CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI

RAFAEL CICERO PENHA ROCHA

PROCESSAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS DE ALUMINA POR ´´GELCASTING `` E CARACTERIZAÇÃO DO LIMITE DE TENSÃO DE RUPTURA EM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

São Bernardo do Campo

2017

RAFAEL CICERO PENHA ROCHA

PROCESSAMENTO DE MOLAS HELICOIDAIS DE ALUMINA POR ´´GELCASTING `` E CARACTERIZAÇÃO DO LIMITE DE TENSÃO DE RUPTURA EM ENSAIO DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Dissertação de mestrado apresentada ao Centro Universitário FEI, para obtenção do título de Mestre em engenharia mecânica com ênfase em materiais e processos, orientado pelo Prof. Dr. Fernando S. Ortega.

São Bernardo do Campo

2017

Rocha, Rafael Cicero Penha.
Processamento de molas helicoidais de alumina por gelcasting e caracterização do limite de tensão de ruptura em ensaio de compressão uniaxial / Rafael Cicero Penha Rocha. São Bernardo do Campo, 2018.
107 f.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Fernando dos Santos Ortega.

1. Mola cerâmica. 2. Alumina. 3. Compressão. 4. Gelcasting. I. Ortega, Fernando dos Santos, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

Mestrado

PGM-10

Aluno: Rafael Cicero Penha Rocha **Matrícula:** 215127-2

Título do Trabalho: Processamento de molas helicoidais de alumina por gelcasting e caracterização do limite de tensão de ruptura em ensaio de compressão uniaxial.

Área de Concentração: Materiais e Processos

Orientador: Prof. Dr. Fernando dos Santos Ortega

Data da realização da defesa: 23/11/2017

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, 23 / 11 / 2017.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Prof. Dr. Fernando dos Santos Ortega	Ass.: _____
Prof. Dr. Gilberto José Pereira	Ass.: _____
Prof.ª Dr.ª Ana Paula Fonseca Albers	Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

A Jesus Cristo, cujo sacrifício na cruz, tornou tudo isso possível.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, pela saúde e disposição.

A minha fiel e companheira esposa Cristiane, por sua paciência e compreensão nos dias mais difíceis, também por compartilhar este sonho comigo. Aos meus pais e irmãos, pela motivação e compreensão. Aos Pastores Danilo e Jose, pelas orações.

Em nome de Reginaldo Castellar, gostaria de agradecer toda equipe de ferramenteiros, que auxiliaram neste trabalho. A Luis Antônio Solda, pelo conhecimento e recursos oferecidos.

A Marcelo Rossoni, pela compreensão e por absorver minhas ausências no trabalho, muitas vezes sendo ele mesmo meu substituto.

Aos professores Gustavo, Gilberto, Chang e Fernando, pelos ensinamentos durante as disciplinas.

Ao orientador Fernando Ortega, pelos conhecimentos transmitidos durante todo curso.

Ao professor Abel, pelo aprendizado, e entusiasmo oferecido, durante a confecção dos moldes de alumínio.

A Lucas Pires pelo esforço em compartilhado comigo durante a moldagem dos corpos de provas.

Ao professor Willian pelo ensaio de MEV realizado com excelência, obtendo dados crucias para o bom andamento do trabalho.

A professora Ivone, pela recepção na UNIVAP e por fornecer equipamentos e conhecimentos necessários para a obtenção do módulo elástico do material.

RESUMO

Este trabalho avalia a aplicação de um material cerâmico (Al_2O_3) para confecção de molas helicoidais, através do processo "gelcasting" , bem como a influência de defeitos decorrentes do processo de fabricação deste material nas propriedades mecânicas da peça. Em uma primeira etapa foi confeccionado um molde de nylon, material mais barato e simples de ser usinado, sendo utilizado para um teste piloto, desenvolvimento e levantamento das variáveis mais relevantes para o processo. Em um segundo momento, foi construído um molde de alumínio adequado para a confecção de corpos de prova prismáticos com dimensões adequadas para a realização de ensaios mecânicos, permitindo assim caracterizar as propriedades mecânicas do material, produzido exatamente conforme a rota usada pra fabricar as molas cerâmicas. Por fim, diante das informações levantadas nas etapas anteriores, foram implementados aprimoramentos no processo de fabricação e produzido um novo molde, em alumínio, com o qual foram fabricadas as molas cerâmicas. Em todos os casos, durante o processo de fabricação a alumina suspensa em solução aquosa de monômeros foi despejada no molde onde, após a gelificação, foi possível desmoldar a peça. As peças foram secas por 24 horas a 90°C e sinterizadas. As densidades das molas foram caracterizada pelo método de Arquimedes. Utilizando corpos de provas foram analisados o módulo elástico da alumina sinterizada através da técnica de excitação por impulso e o limite de resistência à flexão em 4 pontos. A resistência mecânica das molas foi avaliada por compressão uniaxial. A tensão limite de ruptura das molas foi calculada primeiramente através do método de Whal, e posteriormente através de uma análise de elementos finitos com intuito de comparar as tensões entre esses dois métodos. Utilizou-se ainda a estatística de Weibull para avaliar o espalhamento dos resultados. Os resultados mostram que o processo "gelcasting" foi capaz de produzir molas com boa reprodutibilidade. A resistência mecânica observada apresentou boa correlação com os tipos de defeitos observados, sendo controlada particularmente por aqueles localizados na superfície.

