâmetro equivalente do corpo	[L]
D/A	Digital / Analógico	[ad.]
DC	Corrente contínua.	[I]
D_L	Tamanho máximo de partícula de agregado	[L]
E	Módulo de elasticidade	$[M/(T^2.L)]$
E_{in}	Sinal de entrada no AOP.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$

E_{ou}	Sinal de saída no AOP.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
E_o	Módulo de Young para o material denso	$[M/L^3]$
e_n	Fator de correção para o n-ésimo termo do fator B_n	[ad.]
F	Força atuante em um corpo	$[M.L/T^2]$
F_f	Freqüência fundamental em flexão	$[T^{-1}]$
F_{f1}	Primeiro pico de flexão.	$[T^{-1}]$
F_{f2}	Segundo pico de flexão.	$[T^{-1}]$
F_{f3}	Terceiro pico de flexão.	$[T^{-1}]$
f	Freqüência de ressonância de alguma ordem de vibração	$[T^{-1}]$
f_c	Freqüência crítica.	$[T^{-1}]$
f_n	n-ésima freqüência de ressonância	$[T^{-1}]$
F_t	Freqüência fundamental em torção	$[T^{-1}]$
F_{rT}	Freqüência de ressonância à temperatura T	$[T^{-1}]$
F_{ro}	Freqüência de ressonância à temperatura ambiente.	$[T^{-1}]$
F^1_n	Valor médio das 5 séries de freqüência obtida por um equipamento comercial.	$[T^{-1}]$
F^2_n	Valor médio das 5 séries de freqüência obtida pelo equipamento desenvolvido.	$[T^{-1}]$
G	Módulo de cisalhamento	$[M/(T^2.L)]$
g	Aceleração da gravidade.	$[L/T^2]$
I/O	Barramento do microcomputador.	[ad.]
K	Fator de correção do módulo elástico devido o efeito da inércia rotacional e a deformação de cisalhamento transversal da seção em vibração flexional	[ad.]
\dot{k}	Constante de mola.	[ad.]
K'	Constante de cisalhamento proposto por Timoshenko.	[ad.]
K_n	Fator de correção para a n-ésima freqüência de ressonância longitudinal.	[ad.]
K_v	Módulo volumétrico	$[M/(T^2.L)]$
K_r	Razão entre o raio de giro e o comprimento do corpo.	[ad.]

I	Comprimento da barra	[L]
l_d	Comprimento livre da linha de discordância	[L]
M	Fator dependente da razão r/l , k e μ .	[ad.]
M_1	Fator de correção da equação de B_n	[ad.]
M_2	Fator de correção da equação de B_n	[ad.]
M_T	Módulo elástico à temperatura T.	$[M/(T^2.L)]$
M_o	Módulo elástico à temperatura ambiente.	$[M/(T^2.L)]$
m	Massa do corpo	[M]
N	Fator dependente da razão r/l , k e μ .	[ad.]
n	Ordem da frequência de ressonância	[ad.]
P_T	Porosidade total do material	[ad.]
q	Coeficiente de Andreasen para a distribuição do tamanho de partículas.	[ad.]
R	Resistores.	$[L^2MT^{-3}I^{-2}]$
R_E	Resistor equivalente.	$[L^2MT^{-3}I^{-2}]$
R_e	Resistor de equalização no terminal não inversor do AOP.	$[L^2MT^{-3}I^{-2}]$
RC	Filtro passivo.	[ad.]
R_f	Resistor de realimentação do AOP.	$[L^2MT^{-3}I^{-2}]$
R_o	Fator de forma para barra infinitamente longas	[ad.]
R_T	Fator geométrico para vibração torcional, dependente da forma do corpo de prova	[ad.]
R_1	Resistor na entrada do AOP.	$[L^2MT^{-3}I^{-2}]$
r	Raio de giro da seção transversal do corpo.	[L]
S	Seção Transversal do corpo	$[L^2]$
SR	Taxa de variação do AOP.	$[L^2MT^{-4}I^{-1}]$
S_1	Expoente da equação dependente do fator de forma dos poros e do fator de orientação dos poros	[ad.]
S_o	Relação entre a espessura e a largura do corpo	[ad.]
T	Fator de correção da Pickett para o modo fundamental	[ad.]
T_1	Fator de correção dependente da razão d/l , μ e da ordem da frequência de ressonância	[ad.]

T_2	Fator de correção dependente da razão d/l , μ e da ordem da frequência de ressonância	[ad.]
T_3	Fator de correção dependente da razão d/l , μ e da ordem da frequência de ressonância	[ad.]
t	Dimensão da seção transversal paralela à direção da vibração	[L]
U	Amplificadores operacionais	[ad.]
V_0	Tensão de saída no amplificador operacional.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
V_p	Valor de pico do sinal senoidal.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
V_1	Tensão de entrada inversora do amplificador operacional.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
V_2	Tensão de entrada não inversora do amplificador operacional.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
v	Velocidade de propagação da onda	$[L/T^2]$
V_{BE}	Tensão entre base e emissor do transistor.	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
V_m	Volume da matriz	$[L^3]$
V_{PP}	Tensão pico a pico de um sinal senoidal	$[L^2MT^{-3}I^{-1}]$
V_s	Velocidade de propagação da onda torcional	$[L/T^2]$
x	Deslocamento da posição de equilíbrio estático sofrido pelo corpo	[L]
\dot{x}	Velocidade de deslocamento	$[L/T^2]$
\ddot{x}	Aceleração sofrida pelo corpo durante a aplicação da força.	$[L/T^2]$
w	Força gravitacional que age no corpo]	$[M.L/T^2]$
w_n	Frequência circular	$[T^{-1}]$

Símbolos gregos

α	Coeficiente de expansão térmica linear	$[1/t]$
α_1	Fator dependente da razão r/l , k e μ .	[ad.]
β_1	Fator dependente da razão r/l , k e μ .	[ad.]
Δ	Deformação da mola no equilíbrio estático	[L]

ΔT	Diferença entre a temperatura medida e a temperatura ambiente	[t]
ΔT_c	Variação da temperatura crítica para propagação de trincas sob choque térmico	[t]
Δ^1	Variação relativa percentual para cada freqüência obtida pelo equipamento comercial	[ad.]
Δ^2	Variação relativa percentual para cada freqüência obtida pelo equipamento desenvolvido	[ad.]
ΔF_n^1	Variação dentro das 5 séries de freqüência obtida por um equipamento comercial	[T ⁻¹]
ΔF_n^2	Valor médio das 5 séries de freqüência obtida pelo equipamento desenvolvido	[T ⁻¹]
ε	Deformação de um corpo	[ad.]
ϕ	Fator dependente das dimensões da seção transversal	[L]
ϕ_F	Variação relativa percentual das freqüências considerando-se o equipamento comercial e o desenvolvido	[ad.]
γ_{eff}	Energia efetiva de superfície	[M.L ² /T ²]
λ	Comprimento de onda	[L]
μ	Razão de Poisson	[ad.]
μ_o	Valor inicial da razão de Poisson	[ad.]
μ_1	Fator dependente da seção transversal e do fator ϕ em vibração torcional	[L]
ρ	Densidade geométrica	[M/L ³]
ρ_1	Densidade de um meio poroso	[M/L ³]
ρ_0	Densidade teórica do material	[M/L ³]
σ	Tensão de tração, compressão, flexão ou torção	[M/(T ² .L)]
σ_e	Tensão de escoamento dos metais	[M/(T ² .L)]
σ_f	Tensão de fratura de materiais frágeis	[M/(T ² .L)]
τ	Período natural da oscilação	[T]
ψ	Fator geométrico	[ad.]

$\Psi(\alpha, t)$ Deslocamento angular de torção em função do tempo t a uma distância x da origem [L]

L: comprimento, M: massa, T: tempo, t: temperatura.

1 INTRODUÇÃO

As maiores vantagens dos materiais cerâmicos quando utilizados em condições severas de serviço (alta temperatura e ambiente corrosivo) são sua inércia química, refratariedade e excelentes propriedades mecânicas a altas temperaturas. Entretanto, esses materiais podem sofrer danos ou fratura completa quando estão submetidos ao choque térmico.

A degradação mecânica de cerâmicas refratárias provocada pela tensão termomecânica durante o aquecimento ou resfriamento tem sido uma importante questão em aplicações onde se requer o uso de materiais que sejam resistentes ao choque térmico.

A produção de espumas cerâmicas por aeração de suspensões, associada ao processo de “gelcasting” pode proporcionar cerâmicas porosas celulares com uma ampla faixa de densidades e propriedades mecânicas quando comparadas com outras cerâmicas porosas. Entretanto, o uso destes materiais em aplicações específicas como as estruturais, para isolamento térmico, filtragem, suportes para catalisadores, imobilização de microorganismos em aplicações biotecnológicas e implantes ósseos, requer uma adequação da macroestrutura da espuma que favoreça propriedades específicas, tais como resistência mecânica, permeabilidade, condutividade térmica ou área superficial.

O conhecimento sobre propriedades elásticas tem sido fundamental para o entendimento da limitação da vida útil de cerâmicas refratárias e cerâmicas celulares com fins estruturais. Essas propriedades são grandezas físicas que caracterizam a rigidez elástica dos materiais e representam, em primeiro lugar, um pressuposto para a classificação específica dos materiais e suas características mecânicas. Tais propriedades decorrem de características como

tamanho de agregado, temperatura, porosidade, distribuição do tamanho de poros e conectividade entre células vizinhas, as quais são definidas durante a produção do material. Entretanto, o uso de cerâmicas porosas em aplicações estruturais está condicionado ao desenvolvimento de técnicas não destrutivas de análises, que permitem avaliar as propriedades elásticas.

Existem inúmeros métodos dinâmicos para a obtenção das constantes elásticas em cerâmicas celulares, e para o estudo da degradação mecânica, por meio das propriedades elásticas, antes e após o choque térmico de cerâmicas refratárias. Dentre esses, podemos citar o método da excitação por impulso, ultra-som e ressonância de barras. Contudo, a elevada extensão granulométrica e o alto fator de amortecimento de alguns concretos refratários submetidos ao choque térmico, o nível de porosidade elevada de cerâmicas celulares e a elevada temperatura de ensaio tornam a maioria dessas técnicas de caracterização inviáveis para atender simultaneamente essa classe de materiais cerâmicos.

Faz-se então necessário à utilização de um método adequado que seja capaz de atender à formulação desses materiais cerâmicos e o seu estado de degradação inicial e, que permita encontrar as propriedades elásticas de maneira simples, eficiente e precisa.

O método de ressonância mecânica de barras é um dos mais indicados para caracterizar essa classe de materiais cerâmicos. Consiste no estímulo de um corpo de prova com frequência variável, a fim de se localizar a frequência fundamental e os seus harmônicos de vibração natural do corpo. Por meio de relações matemáticas, podem-se correlacionar as frequências de ressonância à densidade, à geometria do corpo e às propriedades elásticas do material. O módulo elástico é obtido por meio do modo de vibração longitudinal ou flexional e o módulo de cisalhamento, por meio da vibração torcional.

As propriedades elásticas dos materiais cerâmicos somente serão efetivamente avaliadas de forma totalmente automática, quando os mesmos forem submetidos a ensaios que envolvam vibração de flexão e torção simultaneamente. O problema é que a presença das partículas grosseiras, o

nível de porosidade e o fator amortecimento impedem que esses materiais sejam ensaiados de forma totalmente automática em equipamentos convencionais de caracterização.

O desenvolvimento de um equipamento específico para caracterizar os diversos tipos de materiais de forma totalmente automática surge como a solução deste impasse, pois permitirá estender a caracterização para esses materiais utilizando-se a aplicação de vibração por flexão e torção simultaneamente. Desta maneira, as relações entre distribuição granulométrica, propriedades elásticas, degradação mecânica por choque térmico e a influência da temperatura nas propriedades elásticas poderão ser estudadas com precisão, permitindo um maior controle na etapa de formulação dessas composições.

Dentro desse contexto apresentado, este trabalho teve como principal objetivo desenvolver um equipamento totalmente automatizado para caracterizar cerâmicas refratárias e celulares, aplicando simultaneamente vibrações de flexão e torção para se obter de uma só vez os valores de E , G e μ . por meio da técnica de ressonância mecânica de barras. Para isto, outras metas tiveram que ser atendidas:

- (a) Elaboração de um método que permita controlar a aplicação da vibração e da temperatura no material, capturar a resposta dessa vibração e calcular as propriedades elásticas obtidas. Tal método resultou no desenvolvimento de um software de controle e análise de fácil utilização, garantindo uma boa precisão nos resultados obtidos.
- (b) Elaboração e desenvolvimento dos circuitos eletrônicos que permita obter uma excelente qualidade e amplitude do sinal de resposta da amostra.
- (c) Elaboração e desenvolvimento de um forno para 1450 °C, de alta precisão e controle, adequado à técnica de vibração e à forma de excitação utilizada.

Como objetivo complementar, este trabalho avalia a degradação mecânica por choque térmico de um concreto refratário por intermédio das propriedades elásticas correlacionando-as com o tamanho máximo de

agregado e a porcentagem volumétrica de matriz no concreto. Também é avaliada a influência da porosidade em materiais cerâmicos celulares de alumina por intermédio dos módulos elásticos, correlacionando-os com modelos propostos por Mackenzie e por Boccaccini para a dependência do módulo de Young com o nível de porosidade e a sua morfologia.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A determinação das propriedades: módulo de elasticidade (ou de Young), E , módulo de rigidez (ou de cisalhamento), G e razão de Poisson, μ , são importantes para a descrição de várias outras propriedades mecânicas. Por exemplo:

- (a) A tensão de escoamento de metais, σ_e , a partir da teoria das discordâncias [1] necessita de G , pela equação:

$$\sigma_e = \frac{2G\dot{b}}{l_d} \quad (2.1)$$

onde \dot{b} é o vetor de Burgers, l_d é o comprimento livre da linha de discordância e G é o módulo elástico de cisalhamento.

- (b) A tensão de fratura de materiais frágeis, σ_f , expressa pela teoria de Griffith [2] precisa de E , conforme a equação:

$$\sigma_f = \sqrt{2\gamma_{eff}E} / (\psi \sqrt{\pi c_i}) \quad (2.2)$$

onde γ_{eff} é a energia efetiva de superfície, ψ é um fator geométrico, c_i é a metade do comprimento de um defeito interno crítico e E é o módulo elástico.

- (c) A variação de temperatura crítica, ΔT_c , para a propagação de trincas sob a ação de choque térmico, segundo a teoria de Hasselman [3] envolve μ , conforme a equação:

$$\Delta T_c = \sigma_f(1-\mu)/(E\alpha) \quad (2.3)$$

onde μ é a razão de Poisson e α é o coeficiente de expansão térmica linear.

Nota-se, portanto, a importância da caracterização dessas propriedades elásticas no contexto da engenharia de materiais, já que σ_e , σ_f e ΔT_c , são grandezas básicas em projetos de materiais e em diversos ramos da engenharia.

São inúmeros os métodos para a avaliação experimental do valor do módulo de Young (E), módulo de cisalhamento (G), módulo volumétrico (K_v) e razão de Poisson (μ) de materiais. Existem aqueles métodos baseados em testes mecânicos estáticos em tração ou compressão, ultra-sônicos, excitação por impulso e, dentre outros, os denominados de ressonância mecânica de barras, ou dinâmicos.

De modo geral, esses métodos podem ser divididos em duas classes: a) métodos estáticos e b) métodos dinâmicos. A revisão a seguir irá apontar alguns comparativos entre esses métodos e algumas das vantagens de cada um deles.

2.1 Métodos Estáticos

Os métodos estáticos consistem em solicitar mecanicamente um corpo por meio da aplicação de tensão (σ) de tração, compressão, flexão ou torção com baixas velocidades de aplicação de carga. Devido à baixa tenacidade dos materiais cerâmicos refratários, os ensaios mais usuais são os de compressão ou flexão (utilizando equipamentos mecânicos adaptados).

A deformação (ε) de um corpo depende da magnitude da tensão (σ) a qual ele é submetido. Para a maioria dos materiais cristalinos, quando são aplicados níveis de tensão relativamente baixos, a tensão e a deformação são proporcionais entre si, sendo que essa proporcionalidade representada pela lei de Hooke [4] pode ser mostrada pela equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.4)$$

onde a constante de proporcionalidade E é o módulo elástico do material.

A lei de Hooke é válida para o regime elástico linear, onde a deformação sofrida pelo corpo é totalmente recuperável quando a carga é retirada. Nessa região, o módulo elástico pode ser obtido pelo coeficiente angular do gráfico da tensão em função da deformação, como mostra a figura 2.1.

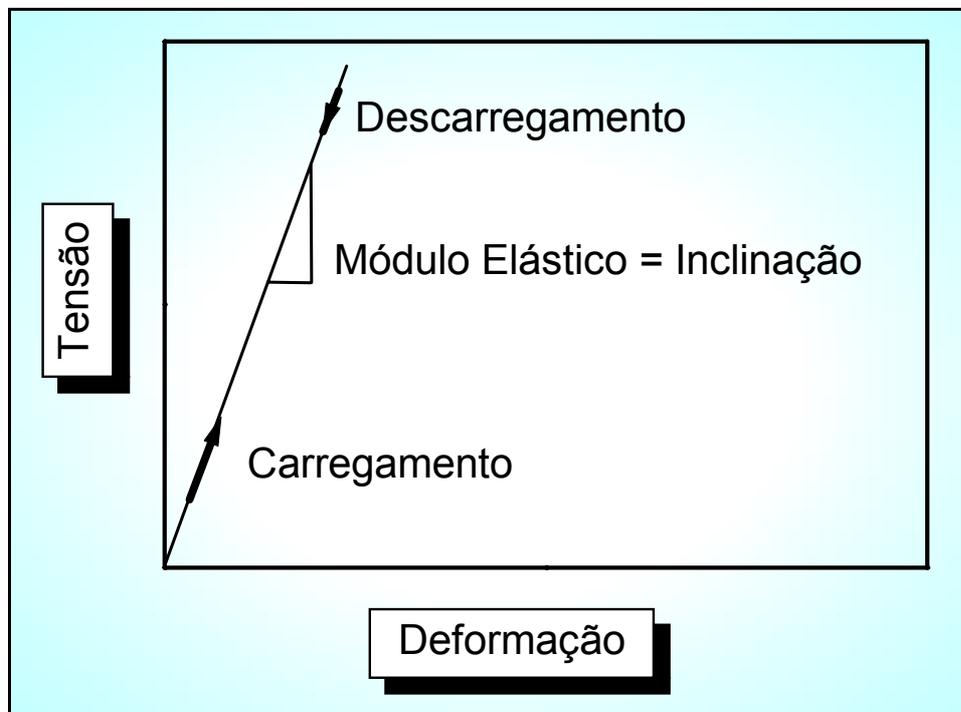


Figura 2.1 - Curva tensão - deformação no regime elástico [4].

À medida que se eleva a temperatura, os materiais refratários tendem a se desviar do comportamento linear elástico. Nessas condições pode-se aproximar o módulo elástico através de uma secante a partir da origem até algum ponto da curva da tensão em função da deformação (módulo secante) ou pela inclinação de uma reta tangente a um dado valor de tensão (módulo tangente) como mostra a figura 2.2.

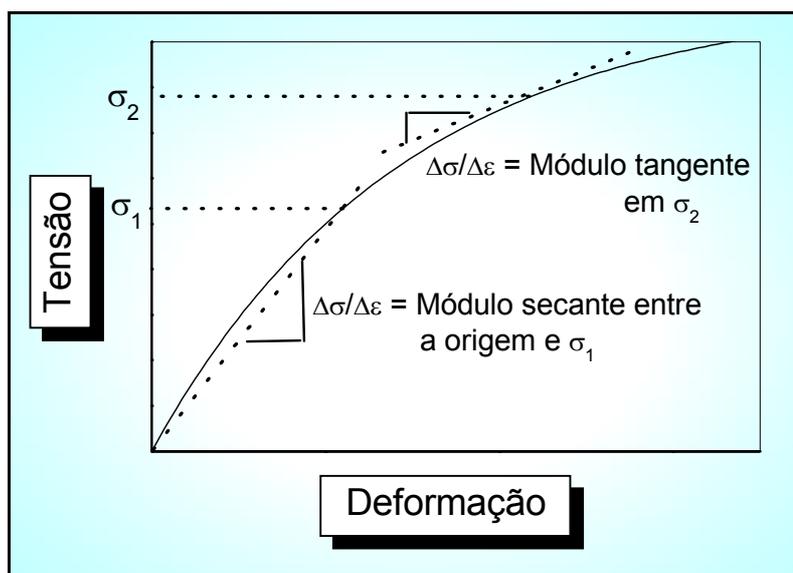


Figura 2.2 - Curva tensão - deformação não-linear [4].

A principal dificuldade para a avaliação do módulo elástico em função da temperatura no método estático é sua determinação precisa. Isto pode ser afetada pela deformação elástica do sistema de medida (máquina de ensaio e dispositivo de flexão) e pelas aproximações assumidas no cálculo do módulo elástico fora do regime elástico como mostrado na figura 2.2.

2.2 Métodos Dinâmicos

Os métodos dinâmicos consistem basicamente na determinação da frequência natural de um corpo de prova pelo emprego da energia das ondas elásticas e na medição da velocidade de propagação de ondas através de um corpo. Ambos os parâmetros medidos podem ser ocupados na determinação das propriedades elásticas do material.

Nos métodos dinâmicos o nível de tensão aplicado é muito baixo, o que permite garantir que o material realmente está no regime elástico. Todavia, é importante lembrar que essas tensões são muito inferiores às aquelas aplicadas pelos métodos estáticos.

Dentre os métodos dinâmicos para caracterizar materiais cerâmicos a altas temperaturas, destacam-se as técnicas ultra-sônicas, a técnica de excitação por impulso e a técnica de ressonância mecânica de barras.

2.2.1 Método de Ressonância Mecânica de Barras

O princípio do método de ressonância mecânica de barras consiste no estímulo de um corpo de prova com frequência variável, na busca das frequências de ressonância de vibração desse corpo e por meio de relações matemáticas, determinam-se os módulos elásticos. Essas relações matemáticas são específicas para a geometria do corpo de prova, o modo de vibração imposta e o arranjo experimental. Inúmeros trabalhos [5,6,7], já expuseram essas relações de maneira exata ou aproximada e tantos outros [8,9,10,11], propuseram arranjos experimentais possíveis.

O método de ressonância mecânica de barras exige um arranjo experimental relativamente simples e leva uma vantagem sobre os métodos estáticos, que é a de medir propriedades elásticas sob a ação de tensão muito baixa, garantindo a obediência a um comportamento elástico linear.

Basicamente, são três os tipos de vibração que se pode impor num corpo de prova, por exemplo, em forma prismática: longitudinal, flexional ou transversal e torcional. Dos dois primeiros tipos, pode-se obter o valor do módulo de Young e da razão de Poisson, sendo que o último fornece o módulo de cisalhamento.

Ide e Föster são referenciados como elásticos como os proponentes da metodologia para a obtenção dos módulos de um corpo sólido a partir de suas frequências de ressonância mecânica, em 1935 e 1937, respectivamente [5].

Do ponto de vista experimental, a metodologia pode ser separada em duas partes: a primeira, trata da excitação, detecção e obtenção das frequências de ressonância e a segunda, do emprego de relações matemáticas e dos procedimentos computacionais, utilizando-se as frequências de ressonância para a obtenção dos módulos elásticos. Esta última parte

restringe as condições experimentais, já que um caso geral torna a matemática bastante complexa. Assim, tipos específicos de vibração, corpos de formas restritas, homogeneidade e isotropia são algumas das exigências mais comuns.

Spinner e Tefft [7], apresentam equações que são exatas para a ressonância de barras cilíndricas e aproximações no caso de barras com seção transversal retangular e quadrada, as quais facilitam o procedimento experimental e geram erros na ordem de 1%. Alta precisão na determinação do módulo de Young exige o conhecimento prévio da razão de Poisson. Sem este valor, E , pode ser determinado aproximadamente a partir da densidade, dimensões da barra e frequências de ressonância dos tipos longitudinal ou flexional.

2.3 Teoria de Vibração Livre de Barras à Temperatura Ambiente

A teoria de vibração livre de corpos sólidos exige a integração das equações de movimento vibratório, de acordo com as condições limites prescritas das tensões ou deslocamentos. Expressões teóricas dos modos de vibração longitudinal e torcional para barras de seção retangular e cilíndrica, foram desenvolvidas há muitos anos (1876), por Pochhammer [5]. Entretanto, soluções mais exatas das equações não foram obtidas até 1940, para barras de seção retangular e igualmente para o caso mais simples que é a de seção cilíndrica.

Soluções mais exatas para a geometria de uma barra com seção transversal retangular estão cada vez mais sendo desenvolvidas, de modo que, já são encontradas soluções mais exatas. O refinamento e melhoramento nas técnicas de medida têm possibilitado verificar a validade dessas aproximações, e como resultado, o método de ressonância dinâmica torna-se uma técnica eficaz para a determinação das constantes elásticas dos sólidos.

2.3.1 Equações de Movimento para a Frequência Natural de Vibração

Todos os sistemas que possuem massa e elasticidade produzem vibração livre ou vibração que ocorre na ausência de excitação externa. O nível de amortecimento dessa vibração, em quantidade moderada, tem pouca influência na frequência natural do corpo e pode ser desprezada nos cálculos [12].

O modelo básico de vibração de um sistema oscilatório simples consiste de um corpo com uma certa massa, uma mola de pequena massa e desprezível em relação à massa do corpo e um amortecedor [13], conforme é mostrado na figura 2.3. A relação força deflexão sofrida pelo conjunto corpo-mola é considerada linear, e pode ser descrita segundo a lei de Hook, $F = k \cdot x$, onde k é a constante de mola e x é o deslocamento da posição de equilíbrio estático sofrido pelo corpo. O amortecimento viscoso é descrito por uma força proporcional à velocidade, ou seja, $F = c \cdot \dot{x}$, onde \dot{x} é a velocidade de deslocamento e c é o coeficiente de amortecimento[14].

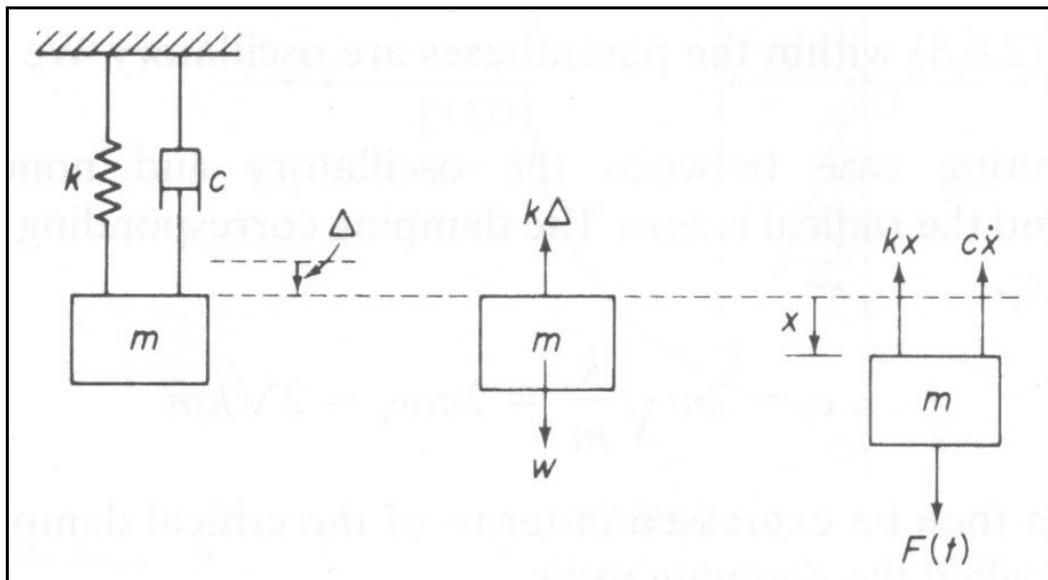


Figura 2.3 - Modelo básico de um sistema oscilatório com amortecimento [13].

A figura 2.4 mostra um sistema simples massa-mola sem amortecimento, assumindo-se que o seu movimento seja somente possível na direção vertical. Pode-se concluir que esse sistema possui apenas um grau de liberdade porque seu movimento é descrito somente por uma simples coordenada x .

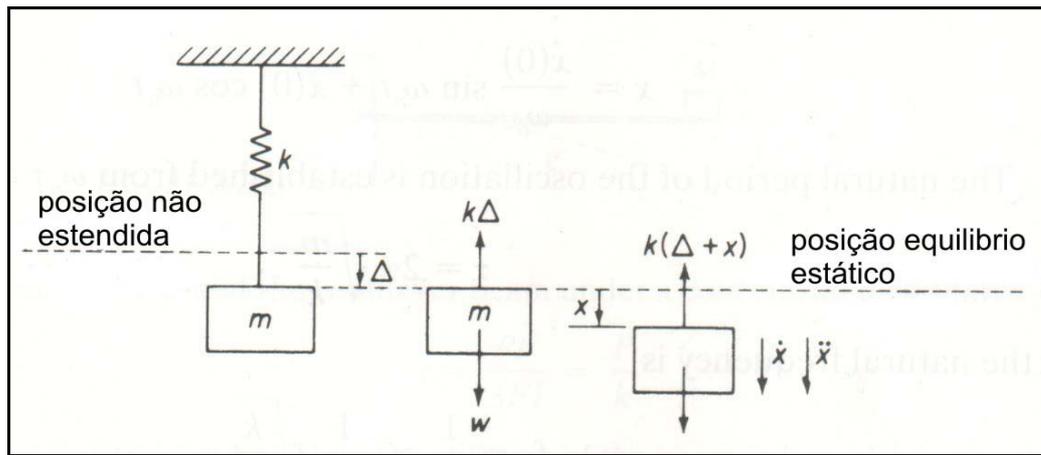


Figura 2.4 - Modelo básico de um sistema oscilatório sem amortecimento [13].

Quando o sistema é colocado em movimento, oscilações podem excitar a sua frequência natural F_n , a qual é uma propriedade do sistema. Assim, podemos examinar alguns dos conceitos básicos associados com a vibração livre de sistemas com um grau de liberdade.

A segunda lei de Newton é a primeira base para examinarmos o movimento do sistema. Como mostra a figura 2.4, a deformação da mola no equilíbrio estático é Δ , e a força $k \cdot \Delta$ que age na mola é igual à força gravitacional w que age no corpo de massa m :

$$k \cdot \Delta = w = m \cdot g, \quad (2.5)$$

Pela medida do deslocamento x da posição de equilíbrio estático, as forças que agem no corpo de massa m são $k(\Delta + x)$ e w . Convencionando-se x como positivo na direção para baixo, as grandezas força, velocidade e aceleração serão também positivas nessa mesma direção.

Aplicando-se a segunda lei de Newton de movimento para a massa m , teremos:

$$\Sigma F = m\ddot{x} = w - \dot{k}(\Delta + x), \quad (2.6)$$

como $\dot{k}\Delta = w$, obtemos a seguinte equação:

$$m\ddot{x} = -\dot{k}x, \quad (2.7)$$

Por definição a frequência circular ω_n é dada pela seguinte equação:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\dot{k}}{m}}, \quad (2.8)$$

A equação 2.7 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0, \quad (2.9)$$

e comparando-se essa equação com a equação do movimento harmônico, conclui-se que o movimento é harmônico. Como a equação 2.9 é uma equação diferencial linear de segunda ordem homogênea, possui a seguinte solução:

$$x = A_1 \sin \omega_n t + B_1 \cos \omega_n t, \quad (2.10)$$

onde A e B são constantes necessárias. Essas constantes são avaliadas das condições $x(0)$ e $\dot{x}(0)$ e $t = 0$, sendo que a equação 2.10 pode ser reduzida para a seguinte forma:

$$x = \frac{x(0)}{\omega_n} \sin \omega_n t + x(0) \cos \omega_n t, \quad (2.11)$$

O período natural da oscilação é determinado por intermédio de $\omega_n \tau = 2\pi$, ou

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (2.12)$$

e a frequência natural é dada por:

$$f_n = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (2.13)$$

A seguir, será detalhado o equacionamento matemático para os tipos de ressonância longitudinal, flexional e torcional, fazendo-se uma correlação entre a precisão das frequências de ressonância medidas e as constantes elásticas.

2.3.2 Vibração Longitudinal de Barras

A vibração longitudinal de barras de seção transversal quadrada ou circular é recomendada como o método de maior precisão na determinação do módulo de Young, E. Utilizando modelamentos empíricos, vários pesquisadores [15,16,17], mostraram que a teoria existente para barras cilíndricas pode, com certas suposições, ser aplicada para amostras de seção transversal quadrada com alto grau de precisão e com certas limitações para barras de seção transversal retangular. As equações para os três tipos de seção transversal serão detalhadas em seguida.

Uma solução aproximada para a velocidade de ondas longitudinais em uma barra de seção transversal cilíndrica infinitamente longa, em função da razão entre o diâmetro e o comprimento da onda (d/λ), pode ser obtida e aplicada nesse caso [5, 18], assumindo-se que a vibração da barra contenha um número inteiro de meios comprimentos de ondas, ou seja,

$$l = \frac{n\lambda}{2} \quad (2.14)$$

A velocidade da onda pode então ser expressa por:

$$v = \lambda \cdot f_n = \frac{2lf_n}{n} \quad (2.15)$$

onde λ é o comprimento de onda da vibração, l é o comprimento da barra, f_n é a frequência de ressonância de alguma ordem de vibração e n é a ordem da frequência de ressonância, 1, 2, 3,

Nesta condição, Bancroft [19] apresenta soluções numéricas de alta precisão relacionando E com a n -ésima frequência de ressonância, f_n :

$$E = \frac{\rho}{K_n} \left(\frac{2lf_n}{n} \right)^2 \quad (2.16)$$

onde ρ é a densidade da barra e K_n é um fator de correção para a n -ésima frequência de ressonância longitudinal. Esse fator de correção é uma função de n , μ , l e d .

Para a condição $d/\lambda \ll 1$, o fator de correção K_n pode ser expresso por:

$$K_n \cong 1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\pi n \mu d}{l} \right)^2. \quad (2.17)$$

Fora da condição especificada de $d/\lambda \ll 1$, o valor do fator de correção é fornecido pela tabela 2.1 [7]. O valor de λ deve ser calculado pela equação (2.15).

O manual de operação e procedimento de um equipamento da marca ELAKON [20], utilizado para medir os módulos elásticos à temperatura ambiente, mostra um equacionamento mais preciso para K_n , definida por:

$$K_n = 1 - \frac{1}{8} \left(\frac{\pi n \mu d}{l} \right)^2 B_n, \quad (2.18)$$

onde

$$B_n = 1 + e_n M_1 + e_n^2 M_2 + \dots \quad (2.19)$$

sendo que o valor de e_n é dado por:

$$e_n = \left(\frac{nd\pi}{2l} \right)^2 \quad (2.20)$$

Tabela 2.1 - Fator de correção K_n para vibrações longitudinais de ressonância de barras cilíndricas como função da razão de Poisson, μ , e razão d/λ [7].

d/ λ	Razão de Poisson (μ)						
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
0,00	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
0,05	0,99988	0,99972	0,99950	0,99922	0,99888	0,99818	0,99802
0,10	0,99950	0,99886	0,99708	0,99686	0,99549	0,99359	0,99206
0,15	0,99882	0,99736	0,99503	0,99277	0,98967	0,98609	0,98202
0,20	0,99780	0,99509	0,99138	0,98670	0,98117	0,97480	0,96772
0,25	0,99632	0,99181	0,98579	0,97830	0,96956	0,95975	0,94903
0,30	0,99421	0,98728	0,97810	0,96702	0,95435	0,94049	0,92571
0,35	0,99114	0,98085	0,96759	0,95203	0,93486	0,91660	0,89770
0,40	0,98651	0,97158	0,95310	0,93236	0,91031	0,88770	0,86503
0,45	0,97913	0,95778	0,93300	0,90668	0,88003	0,85372	0,82812
0,50	0,96621	0,93646	0,90503	0,87383	0,84372	0,81499	0,78780

Esse manual ilustra como exemplo, o valor de M_1 , como sendo:

$$M_1 = \frac{1}{24(1-\mu)^2} [7 - 4\mu - 32\mu^2 + 4\mu^3 + 24\mu^2] \quad (2.21)$$

Para se ter uma idéia da influência desses fatores sobre o valor do módulo de Young, calculado pela equação (2.16), a tabela 2.2 [21] mostra valores de B_n e K_n para valores de n até 20, aproximando-se a equação (2.19) para:

$$B_n \cong 1 + e_n M_1 \quad (2.22)$$

Tabela 2.2 - Valores de B_n (equação (2.22)), K_n (equação (2.18)), K_n' (equação (2.18) e $B_n \cong 1$) e d/λ para n variando de 1 a 20. Foi usado uma amostra padrão de aço com $l = 149,85\text{mm}$, $d = 6,38\text{mm}$ e $\mu = 0,28$ [21].

n	B_n	K_n	K_n'	d/λ
1	1,0009	0,9998	0,9998	0,0233
2	1,0035	0,9992	0,9992	0,0466
3	1,0079	0,9981	0,9981	0,0699
4	1,0140	0,9966	0,9966	0,0932
5	1,0218	0,9946	0,9947	0,1165
6	1,0314	0,9922	0,9924	0,1398
7	1,0428	0,9893	0,9897	0,1631
8	1,0559	0,9858	0,9830	0,1864
9	1,0708	0,9818	0,9830	0,2097
10	1,0874	0,9772	0,9790	0,2330
11	1,1057	0,9719	0,9746	0,2563
12	1,1258	0,9659	0,9697	0,2796
13	1,1476	0,9593	0,9645	0,3029
14	1,1712	0,9518	0,9588	0,3262
15	1,1966	0,94340	0,9527	0,3495
16	1,2236	0,9342	0,9462	0,3728
17	1,2525	0,9240	0,9393	0,3961
18	1,2829	0,9127	0,9320	0,4193
19	1,3152	0,9003	0,9242	0,4426
20	1,3492	0,8867	0,9161	0,4658

Portanto, até $n = 20$ a diferença em K_n é de somente 0.11%. Spinner e Tefft [7], garantem que se for obedecida a condição de que $d/\lambda \ll 1$ então se pode obter K_n adotando-se tão somente $B_n \cong 1,0$ que ainda se terá uma precisão melhor do que 0,10%. A tabela 2.2 [21] mostra na coluna K_n' o efeito dessa aproximação.

A teoria desenvolvida para a ressonância longitudinal de barras cilíndricas pode ser aplicada a barras de seção transversal quadrada. Para isto, uma barra de seção quadrada é tratada como uma barra de seção circular desde que se encontre o diâmetro equivalente que geraria o mesmo momento de seção transversal em torno do eixo do corpo. Deve-se assim, empregar a relação entre o diâmetro equivalente, d_{eq} , e o lado da seção quadrada, b , dado pela equação [7]:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{4}{3}b^2}. \quad (2.23)$$

Assim, para se calcular o módulo de Young, da frequência de ressonância longitudinal de barras de seção quadrada, extrai-se K_n da tabela 2.1 (ou calcula-se da equação (2.17) se for o caso) usando-se as relações mostradas nas equações (2.14) e (2.23), e substitui-se este valor de K_n na equação (2.16).

Uma teoria de vibrações de ressonância longitudinal de barras de seção transversal retangular não tem sido desenvolvida adequadamente, e tratamentos empíricos apropriados não estão disponíveis. Entretanto, se a seção transversal não se afastar muito do quadrado, então o método desenvolvido para ressonância longitudinal de barras de seção quadrada pode ser utilizado para o caso de barras de seção retangular, sem introduzir grandes erros, substituindo-se a equação (2.23) pela seguinte equação [7]:

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{2}{3}(a^2 + b^2)}, \quad (2.24)$$

onde “a” e “b” são a espessura e a largura do corpo, respectivamente.

Se a seção se afastar muito da geometria quadrada, os erros envolvidos no cálculo das propriedades elásticas pelo uso da equação (2.24) podem ser grandes. Neste caso, o uso de vibrações longitudinal não é recomendado e o módulo de Young pode ser adquirido mais precisamente pela vibração flexional.

2.3.2 Vibração Flexional de Barras

O modo flexional ou transversal de vibração é o mais complexo dos três modos em consideração em relação ao modo como a frequência de ressonância é afetada, não somente pelo comprimento e seção transversal, mas pela razão entre os dois [18].

No caso de barras delgadas, é muito mais fácil excitar a vibração flexional do que a vibração longitudinal. Portanto, a vibração flexional é a mais recomendada na determinação do módulo de Young de barras bastante delgadas.

O módulo de Young, como no caso da vibração longitudinal, pode ser determinado também pela vibração flexional. Por intermédio dos dados de frequência de ressonância, peso e dimensões do corpo, o módulo de Young é determinado pela seguinte equação [22]:

$$E = C_F W f_n^2, \quad (2.25)$$

onde W é o peso do corpo, f_n é uma frequência de ressonância e C_F é um fator que depende da forma e tamanho do corpo, o modo de vibração, e razão de Poisson.

Grandes confusões são geradas em relação aos equacionamentos mais adequados para o cálculo de C_F . Diversos autores [22,23,24] usaram diferentes equações diferenciais para achar soluções mais exatas para C_F , por meio da vibração flexional de barras prismáticas. Para isto, as condições de contorno

devem ser as mesmas para as duas extremidades, ou seja, elas devem estar livres como é o caso aqui considerado. Sendo assim, a equação geral que relaciona a frequência de ressonância com as dimensões, densidade e propriedades elásticas pode ser reduzida nas seguintes formas:

$$\frac{M}{\operatorname{tgh}(\alpha_1/2)} + \frac{N}{\operatorname{tg}(\beta_1/2)} = 0 \text{ para } n = 1, 3, 5, \text{ etc.}, \quad (2.26)$$

$$\frac{M}{\operatorname{coth}(\alpha_1/2)} - \frac{N}{\operatorname{cot}(\beta_1/2)} = 0 \text{ para } n = 2, 4, 6, \text{ etc.}, \quad (2.27)$$

α_1 , β_1 , M e N são funções de rl , k e μ . O fator k tem um valor maior que α_1 e menor que β_1 e é relacionado com o módulo de Young e outras propriedades por:

$$E = \frac{4\pi^2 f_n^2 \rho l^4}{r^2 k^4}, \quad (2.28)$$

onde f_n é a n -ésima frequência de ressonância, ρ é a densidade, l é o comprimento, r é o raio de giro da seção e E é o módulo de Young.

A solução de Goens [22] para essas equações é feita por intermédio das seguintes equações:

$$\alpha_1 = k \left[(B^2 k^4 + 1)^{\frac{1}{2}} - Ak^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.29)$$

$$\beta_1 = k \left[(B^2 k^4 + 1)^{\frac{1}{2}} + Ak^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.30)$$

$$M = \frac{\alpha_1}{k^2} \left[(B^2 k^4 + 1)^{\frac{1}{2}} + Bk^2 \right], \quad (2.31)$$

$$N = \frac{\beta_1}{k^2} \left[(B^2 k^4 + 1)^{\frac{1}{2}} - Bk^2 \right], \quad (2.32)$$

onde:

$$A = (r/l)^2 \left[\frac{1+\mu}{K'} + \frac{1}{2} \right], \quad (2.33)$$

$$B = (r/l)^2 \left[\frac{1+\mu}{K'} - \frac{1}{2} \right], \quad (2.34)$$

onde K' é a constante de cisalhamento proposta por Timoshenko [23], o qual pode ser 5/6, 8/9, 0,85, respectivamente para μ igual a 0, 1/6, 1/3.

Após os fatores α_1 , β_1 , M e N tiverem sido calculados em função de k , para valores particulares de r/l e μ , substituições podem ser feitas na equação 2.26 ou na equação 2.27, para a determinação do valor de k . O menor valor de k que satisfaz a equação 2.26 corresponde à primeira ordem de vibração, o próximo menor valor corresponde à terceira ordem de vibração e assim sucessivamente.

De acordo com Pickett [22], as soluções das equações de Timoshenko para vibração flexional de barras com vãos livres podem ser obtidas pela equação:

$$E = 0,94642 \frac{\rho l^4}{t^2} f_1^2 T, \quad (2.35)$$

onde t é a dimensão da seção transversal paralela à direção da vibração, f_1 é frequência de ressonância fundamental e T é um fator de correção de Pickett para o modo fundamental. No caso de barras retangulares, T , que denota o efeito da deformação cisalhante e a inércia rotacional sobre f_1 , é expresso como:

$$T = 1 + 6,585(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2)\left(\frac{t}{l}\right)^2 - 0,086\left(\frac{t}{l}\right)^4 - \frac{8,340(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^4)(t/l)^4}{1 + 6,338(1 + 0,14081\mu + 1,536\mu^2)(t/l)^2} \quad (2.36)$$

Spinner e colaboradores [25], checaram a equação de Pickett experimentalmente, usando barras de aço ($\mu \approx 0.29$). Desde então, o fator de correção T tem sido usado no estudo de vidros. Entretanto, não tem sido evidenciado explicitamente que a equação de Pickett é a melhor. A precisão dessa equação não tem sido examinada para vidros, embora Spinner e colaboradores [25] estimaram um erro menor que 1% no cálculo de E , em amostras pequenas ($d/l \approx 0.4$). Por causa da natureza aproximada das equações de Pickett, o uso de harmônicos não é recomendado para barras de seção retangular.

Um trabalho [26] sugere que o coeficiente de cisalhamento, K' , da equação de Timoshenko para vibração flexional, assuma o seguinte valor:

$$K' = (5 + 5\mu)/(6 + 5\mu), \quad (2.37)$$

supondo que a tensão plana é a condição mais provável para barras. Nesse trabalho [26], o autor fez um estudo experimental em barras de vidros opticamente polidas, comparando os resultados das equações de frequência baseadas na teoria de barras de Timoshenko (equação 2.28) com aquela desenvolvida por Pickett (equação 2.35), desde que a expressão apresentada para K' seja aceita.

Na obtenção dos resultados experimentais, o autor [26] mediu as frequências de ressonância flexional e a frequência de ressonância longitudinal (como efeito de comparação) para o cálculo do módulo de Young. No caso longitudinal, o valor de $E = 6,356 \times 10^{10}$ Pa foi calculado utilizando a equação (2.16). As figuras 2.5 e 2.6 mostram os valores do módulo de Young em função de d/l , obtidos a partir das equações (2.35) e equações (2.26) – (2.34).

Pela figura 2.5, nota-se que os valores médios do módulo de Young obtidos das equações (2.26) – (2.34) coincidem melhor com o valor obtido pela ressonância longitudinal ($E = 6,356 \times 10^{10}$ Pa) do que aqueles obtidos pela equação (2.35) de Pickett. Entretanto, observa-se um menor espalhamento nos valores de E calculados pelas equações (2.26) - (2.34) em relação aos da equação (2.35).

Para os dois primeiros harmônicos (figura 2.6), observa-se que os valores de E não são afetados pelas equações (2.26) - (2.34). Assim, mesmo os resultados de E obtidos pela equação (2.35) apresentarem menores valores em relação às equações (2.26) - (2.34), ela pode ser usada com bastante precisão para valores de d/l entre 0 e 0,4.

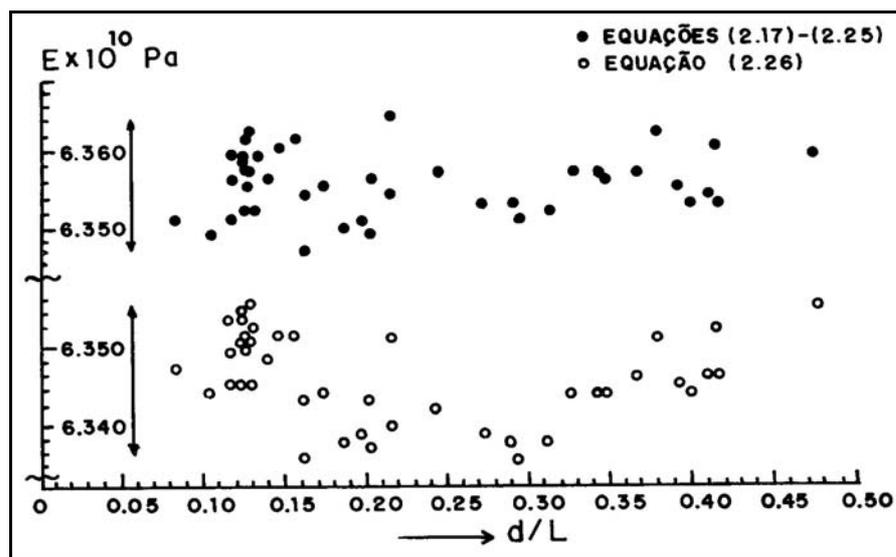


Figura 2.5 - Valores calculados do módulo de Young de vidros empregando-se a ressonância fundamental, $n = 1$, adaptado das equações (2.26 – 2.35) [26].

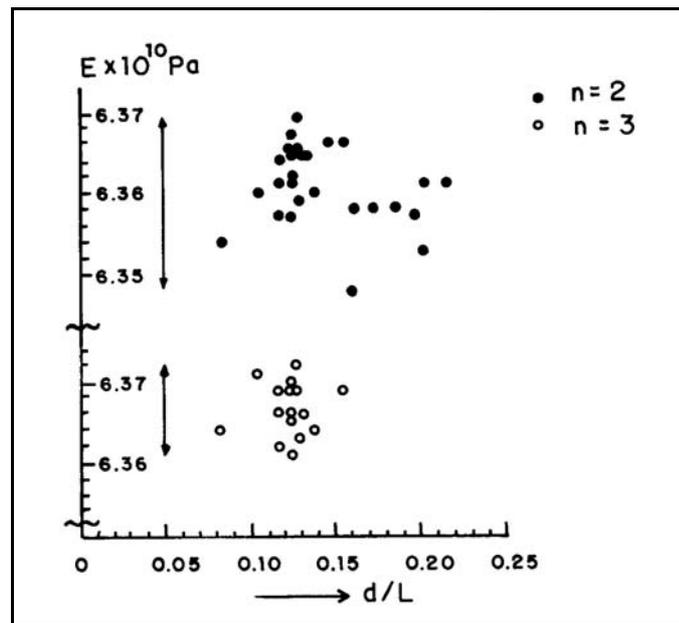


Figura 2.6 - Valores calculados do módulo de Young de vidros pelas equações (2.26) – (2.34) para os dois primeiros harmônicos [26].

Outros autores [5,7] descreveram equacionamentos específicos para calcular o módulo de Young de corpos cilíndricos. A partir das frequências de ressonância das três primeiras ordens de vibração flexional, f_1 , f_2 , f_3 de um cilindro de diâmetro d e comprimento l , o módulo de Young pode ser calculado por meio das seguintes equações:

$$E = 1,261886 \frac{\rho l^4}{d^2} f_1^2 T_1, \quad (2.38)$$

$$E = 0,1660703 \frac{\rho l^4}{d^2} f_2^2 T_2, \quad (2.39)$$

$$E = 0,04321184 \frac{\rho l^4}{d^2} f_3^2 T_3, \quad (2.40)$$

onde T_1 , T_2 e T_3 são os fatores de correção (dependentes da razão d/l , da razão de Poisson μ e da ordem da frequência de ressonância, n), ρ é a densidade do material e l é o comprimento da barra. Os valores desses fatores de correção, T_1 , T_2 e T_3 podem ser obtidos por meio de tabelas (Anexo A, Anexo B e Anexo C, respectivamente) [5,27].

Um trabalho experimental de Spinner e colaboradores [25] confirmaram os cálculos feitos previamente por Tefft [27] para esses fatores de correção, T_1 , T_2 e T_3 . Eles também compararam os dados experimentais com os valores originais de Pickett [22], o qual fez cálculos aproximados desses fatores de correção para alguns valores de razão de Poisson. Eles acharam uma diferença entre os valores desses fatores de correção obtidos por Tefft [27] e por Pickett [22] por volta de 0,6% para uma amostra com $d/l = 0,20$ e $\mu = 0,33$.

Segundo a norma ASTM C 1198 – 96 [28], utilizada no estudo da determinação dos módulos elásticos de cerâmicas avançadas pelo método de ressonância sônica, o fator de correção T da equação (2.36) pode ser simplificado para as seguintes situações:

a) se $l/t \geq 20$, o fator de correção T da equação (2.36) pode ser expresso somente pela equação:

$$T = [1,000 + 6,585(t/l)^2], \quad (2.41)$$

onde l e t são o comprimento e a espessura da barra, respectivamente. O módulo de Young pode então ser calculado diretamente pela equação (2.35).

b) se $l/t < 20$ e a razão de Poisson for conhecida, então o fator de correção, T , pode ser obtido diretamente da equação (2.36) e aplicado na equação (2.35) para a obtenção do módulo de Young.

Ainda por intermédio da norma ASTM C 1198 – 96 [28] é apresentado uma equação para o fator de correção T_1 da equação (2.38) para a ressonância fundamental em flexão de barras cilíndricas, a qual é escrita da seguinte forma:

$$T_1 = 1 + 4,939(1 + 0,0752\mu + 0,8109\mu^2)(d/l)^2 - 0,4883(d/l)^4 - \left[\frac{4,691(1 + 0,2023\mu + 2,173\mu^2)(d/l)^4}{1,000 + 4,754(1 + 0,1408\mu + 1,536\mu^2)(d/l)^2} \right], \quad (2.42)$$

onde d é o diâmetro do cilindro, l é o comprimento do cilindro e μ é a razão de Poisson.

Os valores obtidos para T_1 da equação (2.42) são praticamente os mesmos apresentados na tabela do anexo A, sendo que este fator de correção pode ser simplificado para as seguintes condições:

A) se $l/d \geq 20$, o valor de T_1 da equação (2.42) pode ser simplificado para a seguinte expressão:

$$T_1 = [1,000 + 4,939(d/l)^2], \quad (2.43)$$

B) se $l/d < 20$ e a razão de Poisson for conhecida, então T_1 pode ser calculado diretamente da equação (2.42) e assim usado na equação (2.38) para calcular o módulo de Young.

2.3.3 Vibração Torcional de Barras

O modo de vibração torcional permite calcular o valor do módulo de cisalhamento, G , o qual é muito importante em si, mas que também permite obter a razão de Poisson de materiais isotrópicos por meio da seguinte relação:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1. \quad (2.44)$$

A equação básica que relaciona o módulo de cisalhamento G e a frequência de ressonância torcional f_n é dada por:

$$G = \rho \left(\frac{2lf_n}{n} \right)^2 R_T, \quad (2.45)$$

onde l é o comprimento da barra, f_n é a frequência para a n -ésima ordem de vibração torcional e R_T é o fator geométrico que depende da forma do corpo de prova.

Para um corpo cilíndrico, de diâmetro d e comprimento l , a equação (2.45) é exata e simples, pois o fator R_T que envolve o momento polar de inércia da seção transversal é exatamente igual a 1 e é independente do diâmetro e comprimento da barra.

Por outro lado, a solução das equações para barras de seção retangular requer algumas aproximações para a sua solução. Davies [29] derivou equações aproximadas, para a ressonância torcional de barras de seção retangular, por meio da seguinte equação diferencial de movimento para barras infinitamente finas e com extremidades livres:

$$\frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial t^2} = \frac{G}{\rho R_T} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2} = \frac{v_s^2}{R_0} \frac{\partial^2 \psi(x,t)}{\partial x^2}, \quad (2.46)$$

onde $\psi(x,t)$ é o deslocamento angular de torção, em função do tempo t , a uma distância, x , da origem, v_s é a velocidade de propagação da onda torcional e R_0 é o fator de forma para barras infinitamente longas.

No caso de uma barra de seção retangular com lados a e b ($a > b$, $s = a/b$), $1/R_0$ é dado por:

$$\frac{1}{R_0} = \frac{3}{4(1+s^2)} \left\{ \frac{16}{3} - \frac{2}{b} \left(\frac{4}{\pi} \right)^5 \sum_{p=0}^{\infty} \frac{1}{(2p+1)^5} \operatorname{tgh} \left[(2p+1) \frac{\pi s}{2} \right] \right\}. \quad (2.47)$$

Quando s assume o valor 1, a seção transversal é quadrada, e aí $1/R_0$ vale 0,8435, ou seja, R_0 é igual a 1,18559.

Quando o comprimento da barra torna-se pequeno comparado com a sua seção transversal, a equação (2.47) não pode ser explicitada porque esta é baseada na teoria de vibração de uma barra infinita. Para uma barra finita, de seção transversal quadrada, torna-se necessário fazer a seguinte correção [29]:

$$R_T = R_o \left[1 + \left(\frac{n\pi\mu_1}{l} \right)^2 \right], \quad (2.48)$$

onde R_T é o fator de forma corrigido da equação (2.45), para uma barra finita de seção transversal quadrada e μ_1 é uma função que pode ser expressa por:

$$\mu_1^2 = \int \frac{\Phi^2}{S r^2} dS, \quad (2.49)$$

onde Φ é uma função das dimensões da seção transversal e r é o raio de giro da seção transversal da barra. A integração é feita na área, S , da seção transversal.

A solução aproximada para μ^2 tem sido obtida no caso de seção transversal retangular com as dimensões a e b . Se a relação $S_o = a/b$ for menor que 3, a equação toma a seguinte forma [29]:

$$\frac{\mu_1^2}{b^2} = \frac{1}{12(1+S_o^2)} \left(S_o^2 + \frac{4,577}{S_o} \operatorname{tgh} \left(\frac{\pi S_o}{2} \right) + 2,397 \operatorname{tgh}^2 \left(\frac{\pi S_o}{2} \right) - 7,190 \right). \quad (2.50)$$

Para o caso de barra de seção transversal quadrada, $S_o = 1$, a relação para μ_1^2 pode ser escrita da seguinte forma [29]:

$$\frac{\mu_1^2}{b^2} = 0,000862. \quad (2.51)$$

Então, substituindo-se a equação (2.51) na equação (2.48) pode-se obter o fator de forma para uma barra finita de seção transversal quadrada da seguinte forma:

$$R_T = R_o \left[1 + 0,00851 \left(\frac{nb}{l} \right)^2 \right], \quad (2.52)$$

onde R_T é o fator de forma corrigido, utilizado na equação (2.45) e R_o é igual a 1,18559.

Tefft e Spinner [30], testaram a equação (2.52) experimentalmente na determinação do fator de forma de barras de aço de seção transversal quadrada, por intermédio da frequência de ressonância torcional, variando a razão b/l . Eles acharam que a concordância entre o experimento e a teoria foi completamente satisfatória para valores menores de b/l e insatisfatória quando a razão b/l tornou-se grande. A relação empírica proposta por eles e baseada em seus estudos para barras de seção transversal quadrada é dada da seguinte forma:

$$R_T = R_o \left[1 + n^2 \left(\frac{b}{l} \right)^2 (0,01746 + 0,00148.n + 0,00009.n^2) \right], \quad (2.53)$$

onde R_o é o fator de forma para barra infinita, seção transversal quadrada e vale 1,18559.

No caso de barras de seção transversal retangular, não há uma teoria precisa para a ressonância torcional [7]. Entretanto, estudos experimentais, têm forçado a utilização de barras nesse formato. Para o caso de barra infinita de seção transversal retangular, a solução apresentada por Davies [29] (equação (2.47)) e Timoshenko [23] podem ser utilizadas. O segundo apresentou uma solução da equação para torção estática de barras retangulares com um maior grau de precisão. Seu resultado é dado na forma de uma série infinita e expressa pela seguinte equação [5,7]:

$$R_o = \frac{1 + (b/a)^2}{4 - 2,521(a/b) \left(1 - \frac{1,991}{e^{\pi b/a} + 1} \right)}, \quad (2.54)$$

onde $b > a$ e R_o é o fator de forma que pode ser substituído na equação (2.53).

A equação (2.54) reduz-se ao valor de 1,18559, quando $a = b$, que é o caso de barras de seção transversal quadrada. No caso de $b \gg a$, a equação (2.54) se aproxima a uma equação dada por Pickett [22]:

$$R_o = \frac{1 + (a/b)^2}{4 - 2,521 \left(\frac{a}{b} \right)}. \quad (2.55)$$

Outros pesquisadores [7] testaram essas equações experimentalmente e acharam que a diferença entre a teoria e o experimento foi de aproximadamente 0,2%, se a razão $b/l \leq 0,3$ e $b/a \leq 10$, no modo fundamental de vibração. Baseados nesses resultados, propuseram a seguinte equação:

$$R_T = \left[\frac{1 + (b/a)^2}{4 - 2,521(a/b) \left(1 - \frac{1,991}{e^{\pi b/a} + 1} \right)} \right] \left[1 + \frac{0,00851 n^2 b^2}{l^2} \right] - 0,060 \left(\frac{nb}{l} \right)^{3/2} \left(\frac{b}{a} - 1 \right)^2, \quad (2.56)$$

onde R_T é fator de forma da equação (2.45) e n é a ordem da vibração.

É difícil estimar o erro do fator de forma R_T para valores maiores de b/l , b/a , ou n , quando os dados para mostrar os efeitos desses três parâmetros não estejam disponíveis. Na maioria dos casos, salvo alguns casos extremos, os valores de erros não excedem a 1% [7].

2.3.4 Cálculo da Razão de Poisson

Quando a razão de Poisson não é conhecida e sendo a razão $l/d < 20$ para barras cilíndricas ou $l/t < 20$ para barras retangulares, a norma ASTM C 1198 – 96 [28] apresenta um processo iterativo computacional para o cálculo da razão de Poisson. Esse processo consiste em se determinar o valor da razão de Poisson, baseando-se nos módulos de Young e cisalhamento experimentais. A figura 2.7 mostra esse processo iterativo por meio de um fluxograma e a sua descrição detalhada é apresentada em seguida:

1. Determinar as frequências de ressonância fundamental do modo flexional (f_f) e torcional (f_t) das amostras. Pela equação (2.45) e para qualquer um dos tipos de geometria da amostra, calcula-se o módulo de cisalhamento (G) a partir da frequência de ressonância torcional fundamental e das dimensões e massa da amostra.
2. Usando as equações para o cálculo do módulo de Young de qualquer um dos tipos de geometria da amostra já especificados, obtém-se este módulo (E) da frequência de ressonância flexional fundamental, das dimensões, da massa e de um valor inicial da razão de Poisson (μ_0).
3. Os valores do módulo de cisalhamento e do módulo de Young calculados nos itens 1 e 2, são substituídos na equação (2.44) para a razão de Poisson. Um novo valor para a razão de Poisson (μ_x) é gerado para iniciar uma outra iteração no item 2.
4. As etapas entre os itens 2 e 3 são repetidas até que diferença não significativa (2% ou menos) seja observada entre o último valor e o valor atual computado para a razão de Poisson.

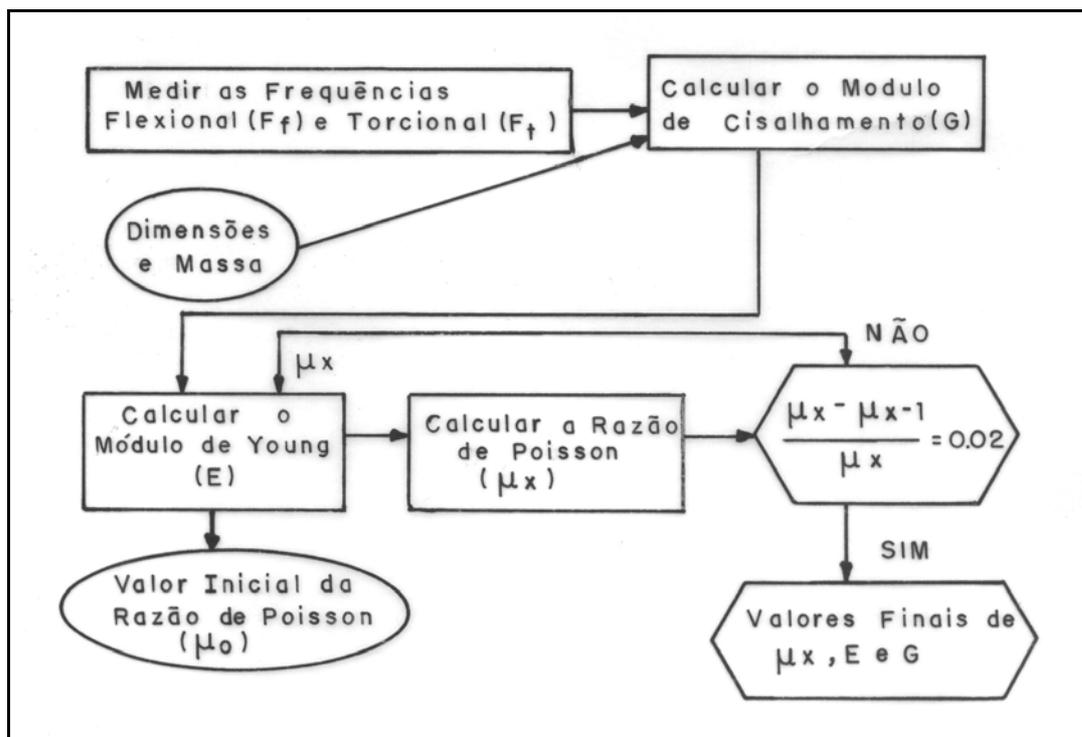


Figura 2.7 - Fluxograma para a determinação da razão de Poisson [28], na qual F_f e F_t são as freqüências de ressonância flexional e torcional respectivamente, E é o módulo de Young e G é o módulo de cisalhamento.

2.4 Medidas dos Módulos Elásticos a Altas Temperaturas

Uma das vantagens do método de ressonância é a aplicabilidade do sistema para a medida dos módulos elásticos em função da temperatura. Os módulos elásticos a altas temperaturas podem ser calculados por meio do conhecimento da dependência das freqüências de ressonância com a temperatura e a expansão térmica do sólido.

Caso haja variações significativas nas dimensões do corpo de prova com o aumento da temperatura, deverá ser feita correção nas equações mostradas anteriormente para o cálculo das propriedades elásticas na temperatura ambiente. A equação usada para a determinação dos módulos elásticos em função da temperatura para sólidos isotrópicos e cúbicos é expressa por [9,10,28]:

$$M_T = M_O [f_{rT} / f_{rO}]^2 [1 / (1 + \alpha \Delta T)], \quad (2.57)$$

onde:

M_T = módulo elástico à temperatura T (módulo de Young, E , ou módulo de cisalhamento, G),

M_O = módulo elástico à temperatura ambiente,

f_{rT} = freqüência de ressonância na temperatura T ,

f_{rO} = freqüência de ressonância na temperatura ambiente,

α = coeficiente de expansão térmica linear médio, na faixa de temperatura de medida, e

ΔT = diferença de temperatura entre a temperatura de medida e a ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

No caso de sólidos que possuem coeficiente de dilatação térmica linear muito pequeno em temperaturas elevadas, como é o caso da alumina policristalina ($\alpha = 8 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), a diferença observada nas propriedades elásticas calculadas pela equação (2.57) e aquelas desenvolvidas para a temperatura ambiente, é menor que 0,9%. Neste caso, as propriedades elásticas podem ser obtidas das equações desenvolvidas para a temperatura ambiente, pela substituição da freqüência de ressonância na temperatura de medida.

Diversos trabalhos [10,32,33] têm mostrado que as propriedades elásticas de alumina policristalina mudam muito pouco com o aumento da temperatura, para temperaturas inferiores a 1000 $^{\circ}\text{C}$, e decrescem mais acentuadamente acima dessa temperatura (figura 2.8).

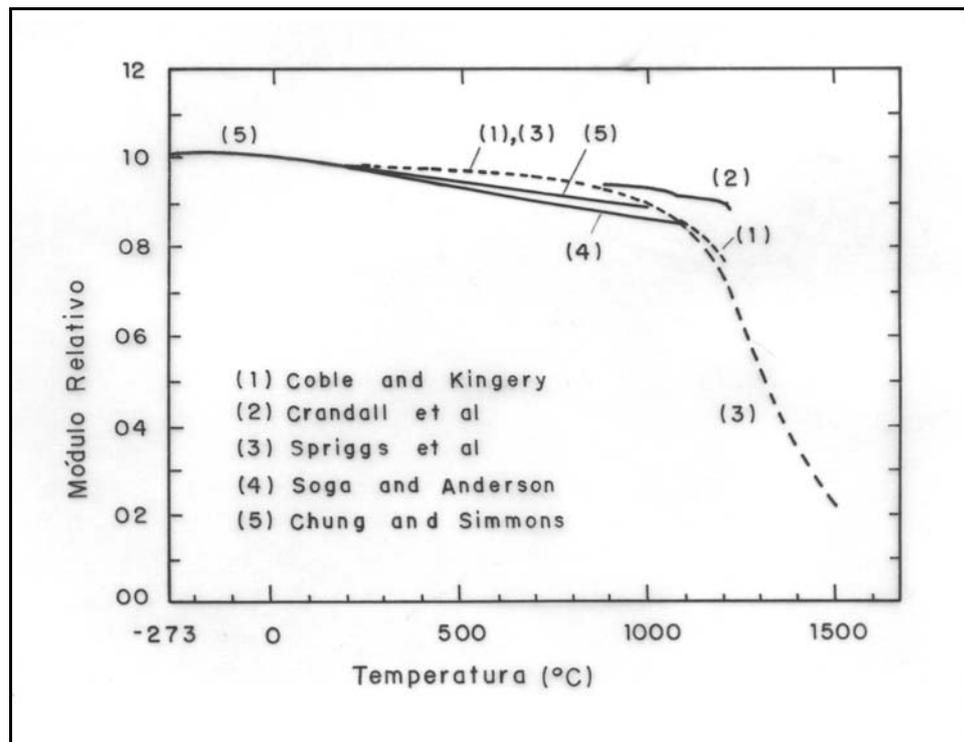


Figura 2.8 - Mudança relativa do módulo elástico com a temperatura de uma alumina policristalina segundo vários autores [32].

O decréscimo do módulo relativo até uma temperatura próxima de 1000 °C é atribuído principalmente ao desvio do comportamento linear elástico que os materiais refratários apresentam, quando sujeitos a uma elevação de temperatura.

Entretanto, o decréscimo dessas propriedades elásticas com o aumento da temperatura acima dos 1000 °C é um indicativo da deformação plástica dos grãos individuais do material policristalino produzido pelo deslizamento dos contornos desses grãos [10,32].

Uma teoria do efeito do deslizamento do contorno dos grãos nessas propriedades [10], assume que os contornos dos grãos respondem a uma tensão cisalhante de maneira viscosa, com um coeficiente de viscosidade que depende exponencialmente da temperatura. Essa teoria afirma que para uma dada frequência de medida, uma temperatura poderá ser alcançada e que a viscosidade poderá ser suficientemente baixa para permitir medidas do movimento do contorno dos grãos. Isto, poderá resultar na relaxação da tensão

cisalhante que age nos contornos dos grãos, e assim, levar a um baixo valor do módulo de Young [10].

Outros trabalhos [9,34] têm comparado uma técnica dinâmica com uma estática, por meio da medida do módulo de Young em função da temperatura, para amostras de vidro e refratários. As figuras 2.9 e 2.10 mostram a evolução do módulo de Young em função da temperatura, para um vidro e um refratário simultaneamente.

Esses resultados mostram que os valores dos módulos elásticos obtidos pelo método dinâmico são maiores que aqueles obtidos pelo método estático, para os dois materiais e essa diferença aumenta com a temperatura (figuras 2.9 e 2.10). As diferenças encontradas nesses valores podem ser explicadas pela análise do comportamento reológico dos materiais testados e pelo tempo envolvido no teste [34]. Métodos dinâmicos são muito rápidos e assim, comportamentos anelásticos podem não ser medidos. Por outro lado, a medida pelo método estático é longa e os resultados podem ser afetados por esses comportamentos. Diferenças nos resultados dependem do grau de anelasticidade do material testado [9].

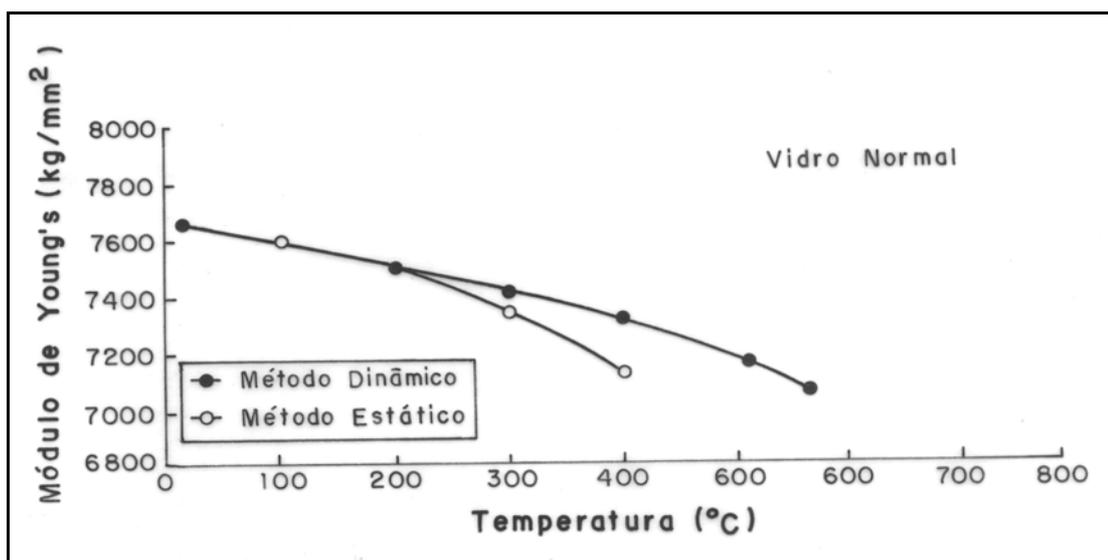


Figura 2.9 – Comparação do módulo elástico com o método dinâmico e estático para uma amostra de vidro em função da temperatura [9].

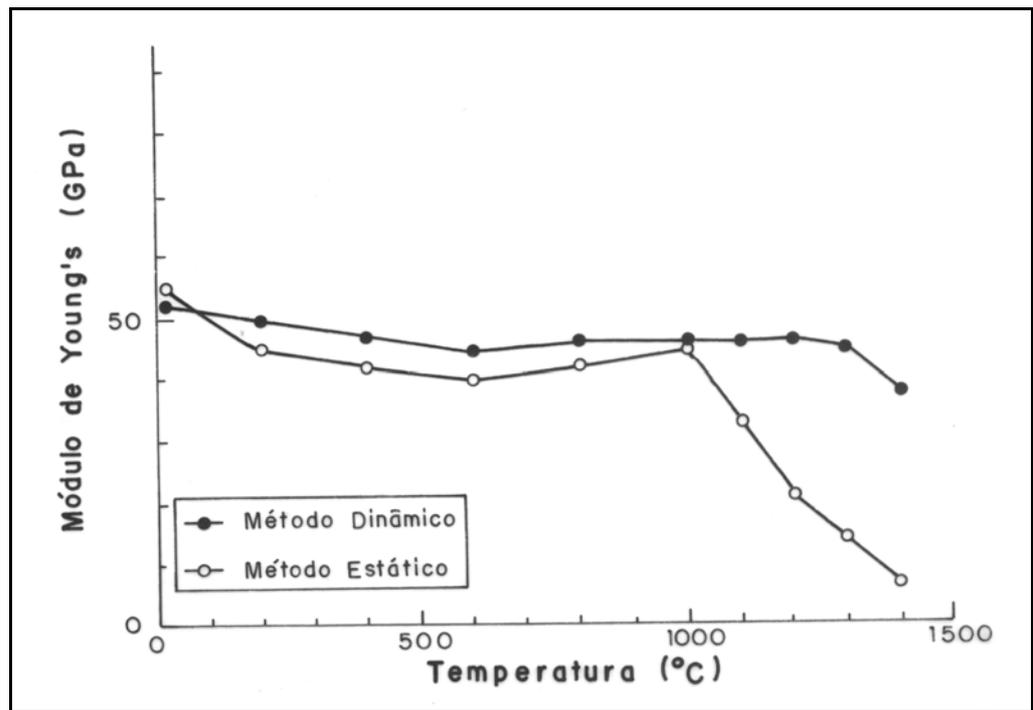


Figura 2.10 - Comparação do módulo elástico com o método dinâmico e estático para uma amostra de magnésia dopada por zircônia em função da temperatura [34].

2.5 Medidas dos Módulos Elásticos com a Porosidade

A maioria dos sólidos porosos são considerados sólidos heterogêneos e os tratamentos analíticos (por exemplo: material contínuo) desenvolvidos para o caso dos sólidos homogêneos não são aplicados [35,36]. Entretanto, se os poros são distribuídos em relação ao seu tamanho, forma e distribuição espacial é possível tratar os sólidos porosos como um material contínuo, fazendo uso das várias propriedades efetivas que dependem das propriedades do sólido denso e a porosidade [37].

A presença de pequenos defeitos no material tais como a porosidade, pode levar a um decréscimo nos valores de suas propriedades elásticas. Vários autores [32,38,39] estudaram a dependência do módulo de Young e razão de Poisson com a porosidade para cerâmicas à base de alumina. Eles estudaram a influência das propriedades elásticas na porosidade, utilizando a técnica do

pulso eco. Os modelamentos matemáticos utilizados por Asmani [38] foram originados de Boccaccini's [40], o qual relaciona a densidade de um meio poroso com a sua porosidade total pela equação:

$$\rho_1 = \rho_0(1 - P_T), \quad (2.58)$$

onde ρ_0 é a densidade teórica e P_T é a porosidade total do material.

Na hipótese dos poros apresentarem uma simetria esferoidal, a dependência do módulo de Young com a porosidade total pode ser escrita da seguinte forma [40]:

$$E(P_T) = E_0(1 - P_T^{2/3})^{s_1}, \quad (2.59)$$

onde E_0 é o módulo de Young para o material denso ($E_0 = 400$ GPa para alumina densa) e P_T é a porosidade total do material. O expoente s_1 da equação (2.59) é calculado por:

$$S_1 = 1,21 \left(\frac{z}{x}\right)^{\frac{1}{3}} \left\{ 1 + \left[\left(\frac{z}{x}\right)^{-2} - 1 \right] \cos^2(\phi) \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (2.60)$$

onde z/x é um fator de forma para os poros (poros esféricos $z/x = 1$, poros cilíndricos $z/x = 1,5$), $\cos^2(\phi)$ é um fator de orientação dos poros (para orientação aleatória $\cos^2(\phi) = 1/3$).

Asmani [38] mostrou que os seus resultados experimentais para a variação do módulo de Young obtidos das medidas das velocidades das ondas sônicas, com a porosidade, podem ser correlacionados por meio de uma equação empírica. Essa equação empírica foi obtida com valores de porosidades de 0,1 a 0,25 % e, pode ser expressa da seguinte forma:

$$E(P_T) = E_0(1 - 2.1P_T). \quad (2.61)$$

Hübner e Dörre [32], mostram segundo o modelo de Mackenzie que para um corpo isotrópico e homogêneo contendo um grande número de vazios esféricos e distribuídos aleatoriamente, a dependência do módulo de Young com a porosidade total pode ser escrita por:

$$E(P_T) = E_0(1 - 1,9.P_T + 0,9.P_T^2). \quad (2.62)$$

2.6 Arranjos Experimentais para a Determinação dos Módulos Elásticos por Intermédio da Frequência de Ressonância de Barras.

Um sistema para a obtenção das frequências de ressonância mecânica de corpos de prova na forma de barras é composto basicamente das seguintes partes [5,18,41,42,43]:

- a) gerador de sinal,
- b) amplificador,
- c) transdutor excitador que converte o sinal elétrico em vibração mecânica,
- d) acoplamento fonte-amostra,
- e) corpo de prova,
- f) acoplamento amostra-receptor,
- g) transdutor de recepção que converte energia mecânica de vibração em sinal elétrico,
- h) amplificador para a etapa receptora,
- i) frequencímetro,
- j) osciloscópio.

Os itens mencionados de (a) a (j) obedecem à ordem experimental desde a geração do sinal de excitação até a detecção da ressonância com a leitura precisa do valor dessa frequência. A figura 2.11 mostra o esquema de

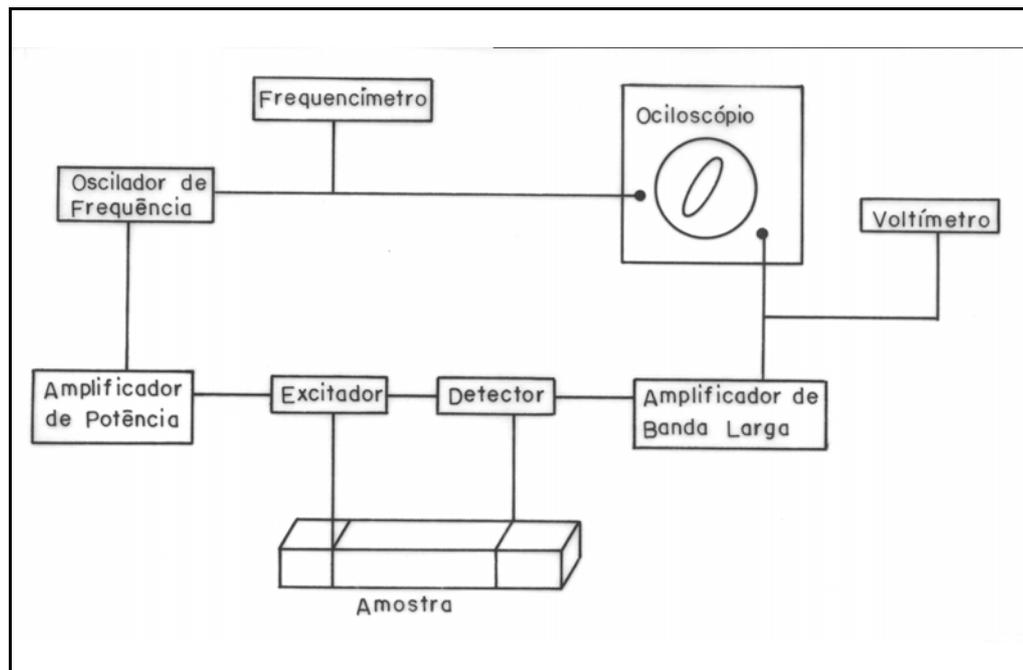


Figura 2.11 - Diagrama de bloco de um sistema usado na ressonância de barras [5].

um sistema completo para a determinação das freqüências de ressonância natural de barras [5]. Esse sistema é capaz de medir freqüências na faixa de 600 a 26.000 Hz, desde que o oscilador de freqüência variável seja de pelo menos 50 khz.

O tamanho e formato do corpo de prova e os tipos de excitação da vibração devem satisfazer as soluções matemáticas estabelecidas e para isto, a geometria mais comum é a com forma de barra de seção transversal quadrada e circular, excitadas longitudinal, flexional e torcional. Nestas condições, as equações apresentadas anteriormente são plenamente aplicáveis. O tamanho do corpo de prova, geralmente depende do material a ser testado. As dimensões devem ficar em uma faixa de valores, de maneira que as freqüências de ressonância estejam dentro dos limites que o equipamento possa medir (principalmente os transdutores). Para materiais cerâmicos, vidros ou aço têm-se utilizado os tamanhos de 152,4 x 25,4 x 12,7 mm para barra retangular, 152,4 x 12,7 x 12,7 mm para barra quadrada, e cerca de 152,4 mm de comprimento x 12,7 mm de diâmetro para barra cilíndrica [7].

A parte mais delicada do sistema é o acoplamento entre transdutores (excitação e recepção) e o corpo de prova. O ideal é que o acoplamento não interfira nas frequências naturais de vibração do corpo e para tanto o acoplamento não deve impor inércia ao sistema, ou seja, adicionar massa significativa que possa afetar as frequências dos modos normais de vibração. Se o fizer, deverá estar sob controle de modo a gerar influência avaliável.

A figura 2.12 mostra os nós de vibração para os tipos de ressonância

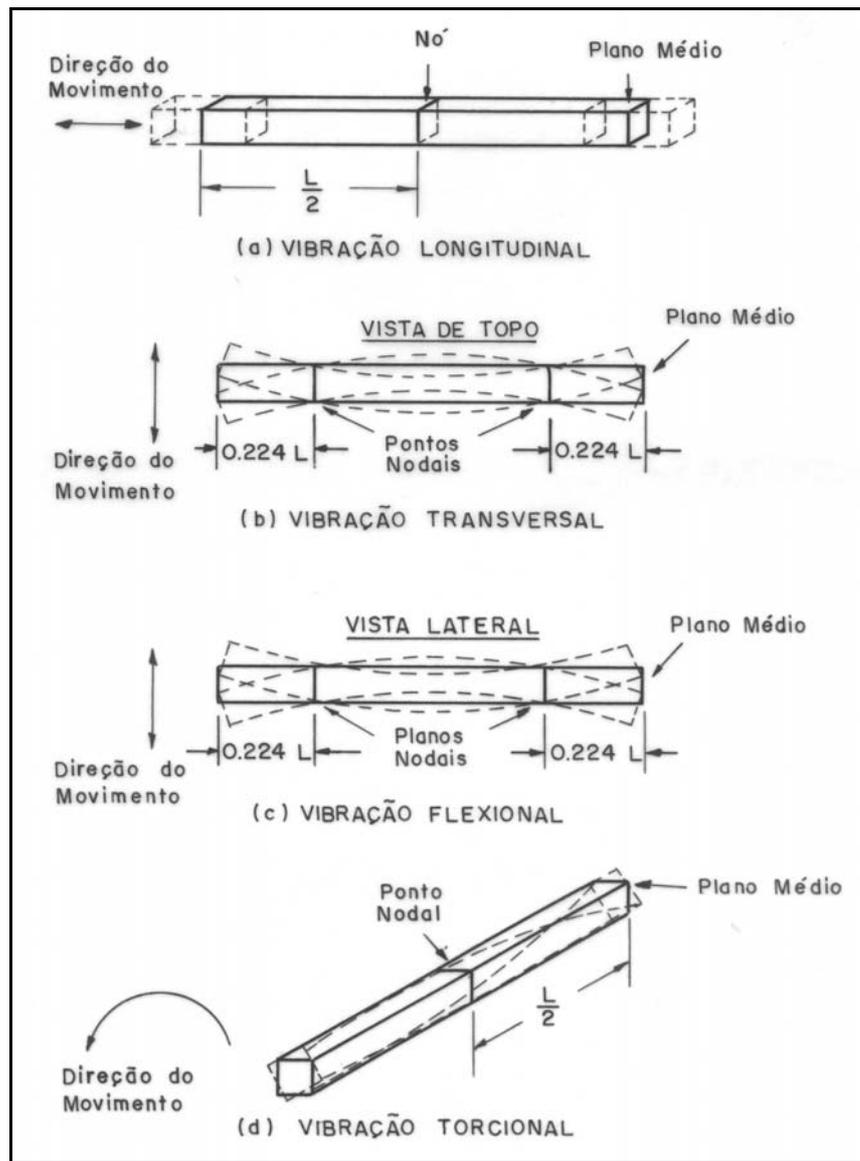


Figura 2.12 - Posição dos nós de vibração para os modos de ressonância longitudinal, transversal, flexional e torcional.

longitudinal, flexional e torcional. Observa-se nessa figura que o nó para a ressonância fundamental no modo longitudinal e torcional está localizado a $\frac{1}{2} L$, enquanto que para o fundamental no modo flexional ou transversal está a $0,224 L$ das extremidades da barra, sendo L o comprimento da barra.

Na literatura, observam-se tanto amostras apoiadas nos nós de vibração como suspensas por fios [5,7,20,28]. A figura 2.13 mostra um sistema de acoplamento amostra - transdutor feito por fios, para as medidas de freqüências de ressonância flexional e torcional. No caso de amostras suspensas por fios, elas não devem ser apoiadas na sua posição nodal ($0,224 L$

de cada lado da barra), devendo inicialmente ser apoiada a 0,1.l dos extremos da barra e posteriormente ajustada experimentalmente para maximizar a deflexão vibracional [28].

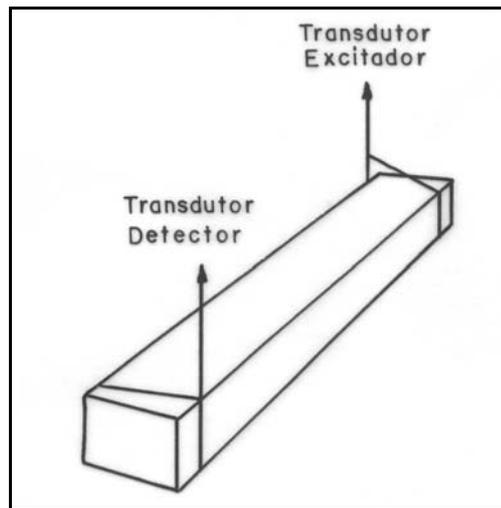


Figura 2.13 - Posicionamento da amostra para a medida das freqüências de ressonância flexional e torcional usando suspensão de fios.

No caso de acoplamento onde há um contato direto das hastes de acoplamento dos transdutores à amostra, elas devem permitir que a amostra oscile sem restrições significativas no modo de vibração desejada. A figura 2.14 mostra um exemplo desse tipo de acoplamento, para os modos

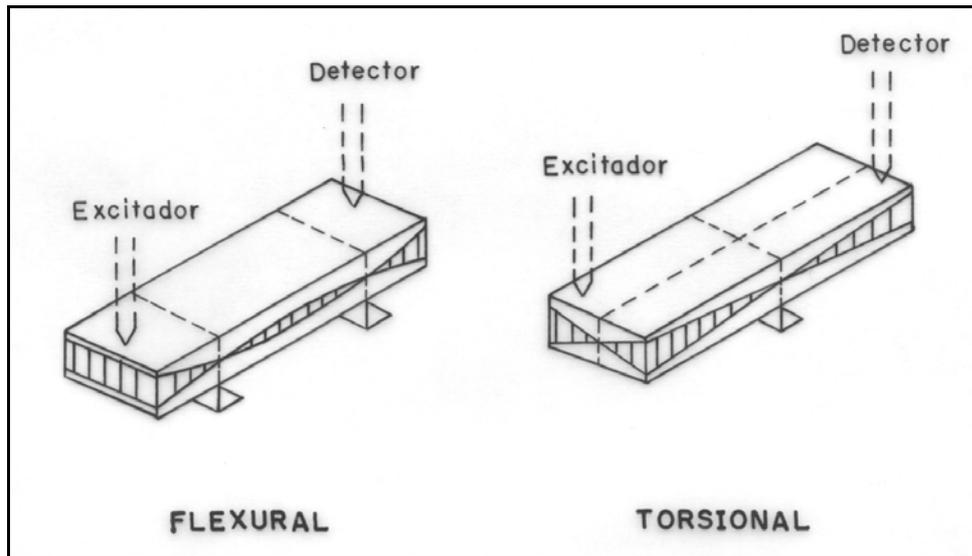


Figura 2.14 - Posicionamento da amostra para medida da freqüência de ressonância flexional e torcional, usando o método de contato direto da haste de acoplamento com a amostra.

flexional e torcional de vibração. Para esse caso, a amostra é apoiada na posição dos nós da ressonância fundamental, ou seja, $0,224 \times l$ e $0,5 \times l$ de cada extremidade para o modo de vibração flexional e torcional respectivamente.