Palavras-chave: Mola cerâmica, Alumina, Compressão, "gelcasting" .

ABSTRACT

This work evaluates the application of a ceramic material (Al_2O_3) for the preparation of helical coils, through the “gelcasting” process, as well as the influence of defects resulting from the manufacturing process of this material on the mechanical properties of the part. In the first step, a nylon mold, a material that is cheap and simple to be machined, was made for a pilot test, process development and survey of the most relevant variables for the process. Secondly, a suitable aluminum mold was built for the preparation of prismatic specimens with dimensions suitable for the mechanical tests, thus allowing to characterize the mechanical properties of the material, exactly produced according to the route used to make the ceramic springs. Finally, given the information gathered in previous steps, improvements were made to the manufacturing process and a new aluminum mold was produced for the manufacture of ceramic springs. In all cases, during the manufacturing process the alumina suspended in aqueous solution of monomers was poured into the mold where, after gelation, it was possible to demold the part. The pieces were dried for 24 hours at 90°C and sintered. The density of the springs was characterized by the Archimedes method. Using prismatic specimens, the elastic modulus of the sintered alumina was analyzed by the impulse excitation technique and 4-point flexural strength. The mechanical strength of the springs was measured by uniaxial compression. The ultimate tensile stress of the springs was first calculated by the Whal method, and later a finite element analysis was performed in order to compare the stresses between these two methods. Weibull's statistic was also used to evaluate the scattering of the results. The results show that the “gelcasting” process was able to produce springs with good reproducibility. The observed mechanical resistance showed good correlation with the types of defects observed, being controlled particularly by those located on the surface.

Key-words: Ceramic spring, Alumina, Compression, “gelcasting” .

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Molas com geometrias variadas; a) helicoidais b) aplicação de molas helicoidais em sistema de suspensão automotiva) molas planas d) aplicação de molas planas em sistema de suspensão automotiva, e) molas prato, f) associação em séria de molas prato. 17
Figura 2 - Características dimensionais de uma mola helicoidal 18
Figura 3 - Molas lineares e não lineares 18
Figura 4- Exemplos de molas: a) linear b) não linear dura c) não linear macia (elastômero). 19
Figura 5 - Distribuição de forças ao longo da seção da mola..... 19
Figura 6 - Concentrador de tensão em molas helicoidal 20
Figura 7 - Efeito do concentrador de tensão na seção do arame devido à sua curvatura..... 21
Figura 8 - Gráfico correlacionando, índice C e concentradores de tensão..... 23
Figura 9 - Distribuição de forças ao longo da seção da mola, a) torção pura, b) Cisalhamento puro, c) torção e cisalhamento sem efeito da curvatura, d) Torção e cisalhamento com efeito da curvatura do arame. 25
Figura 10 - Fórmulas do teorema de Castigliano 25
Figura 11- Limite de resistência ao escoamento para molas metálicas 27
Figura 12 Resistências à tração de vários materiais para confecção de molas..... 28
Figura 13 – Comprimento sólido de molas helicoidais com diferentes tipos de extremidade: (a) em ponta, (b) em ponta esmerilhado, (c) em esquadro, (d) em esquadro e esmerilhado..... 29
Figura 14 - Gráfico de relação de flambagem de molas helicoidais..... 30
Figura 15 - Gráfico para obtenção do fator beta..... 33
Figura 16 - Gráfico para obtenção do fator delta..... 35
Figura 17- Características e aplicações de materiais cerâmicos..... 38
Figura 18-a) Desenho de uma mola cerâmica, e curva de deflexão em função da temperatura. 41
Figura 19- Imagem da mola e do resultado do ensaio de compressão realizado por Mengmeng (2015). 42
Figura 20 Mola cerâmica seção circular e resultado do teste de compressão em ensaio uniaxial comparando o material alumina e zircônia..... 42
Figura 21 - Linha de enrolamento a quente de molas helicoidais de aço. 43
Figura 22 - Molde tubular de cobre para injeção de baixa pressão. 44