Existe também um tipo de acoplamento pelo ar para o transdutor excitador, empregando-se autofalantes. As figuras 2.15 e 2.16 mostram os tipos de acoplamentos que utilizam como excitador um autofalante para os modos de vibração torcional e flexional respectivamente. Nestes casos, para o acoplamento de recepção é necessário o contato e é comum o emprego de cabeças de fonógrafos (a cristal ou magnéticos) e hastes de acoplamento ou ainda um dos fios de suspensão.

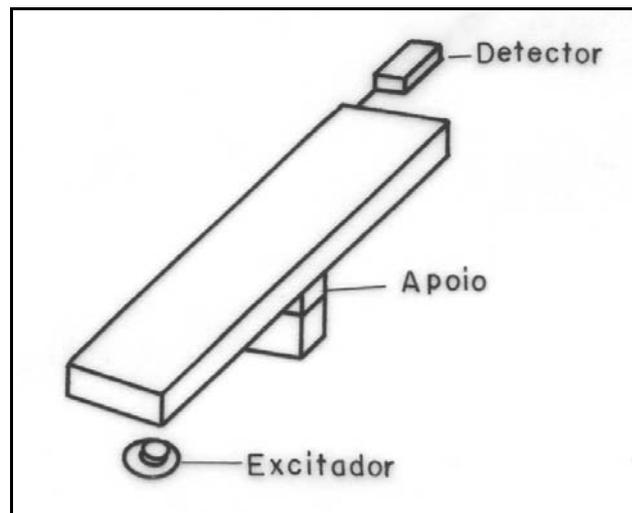


Figura 2.15 - Posicionamento da amostra para a medida da frequência de ressonância torcional, usando aut falante como excitador.

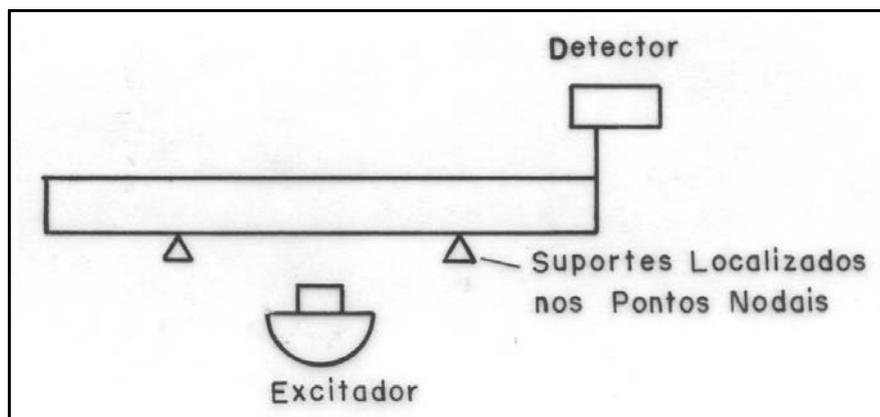


Figura 2.16 - Posicionamento da amostra para a medida da frequência de ressonância flexional, usando aut falante como excitador.

Com os corpos de prova na forma de barras, normalmente a excitação e a recepção são feitas nas extremidades longitudinais do corpo de prova para o modo de ressonância longitudinal, principalmente quando se usa o método de acoplamento direto entre os transdutores e a amostra [16]. A figura 2.17 mostra um esquema de um acoplamento direto entre os transdutores e a amostra, para a excitação e detecção da ressonância longitudinal fundamental.

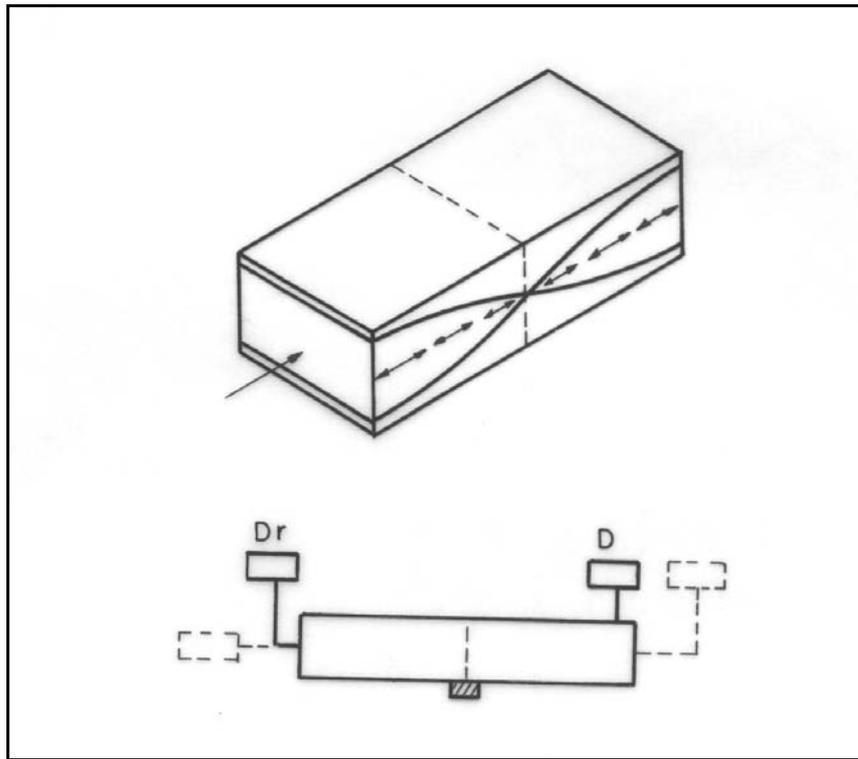


Figura 2.17 - Posicionamento da amostra para a medida da frequência de ressonância longitudinal, usando o método de acoplamento direto.

O procedimento geral para a obtenção das frequências de ressonância utilizando o método de ressonância mecânica de barras, consiste em se varrer a frequência de excitação desde baixos valores e se monitorar a amplitude do sinal de recepção. As ressonâncias serão identificadas pelos máximos no sinal de recepção, já que nessas condições um máximo de sinal é transmitido pelo corpo de prova.

2.7 Teoria do Amplificador Operacional

Um circuito integrado (CI) é um dispositivo que contém os seus próprios resistores e transistores, ou seja, os seus componentes internos não são separados e sim integrados. A associação desses componentes gera um produto final, tal como um amplificador de multi-estágios capaz de desempenhar uma função completa e pré-determinada.

Um dos primeiros e o mais utilizado circuito eletrônico é o amplificador operacional (AOP). O amplificador operacional é um amplificador de corrente contínua (DC) multi-estágio e de alto ganho, com entrada diferencial que pode operar em frequências de 0 (zero) a valores acima de 1 MHz, cujas características se aproximam de um amplificador ideal.

Existem várias tecnologias que são utilizadas na fabricação dos amplificadores operacionais, tais como BIPOLAR, BIFET, BIMOS, etc [44]. Entretanto, a tecnologia mais empregada atualmente é a BIFET, pois a sua estrutura interna utiliza uma combinação de transistores bipolares com transistores JFET, aproveitando assim as vantagens de ambos os tipos de transistores. Uma grande vantagem dessa tecnologia é a altíssima resistência de entrada do amplificador operacional, graças à utilização de transistores FET no estágio de entrada do mesmo.

A figura 2.18 mostra a simbologia esquemática de um amplificador operacional na sua forma original (a) e na sua forma mais usual (b). A descrição dos pinos do circuito integrado mostrado nessa figura é a seguinte:

- 1 e 5 – são destinados ao balanceamento do AOP (ajuste da tensão de OFFSET);
- 2 e V_2 – entrada inversora;
- 3 e V_1 – entrada não-inversora;
- 4 e V_{EE} – alimentação negativa (-3V a -18V);
- 7 e V_{CC} – alimentação positiva (+3V a +18V);
- 6 e V_{out} – saída;
- 8 – não utilizado;

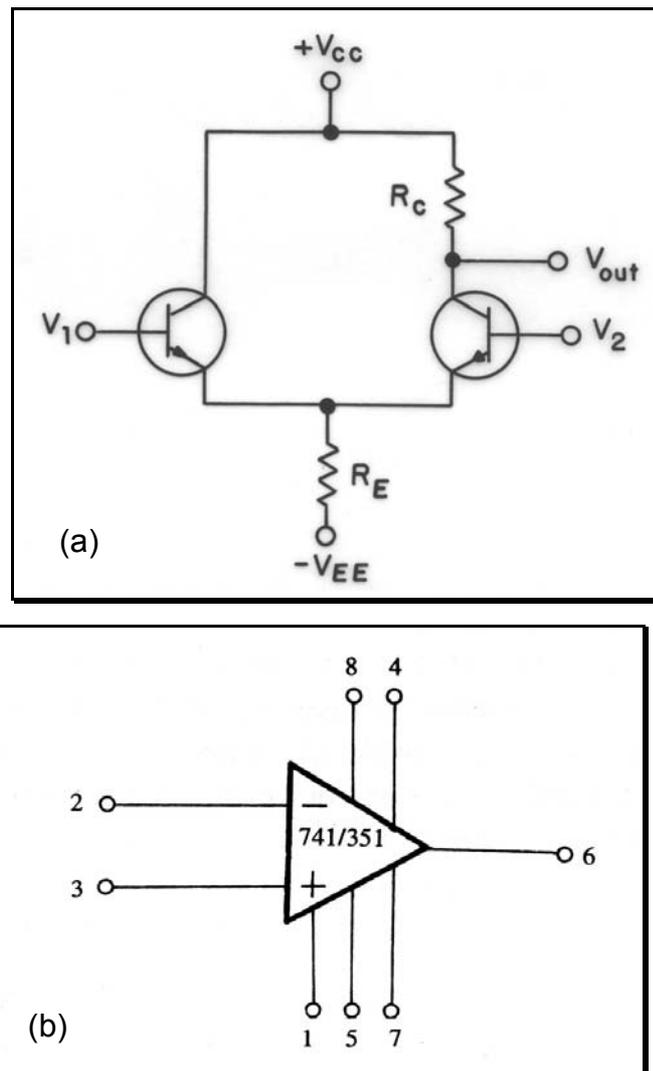


Figura 2.18 – Representação esquemática de um amplificador operacional na sua forma original (a) e na sua forma comercial mais usual (b).

A forma original do amplificador operacional mostrado na figura 2.18 por não haver nenhum capacitor de acoplamento ou de desvio, os sinais de entrada por V_1 e V_2 podem ter freqüências de qualquer valor até zero, que equivale à freqüência DC (corrente contínua). Quando o sinal de entrada V_1 aumenta, a corrente do emissor do transistor da esquerda aumenta. Isso eleva a tensão na extremidade superior de R_E , que equivale à diminuição da tensão entre a base e emissor (V_{BE}) do transistor da direita. Um valor menor de V_{BE} no transistor da direita significa uma menor corrente de coletor nesse transistor, o que aumenta a tensão de saída. Assim, o aumento de V_1 produz um aumento

resistivos externos. A forma mais usual de se fazer isso é colocar um resistor de equalização R_e no terminal não inversor do amplificador operacional [45], como indicado na figura 2.20. O valor do resistor de equalização (R_e) pode ser calculado pela equação [45]:

$$R_e = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}, \quad (2.63)$$

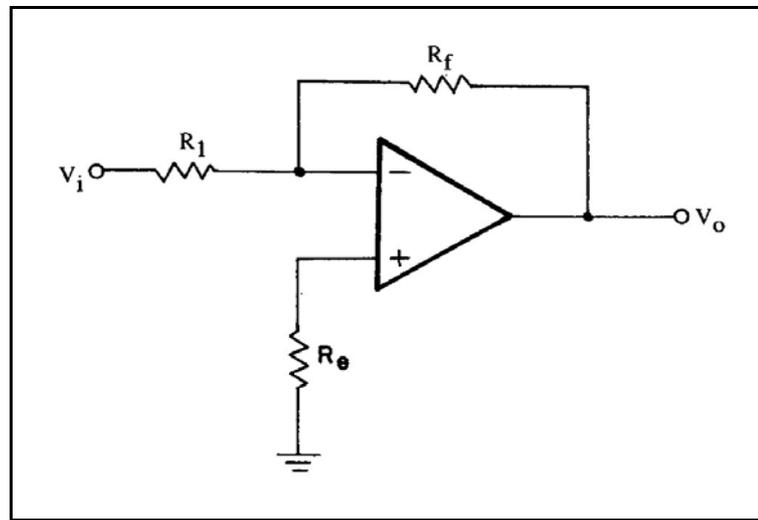


Figura 2.20 – Ajuste da tensão de OFFSET pela inserção de um resistor de equalização na entrada não inversora do amplificador operacional [45].

A importância do ajuste da tensão de OFFSET está nas aplicações onde se deseja utilizar o amplificador operacional. Para aplicações onde se deseja trabalhar com pequenos sinais (da ordem de mv) o ajuste da tensão de OFFSET deve ser levada em conta, bem como o ganho do amplificador operacional. Para um amplificador genérico, onde são definidos o sinal de entrada (E_{in}), o sinal de saída (E_{ou}) e o ganho (A_v), pode-se definir o ganho desse amplificador por [46]:

$$A_v = \frac{E_{ou}}{E_{in}} \quad (2.64)$$

Em decibéis, o ganho do amplificador operacional pode ser calculado por [46]:

$$A_v (dB) = 20 \log \frac{E_{ou}}{E_{in}} \quad (2.65)$$

A importância da utilização do ganho em decibéis (dB) justifica-se quando são utilizados grandes valores para o ganho do amplificador operacional, facilitando a representação gráfica de muitas grandezas que possuam uma ampla faixa de variação.

Caso o amplificador operacional seja perfeito (ideal), ele deve ter as seguintes características físicas [45]:

- (a) resistência de entrada infinita;
- (b) resistência de saída nula;
- (c) ganho de tensão infinito;
- (d) resposta de frequência infinita (de zero a infinitos Hertz);
- (e) insensibilidade à temperatura (DRIFT nulo).

2.7.1 Modos de Operação de um Amplificador Operacional

Basicamente um amplificador operacional trabalha de três modos [47]:

(A) – Sem Realimentação

Este modo é também chamado de malha aberta e o ganho do amplificador é estipulado pelo fabricante, ou seja, não se tem controle sobre o mesmo. A figura 2.21 mostra um diagrama esquemático de um AOP em malha aberta. Este tipo de operação é muito útil quando se utilizam circuitos comparadores.

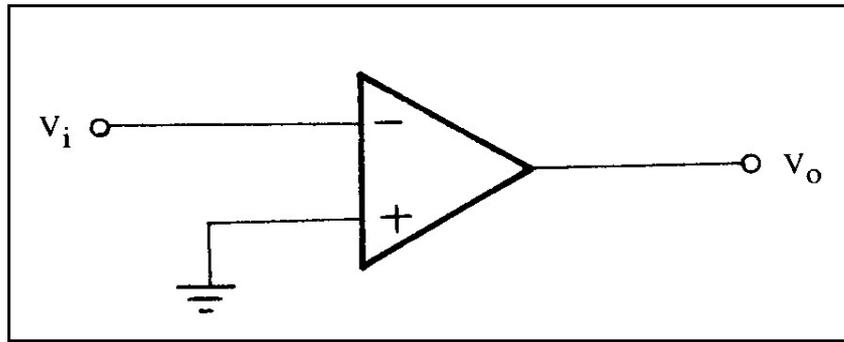


Figura 2.21 – Operação sem realimentação de um amplificador operacional.

(B) – Com Realimentação Positiva

Este tipo de operação é denominado operação em malha fechada. Apresenta como inconveniente o fato de conduzir o circuito à instabilidade. A figura 2.22 mostra um diagrama esquemático de um amplificador operacional submetido à realimentação positiva. Uma aplicação prática da realimentação positiva é encontrada nos circuitos osciladores.

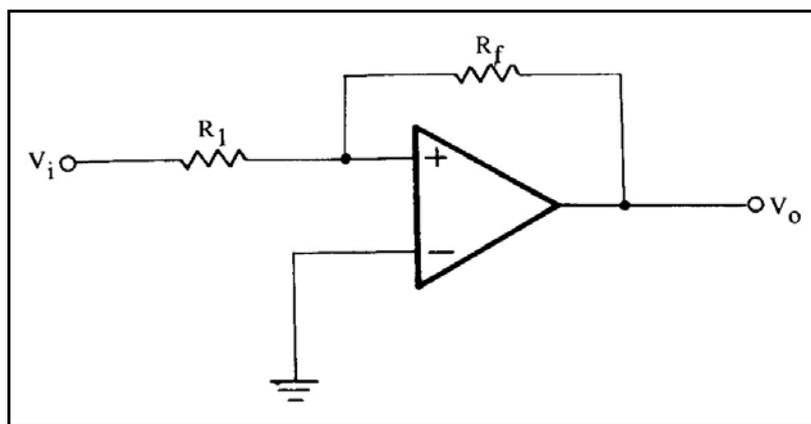


Figura 2.22 - Operação com realimentação positiva de um amplificador operacional.

Nota-se que a saída é reaplicada à entrada não-inversora do amplificador operacional por meio de um resistor de realimentação R_f . Neste

modo de operação, o AOP não trabalha como amplificador, pois sua resposta é não-linear.

(C) – Com Realimentação Negativa

Este tipo de operação é o mais importante em circuitos com amplificadores operacionais. A figura 2.23 mostra um diagrama esquemático de um AOP operando com realimentação negativa. Neste tipo de realimentação, a saída é amostrada e parte dela é levada de volta para a entrada inversora pelo resistor de realimentação R_f .

Realimentação negativa significa que o sinal que retorna tem uma fase oposta à do sinal de entrada. O sinal de realimentação negativa produz uma excepcional mudança no desempenho do circuito. As vantagens da realimentação negativa são: ganho estável, menor distorção e uma resposta maior em frequência. As aplicações dos amplificadores operacionais com realimentação negativa são inúmeras: amplificador não-inversor, amplificador inversor, somador, amplificador diferencial, diferenciador, integrador, filtros ativos, etc..

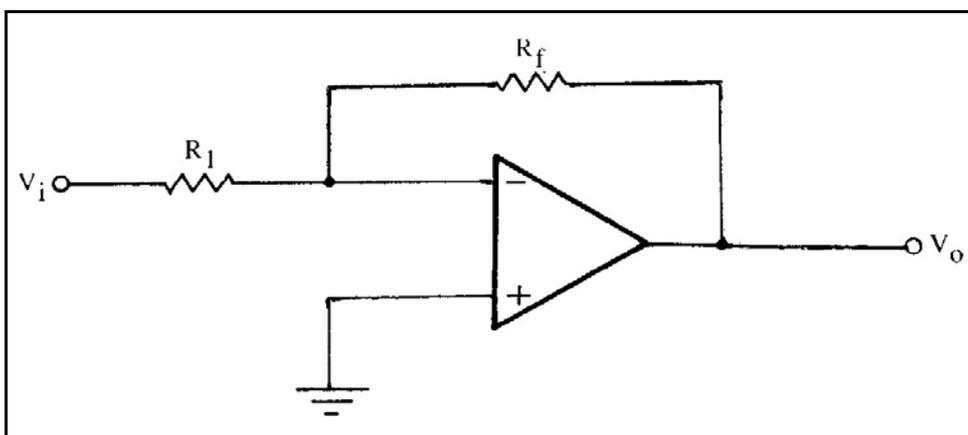


Figura 2.23 - Operação com realimentação Negativa de um amplificador operacional.

2.7.2 Curva de Resposta em Malha Aberta e em Malha Fechada

Como comentado anteriormente, o amplificador operando no modo sem realimentação é dito operação em malha aberta. Já quando ele opera com realimentação negativa é dito operação em malha fechada [46]. Em razão de o amplificador operacional ter acoplamento direto, ele não possui uma frequência crítica inferior. Essa é a razão de a resposta de frequência ser parecida com a figura 2.24. Esse gráfico mostra a curva de ganho de tensão de malha aberta em função da frequência para um amplificador operacional, sendo que a largura de faixa de malha aberta é dada por:

$$B_L = f_c , \quad (2.66)$$

sendo B_L a largura de banda e f_c a frequência crítica .

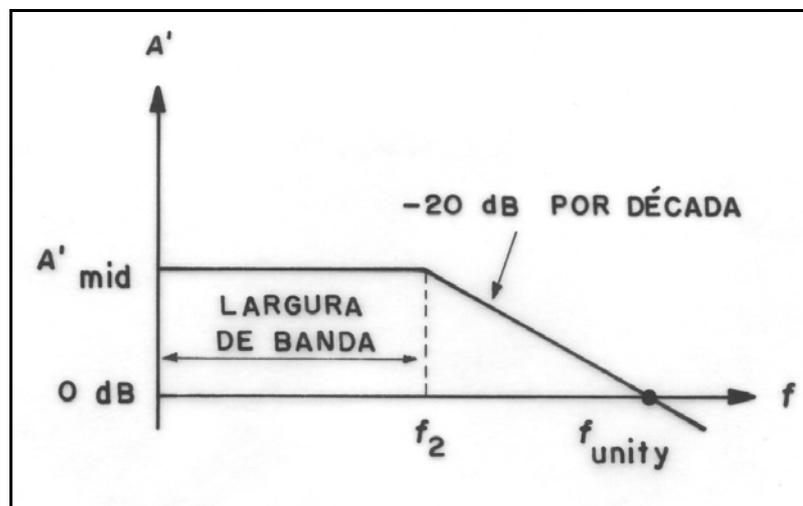


Figura 2.24 – Ganho de tensão de malha aberta versus a frequência.

A figura 2.25 ilustra o efeito da realimentação negativa na banda média para um amplificador operacional comercial [46]. Onde não há realimentação negativa, o ganho de tensão tem um valor máximo de 100.000 e a largura de banda é de 10 Hz. A 10 Hz, o ganho de tensão em malha fechada, A_{CL} , é de 70.700. Acima dessa frequência, o ganho de tensão diminui a uma taxa de 20

dB por década. Essa característica é determinada pelo projeto da estrutura interna do amplificador operacional, o qual tem um pequeno capacitor integrado na estrutura do amplificador operacional. Este capacitor interno forma uma rede de atraso, a qual é responsável pela taxa constante de atenuação. Este capacitor tem uma outra função muito importante que é a de impedir que o amplificador operacional apresente instabilidade à medida que a frequência sofre variações.

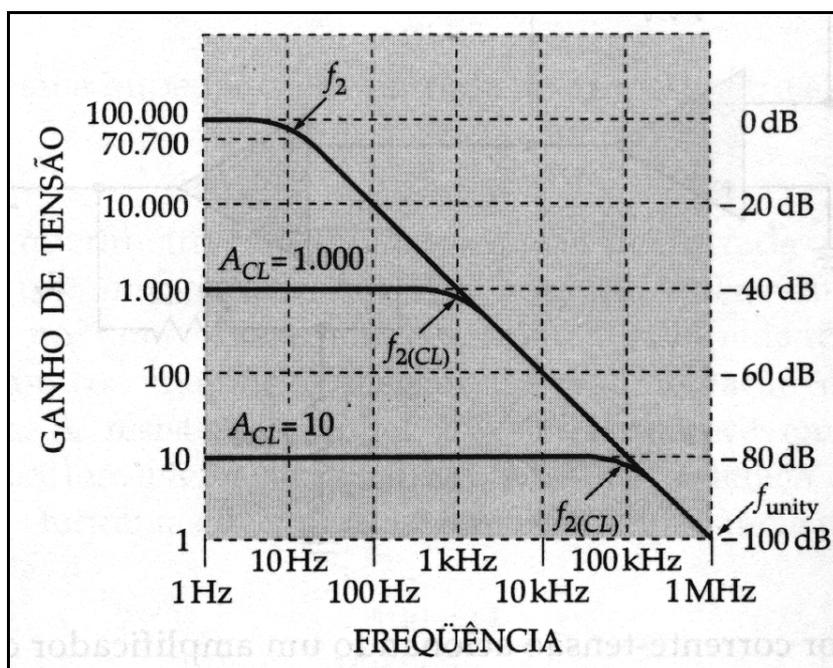


Figura 2.25 – Respostas de malha fechada e de malha aberta [46].

Quando há realimentação negativa, há menos ganho de tensão. Em compensação, podemos estipular um ganho e, conseqüentemente, a largura de faixa de trabalho do amplificador operacional.

2.7.3 Taxa de Variação do Amplificador Operacional (SR)

Uma característica muito importante dos amplificadores operacionais é a taxa de variação (SR), a qual é definida como sendo a máxima taxa de

variação da tensão de saída por unidade de tempo [47]. Normalmente o SR é dado em $V/\mu s$. Em termos gerais, o SR nos dá a velocidade de resposta do amplificador. Quanto maior o SR, melhor será o amplificador operacional. Assim, a taxa de variação pode ser calculada por [47]:

$$SR = 2\pi fV_p, \quad (2.67)$$

onde f é a frequência (Hz) e V_p é o valor de pico do sinal senoidal de saída (V).

A equação 2.62 mostra que em função do SR (determinado pelo fabricante), deverá ser estabelecido um comprometimento entre as variáveis f e V_p , ou seja, para uma determinada frequência f será obtido um valor máximo de V_p e vice-versa. Caso não se observe este fato, o sinal senoidal de saída poderá sofrer uma distorção acentuada, conforme mostra a figura 2.26.

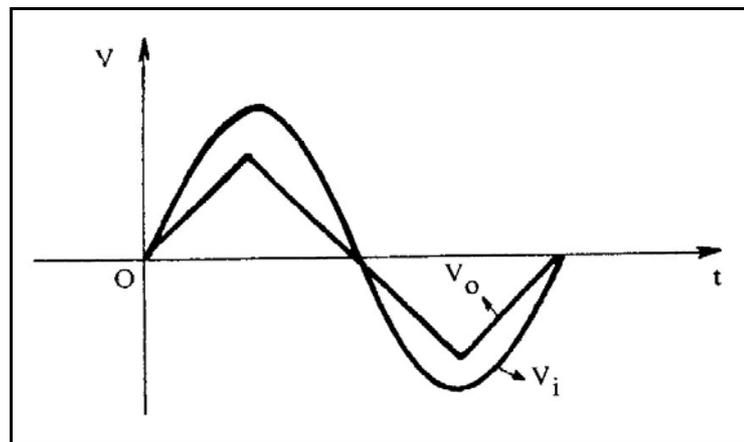


Figura 2.26 – Distorção do sinal senoidal de saída influenciada pela SR.

2.7.4 Saturação pela Tensão de Alimentação

Quando um amplificador operacional trabalhando em qualquer um dos três modos de operação atingir na saída um nível de tensão fixa, a partir do qual não se pode mais variar sua amplitude, diz-se que o amplificador operacional atingiu um nível de saturação.

Na prática, o nível de saturação é relativamente próximo do valor da tensão de alimentação do amplificador operacional. Assim, por exemplo, se alimentarmos o amplificador operacional com $\pm 15V$, a saída atingirá uma saturação positiva em torno de $+ 13,5V$ e uma saturação negativa em torno de $- 13,5V$. A figura 2.27 representa esse fato.

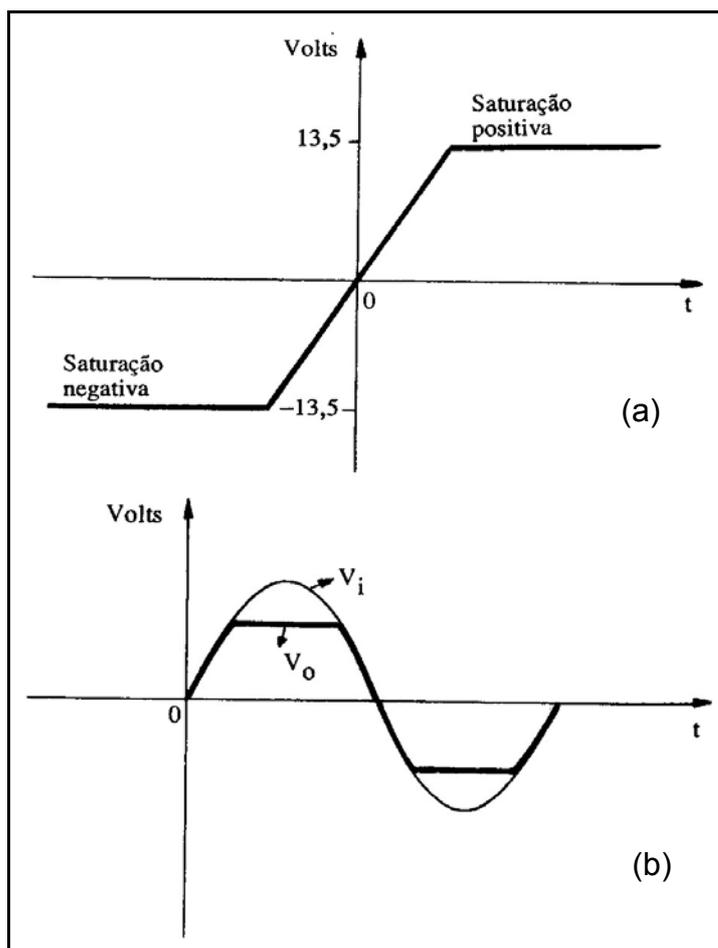


Figura 2.27 – Nível de Saturação de um amplificador operacional (a) e a forma de saída do sinal senoidal ceifado (b).

2.7.5 Ruído

Um sinal elétrico indesejável que aparece nos terminais de qualquer terminal elétrico-eletrônico é considerado um ruído. Motores elétricos, linhas de

transmissão, descargas atmosféricas, radiações eletromagnéticas etc., são considerados as principais fontes de ruído.

Um método prático para minimizar os efeitos dos ruídos em circuitos eletrônicos consiste em se fazer um bom aterramento dos mesmos, bem como dos equipamentos envolvidos e utilizar filtros eletrônicos do tipo “passa - alta” e “passa - baixa”.

Quando circuitos integrados são utilizados, uma boa proteção contra ruídos deve ser providenciada, para que esses não sejam amplificados e assim, comprometer a qualidade do sinal de saída. A maneira mais usual de se fazer essa proteção é por meio de capacitores da ordem de $0,1 \mu\text{f}$, intercalados entre a massa do circuito (terra) e os pinos de alimentação dos circuitos integrados como mostrado na figura 2.28. Estes capacitores funcionam como capacitores de passagem para as corrente parasitas, normalmente de alta frequência, produzidas ao longo dos condutores entre a fonte de alimentação e o circuito. Para uma melhor eficiência, o capacitor deve ser colocado o mais próximo possível do pino de alimentação do circuito integrado.

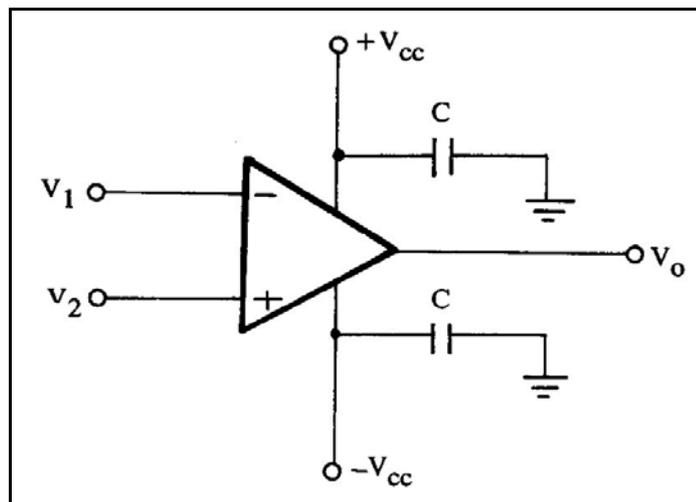


Figura 2.28 – Método de proteção contra os ruídos para um amplificador operacional.

No caso de amplificadores operacionais, por serem alimentados simetricamente, torna-se necessário a utilização de dois capacitores, conforme indicado na figura 2.28.

Quando os amplificadores operacionais são utilizados com realimentação negativa, a possibilidade de penetração de ruídos nas entradas de sinal do dispositivo, bem como os ruídos que possam surgir na sua saída, ficam bastante reduzidos graças às otimizações obtidas pela utilização da realimentação negativa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho foi subdividida em três etapas. Na primeira etapa, o projeto se concentrou na concepção e construção do equipamento automático para a obtenção das propriedades elásticas de materiais cerâmicos refratários em função da temperatura.

Na segunda etapa, desenvolveu-se um software para o controle do equipamento, para aquisição das frequências de ressonância por vibração flexional e torcional, automaticamente, e para o cálculo das propriedades elásticas utilizando essas frequências de ressonância.

Na terceira etapa, utilizando-se o equipamento desenvolvido e o software de controle e aquisição de dados foram realizados experimentos com o intuito de verificar a confiabilidade e reprodutibilidade do equipamento. A influência do coeficiente de distribuição de tamanho de partículas e do tamanho máximo de agregado na degradação mecânica de um concreto refratário afetado por choque térmico, pôde ser avaliada. Também a influência da porosidade e da temperatura nas propriedades elásticas de espumas cerâmicas pôde ser adicionalmente verificada.

3.1 Projeto e Desenvolvimento do Equipamento para Medir Módulo Elástico em Temperaturas Elevadas

O primeiro passo na etapa de desenvolvimento do equipamento para medir o módulo elástico consistiu no levantamento bibliográfico dos diversos equipamentos deste tipo, existentes para materiais, em geral e cerâmicas refratárias em particular, identificando-se vários modelos [5,7,9,10] como os mais utilizados.

Os equipamentos encontrados para determinar as propriedades elásticas de concretos refratários, não utilizam os dois modos de vibração (flexão e torção) simultaneamente na determinação do módulo de Young e do módulo de cisalhamento. Em geral, primeiramente, a amostra é posta para

vibrar por flexão e em seguida por torção, havendo a necessidade de mudança da posição dos apoios e dos transdutores para cada modo de vibração. Além disso, os equipamentos encontrados na literatura avaliam o material em busca, em geral, somente da primeira frequência de ressonância de cada um dos modos de vibração.

Para atender a necessidade da total automação do equipamento, além da confiabilidade, um equipamento modificado foi totalmente desenvolvido, utilizando a técnica de ressonância mecânica de barras e buscando as três primeiras frequências de ressonância dos modos de vibração flexional e torcional, automaticamente. Esse equipamento foi baseado em um equipamento não automático e comercial [20], de marca Elakon.

A configuração de projeto para o desenvolvimento do novo equipamento e o uso de equações matemáticas de maior precisão, o habilitou para a obtenção do módulo de Young, do módulo de cisalhamento e da razão de Poisson em tempo real e em função da temperatura.

3.1.1 Projeto Eletrônico

O projeto eletrônico do equipamento iniciou-se com o emprego de um gerador de onda senoidal microprocessado, HP modelo 33120A, para uma faixa de frequências de 0 a 15 GHz com 20 Vpp de amplitude máxima de saída e duas interfaces para comunicação de saída (RS 232 e RS 485).

Foi utilizado um osciloscópio HP modelo 54603B de 60 MHz para visualizar o sinal da vibração oriundo da amostra. Para a filtragem do sinal de saída da amostra e a sua amplificação, desenvolveu-se, respectivamente, um “filtro passa-alta” de 4 pólos, para eliminar todos os sinais indesejáveis abaixo de 1 kHz, com ganho em tensão no primeiro estágio de 1,152 e 2,235 no segundo, e um amplificador diferencial de sinais com largura de banda na faixa de 100 kHz e ganho em tensão de 100.

Para a filtragem dos sinais acima de 100 KHz, desenvolveu-se um filtro “passa-baixa” de 2 pólos, com frequência de corte em torno de 106 KHz e

ganho em tensão, aproximadamente, de 1,567.

A coleta do sinal realizada pelo computador foi através de uma placa de aquisição de dados A/D Advantech modelo PCL-818H de 16 canais com capacidade de ler sinais na faixa de 0 a 10 volts DC. A conversão do sinal senoidal obtido da amostra em um sinal DC foi realizada por meio de um retificador de onda completa de alta precisão, desenvolvido para fazer o condicionamento adequado do sinal.

O projeto dos módulos desenvolvidos, bem como o filtro “passa-alta”, amplificador diferencial de sinal, filtro “passa-baixa” e retificador de onda completa foram transferidos para uma placa de fenolite, com dupla face revestida em cobre, de modo a reduzir o tamanho do equipamento.

O teste realizado no módulo retificador de onda completa com filtro DC, consistiu na utilização do gerador senoidal, como fonte de sinal de frequência variável e amplitude fixa, captando-se o sinal contínuo (DC) de saída pela placa de conversão analógica em digital, A/D, para em seguida obter-se o seu comportamento de saída em frequência.

Para os módulos de filtragem (filtro “passa - alta” e “passa - baixa”) foi realizado o mesmo teste da etapa anterior. Injetou-se na entrada desses módulos um sinal senoidal de frequência variável e amplitude fixa. Em seguida, esse sinal de saída (módulo de filtragem) foi injetado na entrada do retificador de onda completa e posteriormente capturado na saída pela placa A/D, obtendo-se, então, a resposta do sinal de saída em função da frequência.

Para o módulo amplificador foi realizado teste semelhante aos dois anteriores, com a diferença que nesse foi utilizado sinais de baixa amplitude (< 250 mV) e não se utilizou os módulos de filtragem para que fosse obtido somente o efeito proporcionado pelo módulo amplificador.

3.1.2 Projeto do Forno para Altas Temperaturas

Esta etapa foi destinada ao desenvolvimento do forno tipo mufla para operar em temperaturas de até 1500 °C. A dimensão da câmara interna desse

forno foi de aproximadamente 150 mm x 150 mm x 300 mm. O forno foi projetado para atingir uma potência máxima de 3 kW, potência essa suficiente para atingir essa temperatura baseada nas dimensões internas da câmara. Os elementos de aquecimento de MoSi_2 (Moly D, MD 31 - I Squared R Element Co., Inc.) foram projetados para atender a essa potência e temperatura, sendo utilizados oito unidades desse elemento de aquecimento. Eles possuem forma de U, com dobra de 90° no terminal, diâmetro de 3 mm na parte quente e diâmetro de 6 mm no terminal e foram projetados para serem utilizados em temperatura máxima 1700°C .

Os elementos de aquecimento foram interligados em série, utilizando cordoalhas de alumínio (F207, I Squared R Element Co., Inc.), capaz de suportar picos de corrente de até 150 A.

Para o controle de temperatura foi utilizado um controlador programável e microprocessado (modelo CE 2404-P4-VH) da Eurotherm Controls, com saída de tensão 0 a 10 V para o controle. O envio e a recepção dos parâmetros de operação e de leitura desse controlador foram realizados pelo microcomputador, por intermédio da saída serial RS 232, utilizando o protocolo de comunicação ModBus especialmente desenvolvido para realizar essa comunicação.

O elemento de aquecimento de dissiliceto de molibdênio tem a sua resistividade aumentada gradativamente com o aumento da temperatura e em temperatura ambiente, seu valor é muito pequeno (Figura 3.1) [48]. Isso pode inicialmente levar a valores de corrente muito altos, comprometendo assim o circuito do sistema de alimentação do forno.

Por outro lado, os elementos de aquecimento são muito frágeis em baixas temperaturas e uma corrente excessiva poderá levá-los à fratura. Sendo assim, a voltagem total não deve ser aplicada quando o forno estiver frio, devendo ser aplicada gradativamente com o aumento da temperatura. Para realizar esse controle com maior precisão, foi utilizado um módulo de potência (Eurotherm, modelo 425 A) tyristorizada, capaz de operar com carga indutiva e corrente de até 125 A. O controle é feito através da voltagem DC de 0 a 10 V (oriunda do controlador de temperatura), aplicada nos seus terminais de

entrada para controle, correspondendo assim a uma potência de 0 a 100%.

Existem basicamente duas formas de controle da potência com unidades tyristorizadas [48] usadas em elementos de aquecimento de MoSi_2 : (a) disparo por ângulo de fase e (b) disparo rápido. No primeiro, a potência é

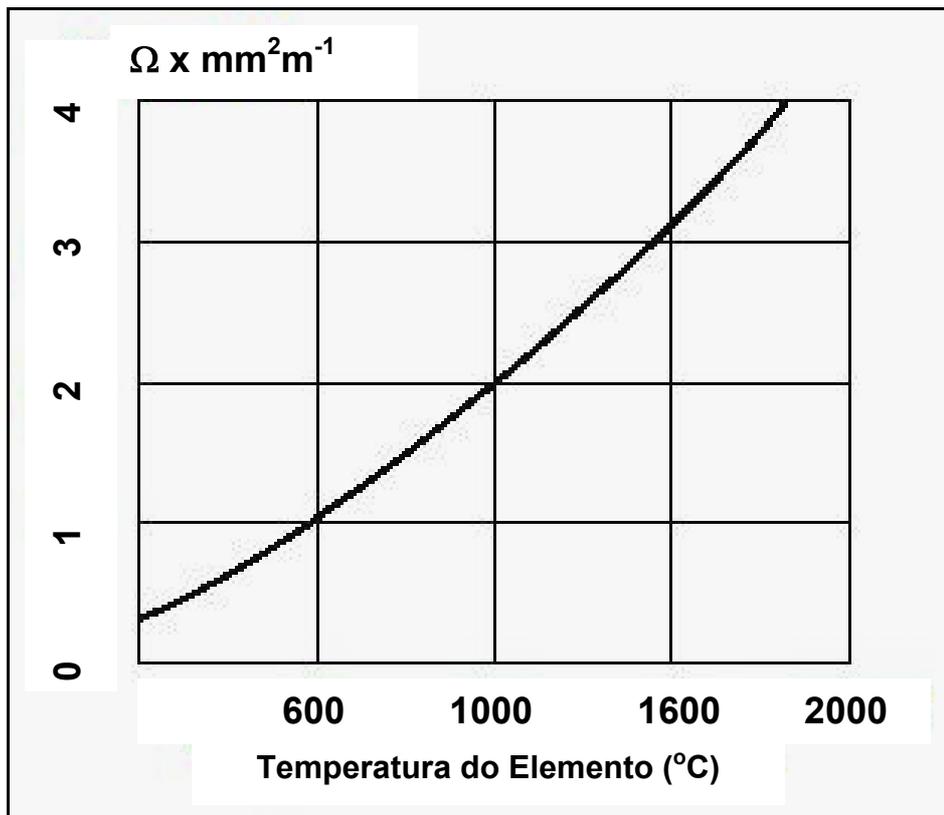


Figura 3.1 - Resistividade elétrica do elemento de aquecimento de MoSi_2 , em função da temperatura, segundo o fabricante [48].

controlada pelo fato que os tyristores conduzem apenas em uma parte do ciclo AC (figura 3.2 (a)). Os tyristores iniciam a condução com um pequeno ângulo de condução e então esse é aumentado para uma condução máxima durante um número de períodos. No segundo, a potência é controlada pela condução do tyristor em um ou mais ciclos completos e a não-condução em um ou mais ciclos completos posteriores (figura 3.2 (b)).

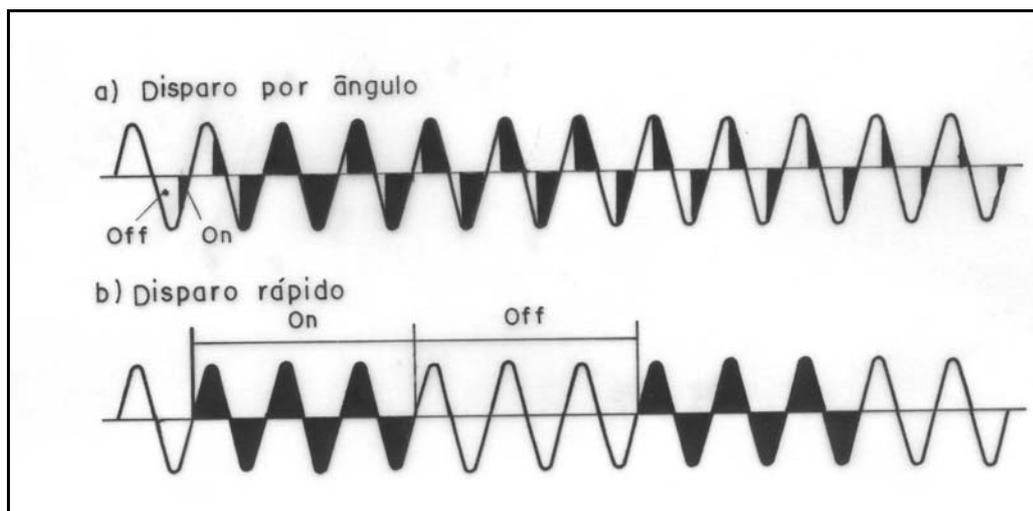


Figura 3.2 - Formas de controle de potência para serem utilizadas em elementos de aquecimento de MoSi_2 .

O modo de controle da potência utilizado neste trabalho foi o de disparo por ângulo de fase, sendo que a unidade de potência tyristorizada escolhida é compatível com esse método de controle. Assim, para completar esta etapa, um transformador de 5000 VA de potência com voltagem de entrada AC de 220 V e três voltagens de saída (50, 64 e 70 V), foi utilizado para alimentar as resistências de aquecimento. Esse transformador é alimentado diretamente pela unidade de potência tyristorizada e selecionou-se o terminal de 64 V de saída desse transformador para conectar-se aos elementos de aquecimento.

O forno para 1500 °C foi projetado com 3 camadas de revestimento cerâmico. Para a primeira camada interna, foi utilizada uma placa rígida para altas temperaturas (Unifrax, Placa Duraboard 1600) com 25 mm de espessura. Para as duas outras camadas mais externas foram utilizadas placas rígidas (Unifrax, placa Duraboard 1200) com 25 mm de espessura cada uma. A tabela 3.1 mostra as propriedades físicas típicas para estas duas placas [49]. As figuras 3.3 e 3.4 mostram as curvas de condutividade térmica para estas duas placas [49].

Tabela 3.1 - Propriedades físicas típicas do revestimento cerâmico do forno, segundo o fabricante [49]

Propriedades E Composição	Placas	
	Duraboard 1600	Duraboard 1200
Classe de Temperatura	1600 °C	1260 °C
Ponto de fusão	1860 °C	1760 °C
Densidade nominal	200 a 300 kg/m ³	220 a 330 kg/m³
Módulo de ruptura típico	6,0 x 10 ⁵ N/m ²	12,4 x 10⁵ N/m²
Perda ao fogo (24 h)	4 a 6%	6 a 7%
Composição básica:	49% Fiberfrax 51% Fiberfrax	Al₂O₃, SiO₂, ligantes

Os cálculos térmicos para o forno foram realizados por um software de simulação COSMOS, do grupo GEMM, baseados na norma ASTM C-680. Esse software, utiliza iterações nas equações de transferência de calor.

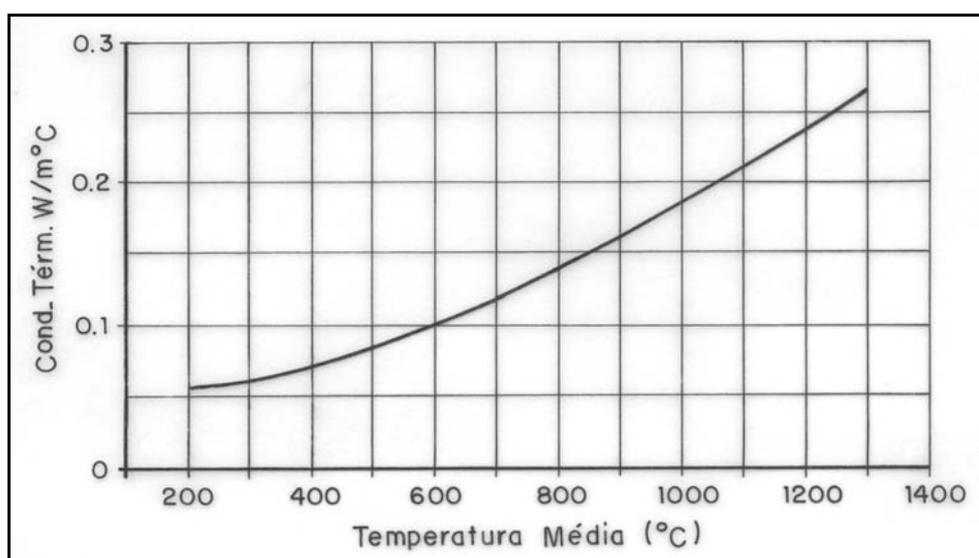


Figura 3.3 - Curva de Condutividade Térmica em função da temperatura para a placa Duraboard 1600 [49].

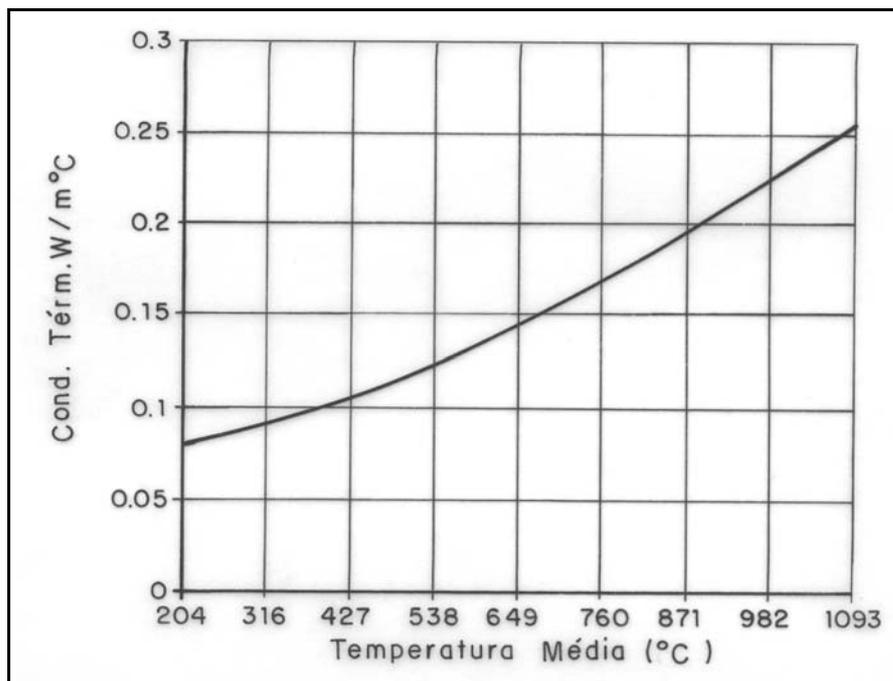


Figura 3.4 - Curva de Condutividade Térmica em função da temperatura para a placa Duraboard 1200 [49].

Para o cálculo, foi considerado um coeficiente de transferência superficial de 10 kcal/(m²h°C) e foi usado o valor de condutividade térmica de cada material, representados na figura 3.3 e figura 3.4. Assim, usando-se essas propriedades térmicas e espessura das placas, pôde-se estimar a temperatura na face externa do forno.

3.1.3 Concepção Mecânica do Equipamento

O passo seguinte à elaboração do forno foi projetar os mecanismos de posicionamento dos transdutores, as hastes metálicas (aço inox) de suporte desses mecanismos e dos transdutores. Uma representação esquemática desses dispositivos pode ser vista na figura 3.5. Os dispositivos de posicionamento dos transdutores foram alocados na parte superior do forno, devido ao arranjo experimental proposto e à forma de excitação da amostra (flexão e torção).

A passagem das hastes de acoplamento entre os transdutores e a amostra é feita por dentro de dois tubos cilíndricos, um para cada transdutor, construídos do mesmo material do revestimento cerâmico. A altura desses tubos é equivalente à espessura da camada de isolamento das paredes do forno (75 mm) e o diâmetro do furo por onde passa a haste é de aproximadamente 5 mm.

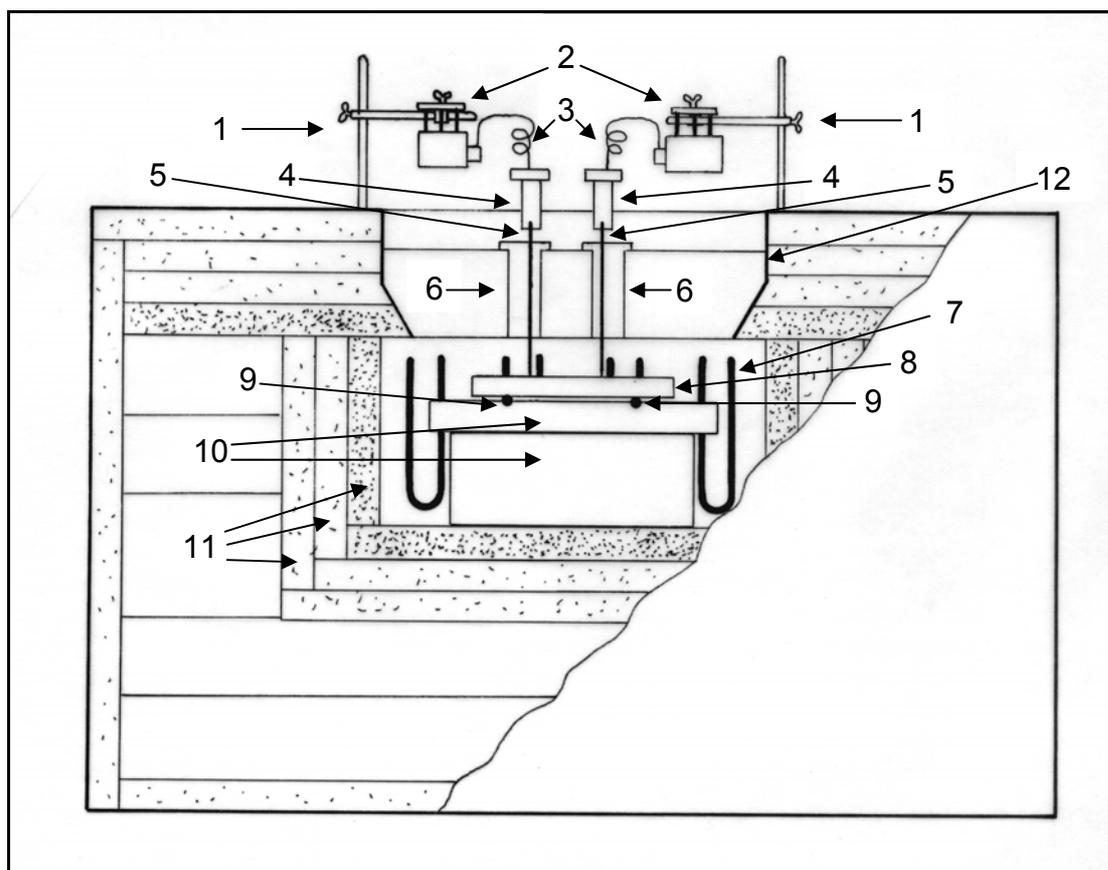


Figura 3.5 - Representação esquemática dos dispositivos para posicionamento dos transdutores na amostra. Obs. (1) Suportes, (2) reguladores do posicionamento dos transdutores, (3) molas, (4) transdutores, (5) hastes de acoplamento, (6) tubos de posicionamento dos transdutores, (7) resistências elétricas, (8) amostra, (9) apoios, (10) bases refratárias, (11) paredes do forno, (12) chapa de aço inox.

Para facilitar o posicionamento das hastes de acoplamento nos diversos tamanhos de amostras (comprimento mínimo de 120 mm e máximo de 200 mm, largura mínima de 8 mm e máxima de 30 mm), cada um dos tubos

cilíndricos foi encaixado dentro de outros dois tubos cônicos para não cair e excêntrico para posicionar a haste de acoplamento, sendo o diâmetro externo maior (60 mm) e diâmetro externo menor (50 mm) (figura 3.6). O material desses dois tubos é também o mesmo do revestimento. Foi deixada uma folga de aproximadamente 0,5 mm entre os tubos, para que um pudesse girar em relação ao outro, de forma que o furo do tubo cilíndrico por onde passa a haste do transdutor, possa sempre ser alinhado com os pontos de excitação e recepção da amostra.

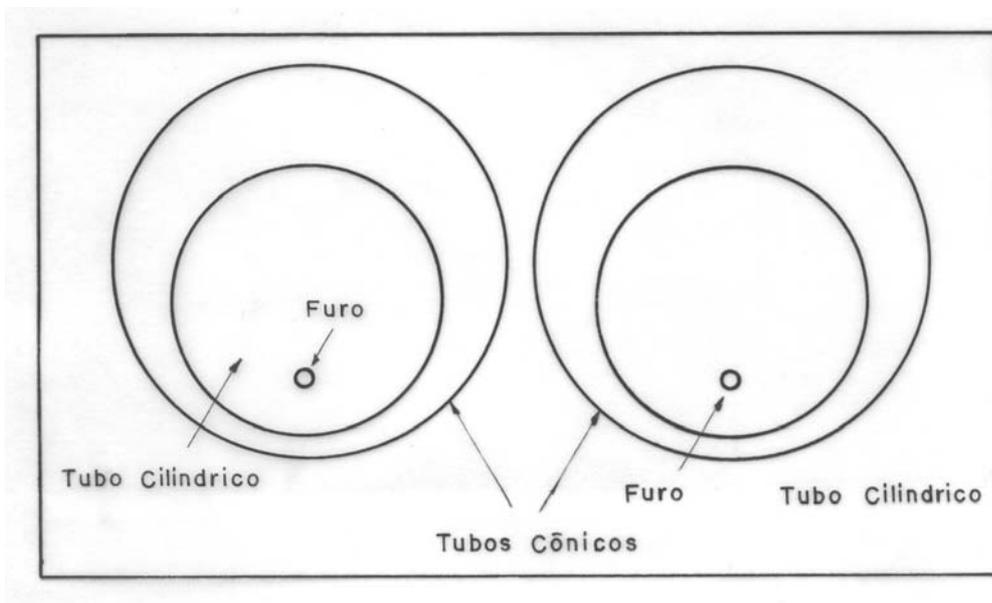


Figura 3.6 – Vista superior do forno, mostrando os tubos que proporcionam o posicionamento dos transdutores na amostra.

O arranjo experimental da figura 3.5 mostra uma concepção da montagem do corpo-de-prova para a realização dos ensaios. Para apoio das amostras, utilizaram-se suportes flexíveis de fio (NiCr) ($d = 0,5$ mm) para as amostras celulares e tubos rígidos de alta alumina para os concretos refratários. Os tubos rígidos tiveram seu comprimento na faixa de $\frac{1}{4}$ da largura da amostra e diâmetro de 3 mm, de forma a amenizar a sua influência nas vibrações, principalmente na de torção.

A distância de cada apoio à extremidade da amostra foi de

aproximadamente 0,224 do comprimento da amostra. Assim, pôde-se propiciar uma melhor varredura das freqüências no modo flexional e torcional, simultaneamente. O arranjo experimental da figura 3.5 também mostra que os transdutores de excitação e recepção foram montados sob molas flexíveis. Assim, consegue-se amenizar a pressão de contato destes com a amostra e diminuir a interferência na freqüência de ressonância da amostra.

Para a excitação das amostras e detecção da vibração, confeccionaram-se dois transdutores de um material piezoelétrico (PZT) no grupo de cerâmicas ferroelétricas, do Departamento de Física, da Universidade Federal de São Carlos. Esses transdutores tiveram a geometria de uma placa, com dimensões de 50mm x 20mm x 1mm, e freqüência de ressonância fundamental longitudinal por volta de 31 kHz.

O arranjo experimental aqui proposto possibilita a obtenção dos módulos elásticos em função da temperatura, pois se projetou uma haste de acoplamento entre os transdutores e a amostra. Essa haste cerâmica de acoplamento, foi confeccionada a partir de uma alta alumina densa, sinterizada a 1650 °C por 3 horas, com 120 mm de comprimento e 3 mm de diâmetro. Para a fixação desta haste aos transdutores foi usada uma resina epóxi de alta resistência e dureza. Os transdutores foram posicionados sobre a amostra a uma distância de aproximadamente 0,32 do seu comprimento, de cada uma das suas extremidades.

3.2 Descrição do Funcionamento do Equipamento

Um esquema de funcionamento do equipamento para medir as propriedades elásticas em altas temperaturas, utilizando o método de ressonância de barras, pode ser vista na figura 3.7. O software computacional desenvolvido para o controle e gerenciamento do equipamento, para a aquisição e a análise dos dados, envia ao gerador senoidal as informações da faixa de freqüência e da amplitude do sinal que serão utilizadas no ensaio.

Esses valores dependem da geometria, das dimensões do corpo de prova e do tipo de material que será analisado.

De posse desses valores, o gerador senoidal envia um sinal para o transdutor excitador, o qual tem a função de converter o sinal elétrico em vibração mecânica de mesma frequência e transmiti-la à amostra. O transdutor receptor tem a função, inversa, de converter a vibração mecânica da amostra

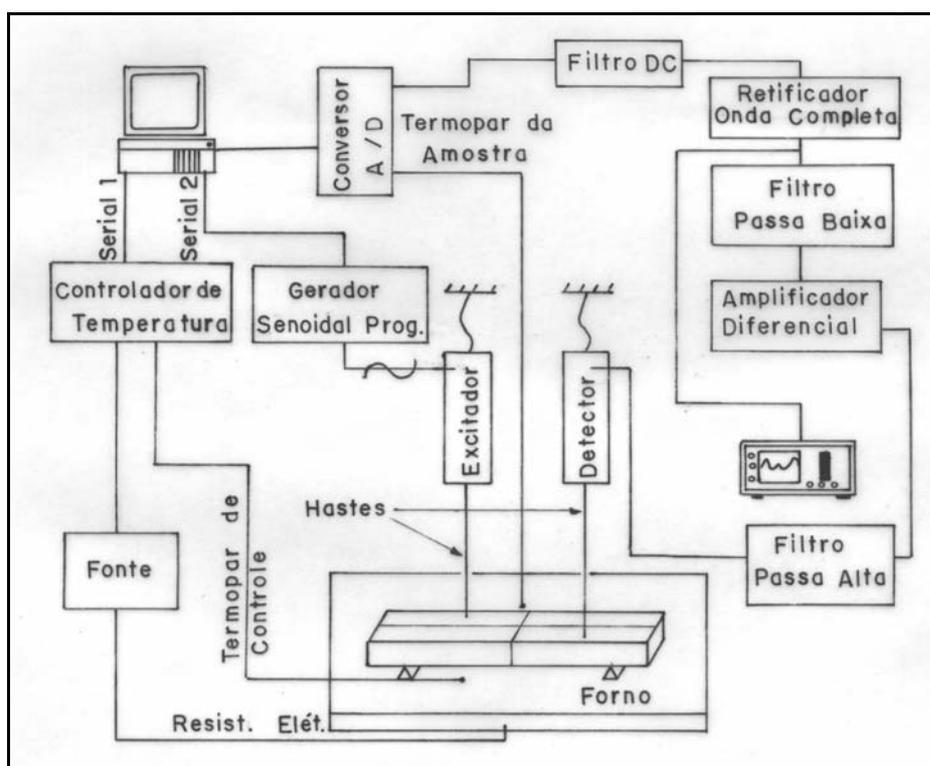


Figura 3.7 - Diagrama esquemático do equipamento desenvolvido para medir as propriedades elásticas de cerâmicas refratárias em temperaturas elevadas.

em sinal elétrico. Embora sempre exista uma resposta do material ao sinal aplicado, somente nas frequências de ressonância, o sinal de entrada é transmitido através da barra, enquanto que em outras frequências, praticamente todo o sinal é amortecido no interior da amostra.

Como o nível do sinal captado pelo detector é muito pequeno, esse precisa ser amplificado e filtrado para amenizar o nível de ruído e recompor a forma senoidal original. O condicionamento do sinal é realizado por um retificador de onda completa que entrega à placa de aquisição um sinal

contínuo com amplitude variando entre 0 e 10 V.

3.3 Testes Preliminares e Calibração

Esta etapa teve como objetivo realizar uma avaliação inicial do comportamento do equipamento para medir as propriedades elásticas em conjunto com a verificação de seu comportamento operacional.

Para verificar a correlação entre a voltagem fornecida pelo gerador senoidal ao transdutor excitador e a voltagem de saída dos três primeiros picos de ressonância flexional, utilizaram-se uma cerâmica técnica comercial à base de alumina. O estudo comparativo da largura do primeiro pico de flexão foi realizado também com esse mesmo material e com um refratário à base da alumina-carbono. A alumina técnica foi escolhida nesses ensaios, uma vez que este material tem uma grande possibilidade de apresentar um comportamento conhecido.

As dimensões do corpo de prova utilizadas nesses dois estudos foram 150 mm de comprimento, 12 mm de largura e 12 mm de espessura para a amostra de cerâmica técnica à base de alumina e de 124 mm de comprimento, 24 mm de largura e 12 mm de espessura. As características físicas e a composição química desse material são apresentadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química (em %-p) e algumas características físicas da alumina técnica.

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Álcalis	CaO	TiO ₂	MgO	ρ_v (g/cm ³)	PA (%)
99,20	0,46	0,010	0,003	0,147	0,003	0,051	3,80	0,09

Para o estudo da influência dos valores de incrementos na frequência e do tempo de duração dessa frequência na identificação do pico, também foi utilizada a mesma alumina técnica. Entretanto, as dimensões do corpo de prova foram 150 mm de comprimento, 12 mm de largura e 5 mm de espessura.

A vibração por flexão aplicada foi no sentido paralelo à espessura da amostra. A posição do ponto de excitação da amostra foi a 48 mm de cada extremidade (0,32 x l (comprimento)). A distância dos apoios às extremidades

da amostra foi de aproximadamente 33,6 mm (0,224 x l). Esses testes foram realizados à temperatura ambiente, utilizando-se apoios de fio de Ni-Cr com aproximadamente 0,4 mm de diâmetro.

As características físicas das amostras de uma alumina densa e de um refratário à base de alumina-carbono, utilizadas nos ensaios de reprodutibilidade e confiabilidade do equipamento, são apresentadas na tabela 3.3. Esses ensaios foram realizados à temperatura ambiente, aplicando-se a vibração flexional e torcional simultaneamente para excitar as amostras. As posições dos transdutores e apoios foram os mesmos utilizados nos ensaios com a cerâmica técnica.

Tabela 3.3 - Características físicas de uma alumina técnica e de um refratário alumina-carbono

Amostras	Material	Dimensões (mm)			Poros. Tot. (P _T)(%)	Dens. Geom. (ρ) (g/cm ³)
		comp.(l)	larg.(b)	esp.(t)		
Al90-1	Alumina	151,00	12,45	12,45	9,90	3,59
Al90-2	Alumina	151,00	19,70	12,45	9,88	3,58
Al90-3	Alumina	151,00	28,80	12,45	10,02	3,59
AlCar	Refratário de Alum./Carbono	152,00	24,00	12,00	6,85	2,88

As amostras de alumina, Al90-1, Al90-2 e Al90-3 foram utilizadas na verificação da influência do pico de ressonância dos transdutores e da largura da amostra no espectro de frequência, e também, na verificação da precisão e reprodutibilidade desses picos de ressonância.

A influência do pico fundamental da haste de acoplamento dos transdutores no espectro de frequência de ressonância da amostra, foi verificada com a amostra de alumina-carbono.

A confiabilidade e a reprodutibilidade dos valores de frequência de ressonância foi obtida, comparando-se os resultados das 5 primeiras frequências de ressonância obtidas por esse equipamento com os valores

obtidos em um equipamento comercial [20]. Nesse ensaio, utilizou-se uma amostra de aço (padrão do equipamento), de seção cilíndrica, com 6,98 mm de diâmetro, 149,85 mm de comprimento, densidade de 7,811 g/cm³ e razão de Poisson igual a 0,28. A amostra foi apoiada sobre fio Ni-Cr, de 0,4 mm de diâmetro a uma distância de $0,224 \times l$ (comprimento) de cada extremidade e a excitação foi através de vibração longitudinal.

3.4 Desenvolvimento do Software de Controle, Aquisição de Dados e Cálculo das Propriedades Elásticas

O controle, a aquisição dos dados e o cálculo das propriedades elásticas foram realizados por um software, desenvolvido em linguagem de programação Delphi 5.0. Nesse software, foi adicionado drivers de comunicação com a placa de aquisição de dados (A/D), fornecidos pelo fabricante. Também foi inserido no software de controle do equipamento, driver de comunicação com o controlador do forno e com o gerador senoidal, através das portas seriais do microcomputador. Esses drivers foram desenvolvidos na linguagem de programação C++, sendo que o primeiro, baseia-se no protocolo modbus e, o segundo em chamadas da API do sistema operacional (Windows).

Com esses drivers, foi possível comandar e buscar informações da placa A/D, do gerador de onda senoidal e do controlador do forno, através do barramento I/O do microcomputador, da porta serial COM 3 e da porta serial COM 4 respectivamente.

A determinação das propriedades elásticas é realizada pelo software e utiliza alguns dos equacionamentos matemáticos mostrados no capítulo 2. O software está preparado para realizar os cálculos das propriedades elásticas utilizando a excitação da amostra por vibração longitudinal, flexional e torcional.

Entretanto, neste trabalho não foi utilizado a excitação longitudinal pelo software para o cálculo das propriedades elásticas das cerâmicas celulares e das refratárias, devido à concepção do arranjo experimental dentro do forno, o qual não permite a excitação da amostra longitudinalmente. Por outro lado, também é difícil obter sinal de resposta dessas amostras por meio da excitação

longitudinal e torcional simultaneamente, utilizando-se os arranjos experimentais aqui apresentados. Assim, para o cálculo das propriedades elásticas, o software utilizou um modelamento matemático específico para cada tipo de excitação, como mostrado a seguir:

A) Excitação longitudinal.

O software permite escolher o tipo de barra que será utilizada no ensaio. No caso de seção quadrada ou retangular, serão utilizadas as equações 2.23 e 2.24 respectivamente para calcular o diâmetro equivalente por meio das dimensões da barra. Caso seja de seção cilíndrica, o diâmetro será utilizado diretamente na equação 2.16, para o cálculo do módulo de Young.

B) Excitação Torcional.

Neste caso, o módulo de cisalhamento, G , será calculado utilizando a equação 2.45. Para a seção cilíndrica, o fator de correção R_T será igual a 1. No caso da barra de seção quadrada, será utilizada a equação 2.53 para encontrar o fator de correção R_T e na de seção retangular, será utilizada a equação 2.54 no cálculo do fator R_o e assim, substituí-lo na equação 2.53, para encontrar o fator de correção R_T .

C) Excitação Flexional.

O módulo de Young, para barras de seção quadrada ou retangular, é calculado por intermédio das equações 2.26 - 2.34. Para isto, a constante de cisalhamento, K' , será obtida da equação 2.37. Se a barra for de seção cilíndrica, o módulo de Young é calculado pelas equações 2.38 – 2.40. Na condição de corpos isotrópicos, a razão de Poisson é calculada pela equação 2.44.

As equações mostradas para o caso de excitação longitudinal e flexional, levam em consideração o conhecimento prévio da razão de Poisson. Caso não se conheça esse valor, o software pode utilizar o processo iterativo mostrado na figura 2.7 e essas equações no cálculo das propriedades

elásticas.

Para a automatização do equipamento é necessário saber teoricamente, a posição de cada um dos três picos de ressonância, para cada modo de vibração, dentro do espectro de frequência. Assim, os picos obtidos experimentalmente podem ser comparados com o teórico por meio da verificação da razão entre suas frequências. A razão teórica entre o segundo (F_{f2}) e o primeiro pico (F_{f1}) de flexão e entre o terceiro (F_{f3}) e o primeiro pico de flexão é parametrizado por funções exponenciais, obtidos por meio de gráficos [30], e são explicitados pelas seguintes equações:

$$\begin{aligned} F_{f2}/F_{f1} = & 2,75631 - 3,61982.Kr - 105,41962.Kr^2 + 1216,91597.Kr^3 - \\ & - 6032,14291.Kr^4 + 11469,0978.Kr^5 - 1874,21939.Kr^6 \end{aligned}, \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} F_{f3}/F_{f1} = & 5,34582 + 2,83676.Kr - 1326,91299.Kr^2 + 22696,30695.Kr^3 - \\ & - 175133,83782.Kr^4 + 650253,26996.Kr^5 - 94723,99104.Kr^6 \end{aligned}, \quad (3.2)$$

onde Kr é igual ao raio de giro dividido pelo comprimento da amostra.

No caso de barras excitadas por vibração longitudinal e torcional, torna-se mais fácil a obtenção da razão teórica entre os picos de ressonância. Assim, a razão entre o segundo e o primeiro pico é aproximadamente 2 e entre o terceiro e o primeiro é aproximadamente 3, para o caso longitudinal e torcional. Esses valores foram obtidos diretamente das equações 2.16 e 2.45, respectivamente.

As propriedades elásticas calculadas são obtidas pelas três primeiras frequências de ressonância de cada um dos modos de excitação. Para efetuar esses cálculos em função da temperatura, as informações de densidade geométrica, as dimensões da amostra e a faixa de temperatura de trabalho devem ser fornecidas inicialmente ao software. Correções nas propriedades elásticas devido à expansão térmica do corpo, não foram realizadas para os materiais estudados à base de alumina, pois o seu coeficiente de dilatação linear é muito pequeno ($8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) e conseqüentemente o fator de correção será menor que 1%. Por meio das dimensões das amostras, o software pode estimar a faixa de varredura em frequência que o equipamento pode realizar.

No final, o módulo de Young, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson mostrado pelo equipamento, é resultado da média aritmética, calculada entre as três primeiras frequências de ressonância longitudinal, flexional e torcional.

3.5 Avaliação das Propriedades Elásticas de um Concreto Refratário após Choque Térmico

Concretos de alta alumina foram utilizados na obtenção das propriedades elásticas antes e após a ação de choque térmico. As composições foram formuladas baseando-se no modelo de empacotamento de Andreasen, variando-se o coeficiente de distribuição de tamanho de partículas ($q = 0,21, 0,26$ e $0,31$), para três tamanhos máximos de partícula de agregado ($D_L = 2800, 4750, 8000 \mu\text{m}$). Para a matriz (partículas $< 100 \mu\text{m}$) utilizaram-se aluminas calcinadas A1000 SG e A3000 FL (Alcoa – EUA) e para os agregados (partículas $> 100 \mu\text{m}$) a alumina eletrofundida branca (Alcoa – Brasil). Fixou-se o teor de água em 15 %-vol. e a dispersão foi feita com ácido cítrico no teor de $0,26 \text{ mg/m}^2$.

A mistura foi realizada num reômetro [50] com rotação constante de 33 rpm e a adição de água ocorreu em duas etapas, segundo procedimento desenvolvido por Pileggi e Pandolfelli [51]. Foi adicionado às composições 1%-peso de cimento (CA270 – ALCOA), sendo o concreto homogeneizado por mais 3 min à 33 rpm. Os corpos de prova foram sinterizados a 1600°C durante 24 horas. A tabela 3.4 apresenta as características das formulações, sendo que para cada tamanho de agregado, o valor indicado representa a média entre três amostras.

Em cada uma das três formulações ($q = 0,21, 0,26$ e $0,31$) e para cada tamanho máximo de agregado ($D_L = 2800\mu\text{m}, 4750\mu\text{m}$ e $8000\mu\text{m}$) foram realizados três ciclos de choque térmico de resfriamento sob $\Delta T = 900^\circ\text{C}$, sendo a temperatura final, a ambiente.

Foram medidas as propriedades antes e após cada ciclo de choque

térmico. O choque térmico foi realizado em um forno tubular vertical, no qual as amostras foram aquecidas até 940°C, e após 30 minutos de espera, eram deixadas cair em água circulante. Após a secagem, por doze horas, mediam-se as propriedades elásticas. Para a formulação $q = 0,26$ também foi realizado um estudo de degradação térmica fazendo-se um único ciclo de choque térmico para $\Delta T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabela 3.4 - Densidade geométrica, porcentagem em volume de matriz, porosidade total e dimensões dos corpos de prova dos concretos estudados.

Coef. And., q	T. Max. Agregado D_L (μm)	Dens. Geom. ρ (g/cm^3)	Vol. de Matriz V_m (%)	Poros. Total P_T (%)	Comp. l (mm)	Larg. b (mm)	Espes. t (mm)
0.21	2800	3.30 ± 0.02	49,00	18,00	147.80 ± 0.10	24.50 ± 0.03	24.90 ± 0.45
	4750	3.23 ± 0.02	37,70	15,90	149.12 ± 0.03	25.32 ± 0.24	25.25 ± 0.10
	8000	3.23 ± 0.03	39,50	17,20	148.95 ± 0.07	24.62 ± 0.03	25.20 ± 0.42
0.26	2800	3.35 ± 0.02	38,10	16,40	148.90 ± 0.60	25.10 ± 0.40	24.30 ± 0.20
	4750	3.23 ± 0.02	33,10	16,10	149.05 ± 0.55	24.90 ± 0.10	24.67 ± 0.02
	8000	3.20 ± 0.04	30,20	16,00	149.92 ± 0.27	25.25 ± 0.25	25.07 ± 0.12
0.31	2800	3.15 ± 0.02	32,30	18,60	148.93 ± 0.19	25.18 ± 0.27	25.30 ± 0.39
	4750	3.21 ± 0.03	28,20	15,70	149.58 ± 0.10	25.42 ± 0.26	25.30 ± 0.35
	8000	3.15 ± 0.03	24,90	17,50	150.07 ± 0.12	25.27 ± 0.12	25.37 ± 0.38

As propriedades elásticas foram obtidas aplicando-se vibração de flexão e de torção simultaneamente, em temperatura ambiente. Maiores detalhes sobre as medidas podem ser obtidos em Paiva e colaboradores [52]. Foi realizada uma varredura na frequência de 1 kHz a 40 kHz nas amostras a fim de se obter os três primeiros picos de ressonância para cada um dos modos de vibração. A identificação desses picos foi realizada pelo software desenvolvido,

o qual foi capaz de controlar o sistema e apresentar em tempo real as propriedades elásticas. As três primeiras frequências de ressonância de cada um dos modos de vibração foram utilizadas nos cálculos, que geraram três valores de E , três de G e três de μ . Os valores finais são médias dentro desses conjuntos de três valores para cada propriedade.

3.6 Avaliação das Propriedades Elásticas de Espumas Cerâmicas em Altas Temperaturas

As amostras de espuma cerâmica foram preparadas através da agitação de suspensões aquosas de alumina (A-1000 SG, Alcoa, Brasil) contendo um agente surfactante. Após a formação da espuma, esta foi gelificada através da polimerização *in situ* de monômeros orgânicos previamente adicionados. O procedimento detalhado desse processo é descrito no trabalho de Ortega e colegas [53].

As amostras de cerâmica porosa celular foram utilizadas na obtenção das propriedades elásticas para diferentes temperaturas. A queima das amostras foi realizada a uma taxa de $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, permanecendo nesta temperatura por 1 hora, para a eliminação dos orgânicos. Em seguida continuou-se o aquecimento a $3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$, para a sinterização, onde permaneceu por 3 horas.

A porosidade total e a porosidade aberta foram determinadas através do princípio de Arquimedes. A tabela 3.5 apresenta as características e as propriedades físicas para cada uma das amostras.

Para cada uma das amostras foram realizadas as medidas das propriedades elásticas aplicando-se simultaneamente vibração mecânica de flexão e de torção desde a temperatura ambiente até $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, em intervalos de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Foi realizada uma varredura na frequência de 1 kHz a 40 kHz nas amostras a fim de se obter os três primeiros picos de ressonância para cada um dos modos de vibração.

Os apoios de fio Ni-Cr foram colocados a uma distância de aproximadamente $0,224 \times l$, a partir das extremidades da barra (l é o comprimento da barra). Os pontos de contato do excitador e receptor foram localizados a $0,32 \times l$. Essas posições do excitador e do receptor favorecem as vibrações de flexão e de torção simultaneamente.

No estudo da porosidade, utilizaram-se as equações 2.59, 2.60 e 2.62.

Tabela 3.5 - Características e propriedades físicas das esponjas cerâmicas.

Amostras	Dens. Geom. ρ (g/cm ³)	Comp. l (mm)	Largura b (mm)	Espes. t (mm)	P. Total P_T (%)	P. Aberta P_A (%)
1	1,54	154,15	22,30	12,30	61,34	58,97
2	1,21	150,40	22,30	9,00	69,63	67,92
3	0,91	146,35	19,45	7,45	77,26	77,06
4	0,85	144,40	20,10	7,10	78,77	78,28
5	0,73	140,90	19,85	8,50	81,63	81,67
6	0,59	121,60	19,95	8,70	85,21	84,63

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Descrição dos Componentes do Equipamento

4.1.1 Condicionamento do Sinal

O equipamento projetado foi construído aproveitando-se um gerador de onda senoidal programável pela porta serial e confeccionando-se as placas eletrônicas do módulo de amplificação dos sinais, filtro “passa-alta”, “filtro passa-baixa” e retificador de onda completa. O gerador de onda senoidal é capaz de gerar frequências desde alguns Hertz até 15 MHz, com amplitude variando desde alguns milivolts a 10 V, medidos pico a pico.

As informações fornecidas ao gerador são enviadas pelo microcomputador, através de sua porta serial. O equipamento desenvolvido utiliza duas portas seriais. Para fazer essa comunicação, foi inserida no barramento I/O do microcomputador uma placa de expansão para quatro portas seriais.

A detecção de sinais em amostras cerâmicas, utilizando a técnica de ressonância de barras, deve ser cada vez mais aperfeiçoada, pois a amplitude desses sinais é muito baixa. A qualidade desse sinal diminui à medida que aumenta o grau de amortecimento (provocado, por exemplo, pela porosidade) do material ensaiado, necessitando, assim, de amplificação e uma filtragem eficiente. A figura 4.1 mostra o circuito esquemático que foi desenvolvido e utilizado no equipamento para medir as propriedades elásticas de materiais cerâmicos, desde a etapa de filtragem e amplificação até a etapa de retificação do sinal.

Observa-se que a primeira etapa é composta por um filtro “passa - alta” de quatro pólos com aproximação do tipo Butterworth, o qual é formado por quatro circuitos de acoplamento capacitor-resistor ($C_1 - R_9$, $C_2 - R_{10}$, $C_5 - R_{14}$ e $C_6 - R_{13}$) e por dois amplificadores operacionais (U_1 e U_2). Através dos valores dos capacitores e resistores utilizados, este filtro foi projetado para atenuar todos os sinais que estiverem abaixo de 884 Hz ($C_1 = C_2 = C_5 = C_6 = 0,15 \mu\text{F}$ e

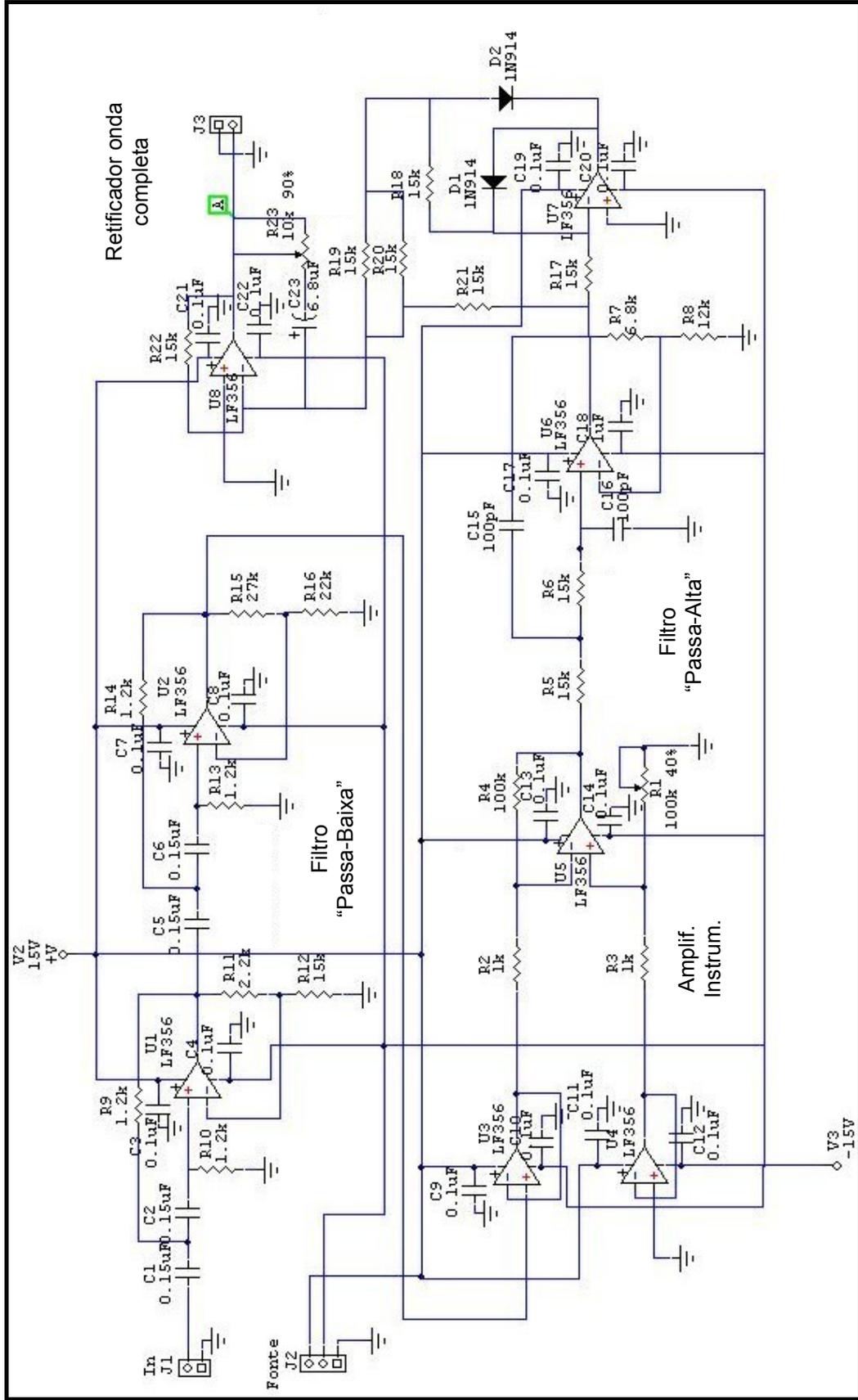


Figura 4.1 - Circuito esquemático da etapa de amplificação e condicionamento do sinal do equipamento para medir módulos elásticos.

$R_9 = R_{10} = R_{13} = R_{14} = 1,2 \text{ k}\Omega$). Um filtro de quatro pólos é formado por duas seções, sendo que a primeira é formada por um filtro de dois pólos com ganho de 1,152 e, a segunda por um filtro de dois pólos com ganho de 2,235 [46]. Observa-se através dos pares de resistores $R_{11} - R_{12}$ e $R_{15} - R_{16}$ do diagrama da figura 4.2 que os ganhos para esse filtro estão coerentes com esses valores de projeto, como pode ser visto pelos ganhos calculados de 1,146 e 2,227, respectivamente para cada seção.

A resposta esperada dos filtros para a aproximação do tipo Butterworth é uma “resposta plana”, ou seja, não possuem nenhum tipo de ondulação na sua curva. O comportamento apresentado por esse filtro na figura 4.2 mostra que ele não apresenta ondulações na sua curva, comportando-se realmente como um filtro do tipo Butterworth.

Para efeitos de comparação, a figura 4.2 também mostra outro filtro “passa-alta”, do tipo passivo (formado somente por capacitor e resistor) com frequência de corte aproximadamente igual a 1 kHz. Verifica-se que o filtro ativo possui uma melhor resposta na filtragem dos sinais abaixo de 500 Hz em relação ao filtro passivo, pois nessa faixa de frequência a amplitude do sinal é muito menor comparado com a amplitude do sinal do filtro passivo.

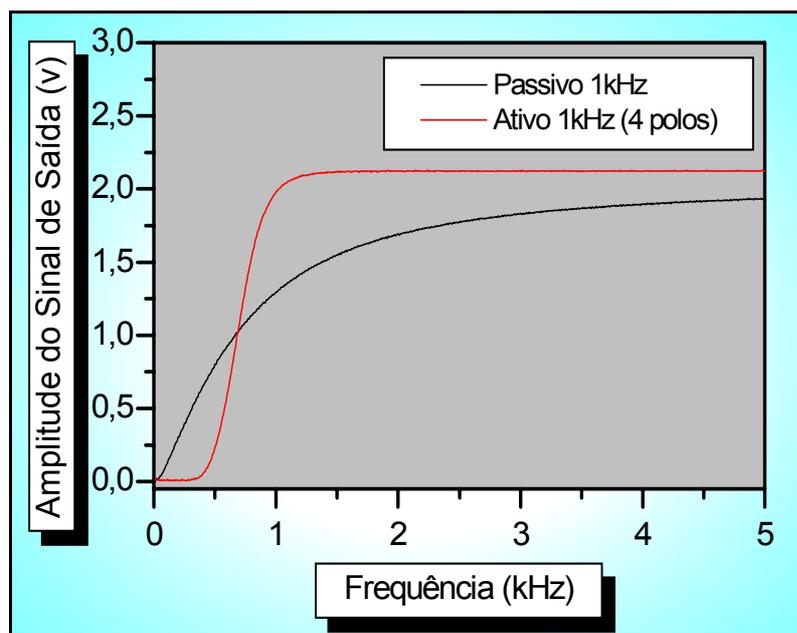


Figura 4.2 - Resposta em frequência do filtro ativo e passivo “passa-alta” para uma frequência de corte abaixo de 1 kHz.

A resposta rápida do filtro nessa faixa é de grande importância, pois se verificou na prática que a maior parte dos ruídos estavam abaixo dessa frequência de corte, principalmente o ruído provocado pela rede elétrica (60 Hz) que possuía o maior nível de amplitude. Conseqüentemente, com o filtro ativo “passa-alta” obteve-se um sinal de melhor qualidade e maior amplitude aliada ao ganho introduzido nesse filtro. Um fator bastante positivo para esse filtro ativo é o fato de apresentar um ganho de tensão praticamente constante na faixa de 1 a 50 kHz, o que corresponde à faixa inicial e final de varredura do equipamento, respectivamente.