Figura 23 - Defeitos, com peças conformadas pelo molde tubular. 45
Figura 24 – Detalhe do molde metálico e mola cerâmica a verde..... 45
Figura 25 - Viscosidade em função da concentração do dispersante Darvan 821A (APA) 47
Figura 26 - Temperatura da solução em função do tempo. 48
Figura 27 - Molde de nylon usado para conformar molas cerâmicas de seção transversal retangular, constituído de um corpo bipartido, fundo e um êmbolo. 51
Figura 28 - Processo de conformação da mola cerâmica 52
Figura 29 - Moldagem da mola cerâmica com o molde em perfil helicoidal fabricado com nylon..... 53
Figura 30 - Ciclo de queima empregado para sinterizar as molas cerâmicas. 54
Figura 31 - Teste de compressão uniaxial das molas cerâmicas.. 54
Figura 32 Bases de apoio para ensaio de compressão da mola helicoidal cerâmica. 55
Figura 33 - Molas sendo extraídas do molde após a gelificação. 57
Figura 34 - Mola a verde, após remoção do molde, apoiada em suporte cilíndrico, para processo preliminar de secagem. 58
Figura 35 Gráfico de deslocamento em função da força para as seis molas ensaiadas, além da curva obtida para o ensaio do dispositivo de apoio, denominada Baseline 60
Figura 36 -Relatório do teste gerado pelo equipamento de ensaio, destacando a redução momentânea de carga em alguns pontos, apesar do contínuo aumento do deslocamento compressivo 61
Figura 37-Diagrama de Weibull, aplicado aos valores de tensão de ruptura em ensaio uniaxial das molas cerâ,icas, destacando os parâmetros da equação obtidos após regressão linear sobre os dados 63
Figura 38- Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada do poro, c) imagem aproximada de uma trinca, d) imagem aproximada com maior resolução. 64
Figura 39-Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada do poro c)imagem aproximada de uma trinca d) imagem aproximada com maior resolução. 65
Figura 40 – Detalhe da fratura da mola 1, após o ensaio de com pressão, visível início da fratura em um poro superficial. 66
Figura 41 - Ferramentas utilizadas na fabricação dos corpos de prova; a) cilindro injetor, b) projeto do molde, c) molde de conformação das amostras, d) conjunto montado. . 69

Figura 42-Amostras posicionadas para ensaio de ultrassom. 73
Figura 43 - Gráfico de taxa de cisalhamento em função da quantidade de dispersante 76
Figura 44 – Imagem dos corpos de prova a verde, onde a amostra à esquerda mostra como a face superior aquela que ficou em contato com a placa de alumínio e a amostra à direita mostra como face superior aquela que ficou em contato com a placa de policarbonato. 77
Figura 45-Distribuição de Weibull, para os resultados do ensaio de flexão dos corpos de prova cerâmicos. 79
Figura 46 - Fundição do tarugo de alumínio. 83
Figura 47 - Molde de alumínio para confecção de molas cerâmicas. 84
Figura 48 - Curva de sinterização adotada para as molas cerâmicas, com patamar de 2 horas a 1600°C. 85
Figura 49 - Mola cerâmica preparada para compressão.. 86
Figura 50-Resultado da conformação das molas no molde de alumínio: a) abertura do molde; b) algumas molas durante a etapa de secagem em temperatura ambiente. 87
Figura 51-Detalhes das extremidades das molas conformadas com molde de alumínio. 87
Figura 52- Porosidade do molde de alumínio recoberta por suspensão cerâmica: a) Detalhe do furo para fixação das partes móveis do molde com parafusos, mostrando a ocorrência de poros que surgiram durante a fundição do tarugo de alumínio; b) Detalhe de alguns poros na parede do molde preenchidos por suspensão gelificada após as primeiras moldagens. 88
Figura 53- Detalhe da marca da linha de partição do molde nas molas, comparando o primeiro com o segundo teste: a) e b) linha de partição do molde de nylon; c, e d) linha de partição do molde de alumínio. 88
Figura 54 - Molas fraturadas a verde durante o processo de secagem, devido ao choque térmico. 89
Figura 55 - Molas cerâmicas a verde, após processo de secagem minimizando o choque térmico. 90
Figura 56 - Detalhe do empenamento gerado após a sinterização das molas cerâmicas. 91
Figura 57-Variação dimensional da mola em função da carga aplicada. 93
Figura 58-Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada do ponto de maior defeito interno, c) imagem aproximada de uma trinca, d) imagem aproximada com maior resolução. 95

Figura 59-Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada de um poro c) imagem aproximada da superfície de fratura, d) imagem aproximada com maior resolução. 96
Figura 60-Análise de elementos finitos de uma mola submetida a uma carga de 545 N. 98
Figura 61- Pico de tensão evidenciado na transição da extremidade para as espiras. 98
Figura 62-Simulação de uma mola cerâmica em corte mostrando para carga de ruptura, a distribuição de tensão ao longo da seção transversal. 99
Figura 64--Correlação entre os dados de tensão de ruptura calculado pelo método de Whal e por elementos finitos. 101
Figura 63- -Distribuição de Weibull para cálculo de Whal. 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valores dos fatores de correção K1 e K2. 33
Tabela 2-Taxa de retração média das características geométricas principais das molas após a sinterização. 59
Tabela 3 - Valores obtidos através do ensaio de Arquimedes (*). 59
Tabela 4 - Valores de tensão e carga de ruptura das molas..... 62
Tabela 5-Resultado das principais características das formulações de monômeros..... 71
Tabela 6- Medidas padrões utilizadas no ensaio de flexão. 72
Tabela 7-Composição da mistura da suspensão com base na solução de monômeros MAM-HMAM. 75
Tabela 8-Composição da mistura da suspensão com base na solução de monômeros MAM-HMAM MBAM. 75
Tabela 9- Resultados de porosidade aparente, densidade aparente e densidade volumétrica para as barras de alumina produzidas por "gelcasting" 78
Tabela 10-Módulos elásticos e coeficiente de Poisson, obtidos experimentalmente. 80
Tabela 11- Percentual de contração pós sinterização, das dimensões principais para as molas cerâmicas. 91
Tabela 12-Porosidade aparente, densidade aparente e densidade volumétrica das peças, medidas através do método de Arquimedes. 92
Tabela 13- Comparativo de densidade, entre o primeiro teste de mola cerâmica (Mola 1), barra de corpo de provas e teste final com molas cerâmicas (Mola 2). 92
Tabela 14- Cálculo da tensão de ruptura das molas cerâmicas pelo método de Whal. 94
Tabela 15- Comparativo de tensão de ruptura, entre cálculo de Whal e elementos finitos. .. 100

LISTA DE SÍMBOLOS

De Diâmetro externo do corpo da mola

Di Diâmetro interno do corpo da mola

H Comprimento da mola

d Diâmetro da seção arame da mola

p Passo da mola

n Número de espiras ativas da mola

T Torque

F Força

D Diâmetro médio do corpo da mola

Nt Número total de espiras

τ Tensão de cisalhamento

J Momento polar de inércia

r Raio do diâmetro do arame da mola.

A Área

KS Fator de Wahl para concentração de tensão estática

Kw Fator de Whal para concentração de tensão diâmica

C Razão entre D e d

λ Ângulo de inclinação da espira

k Constante elástica de uma mola

δ Deslocamento linear de uma mola helicoidal

Su limite resistência a tração

Hs Altura sólida de uma mola helicoidal.

a lado do quadrado ou lado menor de uma seção retangular

K´ Fator concentrador de tensão de uma mola com seção quadrada

G Módulo elástico cisalhante

K1 fator de correção de uma mola retangular

K2 fator de correção de uma mola retangular

β Constante retirada de um abaco

b Lado maior da seção de um retanglo

V Volume da peça;

Vop Volume de poros abertos;

Vip Volume de massa densa e poros isolados

P Porosidade aparente;

T Densidade aparente;