Os ruídos captados pelo equipamento não ficaram somente restritos à faixa de baixa frequência, alguns também apareceram na faixa superior aos 100 kHz. Para tentar atenuar ou eliminar os ruídos acima dessa frequência, foi projetado um filtro ativo “passa-baixa” de dois pólos, com frequência de corte aproximadamente de 106,1 kHz.

O diagrama esquemático mostrado na figura 4.1 apresenta o filtro “passa-baixa” de dois pólos com aproximação do tipo Butterworth, o qual é formado por dois circuitos de desvio (capacitores C_{15} e C_{16}) e pelo amplificador operacional U_6 . O ganho projetado para esse filtro foi de aproximadamente 1,567, o qual ficou bem próximo do ganho teórico de 1,586 para este tipo de filtro [46].

A figura 4.3 mostra a resposta em frequência desse filtro “passa-baixa”. Pode-se observar que ele não apresentou qualquer tipo de ondulação na sua curva, comportando-se como um filtro do tipo Butterworth. Para frequências superiores à de corte, o decréscimo da amplitude desse filtro com o aumento da frequência não foi tão acentuada quanto a atenuação apresentada pelo filtro passa alto. Isto está relacionado ao menor número de pólos desse filtro em relação ao filtro “passa-alta”, pois quanto maior o número de pólos, a resposta do filtro se aproxima da resposta ideal, ou seja, a partir da frequência de corte a amplitude do sinal se torna nula.

Apesar da menor atenuação dos sinais para o filtro “passa-baixa”, não houve comprometimento dos resultados, pois os ruídos de alta frequência que perturbavam o sinal vindo da amostra estavam muito acima dos 100 kHz.

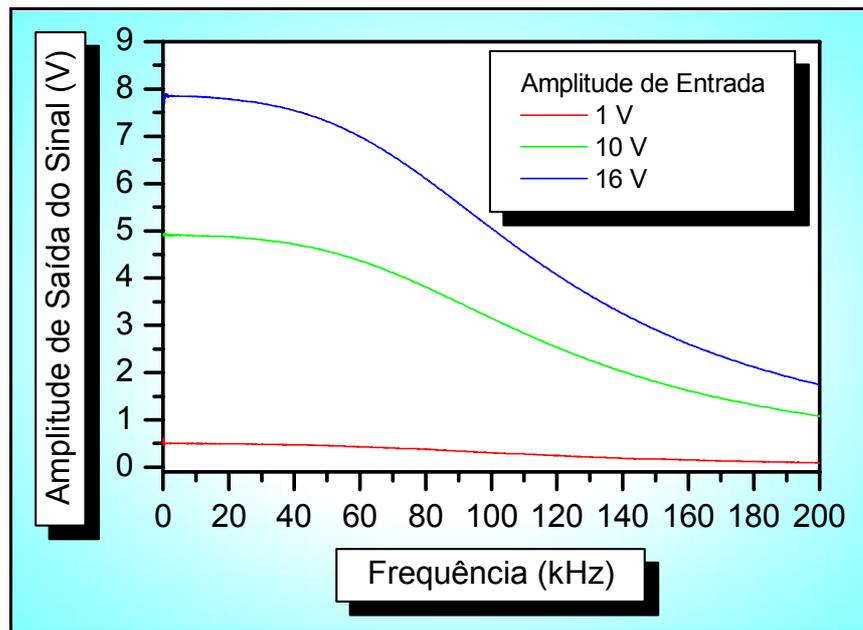


Figura 4.3 - Resposta em Frequência do filtro ativo “passa-baixa”.

O estágio de amplificação de sinal pode ser vista também, no diagrama da figura 4.1. Observa-se que esse amplificador é baseado na arquitetura de um amplificador de instrumentação, ou seja, um amplificador diferencial otimizado para ter alta impedância de entrada e elevada razão de rejeição em modo comum (CMRR).

O amplificador de sinal é formado basicamente pelo estágio de um seguidor de tensão em cada uma das entradas (amplificadores operacionais U_3 e U_4) e pelo amplificador diferencial (amplificador operacional U_5). Como a amplitude máxima do sinal proveniente do transdutor receptor não foi superior aos 50 mV, o ganho projetado para este amplificador foi de 100 X, o que pode ser facilmente demonstrado pela razão entre os pares de resistores R_4/R_2 e R_1/R_3 .

Com esta configuração, através da figura 4.4 pode-se observar a perda de amplitude do sinal em função da frequência de varredura para esse amplificador. Verifica-se que a queda no nível de amplitude do sinal amplificado é pequena para frequências abaixo de 50 kHz, habilitando-o a operar na faixa de 0 a 50 kHz sem comprometer a amplitude do sinal de entrada no amplificador.

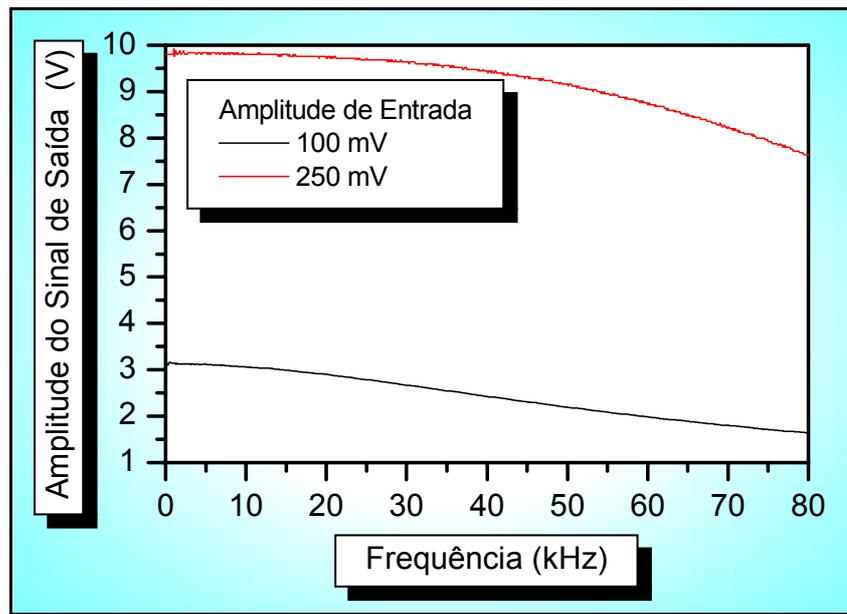


Figura 4.4 - Resposta em frequência do amplificador de instrumentação para uma largura de banda de 0 a 80 kHz

Ao se projetar um amplificador de instrumentação, deve-se levar em consideração várias características físicas do amplificador operacional utilizado no projeto, tais como a curva de resposta em malha aberta e em malha fechada, a máxima variação de tensão de saída por unidade de tempo (Slew-Rate), nível de saturação, etc.

Tomando-se por base a curva de resposta em malha aberta da folha de dados [54] para o amplificador operacional LF356, obtém-se a frequência máxima de aproximadamente 50 kHz para manter um ganho de tensão de 100 (40 dB) constante. Acima dessa frequência, o ganho em tensão apresenta uma atenuação constante de 20 dB/década [45]. Isso explica a razão do decréscimo acentuado na amplitude do sinal após a frequência de 50 kHz, como pode ser visto na figura 4.4.

A tensão máxima que provoca a saturação na saída do amplificador operacional LF356, alimentado por uma tensão de ± 15 V, é de aproximadamente ± 13 V ($26 V_{pp}$) [54]. Valor este que é superior à tensão máxima de trabalho de ± 10 V ($20 V_{pp}$). Utilizando-se a equação (2.47), e substituindo-se o valor da tensão de $26 V_{pp}$ e o valor do Slew-Rate ($SR = 12$

V/ μ s) [54] nesta, obteve-se a freqüência máxima, que poderia provocar uma distorção acentuada no sinal senoidal de saída, que é de 73,4 kHz. Como a freqüência máxima de trabalho é 50 kHz, não houve, portanto, distorção no sinal senoidal de saída desse amplificador.

O último estágio mostrado no diagrama esquemático da figura 4.1 é do retificador de onda completa de precisão, utilizado para converter o sinal AC senoidal em DC. Esse retificador é composto basicamente pelos amplificadores operacionais, U_7 e U_8 e pelo filtro RC (R_{23} , C_{23}). Ele é capaz de retificar sinais na faixa de 100 mV. Um diodo retificador comum não consegue retificar sinal de amplitude muito baixa, pois o mesmo não conduz quando polarizado diretamente com tensões abaixo de 700 mV (supondo diodo de silício).

A figura 4.5 mostra a curva de resposta em freqüência, como sinal DC de saída, do retificador de precisão em função da amplitude do sinal AC de entrada (0.1 V, 1 V, 5 V, 10 V e 20 V). Observou-se que se variando a freqüência do sinal senoidal de entrada a amplitude do sinal DC de saída permanece constante, como era esperado. O Retificador de onda completa mostrou-se eficaz na retificação de sinais desde pequenas amplitudes

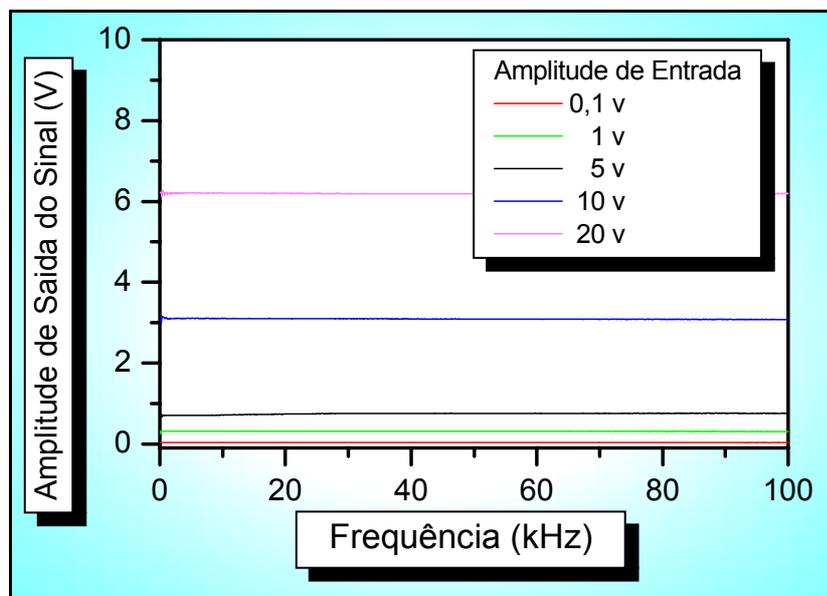


Figura 4.5 - Amplitude do sinal DC de saída em função da freqüência do retificador de onda completa, alimentado por sinais AC de diversas amplitudes.

(0.1 V) a grandes amplitudes (20 v). Essa característica é muito importante para que não haja detrimento no sinal senoidal de saída de maneira a comprometer a identificação dos picos de ressonância da amostra. Observa-se também que o filtro RC utilizado foi eficiente na filtragem do sinal, pois não foi observada ondulação no sinal DC de saída.

A medida das frequências de ressonância da amostra ocorre pela detecção de máximos no transdutor receptor. Na ressonância, a amplitude de vibração do corpo de prova aumenta muito, formando um máximo. Frequências fora da ressonância ou são totalmente amortecidas ou permanecem com baixa amplitude.

4.1.2 Transdutores e Acoplamento

Para que fosse possível induzir uma vibração na amostra e obter o sinal de resposta na outra extremidade, os transdutores excitador e receptor foram projetados de forma a cobrir a faixa de frequência desde 500 Hz até 40 kHz. Essa faixa de frequência é decorrente dos tipos de amostras e suas dimensões.

Esses transdutores foram confeccionados no laboratório de cerâmicas ferroelétricas, do Departamento de Física da UFSCar. Para isto, utilizou-se uma cerâmica piezoelétrica (PbZrO_3), em forma de placa nas dimensões de 50x15x1 mm. O eletrodo dos transdutores foi depositado nas duas faces opostas de maior dimensão e o sentido de sua polarização permitiu ao cristal vibrar com maior intensidade no sentido longitudinal, para essa faixa de frequência.

A adaptação dos transdutores ao arranjo experimental, foi realizada pela colagem destes a uma peça de baquelite (figura 4.6), utilizando-se para isto um adesivo à base de massa epóxi. A utilização desse conjunto em alta temperatura é feita utilizando-se uma haste cilíndrica de alta alumina de 150 mm de comprimento com diâmetro de 3 mm. Esse tubo de alumina foi colado diretamente nos transdutores (figura 4.6) com adesivo à base de massa

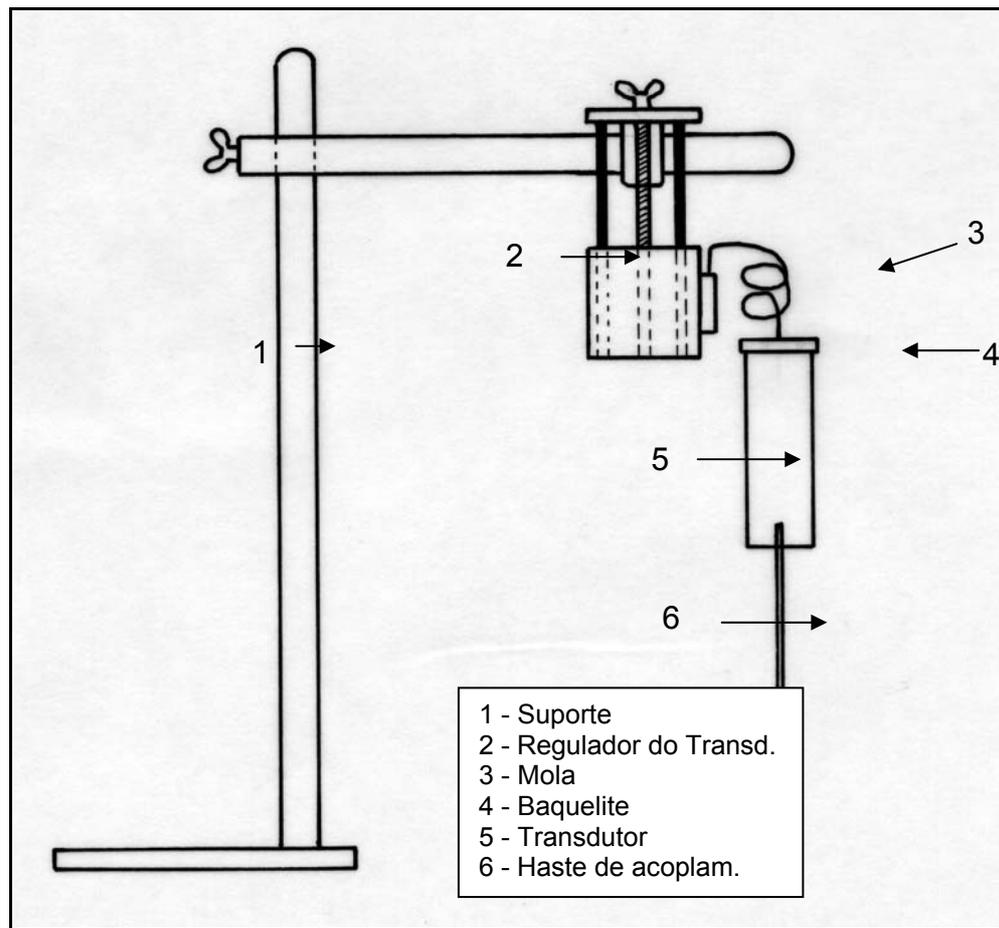


Figura 4.6 - Conjunto de suporte, transdutor, mola, reguladores e haste de acoplamento para altas temperaturas.

epóxi para permitir a transmissão da vibração à amostra em temperaturas elevadas. Esse elevado comprimento da haste faz-se necessário para evitar o superaquecimento dos transdutores e conseqüentemente não danificá-los.

4.1.3 Forno

O forno tipo mufla (figura 4.7) foi desenvolvido para uma temperatura máxima de 1600 °C, sendo dimensionado para uma potência máxima de 3 kW. O revestimento cerâmico do forno é constituído por uma associação de três placas refratárias (UNIFRAX) (figura 4.8), sendo a interna constituída de uma

fibra rígida para 1600 °C (duraboard 1600), a intermediária e a externa de uma fibra rígida para 1260 °C (duraboard 1200).

A baixa condutividade térmica e a espessura do material isolante (76 mm) ofereceram ao forno um bom isolamento térmico, resultando numa temperatura na face externa do revestimento cerâmico de aproximadamente 250 °C, no máximo.

O uso de dois ventiladores nas laterais do forno proporcionou a retirada do ar quente entre a face externa do revestimento e a chapa de cobertura do forno, reduzindo assim a temperatura externa para valores abaixo de 100 °C. A baixa temperatura nessa região é importante para não oxidar a camada de alumínio que reveste os terminais das resistências, evitando maiores danos nos terminais dos mesmos.



Figura 4.7 - Forno elétrico para realização dos ensaios a altas temperaturas.

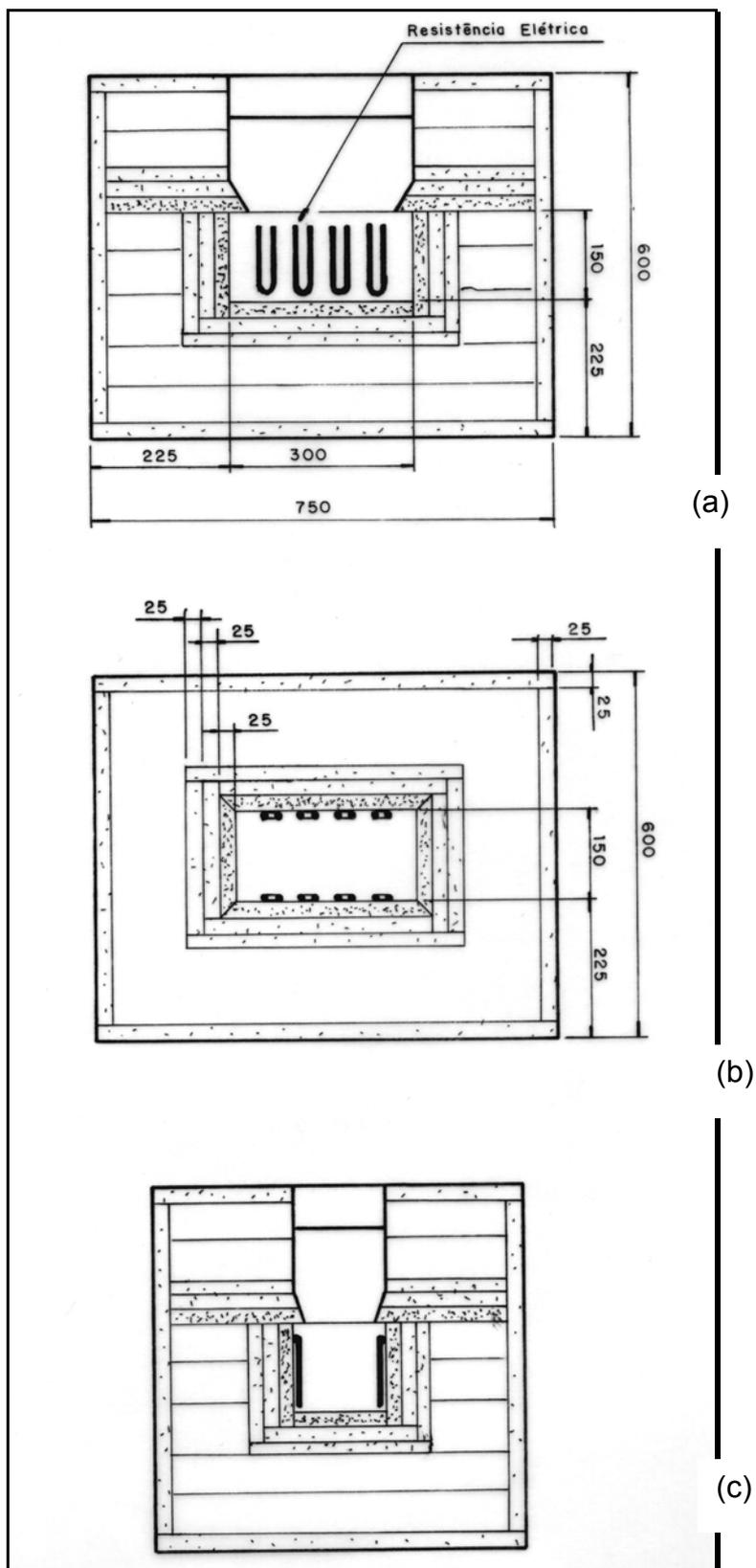


Figura 4.8 - Detalhes construtivos das paredes do forno elétrico para altas temperaturas. (a) vista lateral, (b) vista superior e (c) vista frontal.

Para que fosse possível um aquecimento uniforme na amostra, foram projetadas oito (8) resistências para o forno, utilizando-se quatro (4) resistências de cada lado e interligando-as em série (figura 4.9). Essas resistências são da marca I Squared R Element Co., modelo Moly D, MD 31.

O projeto elétrico de alimentação das resistências levou em conta a temperatura máxima do forno (1600 °C) e a temperatura máxima da resistência (1700 °C), pois a sua resistividade elétrica aumenta com o aumento da temperatura. A potência máxima calculada para cada resistência foi de 375 W. Para uma resistência total a quente (1600 °C) em torno de 0,171 Ω , a voltagem necessária para cada resistência elétrica é de aproximadamente 8 V, liberando assim uma corrente de aproximadamente 47 A.



Figura 4.9 - Esquema de interligação das resistências elétricas.

A voltagem de alimentação das resistências é fornecida por um transformador de 5000 VA de potência, o qual foi projetado para fornecer três voltagens diferentes no seu secundário, 50 V, 60 V e 70 V, com 220 volts na bobina primária. Como a voltagem total necessária nas resistências para atingir a potência de 3 kW é 64 V, utilizou-se a voltagem de 60 V fornecida pelo terminal intermediário do transformador.

A baixa resistividade de um elemento de aquecimento na temperatura ambiente pode, por exemplo, tornar a sua resistência cerca de 11 vezes menor do que a sua resistência a 1600 °C (figura 3.1). Assim, não se deve aplicar a voltagem total nos elementos de aquecimento, enquanto o forno estiver frio, pois seria aplicado um pico de corrente de 11 vezes maior do que a corrente nominal que flui pelo elemento de aquecimento, levando-o à fratura. Isto pode ser resolvido pela utilização de uma unidade de controle de potência thyristorizada (SCR) (figura 4.10) com limitador de corrente, inserida no primário do transformador (baixa corrente), e a aplicação gradual da tensão nos terminais do elemento de aquecimento, enquanto o forno estiver frio, o que pode ser programado no controlador de temperatura do forno.

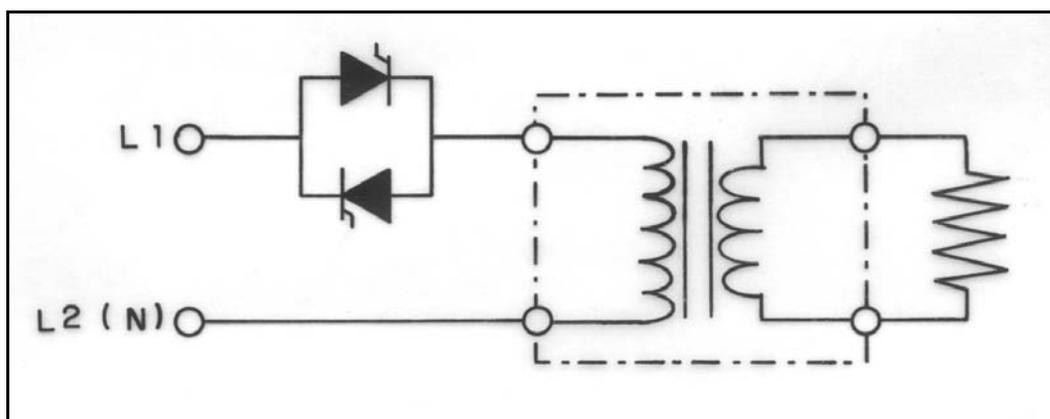


Figura 4.10 - Diagrama de ligação e controle de potência para as resistências elétricas do forno.

A figura 4.11 mostra detalhes internos da câmara do forno, onde pode ser visto a forma de posicionamento dos transdutores na amostra, das

resistências elétricas e do termopar para a coleta de temperatura e controle do forno. A temperatura do ensaio foi obtida através da leitura do controlador de temperatura do forno, por um termopar tipo B (par de fios 6%-p Pt-Rh e 30%-p Pt-Rh). A temperatura medida é enviada para o microcomputador, através do software do equipamento.

Para proteger os fios do termopar, estes foram colocados dentro de um tubo protetor de alta alumina, o qual possui dois furos internos.

O projeto desse forno, permite que a maior dimensão da amostra seja posicionada no sentido paralelo à maior dimensão da câmara do forno (figura 4.11), de modo a se ter um perfil térmico uniforme na amostra.

Para obter essa temperatura de ensaio com maior confiabilidade, o termopar foi colocado na parte central do forno e ligeiramente acima da amostra (figura 4.11). Assim, garante-se que a temperatura da amostra esteja dentro da região que possui um perfil de temperatura estável dentro do forno.

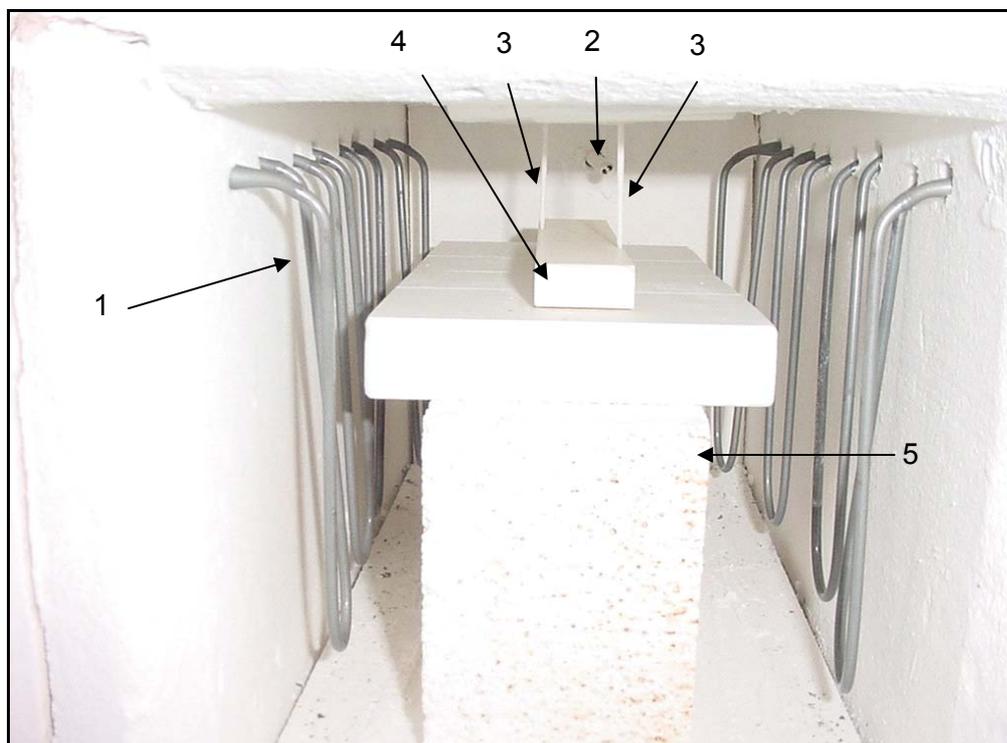


Figura 4.11 - Detalhes do posicionamento do termopar, da amostra e das hastes acopladoras dos transdutores na amostra. 1 - resistências elétricas, 2 - termopar, 3 - hastes acopladoras, 4 - amostra e 5 - base de apoio.

4.1.4 Dispositivos de Regulagem da Pressão e do Posicionamento dos Transdutores na Amostra

O suporte e a haste para fixação dos transdutores e o dispositivo que regula a pressão de contato dos transdutores na amostra (figura 4.12), foram posicionados na parte superior do forno. As peças metálicas desse dispositivo foram construídas em aço inox (ABNT 303), dimensionado de forma a propiciar um deslocamento suave das hastes metálicas que suportam os transdutores no sentido vertical e horizontal. A parte desse dispositivo que sustenta a mola helicoidal foi construída de um material polimérico (celeron).

O dispositivo de posicionamento dos transdutores realiza um movimento vertical, proporcionado por um fuso de passo milimétrico, permitindo o posicionamento de forma lenta e gradual dos transdutores.

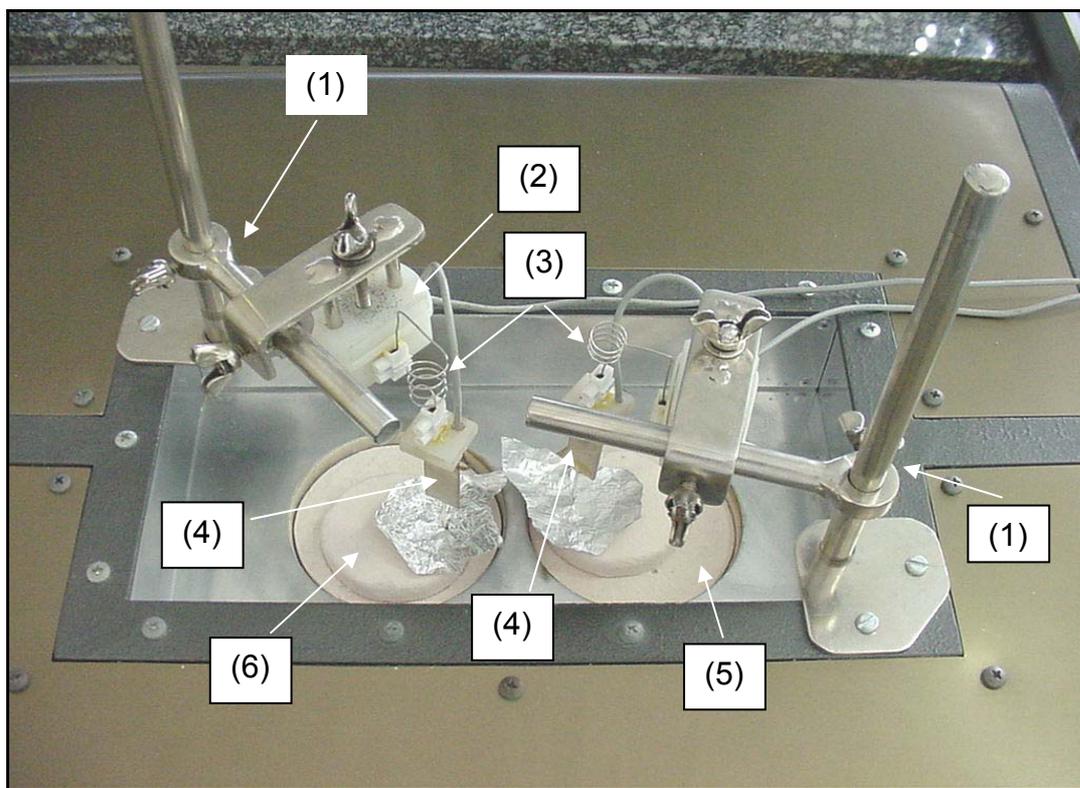


Figura 4.12 - Dispositivo para fixação, regulador de pressão e posicionamento dos transdutores. (1) suporte metálico de sustentação, (2) haste polimérica de deslocamento, (3) molas helicoidais, (4) transdutores, (5) tubo cerâmico cônico e (6) tubo cerâmico cilíndrico.

O dispositivo que faz a regulação da pressão de contato dos transdutores com a amostra (figura 4.12) foi constituído de uma mola helicoidal de aço inox austenítico (ABNT 303) de baixa rigidez, dimensionada para evitar a transmissão de vibrações externas para a amostra. Os transdutores são fixados numa extremidade da mola helicoidal e a outra extremidade desta foi fixada na haste polimérica que faz o posicionamento dos transdutores na amostra, de forma que somente a vibração proveniente da amostra seja captada pelo transdutor receptor.

As peças do dispositivo cerâmico que permitem a passagem dos acopladores e evita o superaquecimento dos transdutores (figura 4.13) foram construídos a partir do material usado no revestimento das paredes do forno, sendo um de forma cônica e o outro cilíndrico reto.

Aquele que tem a forma cônica possui um furo localizado em um dos quatro quadrantes, e pode girar livremente, apoiado no teto superior do forno. Aquele de forma cilíndrica reta possui um pequeno orifício, situado próximo a sua borda, por onde passa a haste acopladora. A peça de forma cilíndrica reta pode girar livremente sobre a de forma cônica, pois ela se encaixa perfeitamente sobre esta, de forma a promover o posicionamento dos transdutores sobre a amostra.

O orifício por onde passa a haste cerâmica acopladora (figura 4.13) foi projetado no diâmetro de 5 mm, de forma a diminuir a transferência de calor para a parte externa do forno, e assim, evitar o superaquecimento dos transdutores, o que poderia prejudicar o seu funcionamento. Esse orifício também tem que estar alinhado verticalmente com o ponto onde há o contato da haste com a amostra, para diversos tamanhos diferentes de amostras utilizadas nos ensaios.

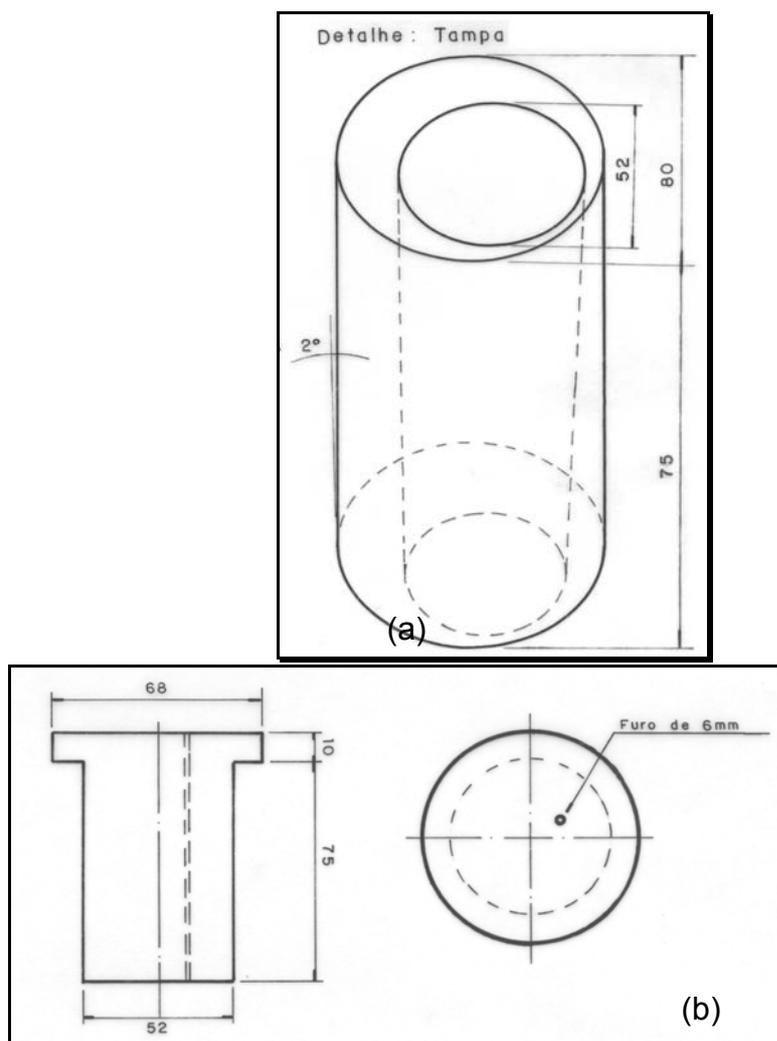


Figura 4.13 - Peças cerâmicas utilizadas para a passagem das hastas acopladoras ligando os transdutores à amostra e diminuir o superaquecimento dos mesmos. (a) cônica, (b) reta.

4.1.5 Ligação dos Módulos ao Microcomputador

O painel de controle do equipamento foi interligado a um microcomputador Pentium 233 MHz (figura 4.14). Para tanto, foi instalada uma placa de controle serial com quatro portas de saída externa. Uma porta serial dessa placa foi usada para gerenciar o gerador de onda senoidal e a outra, para o controlador de temperatura do forno. Para a aquisição dos dados, foi instalada no microcomputador uma placa A/D de 16 canais.

O software envia ao gerador de onda senoidal a informação da faixa de frequência e da amplitude do sinal que serão utilizadas no ensaio. Esses

valores dependem da geometria, dimensões do corpo de prova e do tipo de material que será analisado. De posse desses valores, o gerador senoidal envia um sinal elétrico alternado (AC) para o transdutor excitador. O transdutor detector tem a função, inversa, de converter a vibração mecânica da amostra em sinal elétrico alternado novamente.

Embora sempre exista uma resposta do material ao sinal aplicado, somente nas frequências de ressonância, o sinal de entrada é transmitido através da barra, enquanto que em outras frequências, praticamente todo o sinal é amortecido no interior da amostra. Como o nível do sinal obtido pelo detector é muito pequeno, esse precisa ser amplificado e filtrado para amenizar o nível de ruído e recompor a forma senoidal original. O condicionamento do sinal é feito por meio de um retificador de onda completa que entrega à placa de aquisição de dados um sinal contínuo (DC) com amplitude na faixa de 0 a 10 V.

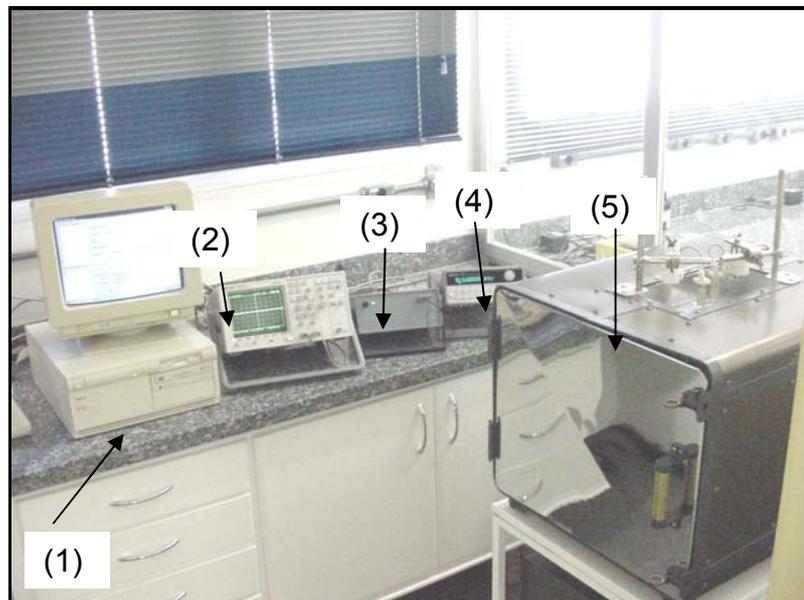


Figura 4.14 - Fotografia do equipamento construído para medir as propriedades elásticas de cerâmicas refratárias a altas temperaturas. (1) microcomputador, (2) osciloscópio, (3) amplificador, filtros e retificador de onda completa, (4) gerador de ondas e (5) forno elétrico.

Em sua arquitetura final (Figura 4.14), o equipamento para medir as propriedades elásticas, tanto na temperatura ambiente quanto a elevadas

temperaturas, possui as condições necessárias, confiabilidade e precisão suficientes para estudar os mais variados tipos de materiais refratários, avaliando seu comportamento, desde a temperatura ambiente, até altas temperaturas.

4.2 Calibração do Equipamento

A primeira tarefa após a construção do equipamento foi efetuar a sua calibração. Basicamente, esta etapa buscou conhecer as características operacionais do equipamento. A relação entre a voltagem fornecida pelo gerador senoidal ao transdutor excitador foi avaliada para os três primeiros picos de frequência do modo de vibração flexional, utilizando-se uma barra de seção retangular (5 mm x 12 mm x 150 mm) de alumina densa. Os transdutores excitador e receptor foram posicionados a 48 mm (0,32 x l) de cada extremidade da amostra.

A figura 4.15 mostra a correlação linear entre a amplitude do sinal de entrada do transdutor excitador e a voltagem dos três primeiros picos de ressonância do modo de vibração por flexão. Isso permite mostrar que o sinal enviado (dentro dessa faixa) pelo gerador senoidal ao transdutor excitador não compromete a amplitude dos três primeiros picos de ressonância da amostra, podendo assim ser utilizado para alimentar o transdutor excitador.

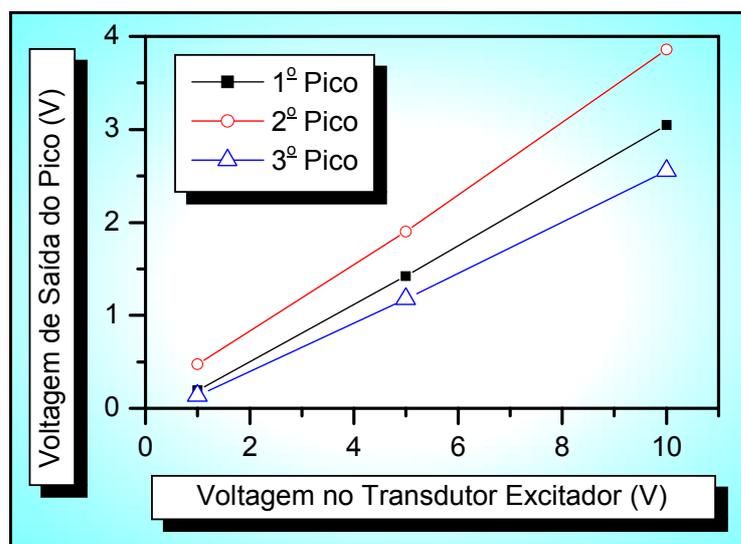


Figura 4.15 - Correlação entre a voltagem aplicada no transdutor excitador e a voltagem de saída para os três primeiros picos de ressonância por flexão.

A maior amplitude apresentada pelo segundo pico de ressonância em relação ao primeiro e terceiro foi devido à posição dos acopladores sobre a amostra estar mais afastado do nó para esse segundo pico ($0,132 \times l$) do que para o primeiro ($0,224 \times l$) e o terceiro ($0,356 \times l$), o que favorece a obtenção de um sinal de maior intensidade.

A largura do pico fundamental em frequência de uma alumina técnica e de um refratário à base de alumina-carbono, obtido por vibração flexional, é mostrada na figura 4.16. Pode-se verificar por essa figura que o pico fundamental da alumina técnica apresentou uma menor largura em frequência do que o refratário da alumina-carbono.

Essa característica de menor largura de pico para a cerâmica técnica comparada com o material refratário se deve ao seu menor valor de atrito interno. Isto pode ser comprovado pela equação de fricção interna, o qual possui uma correlação diretamente proporcional com a razão entre a largura do pico na meia altura e a frequência de ressonância do material [55,56].

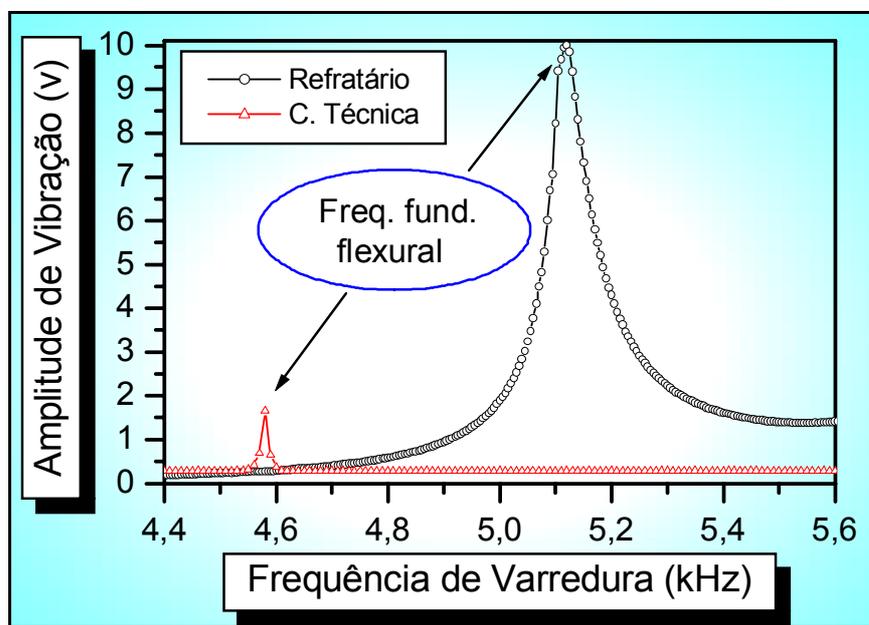


Figura 4.16 - Largura do pico para a frequência fundamental de um refratário de Alumina-carbono e de uma cerâmica técnica à base de alumina.

A operação de varredura de frequências envolve três parâmetros:

valores da frequência de excitação, tempo de duração dessa frequência e incremento na frequência. Esses parâmetros são importantes para adequar as características do sinal obtido da amostra de modo a não prejudicar o nível de amplitude do sinal captado pela placa A/D e conseqüentemente a localização exata dos picos de ressonância do material analisado. Para isso foram feitas variações desses parâmetros até encontrarem-se os valores adequados.