B Densidade volumétrica.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

2 OBJETIVOS 14

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 16

3.1 MOLAS 16

3.1.1 **Introdução** 16

3.1.2 **Molas helicoidais de seção transversal cilíndrica.** 17

3.1.2.1 ***Tensão e deformação em molas helicoidais*** 19

3.1.2.1.1 Tensão de torção 20

3.1.2.1.3 Concentradores de tensão. 21

3.1.2.1.4 Tensões estáticas e dinâmicas 24

3.1.2.1.5 Influência da carga excêntrica na tensão de molas helicoidais. 24

3.1.2.2 ***Cálculo do deslocamento (δ) pelo método de Castigliano*** 25

3.1.2.3 ***Constante elástica K.*** 26

3.1.2.4 ***Resistência de molas helicoidais.*** 26

3.1.2.5 ***Comprimento sólido e total de espiras.*** 28

3.1.2.6 ***Flambagem em molas de compressão.*** 29

3.1.3 **Molas helicoidais de seção transversal quadrada ou retangular.** 30

3.1.3.1 ***Cálculo de tensão em molas com seção quadrada.*** 31

3.1.3.1.1 Tensão incorreta. 31

3.1.3.1.2 Tensão correta. 31

3.1.3.2 ***Cálculo de deflexão em molas helicoidais com seção quadrada.*** 32

3.1.3.3 ***Cálculo do rate em molas helicoidais com seção quadrada.*** 32

3.1.3.4 ***Cálculo de tensão em molas com seção retangular.*** 32

3.1.3.4.1 Tensão incorreta. 32

3.1.3.4.2 Tensão correta. 33

3.1.3.5 ***Cálculo de deflexão em molas com seção retangular*** 34

3.1.3.6 *Cálculo da constante elástica em molas helicoidais com seção retangular.* 35

3.1.4 **Limitações em molas helicoidais metálicas** 35

3.2 MATERIAIS CERÂMICOS 36

3.2.1 **Características dos materiais cerâmicos** 36

3.2.2 **Tipos e aplicações de materiais cerâmicos.** 37

3.2.2.1 ***Alumina*** 38

3.2.3 **Processamento de matérias cerâmicas** 39

3.3 MOLAS CERÂMICAS 40

3.3.1 **Processamento de molas cerâmicas** 43

3.3.1.1 ***Injeção de baixa pressão*** 43

3.3.1.2 ***"gelcasting"*** 45

4 METODOLOGIA 49

5 TESTES PRELIMINARES 50

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS 50

5.1.1 **Confecção do molde** 50

5.1.2 **Preparação da suspensão e moldagem** 51

5.1.3 **Caracterização mecânica e microestrutural** 54

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES 57

5.2.1 **Solução de monômeros** 57

5.2.2 **Moldagem das molas** 58

5.2.3 **Sinterização** 59

5.2.4 Caracterização mecânica 60

5.2.5 **Caracterização Microestrutural** 63

5.2.6 **Resumo dos dados obtidos** 66

6 APRIMORAMENTO DA SUSPENSÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL. 68

6.1 METODOLOGIA 68

6.1.1 **Preparação do molde e sistema de injeção.** 68
6.1.2 **Preparação da solução de monômeros.** 70
6.1.3 **Análise reológica.** 71
6.1.4 **Ensaio de flexão** 71
6.1.5 **Módulo elástico e Razão de Poisson** 72
6.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES. 73
6.2.1 **Solução de monômeros** 73
6.2.2 **Propriedades reológicas** 75
6.2.3 **Produção dos corpos-de-prova** 76
6.2.4 **Porosidade Aparente** 77
6.2.5 **Resistência à flexão** 78
6.2.6 **Avaliação das constantes elásticas** 80
6.2.7 **Resumo dos dados obtidos** 80
7 MOLDAGEM DA MOLA CERÂMICA 82
7.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 82
7.1.1 **Confecção do molde em alumínio para moldagem da mola.** 82
7.1.2 **Moldagem da mola cerâmica, secagem e sinterização.** 84
7.1.3 **Ensaio mecânico.** 85
7.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES 86
7.2.1 **Moldagem das molas** 86
7.2.2 **Secagem** 89
7.2.3 **Sinterização** 90
7.2.4 **Ensaio mecânico** 93
7.2.5 **Análise de tensão por elementos finitos** 97
7.2.6 **Resultado do ensaio compressão uniaxial** 101
7.2.7 **Resumo dos dados obtidos** 102
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS. 103

REFERÊNCIAS 105

1 INTRODUÇÃO

Molas helicoidais têm vasta aplicação nos mais diversos segmentos, onde, para níveis de tensão mais elevados, que atingem escalas em MPa, são utilizados materiais metálicos, que contém, como principais características, boa resistência a fadiga, alta tenacidade à fratura e alta elasticidade. Molas metálicas têm seu campo de aplicação limitado a temperaturas inferiores a 600°C, uma vez que acima desta temperatura os elevados níveis de fluência e plasticidade inutilizam sua aplicação (1). Outro ponto que pode inviabilizar a aplicação de molas metálicas são ambientes quimicamente agressivos, pois os metais são susceptíveis a reações químicas com o ambiente em que operam. Porém, existe a necessidade de sistemas de amortecimento e absorção de energia tanto para temperaturas acima de 600°C, como para ambientes quimicamente agressivos, o que torna necessário o desenvolvimento de materiais que possam ser utilizados para fabricação de molas, que mantenham suas características elásticas em temperaturas mais elevadas, e sejam mais resistentes a ataques químicos.