O material para esse tipo de calibração deve apresentar comportamentos bem definidos. Uma alumina técnica foi utilizada para isto, pois apresenta suas propriedades elásticas bem definidas e conhecidas, além de apresentar baixíssimo nível de porosidade. Por outro lado, é interessante analisar esse material, pois, devido à sua fricção interna ser relativamente menor que outras aluminas mais porosas, apresentam largura de pico mais estreita do que o refratário da alumina-carbono, para um mesmo intervalo de frequência do espectro (figura 4.16). Assim, a largura desse pico deve ser analisada, pois pode conter uma quantidade insuficiente de pontos necessários para serem usados pelo software na etapa de identificação de picos.

Os espectros do primeiro pico de ressonância flexional de uma alumina técnica são mostrados na figura 4.17 (a), (b) e (c) para uma varredura de 2100 Hz a 2200 Hz. Observa-se para esse material, uma boa resposta na amplitude do sinal de saída da amostra para uma amplitude de entrada de apenas 7 volts. Observa-se também que a largura dos picos foi bastante estreita (menos de 20 Hz), confirmando assim, o baixo fator de amortecimento para esse tipo de material, o qual foi comentado anteriormente.

A figura 4.17 (a), (b) e (c) também mostra que tanto os incrementos na frequência (1 Hz, 2 Hz e 5 Hz) quanto o intervalo do tempo de duração dessa frequência (100, 200 e 500 ms) não prejudicaram na precisão e na identificação do primeiro pico de ressonância do modo de vibração por flexão.

A precisão na identificação do primeiro pico de ressonância em função do intervalo de frequência e do tempo entre cada sinal gerado pode ser vista na figura 4.18 sob a forma de desvio padrão percentual para uma amostra de alumina técnica.

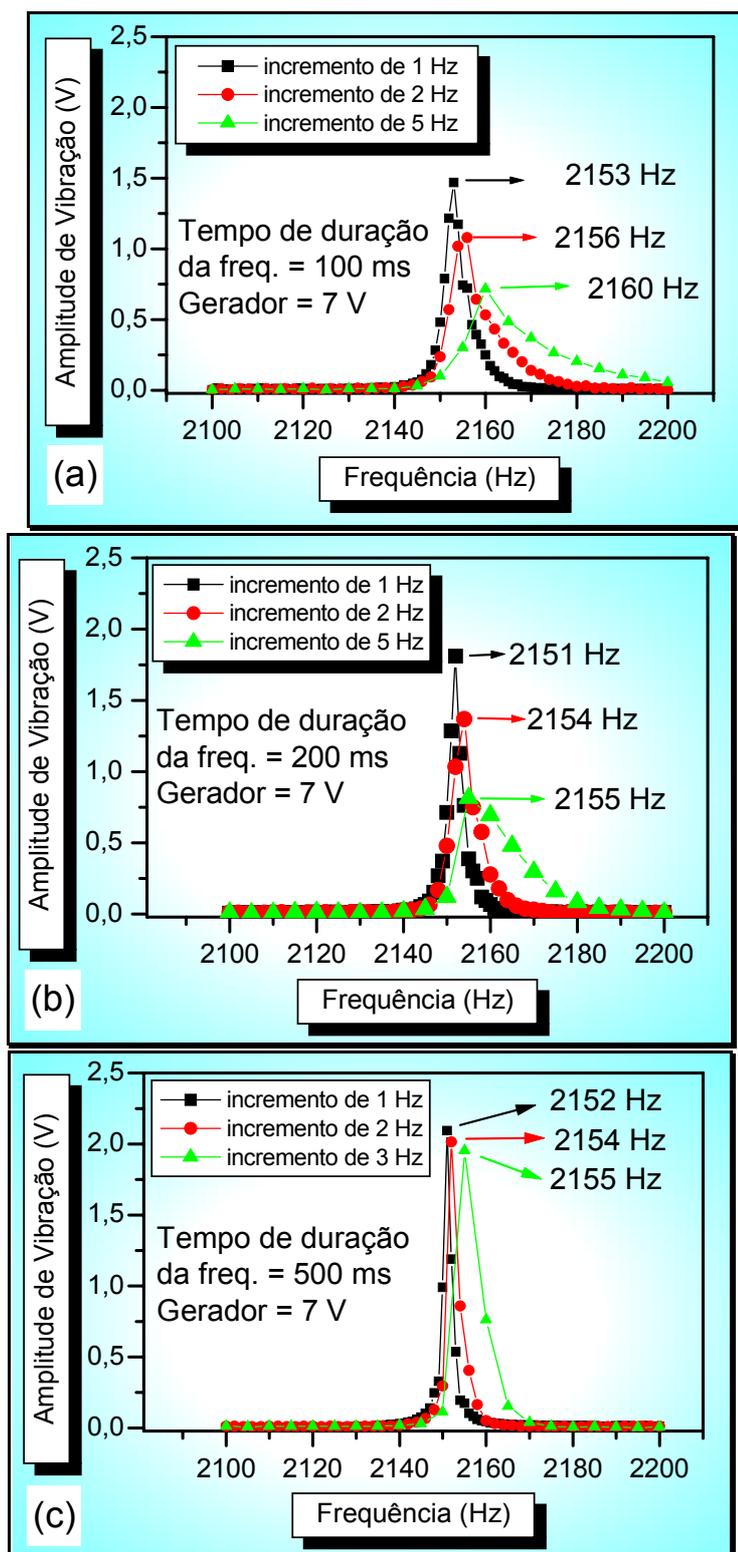


Figura 4.17 - Influência do valor do incremento na frequência e no tempo de duração da frequência na identificação do pico fundamental por flexão para uma alumina técnica. Tempo de duração da frequência : (a) 100 ms, (b) 200 ms e (c) 500 ms.

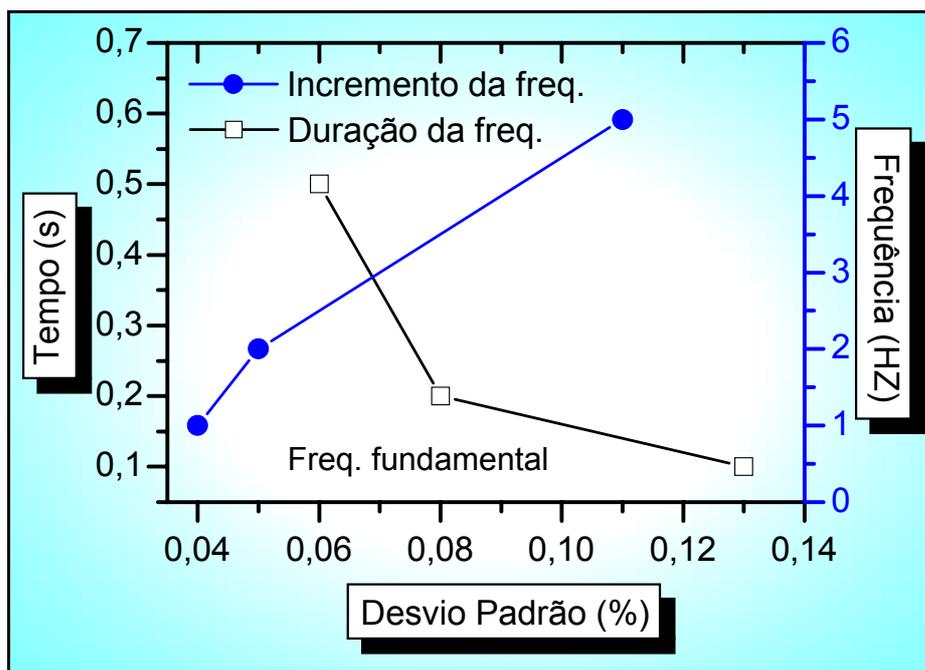


Figura 4.18 - Desvio padrão percentual do primeiro pico em função do intervalo da freqüência e do tempo entre cada sinal gerado, para uma alumina densa.

Como esperado, o erro na identificação do pico aumenta com a diminuição do tempo de duração da freqüência e com o aumento do incremento da freqüência. Esse erro atinge maiores valores para tempo de duração de 100 ms e incremento de freqüência em torno de 5 Hz. Apesar desse aumento no desvio padrão, o erro máximo de 0,13 % é ainda muito pequeno o que praticamente não interfere na identificação do primeiro pico de ressonância por flexão.

Essas características obtidas do equipamento serviram de referência para a etapa de elaboração do software de controle do equipamento e na obtenção das propriedades elásticas de forma automática.

Convém enfatizar que a escolha desses incrementos de freqüência e do tempo de duração da freqüência deve ser feita levando-se também em conta, o tempo total para realizar toda a varredura em freqüência e, em toda faixa de temperatura programada no ensaio, bem como o tempo de espera para o encharque do corpo de prova entre cada temperatura de medida.

A figura 4.19 mostra a curva de resposta em frequência do transdutor excitador e do transdutor detector. Nessa figura, é mostrada a ressonância e a anti-ressonância para esses dois transdutores, onde $|B|$ é a susceptância do material. A figura mostra somente o primeiro pico de ressonância no sentido longitudinal dos transdutores piezelétricos (faixa de 30 a 31 kHz), pois o pico fundamental no sentido transversal e no sentido da espessura são superiores ao longitudinal em frequência. Conseqüentemente, esses não interferem na varredura em frequência da amostra, pois estão acima da faixa de varredura normalmente usada (1 a 50 kHz).

Observa-se na figura 4.19 que esses transdutores também não apresentam nenhum pico de ressonância abaixo da frequência fundamental no modo longitudinal. Essa característica contribui para a diminuição da quantidade de picos espúrios que podem aparecer no espectro de ressonância para um dado material.

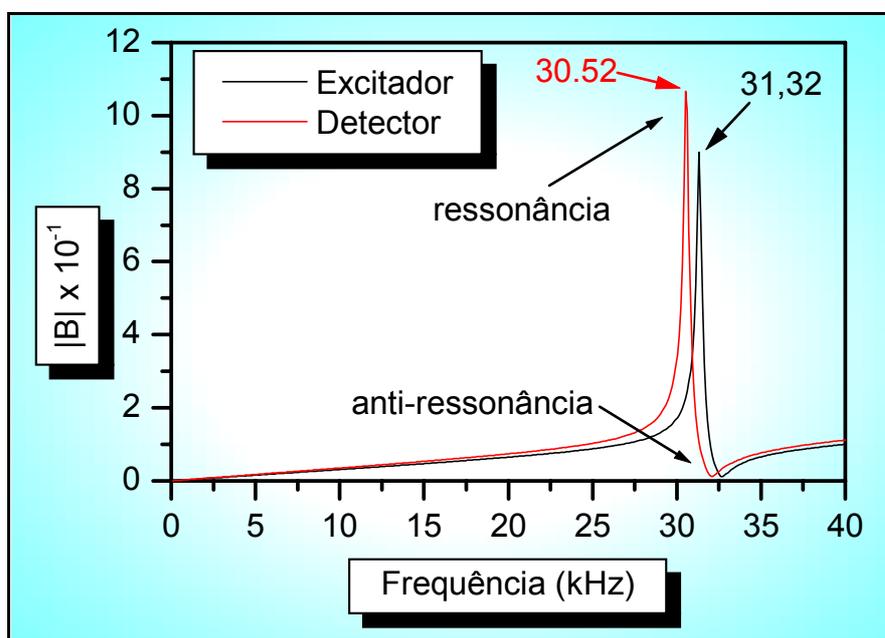


Figura 4.19 - Curva de resposta em frequência do transdutor excitador e do transdutor detector.

A frequência fundamental dos transdutores (modo longitudinal) por volta dos 30 kHz também tem a vantagem de reforçar a qualidade do sinal obtido da

amostra para o terceiro pico de ressonância dos modos de vibração por flexão e torção, pois a amplitude de vibração desse pico é menor em relação aos outros dois primeiros (figura 4.17).

Também foi dada atenção especial à influência do pico fundamental dos transdutores no espectro da amostra. A figura 4.20 (a), (b) e (c) mostra um espectro à temperatura ambiente de três amostras de alumina densa (AI90-1, AI90-2 e AI90-3), excitando-as por flexão e torção simultaneamente. Nesse ensaio, utilizou-se transdutor excitador e receptor sem a haste de acoplamento para altas temperaturas.

As amostras tiveram o mesmo comprimento e espessura ($l = 151\text{mm}$ e $t = 12,45\text{mm}$), variando-se a largura ($b = 12,45\text{mm}$, $b = 19,7\text{mm}$ e $b = 28,8\text{mm}$). O pico de $30,496\text{ kHz}$ mostrado na figura 4.20 (b) não é oriundo do pico fundamental dos transdutores, pois não houve a sua repetição nas duas outras amostras (figuras 4.20 (a) e (c)). Mostrou-se assim, que fora de suas ressonâncias, a amostra comporta-se como um filtro mecânico, eliminando todas freqüências que não fazem parte do seu espectro de ressonância.

A influência da haste acopladora de alumina (para altas temperaturas) à amostra (ver figura 4.6) pode ser vista no espectro da figura 4.21, para uma amostra de um refratário de alumina-carbono. Pode-se observar que, praticamente, não há deslocamento dos picos. Isto demonstra que a utilização dessas hastes, praticamente não interfere nas freqüências de ressonância do material, podendo ser utilizada para a obtenção dos módulos elásticos em altas temperaturas sem alterar a precisão do equipamento.

Pelo espectro mostrado para a amostra de alumina-carbono, pode-se verificar que o pico de ressonância de $23,5\text{ kHz}$ para o caso do ensaio realizado com as hastes de acoplamento possui uma amplitude de vibração muito maior do que o realizado sem a haste. Isto ocorre devido ao surgimento do primeiro pico de ressonância da haste de alumina por volta de $22,6\text{ kHz}$. Como o pico da amostra está próximo dessa freqüência, a energia de vibração transmitida será muito maior com a haste de acoplamento. Nota-se através da

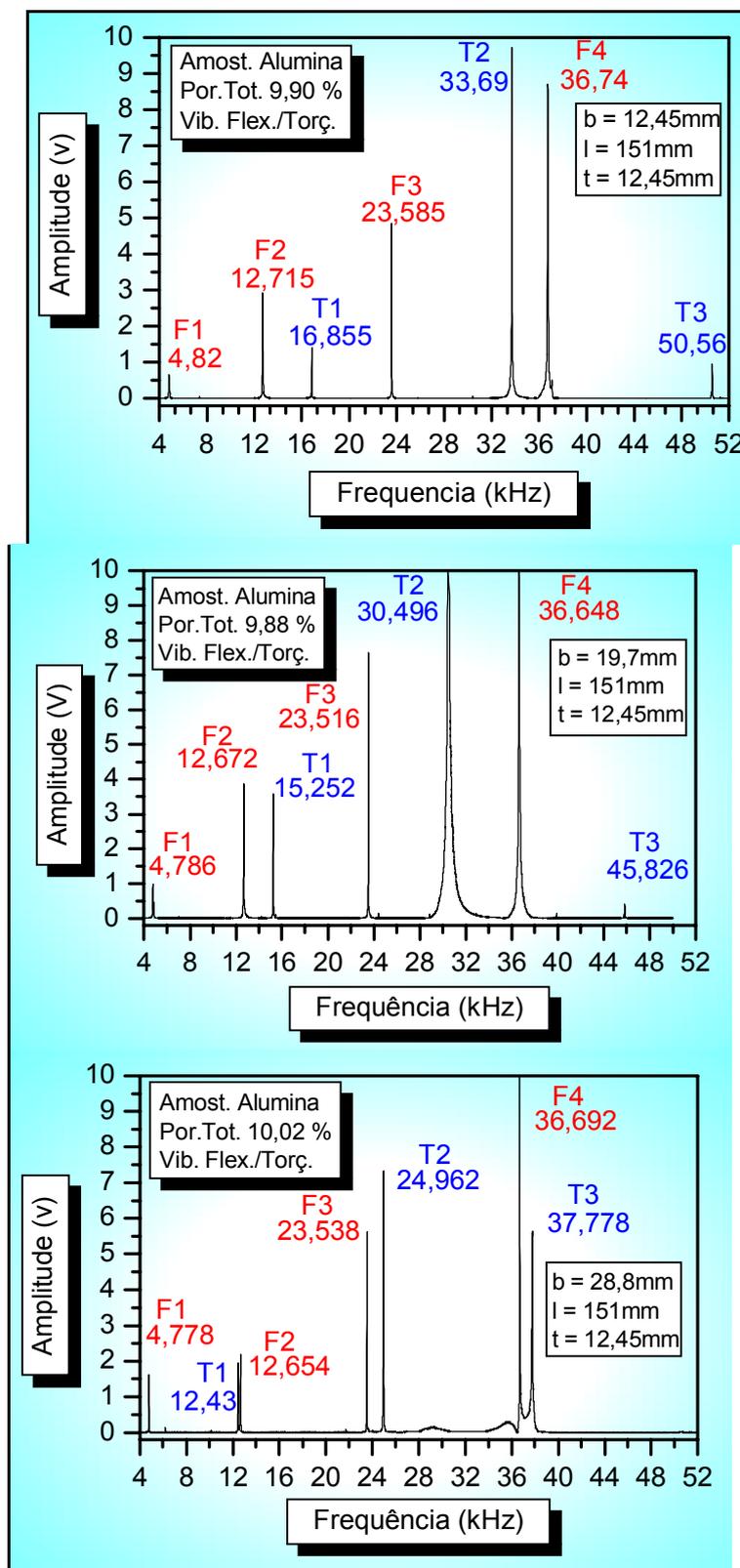


Figura 4.20 - Espectros de três amostras de alumina (Porosidade Total. = 10%) excitadas por flexão e torção simultaneamente, variando-se a sua largura. F1, F2 e, F3, T1, T2 e T3 são os três primeiros picos de flexão e torção, respectivamente.

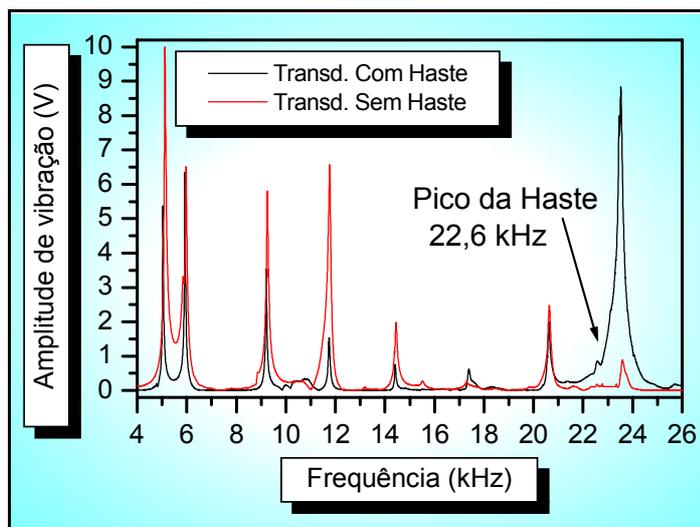


Figura 4.21 - Influência da haste de acoplamento no espectro de ressonância de uma amostra refratária de alumina-carbono.

figura 4.21 que o pico de ressonância da haste apresenta uma amplitude de vibração muito pequena, não interferindo assim na localização e identificação dos picos de ressonância da amostra, pois isto é feito com boa precisão por meio de uma rotina computacional introduzida no software de gerenciamento do equipamento. A adição da massa adicional da haste também não influencia no deslocamento do pico de ressonância, pois sua massa é 4% menor do que a massa do corpo de prova de menor densidade (esponjas cerâmicas de alumina), sendo que para as amostras mais densas essa relação é menor que 0,5%.

A precisão do equipamento foi demonstrada para três amostras (AI90-1, AI90-2 e AI90-3) retificadas de uma mesma alumina (porosidade total = 10%) variando-se apenas a largura (figura 4.22). Essa figura mostra a variação dos três primeiros picos de ressonância para os modos de vibração por flexão e torção em função da largura, b . Pode-se observar que não houve praticamente variação nos valores dos três primeiros picos de ressonância de cada amostra para a vibração por flexão, mostrando assim que não houve influência da largura, b , da amostra nos resultados do modo de vibração por flexão, como era esperado pelas equações 2.26 – 2.34 para esse tipo de vibração mostrado no capítulo 2.

A figura 4.22 também mostra a diminuição da frequência do modo de

vibração por torção com o aumento da largura da amostra, para os três primeiros picos de ressonância desse modo de vibração. A influência da largura da amostra no espectro da ressonância também era esperada pela equação 2.45 para esse tipo de vibração.

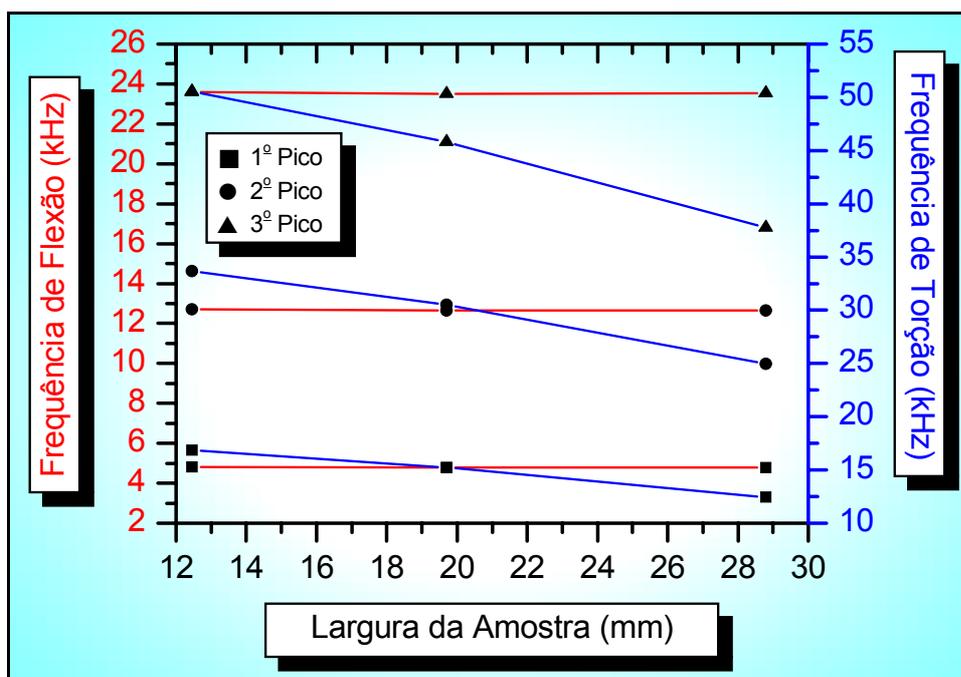


Figura 4.22 - Influência da largura da amostra nos três primeiros picos de ressonância para os modos de flexão e torção.

A precisão na obtenção dos três primeiros picos de ressonância para o modo de vibração por flexão pode ser vista na tabela 4.1, para essas três amostras de alumina, em função do desvio padrão da frequência (kHz). Uma

Tabela 4.1 - Desvio padrão entre medidas de frequência de cada um dos picos de ressonância por flexão para três amostras de alumina (Poros.Tot. = 10%).

Picos de Ressonância por Flexão	Frequência Média (kHz)	Desvio Padrão
F1	4,79	± 0,020
F2	12,68	± 0,020
F3	23.55	± 0,029

excelente reprodutibilidade é mostrada, visto que a maior diferença entre as medidas para cada um dos picos foi inferior a 60 Hz (F3).

A verificação da exatidão dos picos de ressonância obtidos experimentalmente com os obtidos da teoria pode ser vista na tabela 4.2 para amostra de alumina (AI90-1, AI90-2 e AI90-3). Comparando-se a razão entre os picos de ressonância dos harmônicos superiores em relação ao fundamental (figura 4.20 (a), (b) e (c)) para a vibração por flexão e torção, mostra-se que o maior erro entre a frequência de ressonância obtida experimentalmente e a sua previsão teórica é menor que 0,5 % por flexão e menor que 1,3 % por torção. Isto demonstra uma boa confiabilidade e exatidão nos valores de frequência de ressonância obtida pelo equipamento aqui descrito.

Esses valores mostram também que o maior erro na razão entre as frequências de ressonância (teórica e experimental) por torção, encontrado para a amostra AI90-3, é um indicativo de que esta vibração é afetada pela largura da amostra.

Tabela 4.2 - Comparação (teórica e experimental) da razão entre os picos de ressonância de harmônicos superiores e o fundamental por flexão e torção das amostras de alumina AI90-1, AI90-2 e AI90-3.

Modo de Vibração	Razão entre Picos	Prev. Teórica	Resultado Experimental			Erro (%)		
			AI90-1	AI90-2	AI90-3	AI90-1	AI90-2	AI90-3
Flexão	F2/F1	2,64	2,64	2,65	2,65	0,00	0,38	0,38
	F3/F1	4,91	4,89	4,91	4,93	-0,41	0,00	0,40
Torção	T2/T1	2,00	2,00	2,00	2,01	0,00	0,00	0,41
	T3/T1	3,00	3,00	3,01	3,04	0,00	0,00	1,28

A influência dessa comparação (teórica e experimental) da razão entre os picos de ressonância de harmônicos superiores e o fundamental por flexão e torção nas propriedades elásticas, é mostrada na tabela 4.3 em função do erro percentual para as amostras AI90-1, AI90-2 e AI90-3. Os valores das

propriedades estão apresentados como a média decorrente dos três primeiros picos de ressonância de cada um dos modos de vibração e para cada amostra.

O cálculo do módulo elástico e do módulo de cisalhamento (tabela 4.3) utilizando os três primeiros picos de ressonância para cada uma das amostras de alumina levou a resultados mais precisos, levando-se em consideração que mesmo a amostra AI90-2 apresentando um desvio individual de $\pm 1,5$ GPa no módulo elástico, o desvio máximo não passou de $\pm 0,55\%$.

Tabela 4.3 - Módulo elástico, módulo de cisalhamento e razão de Poisson obtidos por ressonância de barras para as amostras de alumina ($P_T = 10\%$).

Propriedades Elásticas	AI90-1	AI90-2	AI90-3	Valor Médio
Mod. Elast. (GPa).	274,5 \pm 1.10	272,8 \pm 1.50	274,0 \pm 0,80	273,8 \pm 1,13
Mod. Cisal. (GPa)	110,0 \pm 0,10	109,9 \pm 0,20	111,9 \pm 1,20	110,6 \pm 0,50
Razão de Poisson	0,247 \pm 0,01	0,240 \pm 0,01	0,223 \pm 0,02	0,237 \pm 0,01

A técnica e o equipamento desenvolvido mostraram ser bastante eficiente, pois independentemente da geometria da amostra, o desvio máximo no valor médio do módulo elástico e no módulo de cisalhamento dessas amostras não foi superior a $\pm 1,13$ GPa, ou seja $\pm 0,41\%$.

Observa-se, também, que a geometria das amostras, expressa pela largura, b , praticamente não influenciou nos resultados das propriedades elásticas do material. Isso mostra que os modelamentos matemáticos empregados foram precisos na obtenção dessas propriedades através da técnica de ressonância de barras. A prática mostrou que a seção retangular é

mais conveniente para obter os sinais de vibração por flexão e torção, simultaneamente.

A confiabilidade e a reprodutibilidade dos valores de frequência de ressonância obtida pelo equipamento desenvolvido e por um equipamento comercial [21] adaptado para alta temperatura, puderam ser verificadas para uma amostra padrão original desse equipamento [21]. Essa amostra padrão de aço, de seção transversal cilíndrica possui 149,85 mm de comprimento, 6,98 mm de diâmetro, densidade igual a 7,811 g/cm³ e razão de Poisson aproximadamente 0,28. As medidas foram tomadas à temperatura ambiente (25 °C). Mediram-se 5 séries das 5 primeiras frequências de ressonância da vibração longitudinal, utilizando-se a haste de acoplamento original do equipamento comercial e a haste de acoplamento modificada (altas temperaturas) para o equipamento desenvolvido.

As tabelas 4.4 e 4.5 mostram os resultados para a amostra padrão de aço, utilizando-se o equipamento comercial e o desenvolvido, respectivamente. Apresentam-se as colunas com as 5 séries de medida das 5 primeiras frequências de ressonância (f_n), o valor médio dessas 5 séries para cada frequência (f_n^1 , f_n^2), a variação dentro das 5 séries (Δf_n^1 , Δf_n^2) e a variação relativa percentual para cada frequência ($\Delta^1 = \Delta^2 = (\Delta f_n^1 / f_n^1) \times 100$).

Na tabela 4.5 aparece uma coluna adicional mostrando a variação relativa percentual das frequências ($\Phi_f = [(|f_n^1 - f_n^2|) / f_n^1] \times 100$) considerando-se o equipamento comercial e o desenvolvido.

Pode-se observar, através das tabelas 4.4 e 4.5, que a maior variação relativa é de apenas 0,06% para o equipamento comercial e de apenas 0,05% para o equipamento desenvolvido. Esses resultados mostram que o equipamento desenvolvido apresentou uma excelente reprodutibilidade nas frequências de ressonância de uma amostra de aço padrão.

Tabela 4.4 - Reprodutibilidade nas frequências de ressonância para uma amostra padrão de aço, utilizando um equipamento comercial (coleta manual) no modo longitudinal de vibração [21].

n	Repetições					f_n^1 (Hz)	Δf_n^1 (Hz)	Δ^1 (%)
	f_n (Hz)							
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª			
1	17357	17366	17367	17359	17360	17361,8	3,76	0,02
2	34705	34753	34716	34664	34710	34706,0	17,20	0,05
3	52105	52104	52144	52103	52197	52130,6	31,92	0,06
4	69369	69412	69420	69377	69389	69393,4	18,08	0,03
5	86615	86647	86655	86623	86630	86634,0	13,60	0,02

Tabela 4.5 - Reprodutibilidade nas frequências de ressonância para uma amostra padrão de aço, utilizando o equipamento desenvolvido (coleta automático) no modo longitudinal de vibração.

N	Repetições					f_n^2 (Hz)	Δf_n^2 (Hz)	Δ^2 (%)	Φ_f (%)
	f_n (Hz)								
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª				
1	17500	17525	17515	17510	17505	17511	8,60	0,05	0,86
2	34960	34955	34965	34960	34965	34961	3,74	0,01	0,73
3	52265	52260	52270	52255	52265	52263	5,10	0,01	0,25
4	69385	69375	69380	69390	69375	69381	5,83	0,01	0,02

5	86715	86735	86730	86740	86720	86728	9,27	0,01	0,11
---	-------	-------	-------	-------	-------	-------	------	------	------

A confiabilidade nas medidas feitas se confirma, observando-se os valores da coluna da variação relativa percentual (tabela 4.5), Φ_f , comparando-se os valores médios das freqüências entre os dois equipamentos, comercial e o construído. Essa confiabilidade vem do fato de se obter uma variação relativa máxima (Φ_f) de 0,86% em relação ao valor do equipamento comercial para as freqüências de ressonância. Observa-se que essas variações relativas são maiores para as duas primeiras freqüências de ressonância, caindo para menos de 0,3% para as três seguintes, demonstrando assim uma maior confiabilidade para as freqüências de ordem superior.

4.3 Desenvolvimento do Software de Controle, Aquisição de Dados e Análise

O monitoramento e controle do equipamento de medida de propriedades elásticas são realizados por um software, desenvolvido em linguagem de programação delphi, capaz de comandar o gerador de onda senoidal, o controlador de temperatura do forno e a placa de aquisição de dados, simultaneamente.

O princípio básico de operação do software é o controle do equipamento, por meio de informações pré-fornecidas do corpo de prova e de configuração do sistema, e a busca das três primeiras freqüências de ressonância do corpo de prova, dos modos de vibração flexional e torcional, para o cálculo automático do módulo de Young, módulo de cisalhamento e da razão de Poisson.

O software opera em forma de módulos, os quais são dependentes entre si, e atuam como apoio ao módulo central de cálculo das propriedades elásticas. As informações das freqüências de ressonância obtidas da amostra, juntamente com as suas características físicas e a temperatura, são usadas

nesse módulo para o cálculo das propriedades elásticas em função da temperatura.

4.3.1 Módulo de Informações dos Ensaios Realizados

A tela de abertura do software desenvolvido para realizar o gerenciamento, controle e aquisição de dados do equipamento para medir as propriedades elásticas em função da temperatura, é mostrada na figura 4.23.

Nesta etapa, todas as informações principais relativas aos ensaios já realizados ficam armazenadas em um banco de dados, de maneira a propiciar uma análise mais detalhada do ensaio selecionado através do botão ou do menu de ferramentas “Análise”. Os ensaios já realizados ficam dispostos nesta tela de forma seqüencial e ordenados pelo número do ensaio realizado.

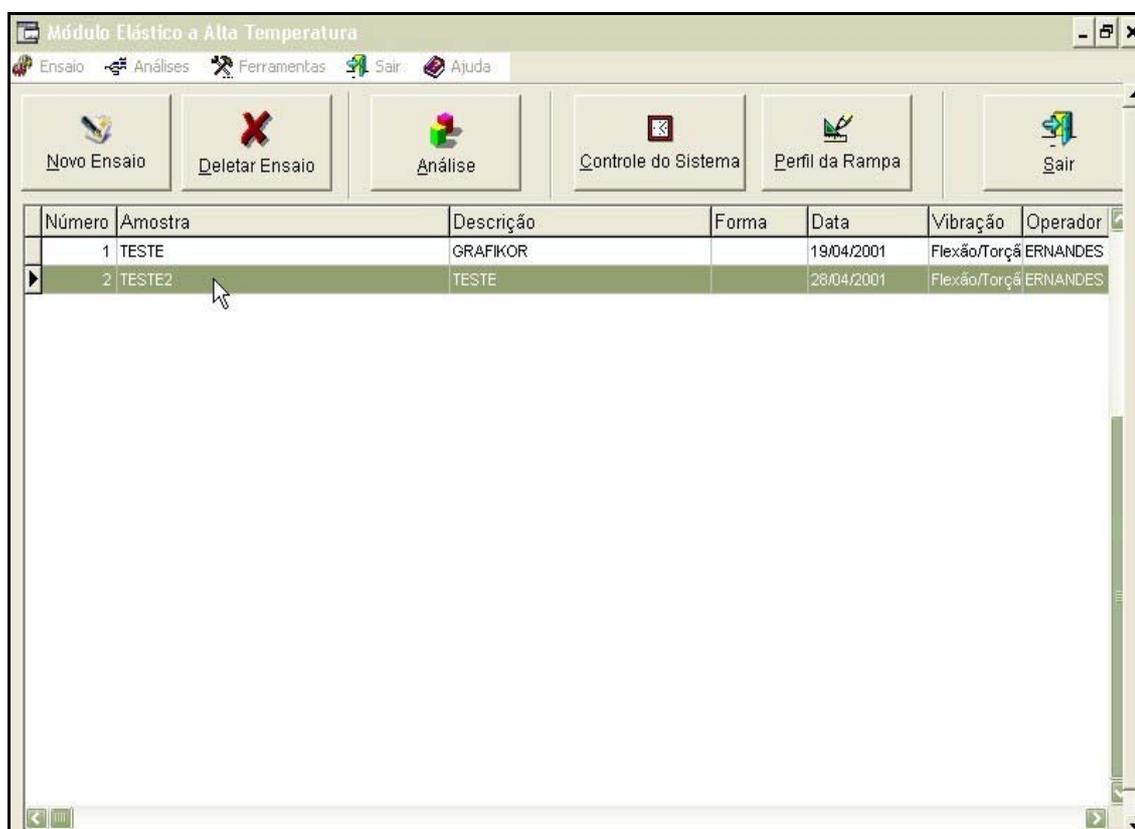


Figura 4.23 - Tela de abertura do software de controle e aquisição do equipamento para medir as propriedades elásticas a altas temperaturas.

Pelo botão “Controle do Sistema”, pode-se efetuar todos os ajustes de comunicação entre os periféricos (gerador senoidal, placa analógica/digital, controlador de temperatura do forno) e o microcomputador. A comunicação entre os periféricos e o computador é realizada pelos drivers de comunicação desenvolvidos especialmente para esta finalidade.

A comunicação do gerador senoidal com o microcomputador é realizada através da porta serial do microcomputador, utilizando-se chamadas da API do sistema operacional Windows. O controlador do forno foi acoplado ao microcomputador através de outra porta serial, pelo desenvolvimento do driver de comunicação, programado em linguagem C++ utilizando-se o protocolo de comunicação ModBus. O cartão analógico/digital utiliza o barramento I/O do microcomputador para se comunicar, utilizando-se chamadas da API do sistema operacional Windows pelas sub-rotinas escritas em delphi.

Por meio do menu principal pode-se também eliminar um ensaio já armazenado, realizar um novo ensaio ou fechar o software pelo acionamento de botões apropriados.

4.3.2 Módulo de Criação de um Novo Ensaio

Ao ser selecionado um novo ensaio, a tela de “Novo Ensaio” é mostrada no monitor (figura 4.24). Nessa tela são armazenadas as informações referentes às condições iniciais para o ensaio, bem como as características e propriedades físicas da amostra para a determinação das suas propriedades elásticas.

Novo Ensaio

Experimento Número: -1

Nome da Amostra: REF-A1 Data: 15/02/2002

Descrição: CONCRETO REFRATARIO 1% -P CIMENTO

Operador: ERNANDES

Características do Material

Poisson Conhecido 0.10

Módulo Elástico Estimado (GPa) 400.00

Poisson/Módulo Elástico Desconhecidos

Características da Amostra

Barra

Densidade (g/cm³) 3.2

Largura (mm) 25.0

Espessura (mm) 25.0

Cilíndrica

Comprimento (mm) 150.0

Modo de Vibração

Longitudinal

Flexão

Torção

Flexão/Torção

Varredura da Frequência

Freq. Inicial(Hz) 1000

Freq. Final(Hz) 40000

Variação Freq.(HZ) 10

Intervalo Leit.(s) 0.3

Amp. Gerador (v) 10.00

Perfil de Temperatura

Ensaio Cíclico

Ensaio Temperatura Ambiente

Programa Simples

Selecionar um Programa

Tempo entre Varredura (min) 5

Número de Varreduras

Temperatura de Ensaio

Tempo Encharque (min) 10

Temperatura Máxima (oC) 1200

Taxa Aquecimento (oC/min) 3

Intervalo de Medida (oC) 100

Editar um Perfil

Confirma Cancela

Figura 4.24 - Tela para um novo ensaio do software de controle e aquisição do equipamento para medir as propriedades elásticas a altas temperaturas.

Apesar da concepção do projeto do forno permitir apenas a excitação da amostra e a captura da sua vibração nos modos flexional e torcional, o software também disponibiliza a utilização da vibração longitudinal segundo os modelamentos matemáticos descritos anteriormente. A versatilidade do software permite que se utilize a vibração por flexão e torção simultaneamente quando a caixa de características do material “Poisson/Módulo de Young Desconhecidos” estiver selecionada.

Também é possível selecionar somente os modos de vibração longitudinal, flexional e torcional isoladamente, para a obtenção do módulo elástico (vibração longitudinal/flexional) e o módulo de cisalhamento (vibração torcional) quando a caixa de características do material “Poisson Conhecido” estiver selecionada. Neste caso, é necessário que seja fornecido o valor da

razão de Poisson, pois a equação que calcula o módulo elástico através da vibração longitudinal ou flexional é dependente da razão de Poisson.

Para ganhar tempo na busca dos três primeiros picos de ressonância da amostra, a caixa de características do material “Módulo Elástico Estimado (GPa)”, quando selecionada, permite que se escolha o tipo e característica do material da amostra (matéria prima, porosidade) fazendo uma busca num banco de dados contendo essas informações já catalogadas. Com estas informações o valor do módulo elástico sugerido é usado para se estimar os valores das frequências inicial e final de varredura, bem como o incremento da frequência e do tempo de duração dessa frequência gerada e aplicada ao transdutor excitador.

Os resultados experimentais deste trabalho (figura 4.16) mostraram que a largura dos picos em cerâmicas técnicas à base de alumina é menor do que a dos refratários à base de alumina-carbono, o que possibilita ao software escolher automaticamente intervalos menores de leitura (5 Hz) para materiais mais densos e intervalos maiores (10 Hz) para materiais refratários. Caso contrário pode-se escolher esses valores manualmente.

Ainda na tela apresentada na figura 4.24 é possível escolher se o ensaio será em função do tempo (cíclico) ou em função da temperatura.

No ensaio cíclico, o software permite escolher o número de varreduras do espectro, o tempo entre cada varredura e a temperatura para a realização do ensaio. Com esta opção, é possível acompanhar a variação da frequência de ressonância com o tempo de endurecimento de um concreto refratário, por exemplo, a partir de um certo estágio, para uma dada temperatura.

Na realização de ensaios em função da temperatura, é possível selecionar a caixa “Programa Simples”, onde é escolhido o tempo de permanência numa determinada temperatura antes de iniciar a varredura, a temperatura máxima do ensaio, a taxa de aquecimento e o intervalo de temperatura entre cada medida. O ensaio nessa configuração é realizado inicialmente na temperatura ambiente e imediatamente após o tempo de

encharque, para a estabilização da temperatura, em cada intervalo selecionado.

4.3.3 Módulo de Controle e Execução do Ensaio

A figura 4.25 mostra a tela de execução e resultados do ensaio. Na coluna “Dados da Varredura”, é mostrado o resultado do tempo, frequência do sinal excitador, amplitude de saída do sinal e a temperatura para cada ponto do ensaio.

Para uma melhor visualização dos resultados, essa tela mostra um gráfico na sua parte superior o qual apresenta o espectro à medida que ele vai sendo registrado. Todas essas informações são armazenadas em um banco de dados para posterior exportação ou análise dos dados.

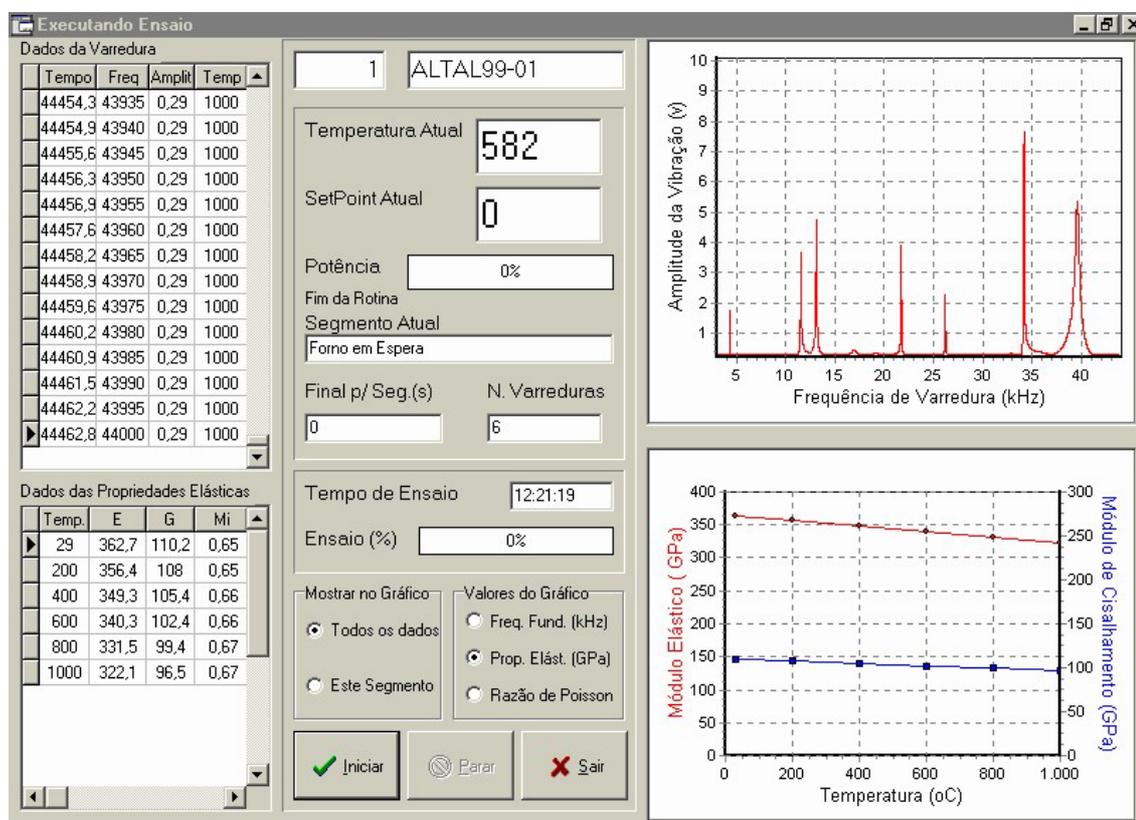


Figura 4.25 - Tela de resultados do ensaio do software de controle e aquisição do equipamento para medir as propriedades elásticas a elevadas temperaturas.

Após o término de cada varredura em frequência, o software faz o cálculo das propriedades elásticas e mostra essas medidas “on-line” na coluna “Dados das Propriedades Elásticas”. Simultaneamente, essas propriedades podem também ser vistas num gráfico em função da temperatura ou do tempo, dependendo da respectiva seleção de sua caixa, o qual aparece na parte inferior da tela (figura 4.25). Novamente, todas essas informações são armazenadas em um outro banco de dados para posterior exportação, impressão ou análise no próprio software.