Materiais cerâmicos suprem bem a necessidade de trabalhar em ambientes agressivos, seja térmica ou quimicamente, pois têm como principais características alto ponto de fusão, elevada dureza, boa inércia química e alta rigidez, permitindo aos componentes cerâmicos atuar na faixa de temperatura em que os metais já não apresentam características adequadas (2). Entretanto, estas mesmas características que são superiores quando comparadas com materiais metálicos, são responsáveis por dificultar o processamento, visto que, devido à baixa tenacidade e a alta dureza, materiais cerâmicos não podem ser usinados, laminados, trefilados ou forjados e o alto ponto de fusão torna inviável o processamento por fundição devido ao alto custo. Assim, a melhor opção para produzir peças com geometrias complexas com materiais cerâmicos é a utilização do material particulado, compactado na geometria desejada e posteriormente sinterizado (3).

O uso de material particulado permite a possibilidade de aplicação de várias técnicas de conformação, uma vez que as partículas podem ser compactadas no interior de um molde com a geometria desejada. Essa compactação pode ser feita a seco, com aplicação de pressão mecânica, ou a partir de partículas suspensas em meio líquido. Outra possibilidade é adicionar plastificantes às partículas e trabalhar com uma massa plástica, massa esta que poderá ser moldada ou usinada a verde de acordo com a geometria da peça. Outros métodos um pouco mais recentes fazem a moldagem com auxílio de materiais poliméricos, seja fundindo polímeros com as partículas de cerâmicas e injetando em um molde (injeção de baixa pressão), ou dispersando partículas cerâmicas em uma solução de monômeros e

polimerizando tal suspensão no interior de um molde com o formato negativo da peça (“gelcasting”). Porém independente de como se chegue à forma final da peça, o material particulado não tem a resistência mecânica de uma peça cerâmica, pois não existem ligações primárias entre as partículas, ligações estas que serão formadas no processo de sinterização, juntamente com a redução da porosidade da peça. (2,3)

A fabricação de molas cerâmicas ainda é algo relativamente novo na literatura, não havendo muitas pesquisas sobre o tema. Alguns métodos de processamento já foram explorados e, em uma breve análise, é possível verificar que a maior dificuldade é de se obter uma boa reprodutibilidade no processamento, pois os defeitos gerados nesta etapa, como poros e deformações geométricas, têm grande influência no resultado final da peça sinterizada, impactando na resistência mecânica das amostras (5).

Dentre os processos de fabricação de materiais cerâmicos utilizados na fabricação de molas helicoidais, um deles se sobrepõe aos demais, o “gelcasting” , pois a elevada resistência mecânica a verde e boa reprodutibilidade têm se mostrado mais eficazes do que outros métodos como injeção por baixa pressão, por exemplo. O processo ““gelcasting” ” é uma técnica de conformação líquida que consiste em dispersar partículas cerâmicas em uma solução de água e monômero e, após o preenchimento de um molde com esta suspensão, promover a polimerização dentro do molde com a geometria desejada. Como resultado da reação de polimerização, forma-se uma rede polimérica com alta densidade de ligações cruzadas que transforma a fase líquida (solução de monômeros) em um hidrogel. O processo de gelificação é iniciado com a adição de um catalisador e de um iniciador químico, cujos radicais livres dão início um processo exotérmico de polimerização. Ao final da gelificação, a suspensão é transformada de um fluido viscoso em um sólido elástico e pode ser removida do molde, submetida à secagem e, por fim, à sinterização da peça. Características como a baixa viscosidade da suspensão e boa resistência mecânica da peça gelificada (a verde) tornam esta técnica bastante indicada para a confecção de peças com geometria complexa, como as molas helicoidais. (1, 4).

Embora existam trabalhos na literatura abordando a fabricação e caracterização de molas cerâmicas, geralmente as análises são feitas em termos de medida da constante elástica da mola, carga de ruptura e a análise da variabilidade, através da estatística de Weibull (6, 7, 8).

São escassos os trabalhos que se dedicam a calcular a tensão de ruptura na mola informação esta que normalmente é um dado de entrada de um projeto de mola helicoidal, isso significa que sem esta informação, não há como prever, quanto se pode aplicar de carga

nem quanto se pode defletir em uma mola sem que esta venha a falhar. Outros fatores de grande importância em projetos são os módulos de elasticidade E e G. Tratando-se de materiais cerâmicos, estes módulos não podem ser padronizados, pois, o seu resultado está diretamente ligado ao processamento, contudo, são de grande importância para o projeto e fabricação de molas cerâmicas destinadas a operar dentro do regime elástico.

2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho consistem em obter informações relevantes sobre o processamento de uma mola cerâmica pelo processo ""gelcasting" ", obtendo informações cruciais para um projeto de engenharia, o que facilitará possíveis fabricações futuras. Serão levantados os seguintes parâmetros: limite de resistência à compressão, grau de contração comparando dimensões antes e após sinterização, módulos elásticos e coeficiente de Poisson, além da porosidade de peças sinterizadas e identificação de possíveis falhas de processamento.

Os objetivos do trabalho são:

a) Reunir informações preliminares acerca do processo, diante da escassez de informações envolvendo o uso desta técnica para a conformação de molas cerâmicas, permitindo identificar as principais dificuldades, ajustar o processo e projetar um molde com base em informações mais consistentes. Para isso, foi produzido um molde preliminar em material polimérico para estudar as variáveis mais relevantes do processo ""gelcasting" " aplicado na produção de molas cerâmicas;
b) Efetuar ensaios de compressão para identificar o limite de resistência das peças obtidas com o molde preliminar e as variáveis de processo usadas para produzir as primeiras molas cerâmicas. Esta etapa visa avaliar a robustez do processo e o fornecimento de subsídios para projetar parâmetros geométricos do novo molde, tais como o número de espiras e as dimensões da seção transversal das espiras;
c) Levantar informações sobre o material produzido que estabelecem uma conexão entre processamento e propriedades. Para isso, foram produzidos corpos de prova com geometria adequada para ensaios de flexão estabelecidos por norma, seguindo a mesma rota usada para produzir as molas cerâmicas;
d) Realizar alterações no processamento, para melhorar a qualidade das peças e confeccionar um novo molde redimensionado com base nos resultados preliminares obtidos;
e) Produzir e caracterizar novas amostras de molas cerâmicas;
f) Determinar a tensão de ruptura das peças através do software de elementos finitos;
g) Correlacionar os defeitos microestruturais com as fraturas observadas nos corpos de prova.

O material escolhido foi a alumina (Al_2O_3), devido a suas boas propriedades mecânicas e térmicas, além de ser de fácil aquisição e processamento, amplamente utilizado em aplicações de engenharia, resultando em bom custo-benefício.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresentará dados e informações disponíveis na literatura que serão fundamentais para a compreensão do comportamento mecânico de molas helicoidais, de materiais cerâmicos, do processo de fabricação e da relação entre microestrutura e propriedades de molas cerâmicas helicoidais.

3.1 MOLAS

Segundo J. C. Juvinal, (2011) molas são elementos de máquinas capazes de armazenar energia para liberar posteriormente (9). Seguindo esta definição, como não existe material totalmente rígido, é possível dizer que qualquer material em qualquer formato pode ser considerado uma mola, ainda que em uma faixa muito estreita de aplicação, já que independente da composição, todo material tem um regime elástico. (9)

3.1.1 Introdução

Não se sabe ao certo quando a humanidade passou a utilizar molas, mas elas têm facilitado nossas vidas a centenas de anos, sejam elas utilizadas em itens complexos como relógios, automóveis e máquinas ou até mesmo em acessórios mais simples como lapiseiras, maçaneta, ou um simples clipe de papel.