4.3.4 Módulo de Análise dos Ensaios

A figura 4.26 mostra a tela de “Análise dos Ensaios”. Através da barra de menu “Análise” pode-se selecionar a opção para criar uma nova análise, abrir uma já existente ou apagá-la do banco de dados.

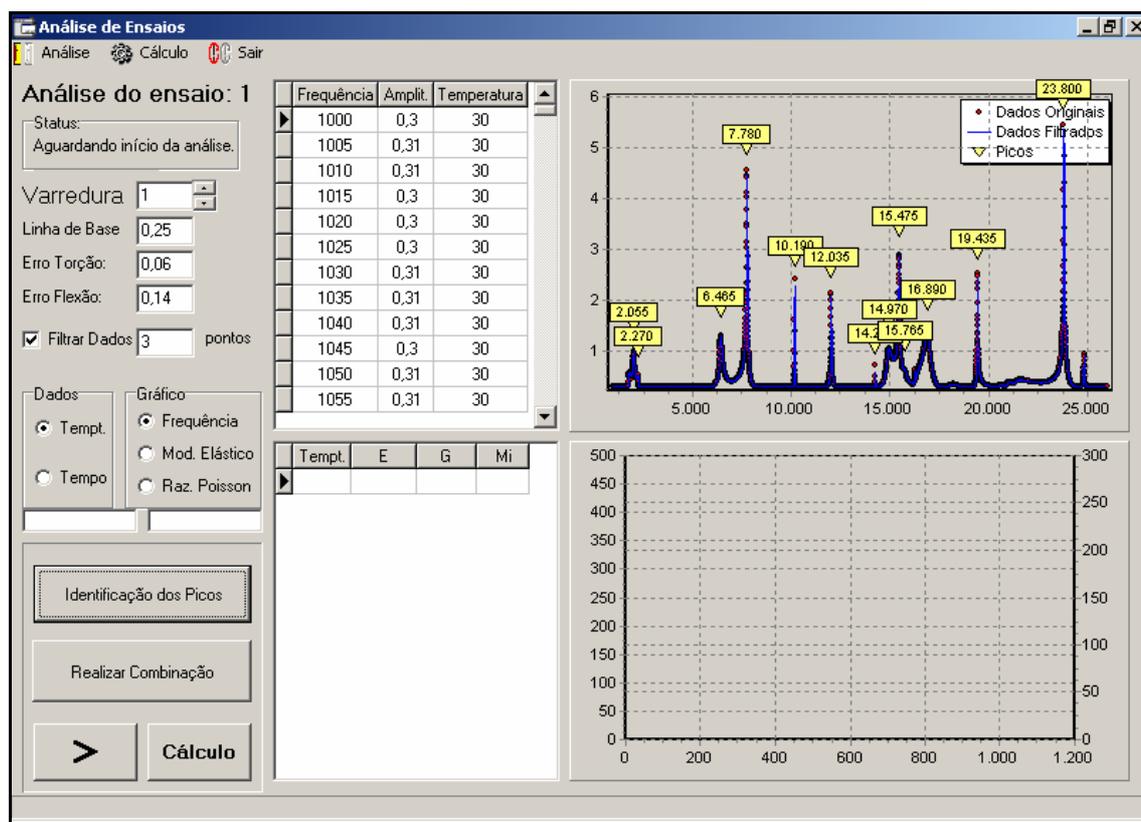


Figura 4.26 - Tela de análise dos ensaios.

A opção de criação de uma nova análise de um ensaio já realizado é importante, no caso em que essa análise não foi realizada automaticamente pelo equipamento durante a execução do ensaio, devido ao ajuste pré-selecionado dos parâmetros de erros de flexão e torção e da linha de base. Ao ser selecionado essa opção, pode-se digitar ou alterar os valores para a linha de base, do erro de flexão e torção, assim como a utilização da filtragem dos dados para cada uma das varreduras pré-selecionada. Essas informações são importantes na etapa de identificação dos picos de ressonância e na de identificação dos três primeiros picos de flexão e torção.

Em seguida, através do menu “Cálculo”, pode-se selecionar a opção de se efetuar o cálculo das propriedades elásticas em função da temperatura ou do tempo de forma automática ou manual (progressiva).

Caso seja automática, o software calcula as propriedades elásticas para todas as temperaturas em que foram realizados os ensaios. Caso contrário, pode-se realizar as etapas de linearização dos dados, identificação de cada um

dos três picos de flexão e torção, e o cálculo das propriedades elásticas para cada temperatura (varredura) de ensaio, de forma progressiva.

A tela apresentada na figura 4.26, mostra que se pode também visualizar os dados (frequência, amplitude de vibração, temperatura em cada coleta ou tempo) obtidos de cada ensaio (varredura), na forma de uma tabela, assim como uma representação gráfica do espectro amplitude x frequência. Pode-se também visualizar em uma tabela na parte inferior a temperatura do patamar, e as propriedades elásticas calculadas pelo software (módulo de Young (E), módulo de cisalhamento (G) e razão de Poisson (μ)).

Através da caixa de seleção “Gráfico”, as três primeiras frequências de ressonância dos modos flexional e torcional, os módulos de Young e de cisalhamento, e a razão de Poisson, podem ser visualizadas em forma gráfica em função da temperatura ou do tempo.

O cálculo das propriedades elásticas pode ser determinado automaticamente durante a realização do ensaio conforme visto no item 4.3.3 ou manualmente após o ensaio como mostrado neste item. A diferença entre os dois é que no modo automático, alguns parâmetros são fornecidos ao software antes da realização do ensaio e no modo manual, esses parâmetros podem ser alterados durante a realização das análises para o cálculo das propriedades elásticas. Em ambos os casos, o cálculo é baseado em submódulos seqüenciais, em que cada um é dependente do anterior.

4.3.4.1 Etapa de Suavização dos Dados

A filtragem dos dados é realizada nesse bloco, empregando-se uma regressão linear dos valores da frequência de varredura e amplitude de vibração, através do método dos mínimos quadrados, usando-se a quantidade de pontos pré-selecionados (ver “Filtrar Dados” na figura 4.26).

Esse processo consiste no cálculo da média aritmética referente à quantidade de pontos pré-selecionados, a partir do primeiro ponto, repetindo-se essa operação para os próximos pontos, a partir do segundo e assim por

diante. Utiliza-se um banco de dados auxiliar para armazenar esses novos pontos, de maneira que cada ponto filtrado representa a média aritmética da quantidade de pontos pré-selecionados.

4.3.4.2 Etapa de Identificação dos Picos de Ressonância.

O software dispõe de um módulo específico para fazer a identificação de todos os picos, através da amplitude máxima de vibração e frequência de varredura. Esses picos são armazenados em um banco de dados. A identificação é realizada dentro desse banco de dados, comparando-se sempre a amplitude do ponto posterior com o anterior, armazenando-se o maior valor dentre os dois, sobre o espectro suavizado.

Ao ser constatada uma queda no valor da amplitude do ponto posterior em relação ao anterior, o software considera o último maior valor e armazena-o como sendo um pico de ressonância. A fim de evitar que esse ponto seja um ruído de sinal, é necessário que a queda no valor da amplitude do ponto sucessor em relação ao antecessor seja constatada por pelo menos em seis pontos consecutivos.

A partir desse ponto, o software também compara a amplitude do ponto posterior com o anterior, armazenando sempre o menor valor dentre os dois, para a identificação do ponto de amplitude mínima. Para que um ponto seja considerado um pico de ressonância, é necessário que a diferença entre a amplitude máxima desse ponto e o ponto de amplitude mínima seja maior ou igual a 200 mV. Este valor foi escolhido devido a essa diferença ser maior do que a amplitude máxima observada para os ruídos. Após ter sido encontrado os pontos de amplitude máxima e mínima, todo o processo é repetido para encontrar os próximos picos de ressonância, onde todos esses são armazenados em outro banco de dados.

4.3.4.3 Etapa de Identificação dos três Primeiros Picos de Flexão e Torção

Esse bloco utiliza todos os picos já identificados na etapa anterior seção 4.3.4.2 e aplica uma relação matemática entre eles para encontrar os três primeiros picos de ressonância dos modos de vibração por flexão e torção. Pickett [22] mostra que existe uma razão teórica do segundo, terceiro, quarto e quinto picos de ressonância em relação ao primeiro em função da razão entre o raio de giro e o comprimento da amostra, para o modo de vibração por flexão. Essas informações são utilizadas no software em forma de equação polinomial de grau seis (equação (3.1) e equação (3.2)), na identificação dos três primeiros picos de flexão.

A razão teórica dos picos de ordem superior em relação ao primeiro, para a vibração de torção, pode ser diretamente calculada através das equações (2.45), (2.53) e (2.54), obtendo-se os valores aproximados de 2 e 3 para a razão teórica do segundo pico pelo primeiro e do terceiro pelo primeiro, respectivamente. Devido à geometria do corpo de prova utilizada e o modelamento matemático empregado, o primeiro pico de ressonância em flexão aparece sempre antes do que o primeiro em torção. Assim, as análises são efetuadas primeiramente para a identificação dos picos de flexão e depois para a identificação dos picos de torção, após a extração dos três primeiros picos de flexão do banco de dados.

A lógica utilizada no software consiste na busca, a partir do segundo pico, da razão entre todos os picos com o primeiro, comparando-a com a razão teórica, considerando um erro pré-determinado (itens “Erro Torção” e “Erro Flexão”), tanto para flexão quanto para torção. Caso sejam encontrados vários picos que estejam dentro da faixa do erro escolhido e satisfaçam a relação teórica, o software é capaz de selecionar apenas o pico mais próximo da relação teórica e descartar os demais.

4.3.4.4 Etapa de Cálculo das Propriedades Elásticas

Após terem sido encontradas as três primeiras frequências de ressonância do modo de vibração por flexão e por torção, as propriedades elásticas podem ser determinadas nesse módulo final. O módulo de Young, módulo de cisalhamento e razão de Poisson são calculados através das equações mencionadas na seção 3.4.

A figura 4.27 mostra um fluxograma referente à lógica de programação para a obtenção do módulo de Young, módulo de cisalhamento e razão de Poisson, automaticamente. O software calcula primeiramente o módulo de cisalhamento, através do primeiro pico de frequência torcional, pois esse depende somente da densidade e dimensões da amostra.

Para que seja iniciada a operação de cálculo, devem-se fornecer inicialmente os valores 0,2 e 0,01 para k e μ respectivamente, de forma a serem utilizados nas equações (2.26), (2.27) e (2.29 – 2.34) para o cálculo dos parâmetros K' , A , B , α_1 , β_1 , M e N .

O valor inicial atribuído a k é muito importante quando ele é utilizado na verificação das raízes das equações (2.26), (2.27) e (2.29 – 2.34), pois essas equações são muito complexas e qualquer outro k abaixo desse valor e próximo a zero, pode levar a erros de divisão por zero. Também o valor inicial

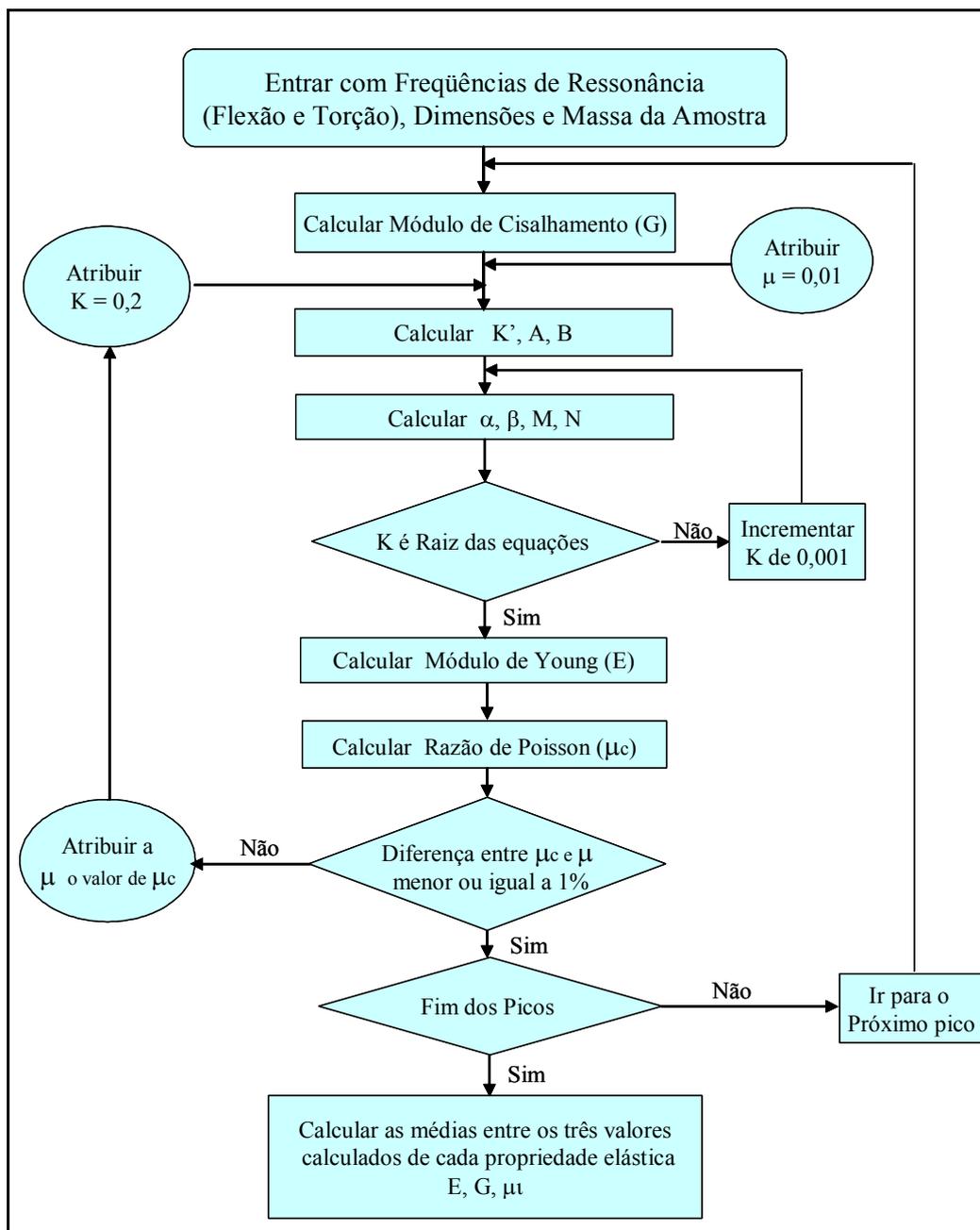


Figura 4.27 - Fluxograma para cálculo do módulo de Young, módulo de cisalhamento e razão de Poisson.

de 0,01, atribuído a μ , para o início do processo iterativo, está fora da faixa da razão de Poisson de materiais cerâmicos encontrados na literatura, o que garante uma maior iteratividade na busca da razão de Poisson do material ensaiado.

A próxima etapa é verificar se os valores de K são raízes das equações (2.26) ou (2.27). Caso negativo, o valor de K é sempre aumentado de 0,001 e novamente entra nos cálculos de α_1 , β_1 , M e N . Caso positivo, o valor de k é utilizado no cálculo do módulo de Young e da razão de Poisson através das equações (2.28) e (2.44), respectivamente.

Em seguida é verificado se a diferença entre a razão de Poisson atual e a anterior é menor ou igual a 1 %. Caso essa diferença seja superior a 1%, esse valor da razão de Poisson calculado entra novamente no cálculo das variáveis K' , A , B , α_1 , β_1 , M e N (equações (2.26), (2.27) e (2.29 – 2.34)) e o processo é repetido até que seja encontrada uma diferença entre a razão de Poisson anterior e a atual menor ou igual a 1%.

Caso a razão de Poisson passe nesse teste, o processo é novamente repetido desde o início efetuando-se os cálculos das propriedades elásticas para a segunda e terceira frequências de ressonância dos modos de vibração por flexão e torção (figura 4.27). O resultado final das propriedades elásticas sai da média aritmética dos três resultados obtidos de cada uma das frequências de ressonância.

4.4 Avaliação das Propriedades Elásticas de Alguns Materiais.

4.4.1 Avaliação do Módulo de Young em Função da Temperatura Utilizando Método Estático e Dinâmico

Akiyoshi [57] demonstrou que o módulo de Young em função da temperatura avaliada para uma alumina técnica utilizando um equipamento de ensaio de módulo de ruptura a quente, MOR-Q, precisa de correções devido à baixa rigidez do sistema de medida (equipamento e dispositivo de flexão), para obter o módulo de Young com maior precisão.

A figura 4.28 apresenta um gráfico do módulo de Young em função da temperatura para uma alumina técnica, caracterizada pelo equipamento de ensaio de módulo de ruptura a quente, MOR-Q (técnica estática) e pelo

equipamento desenvolvido (técnica de vibração). Para efeitos de comparação, nesta figura também é apresentada uma curva obtida por Munro [58], para uma alumina de alta pureza, utilizando a técnica ultra-sônica, descrita na norma ASTM - C 1198-91.

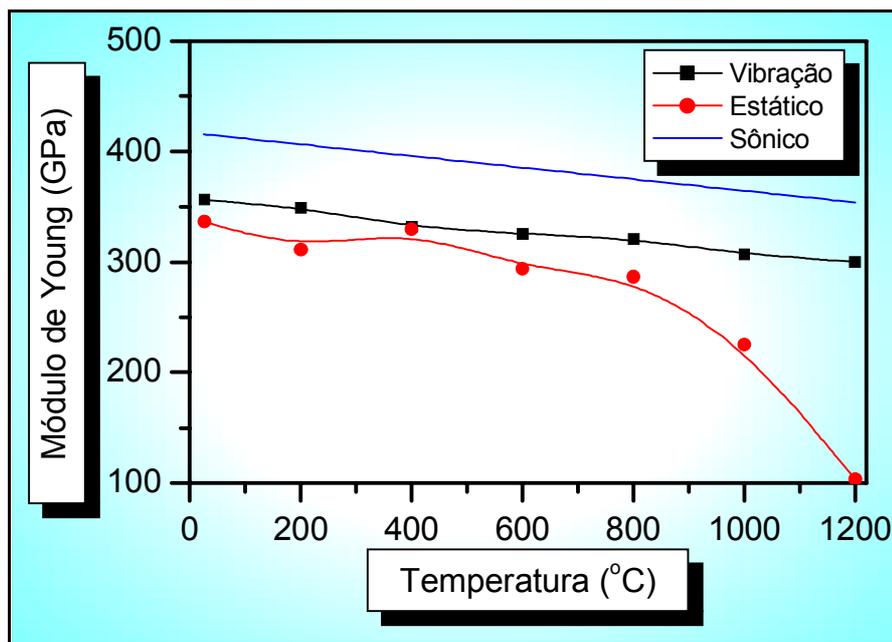


Figura 4.28 - Módulo de Young em função da temperatura obtido por um método estático [57], método dinâmico (equip. construído) para uma alumina técnica, e por um método ultra-sônico [58] para uma alumina pura.

A figura 4.28 também mostra que o módulo de Young obtido experimentalmente pelo equipamento desenvolvido (técnica de vibração) apresenta o mesmo comportamento daquele obtido por Munro [58], embora com valores absolutos ligeiramente diferentes devido possivelmente às fases presentes serem distintas das duas aluminas. A mesma amostra caracterizada pelo equipamento de módulo de ruptura a quente (técnica estática), apresentou comportamento semelhante aos outros dois equipamentos somente até a temperatura de 800 °C. Acima dessa temperatura, o módulo de Young medido pelo equipamento de módulo de ruptura a quente apresenta uma queda expressiva.

Essa mesma diferença de queda do módulo de Young com a

temperatura entre os métodos estático e dinâmico, foi observada para outros dois materiais distintos desses, como foi mostrado nas figuras 2.9 e 2.10.

Apesar de Akiyoshi [57] utilizar métodos para corrigir os valores do módulo de Young, o seu resultado em função da temperatura mostrado na figura 4.28 apresenta valores absolutos abaixo dos apresentados para a mesma amostra e caracterizada pelo equipamento desenvolvido nesse trabalho. A queda excessiva do módulo de Young em relação ao das técnicas dinâmicas, deve estar associada possivelmente à existência de fase vítrea [9].

O baixo valor de porosidade aparente (0,09%) (tabela 3.2) apresentado pelos corpos de alumina técnica pode ser um indicativo da presença de fase líquida na sinterização que depois se converte em fase vítrea.

Outra possibilidade para isto deve estar relacionada ao tempo de caracterização e o nível de deformação utilizado por essas técnicas. Métodos dinâmicos são muito rápidos e assim, deformações plásticas dependentes do tempo podem não ser medidas. Por outro lado, a medida pelo método estático é comparativamente mais longa e os resultados podem ser afetados por esta deformação plástica [34] e possivelmente pelo creep. Assim, mostrou-se que a técnica estática é mais afetada pelo maior nível de deformação imposta à amostra do que a dinâmica em altas temperaturas.

Os métodos estáticos e dinâmicos podem ser utilizados para diferentes propósitos:

- a) refratários sob ação de carga;
- b) avaliação de parâmetros de choque térmico;
- c) estudo de cerâmicas celulares.

4.4.2 Avaliação das Propriedades Elásticas de Concretos Refratários Afetados por Choque Térmico

Esta etapa do trabalho procura avaliar o dano por choque térmico; através da medida das propriedades elásticas (E , G e μ) pelo método de ressonância mecânica de barras, de um concreto refratário à base de alumina

contendo 1% - peso de cimento, com três tamanhos de agregados ($D_L = 2800, 4750, 8000 \mu\text{m}$) e três valores do coeficiente de distribuição de tamanho de partículas ($q = 0,21, 0,26$ e $0,31$).

Será mostrado que o equipamento desenvolvido nesta tese, através da técnica de ressonância mecânica de barras, tem sensibilidade suficiente para avaliar a variação das propriedades elásticas, confirmando assim os efeitos já esperados pela mudança microestrutural introduzida no concreto pelo choque térmico.

Após a aplicação de choque térmico em um concreto refratário é de se esperar um decréscimo nos seus valores dos módulos elásticos, pelo surgimento de novas trincas ou pelo crescimento das pré-existentes. Estas são intensificadas quando a variação de temperatura do choque for maior que a variação crítica, ΔT_c , da matriz. Os valores dos módulos elásticos podem também ser afetados pela quantidade de finos (matriz) e pela variação do maior tamanho de agregado presente no concreto, pois pode resultar em concretos com microestrutura com diferentes graus de interconectividade entre as partículas à medida que D_L e q variam.

A variação das propriedades elásticas, E , G e μ , com o tamanho máximo de agregado para as composições $q = 0,21$, $q = 0,26$ e $q = 0,31$ antes do choque térmico é mostrada nas Figuras 4.29 e 4.30. O módulo de Young e o módulo de cisalhamento decrescem com o aumento no diâmetro máximo do agregado para cada coeficiente de empacotamento, q , e também com o aumento de q para um dado tamanho de agregado (figura 4.29).

A razão de Poisson também decresce com o aumento no diâmetro máximo do agregado, para cada coeficiente de empacotamento, q . Entretanto, parece haver uma diminuição da influencia do tamanho de agregado na queda da razão de Poisson com o aumento do q (figura 4.30). Essa influência é bem menor para $q = 0,31$ e torna-se praticamente nula a partir do tamanho máximo $D_L = 4750 \mu\text{m}$.

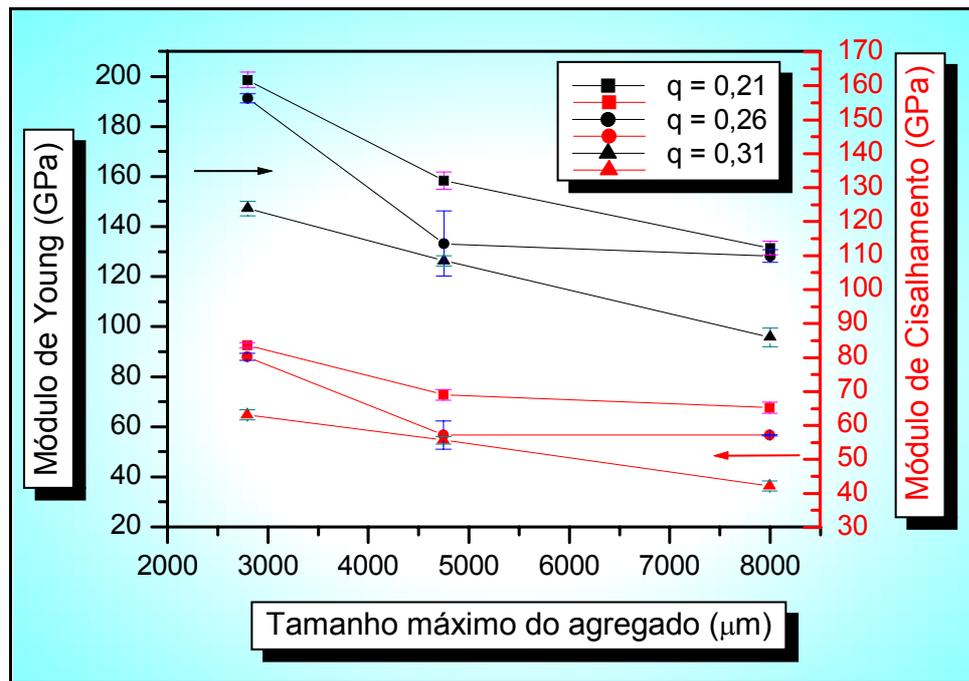


Figura 4.29 - Variação das propriedades elásticas, E e G, com o diâmetro máximo de agregado, D_L , para composições com $q = 0,21$, $0,26$ e $0,31$.

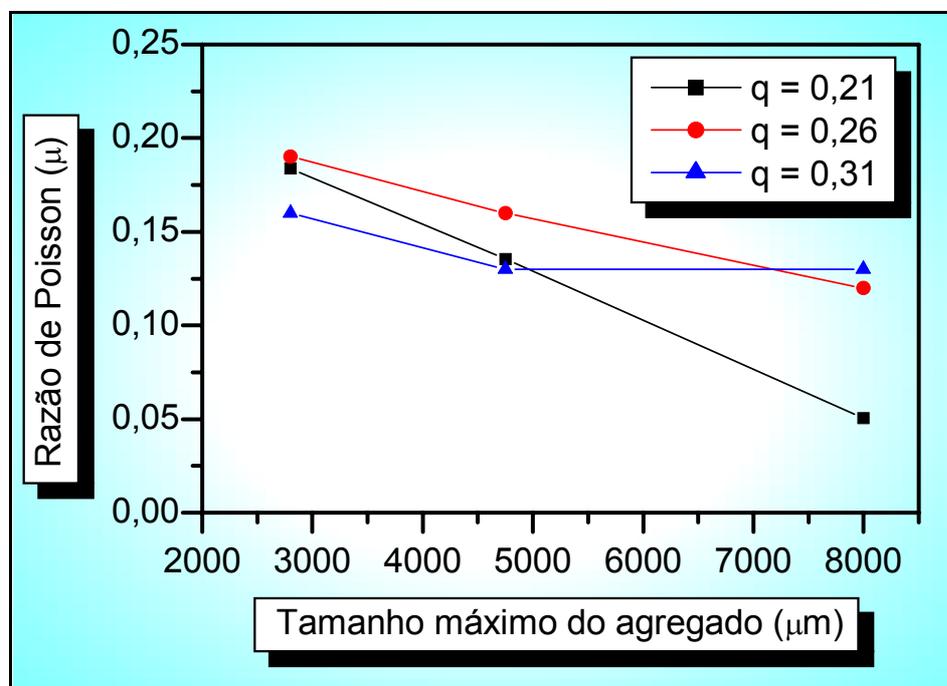


Figura 4.30 - Variação da razão de Poisson μ , com o diâmetro máximo de agregado, D_L , para composições com $q = 0,21$, $0,26$ e $0,31$.

Em termos de microestrutura, tanto o aumento de q quanto o aumento de D_L causam o mesmo efeito de diminuição da porcentagem volumétrica de matriz do concreto. Quando q é aumentado (para D_L fixo) a reta da distribuição acumulada aumenta de inclinação, o que faz o teor de finos (matriz) diminuir e o teor de grossos (agregados) aumentar, um em relação ao outro.

Entretanto, quando D_L é aumentado (para q fixo) a extensão de grossos aumenta em teor, provocando a diminuição volumétrica relativa, dos finos (matriz). Como a matriz é a parte da microestrutura que dá coesão ao concreto, a diminuição do seu teor pode ser a explicação da queda dos módulos elásticos com o aumento de q ou de D_L , conforme verificado na Figura 4.29.

Outros autores [59,60] que estudaram refratários à base de magnésia-zircônia e magnésia-carbono, mediram a razão de Poisson desses materiais através do pulso eco e encontraram valores desde 0,14 a 0,25. Os valores da razão de Poisson encontrados neste trabalho estão dentro da faixa de valores encontrados por esses autores. A composição com $q = 0,21$ e tamanho máximo de agregado de $8000 \mu\text{m}$ apresentou um valor inferior à faixa encontradas por eles. Isto mostra que essa composição foi mais sensível à queda da razão de Poisson. Por outro lado, os tamanhos máximos de agregados de $2800 \mu\text{m}$ e $4750 \mu\text{m}$ foram mais coerentes com os resultados deles, pois os seus tamanhos máximos de agregados variaram de $1 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m}$.

A composição com coeficiente de empacotamento $q = 0,26$ é tecnologicamente interessante porque resulta em um concreto bombeável de alto desempenho. Para esta formulação, a diminuição nos valores das propriedades elásticas com o aumento do diâmetro máximo de agregados é menos pronunciada a partir do tamanho de agregado de $4750 \mu\text{m}$ como é mostrado na Figura 4.29. Isto mostra que para uma formulação com essas características, as propriedades elásticas do concreto praticamente não são afetadas dentro desta faixa de tamanho de agregado. Baseado nesses resultados, a formulação com distribuição $q = 0,26$ foi escolhida para o estudo da degradação por choque térmico através das propriedades elásticas.

A Figura 4.31 mostra, em termos de E , o resultado da degradação mecânica da composição $q = 0,26$ em função da severidade do choque térmico, ΔT , para os três diâmetros máximos de agregado. Observa-se que independentemente do tamanho do agregado, o módulo de Young diminui com o aumento de ΔT , revelando o progressivo dano com a severidade do choque térmico.

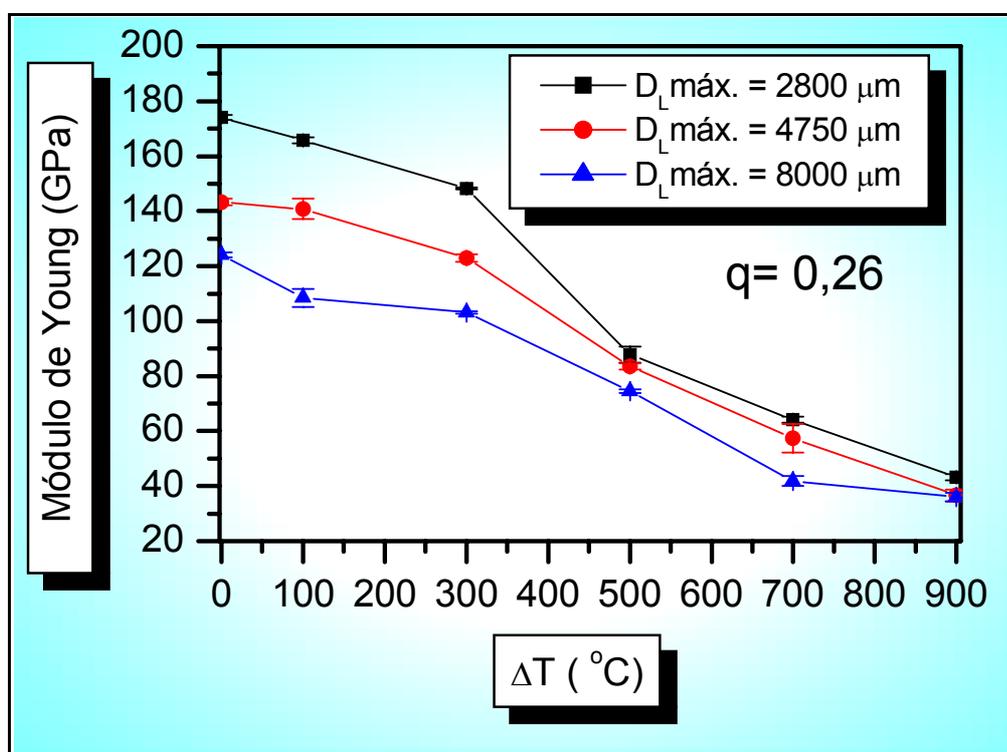


Figura 4.31 - Efeito da variação da temperatura de choque térmico, para um único ciclo, no módulo de Young do concreto $q=0,26$. As curvas estão parametrizadas pelo D_L .

Para variações de temperatura abaixo de 500 $^{\circ}\text{C}$, a variação do tamanho máximo do agregado teve uma influência maior na degradação do que em temperaturas acima de 500 $^{\circ}\text{C}$. Para $\Delta T = 900$ $^{\circ}\text{C}$, observa-se pouca influência da variação do tamanho de agregado. Uma melhor visualização desses efeitos, é mostrada na figura 4.32, para o módulo de Young relativo ($E_{\text{após choque}}/E_{\text{antes}}$)

choque) e essa mesma formulação. Todas as três curvas apresentam o mesmo comportamento.

Era esperada uma maior resistência ao dano por choque térmico para a composição com $D_L = 8000 \mu\text{m}$. Isto porque um agregado de tal dimensão representaria uma maior barreira à propagação das trincas. Como não se observou maior resistência ao dano por choque térmico para a composição com $D_L = 8000 \mu\text{m}$, uma hipótese para isto é que à medida que se aumenta D_L , diminui-se o número de partículas de agregado por unidade de volume do concreto, e portanto diminui o número das supostas barreiras. Outra hipótese pode estar relacionada com a possibilidade de que o trajeto da fratura do agregado tenha sido transgranular.

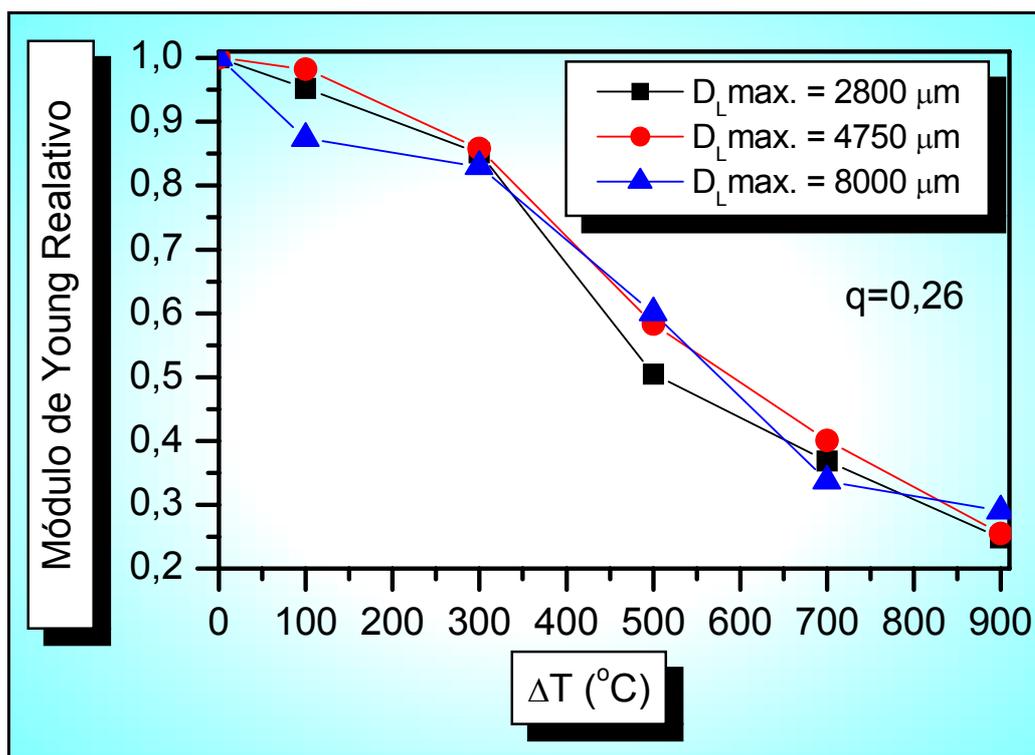


Figura 4.32 - Efeito da variação da temperatura de choque térmico, para um único ciclo, no módulo de Young relativo do concreto com $q = 0,26$.

O efeito do número de ciclos de choque térmico para $\Delta T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o concreto com $q = 0,26$ pode ser verificado na Figura 4.33 em função do tamanho máximo do agregado. Observa-se um grande dano nas amostras já no primeiro ciclo de choque térmico. O segundo e terceiro ciclos continuaram gerando danos, porém menos acentuados. A justificativa para isso é que, para o primeiro ciclo com $\Delta T = 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ é muito agressivo, causando grande dano no material.

Após esse primeiro ciclo muitos defeitos foram gerados e aqueles pré-existentes cresceram de tamanho, causando diminuição na resistência mecânica do concreto. Ciclos posteriores de choque térmico (segundo e terceiro ciclos) causaram dano relativamente menor, uma vez que esse material danificado torna-se naturalmente mais resistente ao choque térmico pelo mecanismo tenacificador do microtrincamento. Além disso, o acúmulo de energia elástica armazenada no corpo, que é a força motriz para a propagação das trincas, diminui com o decréscimo da resistência mecânica.

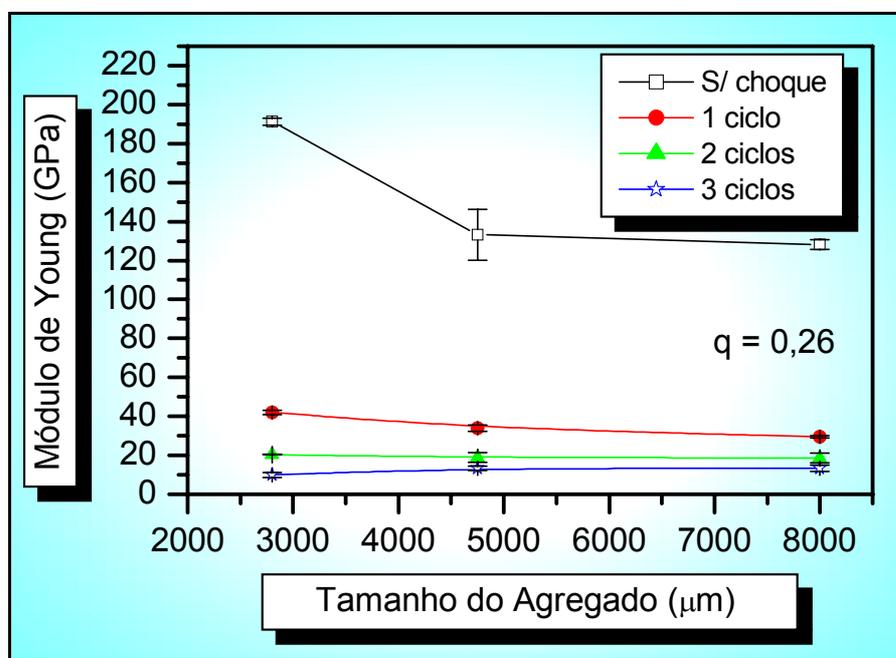


Figura 4.33 - Efeito do número de ciclos de choque térmico, para $\Delta T=900^{\circ}\text{C}$, no módulo de Young do concreto com $q=0,26$.

A metodologia utilizada na obtenção das propriedades elásticas possibilitou também avaliar o comportamento da razão de Poisson antes e após choque térmico desses concretos refratários. Através da Figura 4.34 pode-se verificar, para a amostra sem choque térmico, o decréscimo da razão de Poisson com o aumento do tamanho do agregado. Esses valores encontrados da razão de Poisson sem choque térmico estão coerentes com resultados da literatura para concretos à base de alumina [61].

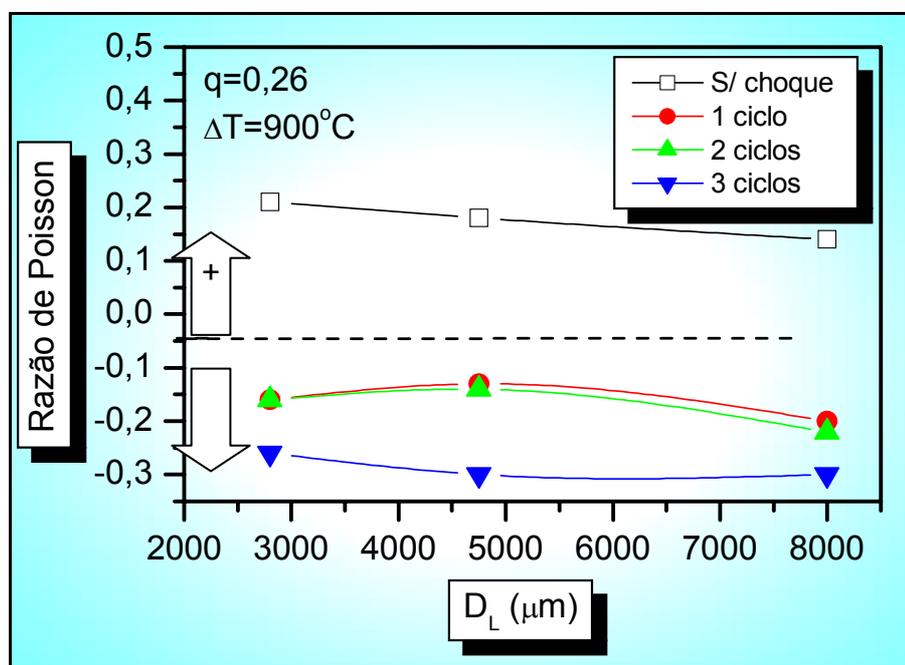


Figura 4.34 - Comportamento da razão de Poisson antes e após vários ciclos de choque térmicos para o concreto com $q = 0,26$ e diferentes tamanhos máximos de agregado.

A aplicação de apenas um único ciclo de choque térmico, de $\Delta T=900$ °C, provocou uma queda acentuada na razão de Poisson comparada com a amostra sem choque térmico, levando-se a valores negativos de μ . A aplicação de dois e três ciclos de choque térmico, de $\Delta T= 900$ °C, também levou a valores negativos da razão de Poisson o que pode significar uma

limitação da metodologia para a determinação dessa propriedade em corpos de prova submetidos a severos ciclos de choque térmico.

A equação (2.44) para o cálculo da razão de Poisson requer material isotrópico. Grandes danos provocados por muitos ciclos de choque térmico de alta severidade ($\Delta T = 900^{\circ}\text{C}$) pode estar tornando as amostras anisotrópicas. Jason e colegas [62] mostraram que o choque térmico em barras pode causar trincas transversais ao corpo de prova, que quando exagerados podem comprometer a continuidade física do corpo, perturbando a medida de μ .

Uma melhor avaliação disso pode ser feita, comparando-se os resultados do módulo de cisalhamento (figura 4.35) com o módulo de Young (figura 4.33), variando-se o tamanho máximo do agregado e aplicando-se 3 ciclos de choque térmico ($\Delta T=900^{\circ}\text{C}$) para o mesmo refratário ($q = 0,26$). Através das equações matemáticas que são utilizadas para o cálculo do módulo de cisalhamento, pode-se verificar que estas independem de μ . Por meio dessas figuras pode-se notar que apesar dos valores de μ serem negativos, estes não afetam determinantemente os valores de E (equação (2.35)), considerando o caso de corpos isotrópicos.

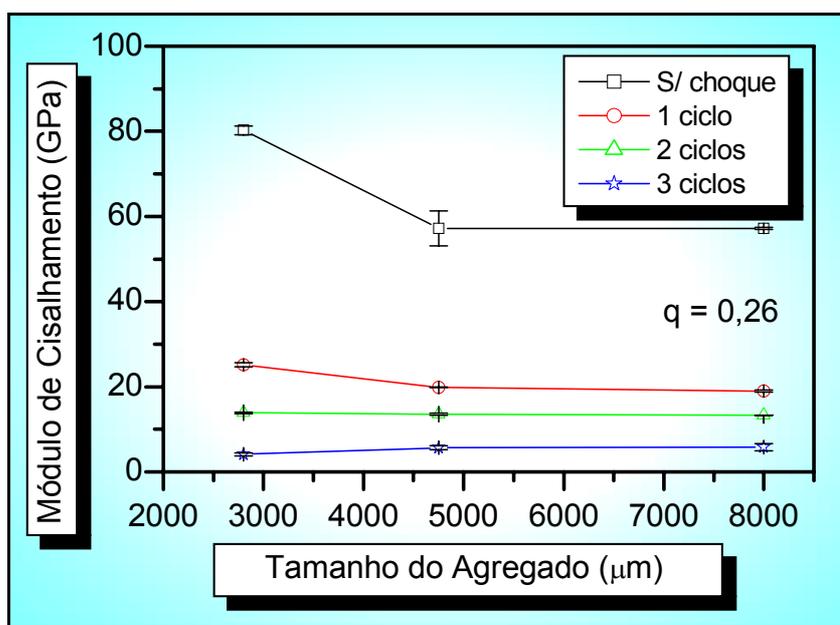


Figura 4.35 - Efeito do número de ciclos de choque térmico, para $\Delta T=900^{\circ}\text{C}$, no módulo de Cisalhamento do concreto com $q=0,26$.

4.4.3 Avaliação das Propriedades Elásticas de Cerâmicas Porosas

O módulo de Young e o módulo de cisalhamento de cerâmicas celulares, medidos em função da porosidade total e na temperatura ambiente são mostrados na Figura 4.36. Pode-se observar que o módulo de Young e o módulo de cisalhamento decrescem com o aumento da porosidade total, mostrando assim, que essas propriedades elásticas são influenciadas pela presença de pequenos defeitos do corpo (poros) de prova.

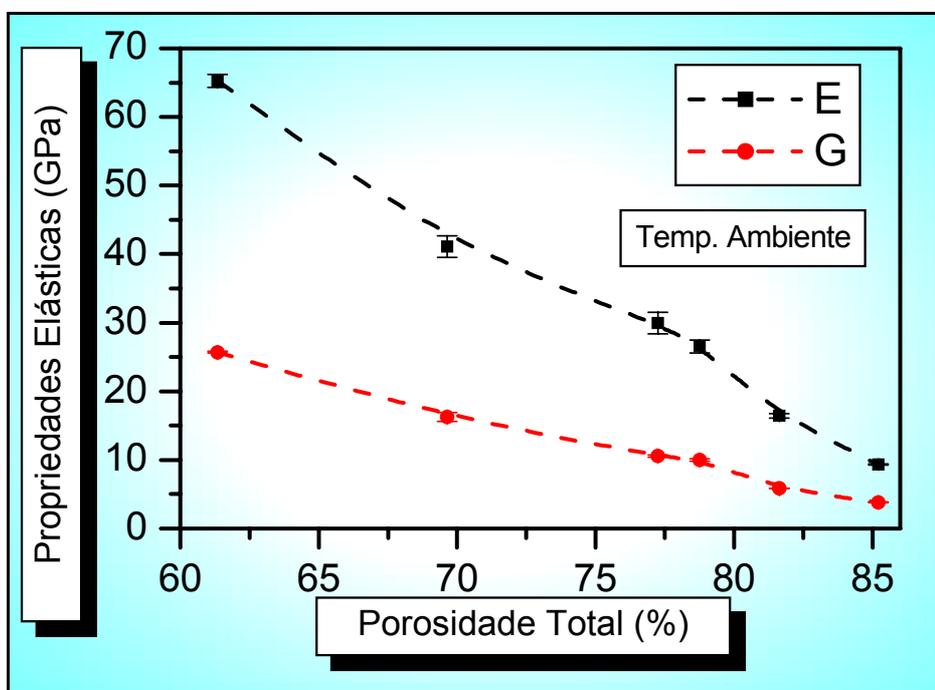


Figura 4.36 - Influência da porosidade nas propriedades elásticas das esponjas cerâmicas à temperatura ambiente. As linhas tracejadas são apenas para indicar uma tendência.

A variação da razão de Poisson e da razão de Poisson relativo com a porosidade total para as aluminas celulares, é apresentada na figura 4.37. É mostrado o decréscimo da razão de Poisson com o aumento da porosidade total, chegando a uma queda de 22 % para uma porosidade total de 85 %. Diferentemente de outros autores [40,63,64], que estudaram a dependência do

módulo de Young com a porosidade e assumiram valores constantes da razão de Poisson com a porosidade, é notado nos resultados mostrados na figura 4.36 que existe uma influência da porosidade na razão de Poisson. Outros autores [38,39], entretanto, mostraram que existe variação dos valores da razão de Poisson com a porosidade do material. Essa influência foi mostrada para uma alumina com porosidade total variando de 0,1 % a 25 %, utilizando a técnica do pulso eco. Os valores da razão de Poisson encontrado por eles foram bem próximos um do outro e variou praticamente de 0,25 a 0,19 para essa faixa de porosidade.

Entretanto, a figura 4.37 mostra que os valores da razão de Poisson encontrados neste trabalho, variaram de 0,27 a 0,21, porém, para uma faixa de porosidade de 61 % a 85%. Deve-se ressaltar que essa comparação é realizada em materiais que foram fabricados por processos diferentes, não se levando em consideração a distribuição, o tamanho e a forma do poro, o qual pode levar a uma tendência diferente nos intervalos de valores da razão de Poisson, para uma determinada faixa de porosidade.

Assim, o decréscimo da razão de Poisson indica que a porosidade induz uma diminuição da taxa de deformação entre a deformação na direção perpendicular e a paralela no sentido de aplicação da tensão.

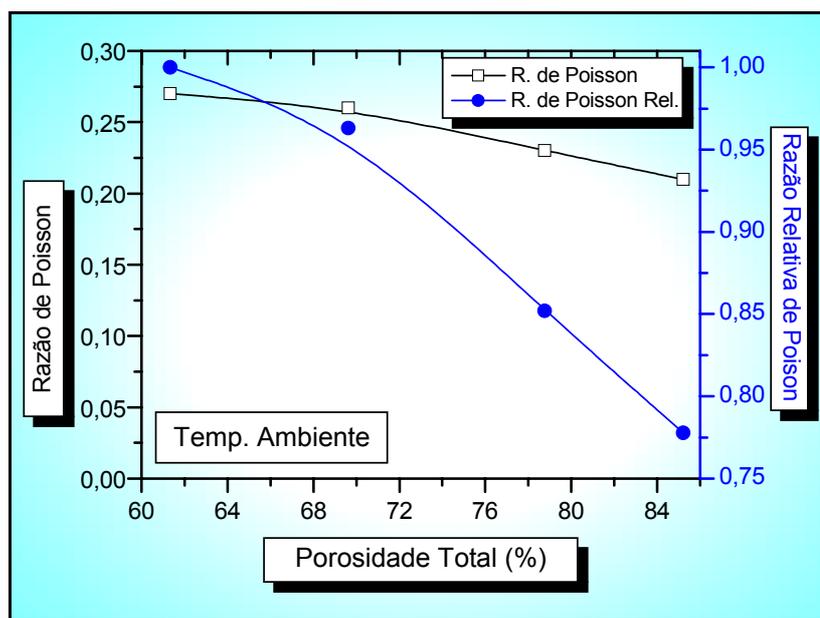


Figura 4.37 – Influência da porosidade na razão de Poisson de uma esponja cerâmica à base de alumina, na temperatura ambiente.

A Figura 4.38 mostra a variação do módulo de Young em função da porosidade total segundo os dados experimentais (pontos) obtidos através das equações (2.26 - 2.34), além dos modelos (curvas) de Mackenzie [32], equação (2.62), e de Boccaccini [40], equação (2.59 e 2.60) (Temperatura ambiente).

Para o modelo de Boccaccini usou-se a relação $z/x = 1$ que corresponde à forma esférica e $z/x = 1,5$ que corresponde à forma cilíndrica dos poros. Pode-se observar que os resultados experimentais estão mais de acordo com o modelamento de Mackenzie, que considera poros esféricos.

Através do modelo de Boccaccini, os pontos experimentais se aproximam mais da curva para $z/x = 1,5$, ou seja para poros cilíndricos. Isso tem sentido, considerando-se que para a alta porosidade das esponjas, há uma grande conexão entre os poros. Uma fileira de poros esféricos conectados pode ser abstraída por um poro cilíndrico. Evidência da interconectividade entre os poros pode ser inferida pela proximidade entre os valores das porosidades total e aparente (Tabela 3.5). Esforços estão sendo feitos para ampliar o estudo e caracterização dessas espumas cerâmicas com níveis menores de porosidades, completando, assim, mais extensamente a figura 4.38.

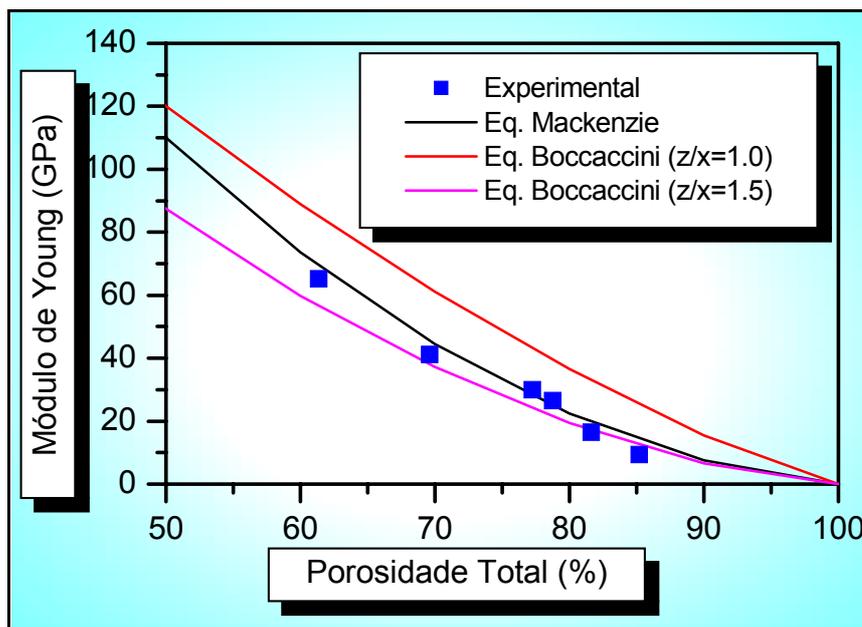


Figura 4.38 - Influência da porosidade no módulo elástico segundo modelos de Mackenzie e Boccaccini (curvas contínuas) e os resultados experimentais (pontos) desta tese.

Neste trabalho, não foi efetuada a correção do coeficiente de dilatação térmica linear para as amostras de alumina celular em função da temperatura. Entretanto, verificou-se essa influência em uma alumina celular com porosidade total = 61,34 %. Os valores do módulo de cisalhamento relativo, sem e com correção do α , pode ser vista na figura 4.39.

Verifica-se que praticamente não houve diferença de valores entre o módulo de cisalhamento relativo realizado neste teste. A diferença máxima foi de aproximadamente 1 % a 1200 °C. Essa diferença é muito pequena se comparada com o $\alpha = 8 \times 10^{-6}$ °C, utilizado neste trabalho. Essa pequena diferença concorda com Paulsem e colaboradores [65], que caracterizaram um refratário à base de alumina-sílica. Eles também ignoraram essa correção, pois estimaram valores na faixa de 0,5 % a 0,9 %, para uma diferença de temperatura de 1000 °C e um α variando de 5 a 9 x 10⁻⁶ °C.

Neste caso, as propriedades elásticas podem ser obtidas através das equações desenvolvidas para a temperatura ambiente, pela substituição da frequência de ressonância encontrada, na temperatura de medida.

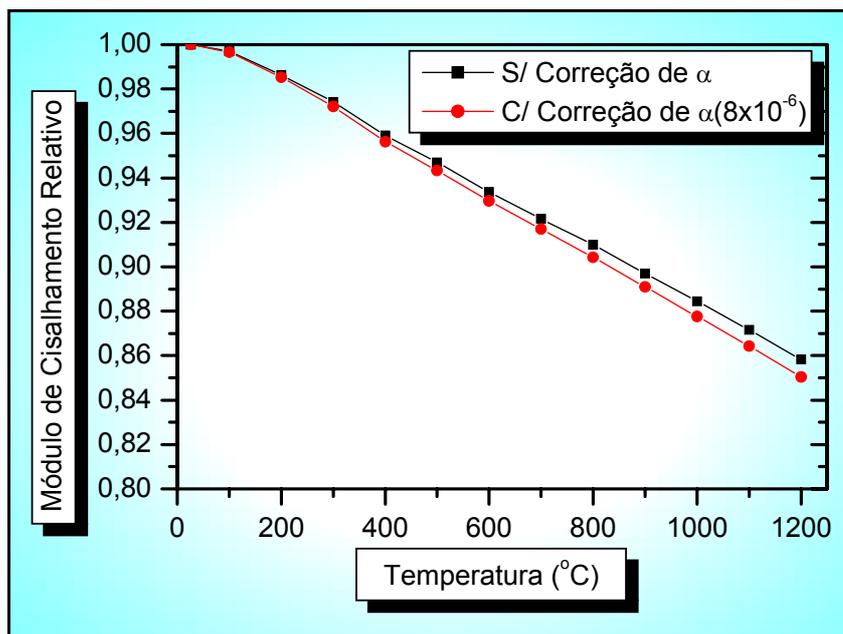


Figura 4.39 – Influência da correção do coeficiente de dilatação térmica linear no módulo de cisalhamento relativo de uma alumina celular com porosidade total de 61,34 %.

A Figura 4.40 mostra a variação do módulo de Young relativo ($E_{temp.}/E_{temp. Amb.}$) em função da temperatura para as amostras de esponja cerâmica com porosidade total na faixa de 61 a 85%. Para todas essas amostras observa-se uma queda não muito acentuada do módulo de Young com o aumento da temperatura, até 1100 °C. O comportamento dessas amostras é praticamente o mesmo até os 500 °C. Acima desta temperatura, a porosidade teve uma maior influência na queda de E relativo. Na temperatura de 1100 °C a queda máxima sofrida nos valores de E ficou entre 11 e 13%, sendo que este valor aumenta com o aumento da porosidade total do material.

Esse valor de queda no módulo de Young concorda com Munro [58] que caracterizou a alumina sinterizada com 2% de porosidade. Portanto, a queda observada na Figura 4.40 tem sua justificativa, em grande parte, devido aos efeitos da temperatura e não da estrutura celular. Tal resultado pode estar relacionado ao tipo de solicitação efetuado para se avaliar os módulos elásticos. No método de ressonância mecânica de barras a carga aplicada é muito baixa.

Efeitos específicos da macroestrutura da cerâmica celular exigem maiores estudos, ora em prosseguimento no grupo de trabalho.

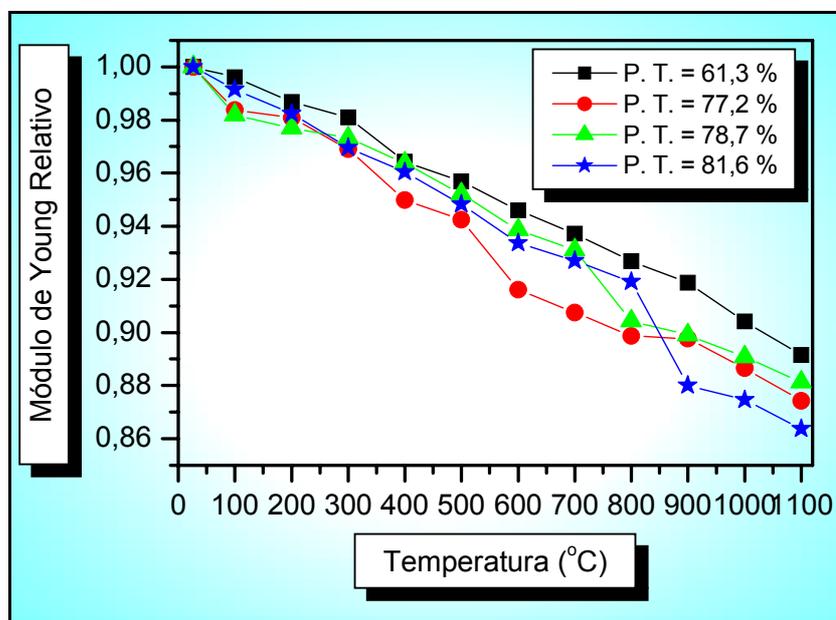


Figura 4.40 - Variação do módulo de Young relativo com a temperatura parametrizada pela porosidade de esponjas cerâmicas de alumina.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, duas ferramentas que permitem estudar o comportamento dos materiais cerâmicos refratários com elevada precisão foram desenvolvidas: (a) um software de controle, aquisição e análise das propriedades elásticas em função da temperatura baseado nas equações que apresentam melhor precisão nas medidas; (b) construção de um equipamento, capaz de obter as frequências de ressonância para serem utilizadas pelo software na determinação do módulo de Young, módulo de cisalhamento e razão de Poisson, de forma totalmente automática.

Ambas as ferramentas se mostraram adequadas para o estudo da influência da distribuição granulométrica sobre as propriedades elásticas de concretos refratários aluminosos afetados por choque térmico e também no

estudo da porosidade de espumas cerâmicas processadas por gelcasting nas propriedades elásticas, em função da temperatura.

Os resultados obtidos nesse trabalho mostram que o equipamento desenvolvido utilizando a técnica de ressonância de barras é bastante confiável quanto à reprodutibilidade e precisão dos valores medidos. O cálculo dos módulos de Young e de cisalhamento, assim como da razão de Poisson, utilizando a média entre os três primeiros picos de ressonância para cada um dos modos de vibração proporciona maior precisão, aliada ao modelamento matemático empregado.

As hastes cerâmicas utilizadas para fazer o acoplamento entre os transdutores e a amostra, praticamente não interferiram nas medidas efetuadas à temperatura ambiente, o que propicia a utilização do equipamento na obtenção das propriedades elásticas em função da temperatura, até 1200 °C, pois sem essas hastes não seria possível acoplar os transdutores, externamente localizados, e a amostra no interior do forno.

Para o equipamento funcionar de maneira totalmente automática, o arranjo utilizado na montagem da amostra foi de vital importância para a obtenção das vibrações pelo modo flexional e torcional, simultaneamente. As posições de contato dos transdutores com a amostra e da amostra com o suporte foi decisivo para garantir bom nível de sinal captado pelo equipamento.

As propriedades elásticas obtidas antes do choque térmico para os concretos refratários por meio dessa técnica mostram que essas são dependentes tanto do coeficiente de Andreasen, q , na formulação quanto do diâmetro máximo do agregado, D_L . Para a formulação com $q = 0,26$ essa influência foi praticamente pequena para as amostras com tamanhos máximos de agregado na faixa de 4750 e 8000 μm .

O aumento do número de ciclos de choque térmico, para $\Delta T = 900$ °C, leva à obtenção de valores negativos da razão de Poisson. Isto sugere que o modelamento matemático e a técnica empregada não devem ser utilizados na obtenção da razão de Poisson em materiais altamente danificados pelo choque térmico, limitando, assim, a confiabilidade em E . Porém, G independe disso.

Este trabalho mostrou que a técnica de ressonância mecânica de barras, para a determinação dos módulos elásticos e da razão de Poisson, tem sensibilidade suficiente para acompanhar mudanças microestruturais sutis causadas pelos parâmetros q e D_L da formulação de concretos refratários. Além disso, os experimentos parecem indicar que a razão de Poisson é sensível ao dano exagerado por choque térmico, apresentando valores não usuais, indicando talvez a perda de isotropia do corpo.

Os modelamentos de Mackenzie e de Boccaccini que descrevem a dependência do módulo de Young com a porosidade permitiram confirmar a precisão e exatidão do acompanhamento da modificação microestrutural, pela porosidade de esponjas cerâmicas. Os resultados experimentais mostram que esses valores são mais concordantes com o modelamento de Mackenzie. Esses mesmos resultados, quando comparados com o modelamento de Boccaccini, mostram uma maior concordância quando se utiliza esse modelo com o fator de forma $z/x = 1.5$ (forma cilíndrica).

A dependência dos módulos elásticos com a temperatura para as esponjas de alumina pôde também ser avaliada. A queda dos módulos é influenciada predominantemente pela temperatura, mas também há influência da porosidade total. A queda no módulo de Young relativo foi maior na esponja de maior porosidade na temperatura de 1100 °C.

O método utilizado neste trabalho possibilitou o estudo de cerâmicas de alumina com porosidade entre 60 e 87% em função da temperatura, o que dificilmente seria conseguido por meio de outras técnicas, principalmente a estática. Além disso, essa possibilidade é de extrema relevância para o potencial de aplicação de esponjas cerâmicas em altas temperaturas.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho, encontraram-se diversas dificuldades e assuntos que podem ser abordadas em trabalhos futuros:

- i) Estudo de novos materiais para serem utilizados como haste de acoplamentos entre os transdutores e os corpos de prova, buscando aluminas mais puras para diminuir o efeito da fluência;
- ii) Fazer vários outros estudos utilizando outros tipos de sensores para melhorar o nível de amplitude do sinal capturado da amostra;
- iii) Fazer alterações no equipamento para que ele possa realizar medidas em temperaturas mais elevadas;
- iv) Efetuar evolução no software de controle, aquisição e cálculo das propriedades elásticas. Proposta para isso, seria a incorporação de uma rotina com ferramentas estatísticas de análise para melhorar a etapa de ajuste e que possibilite um tratamento estatístico dos resultados dos obtidos.
- v) Aprofundar os estudos que avaliam a influência da distribuição granulométrica sobre o comportamento elástico dos concretos refratários antes e após choque térmico;
- vi) Aprofundar os estudos que avaliam a influência do tamanho de agregado sobre o comportamento elástico dos concretos refratários após choque térmico, realizando um mapeamento completo da ciclagem térmica por diferentes ΔT para as formulações $q = 0,21$, $q = 0,26$ e $q = 0,31$;
- vii) Aprofundar os estudos que avaliam a influência da porosidade de espumas cerâmicas sobre o comportamento das propriedades elásticas; efetuando-se medidas em níveis de porosidade mais baixa para uma avaliação global desse comportamento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HAYDEN, W., MOFFATT, W.G., WULFF, J. Mechanical Behavior, **John Wiley & Sons**, New York, EUA, v. III, 1965, p. 61-96.
- 2 ZANOTTO , E. D., MIGLIORY Jr. A. R. Propriedades Mecânicas de Materiais Cerâmicos: Uma Introdução. **Cerâmica**, 37 (247), 1991, p. 7-16.
- 3 HASSELMAN, D. P. H. Unified Theory of Thermal Shock Fracture Initiation and Propagation in Brittle Ceramics. **J. Am. Ceram. Soc.**, 52(11), 1969, p. 600-604.
- 4 CALLISTER JR., W. D. Materials Science and Engineering. 4th ed. New York: **John Willey & Sons**, 1997, 852 p.
- 5 SCHREIBER, E.; ORSON, A. L.; SOGA, N. Elastic Constants and Their Measurement”, Capítulo 4: Dynamic Resonance Method for Measuring the Elastic Moduli of Solids, **McGraw-Hill**, 1973, p. 82-125.
- 6 SPINNER, S.; VALORE JR., R. C. Comparison of Theoretical and Empirical Relations between the Shear Modulus and Torcional Resonance Frequencies for Bars of Rectangular Cross Section. **J. Res. Nat. Bur. Standards**, 60 (5), May, 1958, p. 459-464.

- 7 SPINNER, S.; TEFFT, W. E. A Method for Determining Mechanical Resonance Frequencies and for Calculating Elastic Moduli from these Frequencies. *Am. Soc. Test. Mat.*, Proc., 61, 1961, p. 1221-1238.
- 8 AULT, N.; UELTZ, H. F. G. Sonic Analysis for Solid Bodies. *J. Am. Cer. Soc.*, 36 (6), June, 1953, p. 199-203.
- 9 SPINNER, S. Elastic Moduli of Glasses at Elevated Temperatures by a Dynamic Method. *J. Am. Cer. Soc.*, 39 (3), 1956, p. 113-118.
- 10 WACHTMAN JR., J. B.; LAM JR., D. G. Young's Modulus of Various Refractory Materials as a Function of Temperature. *J. Am. Cer. Soc.*, 42 (5), May, 1959, p. 254-260.
- 11 HORIKAW, S.; et all. Projeto e Construção de um Equipamento Para a Medida do Módulo de Elasticidade através do Método de Ressonância. *Cerâmica*, 34 (221), Junho, 1988, p. 98-103.
- 12 KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., SANDERS, J. V. Fundamentals of Acoustics. 3^a ed. New York, *John Wiley & Sons*, 1982, 480 p.
- 13 THOMSON, W. T., DAHLEH, M. D. Theory of Vibrations With Applications. 5^a ed. New Jersey, *Prentice Hall*, 1998, 524 p.
- 14 WARBURTON, G. B. The Dynamical Behaviour of Structures. 2^a ed. New York, *Pergamon Press*, 1976, 354 p.

- 15 RAYLEIGH, L. The Theory of Sound. v. 1, **Dover**, New York, 1945, 356 p.
- 16 LOVE, A. E. H. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. 4^a ed., **Dover**, New York, 1944, 435 p.
- 17 LAMB, H. The Dynamical Theory of Sound. 2^a ed., **Dover**, New York, 1960, 325 p.
- 18 DAVIS, W. R. Measurement of the Elastic Constants of Ceramics by Resonant Frequency Methods. **The British Ceramic**, 67 (11), 1967, p. 515-541.
- 19 BANCROFT, D. The Velocity of Longitudinal Waves in Cylindrical Bars. **Phys. Rev.**, (59), 1941, p. 588-593.
- 20 KNAKE, H.; LOBERT, G.; TÖPFER, M. Präzisionsbestimmung elastischer kennwerte mit dem Geratesystem ELAKON. **Friedrich-Schiller** - Universität Jena, Jena, 1989, 42 pgs.
- 21 RODRIGUES, J. A.; PANDOLFELLI, V. C.; PAGLIOSA NETO, C. Equipamento para a Determinação do Módulo Elástico e Razão de Poisson pela Técnica de Frequências de Ressonância de Barras, até 1100 °C. **Anais do 36^o Congresso Brasileiro de Cerâmica**, junho, Caxambú-MG, 1992, p. 711-718.

- 22 PICKETT, G. Equations for Computing Elastic Constants from Flexional and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders. *Am. Soc. Test. Mater.*, Proc., 45, 1945, p. 846-865.
- 23 TIMOSHENKO, S.; GOODIER, J. N. Theory of Elasticity. 2^a ed., p. 277, **McGraw-Hill**, New York, 1951.
- 24 THOMSON, W. P. The Effect of Rotatory and Lateral Inertia on Flexional Vibration of Prismatic Bars. *Journal Acoustical Soc. Am.*, (6), 1939, p. 198-205.
- 25 SPINNER, S.; REICHARD, T. W.; TEFFT, W. E. A Comparison of Experimental and Theoretical Relations between Young's Modulus and the Flexional and Longitudinal Resonance Frequencies of Uniform Bars. *J. Res. Nat. Bur. Standards*, 64A (2), 1960, p.147-155.
- 26 KANEKO, T. Relation Between Flexional Resonant Frequencies of Rectangular Beams and Young's Modulus. *J. Non-Crystalline Solids*, 21, 1976, p. 435-439.
- 27 TEFFT, W. E. Numerical Solution of the Frequency Equations for the Flexional Vibration of Cylindrical Rods. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 64B:237, 1960.
- 28 **AMERICAN SOCIETY FOR TESTINGS AND MATERIALS** Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Sonic Resonance. Designation: C 1198 – 96, 1996, 1 – 8.

- 29 DAVIES, R. M. – The Frequency of Longitudinal and Torsional Vibration of Unloaded and Loaded Bars. *Philosophical Magazine*, 25, 1938, p. 364-386.
- 30 TEFFT, W. E.; SPINNER, S. Torsional Resonance Vibrations of Uniform Bars of Square Cross Section. *J. Res. Nat. Bur. Standards*, 65A, 1961, p. 167-171.
- 31 **AMERICAN SOCIETY FOR TESTINGS AND MATERIALS** Standard Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance, Designation: C 623 – 92, 1992, Re-Aprovada em 1995, p. 1-6.
- 32 DÖRRE, E., HÜBNER, H. Alumina Processing, Properties and Applications, *Springer-Verlag*, 1984, p. 74-104.
- 33 NONNET, E.; LEQUEUX, N.; BOCH, P. Elastic Properties of High Alumina Cement Castables from Room Temperature to 1600 °C. *Journal of the European Ceramic Society*, (19), 1999, p. 1575-1583.
- 34 SCHULLE, W., BURKHARDT, K., TOMSU, F. Evaluation of the Modulus of Elasticity of Refractories. *UNITECR 1999*, Berlin. In: Proceedings Berlin: German Ceramic Society, 1999, 410-412.
- 35 RAMAKRISHAN, N., ARUNACHALAM, V.S., Effective Elastic Moduli of Porous Solids, *Journal of Materials Science*, 25, 1990, p. 3930-3937.

- 36 DEAN, E.A., LOPEZ, J.A. Empirical Dependence of Elastic Moduli on Porosity for Ceramic Materials. *Journal of the American Ceramic Society*, (66), No. 5, 1983, p. 366-370.
- 37 RAMAKRISHAN, N., ARUNACHALAM, V.S., Effective Elastic Moduli of Porous Ceramic Materials. *J. Am. Ceramic. Soc.*, 76(11), 1993, p. 2745-2752.
- 38 ASMANI, M., KERMEL, C., LERICHE, A., OURAK, M. Influence of Porosity on Young's Modulus and Poisson's Ratio in Alumina Ceramics. *Journal of European Ceramic Society*, (21), 2001, p. 1081-1086.
- 39 CHANG, L. S., CHUANG, T. H., WEI, W. J. Characterization of Alumina Ceramics by Ultrasonic Testing. *Materials Characterization*, (45), 2000, p. 221-226.
- 40 BOCCACCINI, D.N., BOCCACCINI, A. R. Dependence of Ultrasonic Velocity on Porosity and Pore Shape in Sintered Materials. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 16 (4), 1997, p. 187-192.
- 41 **AMERICAN SOCIETY FOR TESTINGS AND MATERIALS** Standard Test Method for Moduli of Elasticity and Fundamental Frequencies of Carbon and Graphite Materials by Sonic Resonance. Designation: C 747 – 93, 1993, p. 1-8.
- 42 **AMERICAN SOCIETY FOR TESTINGS AND MATERIALS** Standard Test Method for Young's Modulus of Refractory Shapes by Sonic Resonance. Designation: C 885 – 87, 1987, p. 278-283.

- 43 **AMERICAN SOCIETY FOR TESTINGS AND MATERIALS** Standard Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Glass and Glass-Ceramics by Resonance, Designation: C 623 – 92, 1992, Re-Approved on 1995, p. 1-6.
- 44 CHIRLIAN, P. M. Analysis and Design of Integrated Electronic Circuits. **Harper Row Inc.**, 1987, 2.a ed., USA.
- 45 PERTENCE, J. A. Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório, **Mc Graw-Hill**, 5ª. Ed., São Paulo, 1988.
- 46 MALVINO, A. P. -, Eletrônica, 4ª Edição, **Makron Books**, [2], São Paulo, 1995.
- 47 COUGHLIN, R. F., DRISCOLL, F. F. Operational Amplifiers and Linear Integrated Circuits. **Prentice-Hall Inc.**, 3ª Ed., USA, 1987.
- 48 **KANTHAL SUPER HANDBOOK**, Hallstahammar, Sweden, 1999.
- 49 **DATA SHEET** FiberFrac Duraboard High Temperature, Placas Duraboard 1600 e Duraboard 1200, UNIFRAX-Brasil, 2002.
- 50 PILLEGi, R. G., PAIVA, A. E. M., GALLO, J., PANDOLFELLI, V. C. Novel rheometer for refractory castables. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 79, n. 1, 2000, p. 54 -58.

- 51 PILEGGI, R. G., STUDARDT, A. R., PANDOLFELLI, V. C. How mixing affects the rheology of refractory castables, part 2. *American Ceramic Society Bulletin*, 80(7), 2001, p. 27-31.
- 52 PAIVA, A. E. M., Rodrigues, J. A. *Proceedings of the 45th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society*. Florianópolis - SC, 2001.
- 53 ORTEGA, F. S., PAIVA, A. E. M., RODRIGUES, J. A., PANDOLFELLI, V. C. *Proceedings of the 46th Annual Meeting of the Brazilian Ceramic Society*, São Paulo - SP, 2002.
- 54 **HANDBOOK LF356**, Manual do Circuito Operacional Integrado LF356.
- 55 WACHTMAN Jr., J. B., TEFFT, W. E. Effect of Suspension Position on Apparent Values of Internal Friction Determined by Forster's Method. *The Review of Scientific Instruments*, 29 (6), 1958, p. 517-520.
- 56 GOLDSBY, J. C. Temperature-Dependent Elastic and Anelastic Behavior of Silicon-based Fiber-Reinforced Silicon Carbide Ceramic Matrix Composites. *Materials Science and Engineering*, A279, 2000, 266-274.
- 57 AKIYOSHI, M. M., Avaliação das Propriedades Térmicas e Mecânicas Visando à Simulação Computacional de Cerâmicas Refratárias, *Dissertação de Mestrado*, UFSCar, 2001.
- 58 MUNRO, R. G. Evaluated Material Properties for Sintered α -Al₂O₃. *J. Am. Ceram. Soc.*, 80(8), 1997, p. 1919-1928.

- 59 WEN-CHENG J., W., YUH-PRING, L. Mechanical and Thermal Shock Properties of Size Graded MgO-PSZ Refractory. ***Journal of the European Ceramic Society***, (20), 2000, p. 1159-1167.
- 60 SCHMITT, N., BERTHAUD, Y., POIRIER, J. Tensile Behaviour of Magnesia Carbon Refractories. ***Journal of the European Ceramic Society***, (20), 2000, p. 2239-2248.
- 61 TEFFT, W. ***J. Res. Nat. Bur. Stand.***, 70A, 1966, 277-280.
- 62 SCHYMANSKI, J., VAN DER LAAN, S. R. ***J. Am. Ceram. Soc.***, 84(6), 2001, p. 1309-1314.
- 63 NAGARAJAN, A. – Ultrasonic Study of Elasticity Porosity Relationship in Polycrystalline Alumina. ***Journal of Applied Physics***, 42 (10), 1971, p. 3693-3696.
- 64 LAM, D. C. C., LANGE, F. F., EVANS, A. G. Mechanical Properties of Alumina Produced from Powder Compacts. ***J. Am. Ceram. Soc.***, 77(8), 1994, 2113-2117.
- 65 PAULSEN, O., STEINMO, M., SELTVEIT, A. ***In Proc. of UNITECR'91***, Aachen, 1991, p. 577-582.

ANEXO A

Fator T_1 , para o modo fundamental da vibração flexional de cilindros, em função da razão d/l e razão de Poisson [7].

Razão d/l	Razão de Poisson										
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,00	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
0,02	1,001954	1,001979	1,002004	1,002029	1,002053	1,002077	1,002100	1,002124	1,002147	1,002170	1,002193
0,04	1,007804	1,007905	1,008004	1,008102	1,008199	1,008295	1,008388	1,008482	1,008575	1,008666	1,008757
0,06	1,017522	1,017748	1,017968	1,018186	1,018405	1,018619	1,018826	1,019038	1,019245	1,019450	1,019653
0,08	1,031064	1,031461	1,031848	1,032233	1,032618	1,032994	1,033360	1,033733	1,034096	1,034459	1,034818
0,10	1,048367	1,048983	1,049580	1,050174	1,050765	1,051344	1,051916	1,052484	1,053050	1,053610	1,054170
0,12	1,069357	1,070225	1,071077	1,071920	1,072753	1,073577	1,074393	1,075202	1,076008	1,076808	1,077604
0,14	1,093950	1,095111	1,096256	1,097378	1,098495	1,099599	1,100694	1,101782	1,102864	1,103941	1,105015
0,16	1,122061	1,123544	1,125007	1,126452	1,127884	1,129302	1,130711	1,132113	1,133509	1,134901	1,136288
0,18	1,153592	1,155430	1,157245	1,159039	1,160817	1,162585	1,164337	1,166086	1,167830	1,169569	1,171308
0,20	1,188458	1,190676	1,192869	1,195038	1,197191	1,199332	1,201464	1,203591	1,205714	1,207838	1,209961
0,22	1,226567	1,229189	1,231781	1,234351	1,236906	1,239449	1,241986	1,244521	1,247057	1,249596	1,252141
0,24	1,267838	1,270881	1,273894	1,276886	1,279865	1,282836	1,285807	1,288779	1,291757	1,294746	1,297747
0,26	1,312189	1,315668	1,319120	1,322555	1,325980	1,329403	1,332832	1,336270	1,339723	1,343194	1,346687
0,28	1,359546	1,363477	1,367381	1,371276	1,375167	1,379065	1,382977	1,386911	1,390869	1,394857	1,398879
0,30	1,409842	1,414233	1,418606	1,422974	1,427322	1,431747	1,436169	1,440625	1,445121	1,449661	1,454250
0,32	1,463014	1,467873	1,472724	1,477584	1,482465	1,487380	1,492337	1,497345	1,502411	1,507540	1,512737
0,34	1,519006	1,524340	1,529680	1,535043	1,540446	1,545901	1,551420	1,557012	1,562682	1,568439	1,574286
0,36	1,577766	1,583580	1,589417	1,595298	1,601240	1,607259	1,613367	1,619572	1,625884	1,632309	1,638853
0,38	1,639253	1,645548	1,651888	1,658300	1,664800	1,671405	1,678129	1,684983	1,691975	1,699113	1,706401
0,40	1,703422	1,710202	1,717054	1,724007	1,731082	1,738298	1,745669	1,753207	1,760921	1,768818	1,776904
0,42	1,770243	1,777505	1,784874	1,792382	1,800052	1,807904	1,815954	1,824214	1,832694	1,841401	1,850342
0,44	1,839681	1,847424	1,855317	1,863393	1,871677	1,880193	1,888956	1,897979	1,907273	1,916846	1,926702
0,46	1,911712	1,919934	1,928355	1,937012	1,945932	1,955140	1,964653	1,974485	1,984646	1,995143	2,005980
0,48	1,986311	1,995009	2,003964	2,013216	2,022795	2,032727	2,043030	2,053718	2,064802	2,076288	2,088178
0,50	2,663458	2,072628	2,082123	2,091985	2,102247	2,112937	2,124075	2,135673	2,147741	2,160285	2,173305

ANEXO B

Fator T_2 , para o primeiro harmônico da vibração flexional de cilindros, em função da razão d/l e razão de Poisson [7].

Razão d/l	Razão de Poisson										
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
0,00	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
0,02	1,001954	1,001979	1,002004	1,002029	1,002053	1,002077	1,002100	1,002124	1,002147	1,002170	1,002193
0,04	1,007804	1,007905	1,008004	1,008102	1,008199	1,008295	1,008388	1,008482	1,008575	1,008666	1,008757
0,06	1,017522	1,017748	1,017968	1,018186	1,018405	1,018619	1,018826	1,019038	1,019245	1,019450	1,019653
0,08	1,031064	1,031461	1,031848	1,032233	1,032618	1,032994	1,033360	1,033733	1,034096	1,034459	1,034818
0,10	1,048367	1,048983	1,049580	1,050174	1,050765	1,051344	1,051916	1,052484	1,053050	1,053610	1,054170
0,12	1,069357	1,070225	1,071077	1,071920	1,072753	1,073577	1,074393	1,075202	1,076008	1,076808	1,077604
0,14	1,093950	1,095111	1,096256	1,097378	1,098495	1,099599	1,100694	1,101782	1,102864	1,103941	1,105015
0,16	1,122061	1,123544	1,125007	1,126452	1,127884	1,129302	1,130711	1,132113	1,133509	1,134901	1,136288
0,18	1,153592	1,155430	1,157245	1,159039	1,160817	1,162585	1,164337	1,166086	1,167830	1,169569	1,171308
0,20	1,188458	1,190676	1,192869	1,195038	1,197191	1,199332	1,201464	1,203591	1,205714	1,207838	1,209961
0,22	1,226567	1,229189	1,231781	1,234351	1,236906	1,239449	1,241986	1,244521	1,247057	1,249596	1,252141
0,24	1,267838	1,270881	1,273894	1,276886	1,279865	1,282836	1,285807	1,288779	1,291757	1,294746	1,297747
0,26	1,312189	1,315668	1,319120	1,322555	1,325980	1,329403	1,332832	1,336270	1,339723	1,343194	1,346687
0,28	1,359546	1,363477	1,367381	1,371276	1,375167	1,379065	1,382977	1,386911	1,390869	1,394857	1,398879
0,30	1,409842	1,414233	1,418606	1,422974	1,427322	1,431747	1,436169	1,440625	1,445121	1,449661	1,454250
0,32	1,463014	1,467873	1,472724	1,477584	1,482465	1,487380	1,492337	1,497345	1,502411	1,507540	1,512737
0,34	1,519006	1,524340	1,529680	1,535043	1,540446	1,545901	1,551420	1,557012	1,562682	1,568439	1,574286
0,36	1,577766	1,583580	1,589417	1,595298	1,601240	1,607259	1,613367	1,619572	1,625884	1,632309	1,638853
0,38	1,639253	1,645548	1,651888	1,658300	1,664800	1,671405	1,678129	1,684983	1,691975	1,699113	1,706401
0,40	1,703422	1,710202	1,717054	1,724007	1,731082	1,738298	1,745669	1,753207	1,760921	1,768818	1,776904
0,42	1,770243	1,777505	1,784874	1,792382	1,800052	1,807904	1,815954	1,824214	1,832694	1,841401	1,850342
0,44	1,839681	1,847424	1,855317	1,863393	1,871677	1,880193	1,888956	1,897979	1,907273	1,916846	1,926702
0,46	1,911712	1,919934	1,928355	1,937012	1,945932	1,955140	1,964653	1,974485	1,984646	1,995143	2,005980
0,48	1,986311	1,995009	2,003964	2,013216	2,022795	2,032727	2,043030	2,053718	2,064802	2,076288	2,088178
0,50	2,663458	2,072628	2,082123	2,091985	2,102247	2,112937	2,124075	2,135673	2,147741	2,160285	2,173305

ANEXO C

Fator T_3 , para o segundo harmônico da vibração flexional de cilindros, em função da razão d/l e razão de Poisson [7].

Razão d/l	Razão de Poisson											
	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	
0,00	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000	1,000000
0,01	1,002609	1,002660	1,002710	1,002759	1,002808	1,002856	1,002903	1,002950	1,002997	1,003043	1,003089	1,003135
0,02	1,010421	1,010623	1,010823	1,011020	1,011214	1,011405	1,011594	1,011780	1,011968	1,012152	1,012335	1,012517
0,03	1,023390	1,023845	1,024290	1,024729	1,025164	1,025593	1,026015	1,026436	1,026855	1,027267	1,027676	1,028082
0,04	1,041446	1,042248	1,043034	1,043810	1,044578	1,045334	1,046082	1,046824	1,047563	1,048293	1,049019	1,049741
0,05	1,064495	1,065736	1,066954	1,068155	1,069343	1,070516	1,071678	1,072830	1,073974	1,075110	1,076240	1,077357
0,06	1,092436	1,094201	1,095938	1,097048	1,099340	1,101014	1,102673	1,104318	1,105953	1,107578	1,109196	1,110807
0,07	1,125153	1,127523	1,129857	1,132160	1,134438	1,136693	1,138930	1,141151	1,143360	1,145557	1,147746	1,149926
0,08	1,162526	1,165581	1,168592	1,171565	1,174505	1,177421	1,180314	1,183191	1,186053	1,188904	1,191747	1,194582
0,09	1,204448	1,208262	1,212021	1,215737	1,219416	1,223067	1,226696	1,230306	1,233902	1,237488	1,241067	1,244638
0,10	1,250814	1,255455	1,260034	1,264564	1,269056	1,273517	1,277955	1,282376	1,286786	1,291188	1,295587	1,300000
0,11	1,301530	1,307065	1,312532	1,317947	1,323321	1,328666	1,333990	1,339300	1,344603	1,349904	1,355208	1,360528
0,12	1,356516	1,363010	1,369431	1,375799	1,382127	1,388429	1,394714	1,400992	1,407270	1,413554	1,419850	1,426152
0,13	1,415707	1,423222	1,430664	1,438052	1,445405	1,452737	1,460061	1,467387	1,474723	1,482077	1,489456	1,496852
0,14	1,479051	1,487650	1,496175	1,504653	1,513112	1,521541	1,529982	1,538439	1,546921	1,555435	1,563990	1,572562
0,15	1,546513	1,556257	1,565933	1,575568	1,585187	1,594809	1,604449	1,614123	1,623839	1,633609	1,643439	1,653322
0,16	1,618072	1,629024	1,639915	1,650780	1,661643	1,672528	1,683453	1,694432	1,705478	1,716601	1,727810	1,739082
0,17	1,693723	1,705945	1,718120	1,730280	1,742473	1,754704	1,767001	1,779381	1,791856	1,804437	1,817134	1,830000
0,18	1,773475	1,787033	1,800562	1,814105	1,827696	1,841361	1,855124	1,869002	1,883011	1,897161	1,911461	1,925900
0,19	1,857353	1,872312	1,887269	1,902208	1,917349	1,932540	1,947868	1,963350	1,979003	1,994838	2,010865	2,027082
0,20	1,945396	1,961827	1,978286	1,994826	2,011487	2,028302	2,045298	2,062497	2,079912	2,097557	2,115440	2,133552
0,21	2,037653	2,055631	2,073675	2,090843	2,110181	2,128725	2,147502	2,166535	2,185839	2,205426	2,225305	2,245362
0,22	2,134200	2,153799	2,173513	2,193401	2,213523	2,233906	2,254584	2,275579	2,296906	2,318578	2,340601	2,362962
0,23	2,235112	2,256416	2,277814	2,299610	2,321620	2,343962	2,366670	2,389764	2,413260	2,437169	2,461496	2,486232
0,24	2,340488	2,363589	2,386928	2,410580	2,434600	2,459032	2,483908	2,509250	2,535071	2,561381	2,588182	2,615472
0,25	2,450441	2,475435	2,500745	2,526451	2,552613	2,579275	2,606470	2,634219	2,662535	2,691423	2,720883	2,750982
0,26	2,565101	2,592092	2,619491	2,647382	2,675827	2,704873	2,734552	2,764882	2,795876	2,827534	2,859853	2,892822