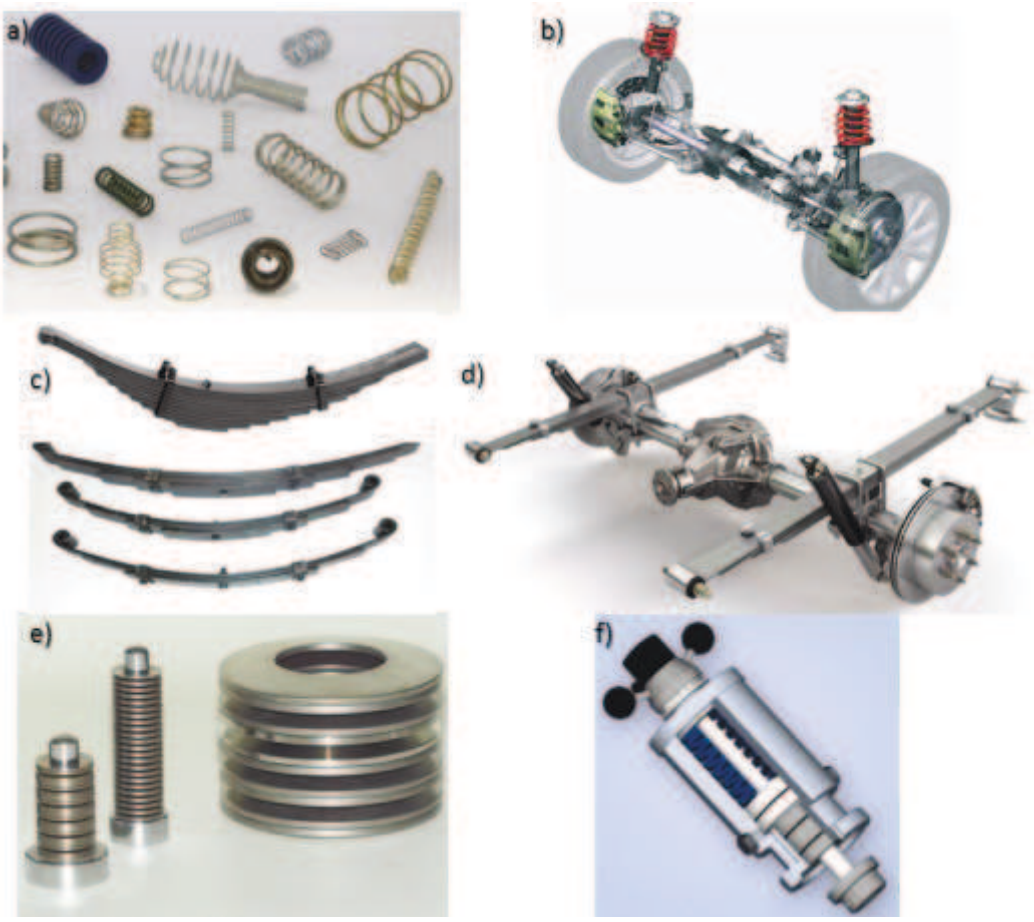
Molas podem ser confeccionadas de diversas formas, dependendo da necessidade de aplicação, porém, em projetos de engenharia as mais utilizadas são as helicoidais (tração e compressão), planas e molas prato.(10)

Neste capítulo será descrito apenas a geometria de mola helicoidal de compressão com seção circular, retangular e quadrada.

Atualmente molas são predominantemente confeccionadas em aços. Somente para baixo nível de tensão é possível encontrar molas confeccionadas em outros materiais, como plásticos por exemplo. Também é possível, para projetos mais específicos, encontrar blocos de borracha atuando como molas, com intuito de diminuir vibrações.

Porém, com a necessidade de redução de massa e aumento dos níveis de tensão, cada vez mais, é notório a presença de compósitos de alta resistência na fabricação de molas (11). A Figura 1 mostra alguns exemplos e aplicações de molas.

Figura 1 - Exemplo de molas com geometrias variadas e possíveis aplicações.



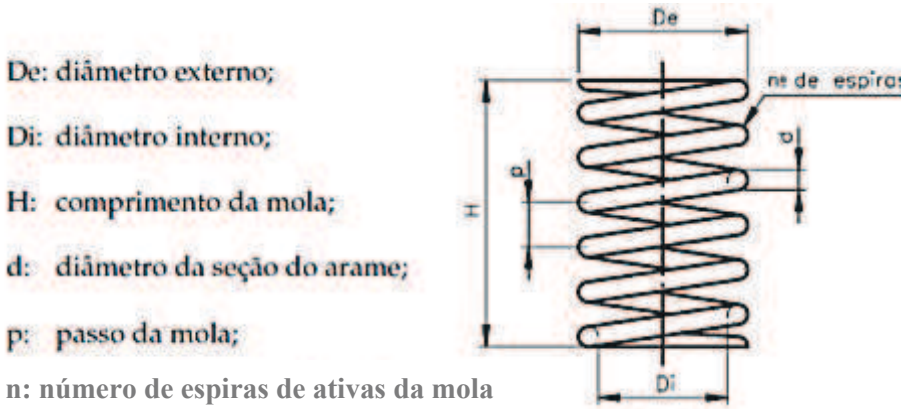
Fonte: Autor
Legenda: a)Helicoidais; b) aplicação de molas helicoidais c) molas planas; d) aplicação de molas planas; e) molas prato; f) aplicação de molas prato

3.1.2 Molas helicoidais de seção transversal cilíndrica.

Molas helicoidais são consideradas as mais comuns entre as principais formas geométricas, sendo empregadas em praticamente toda frota de veículos leves nacionais, além de suportes de máquinas, canetas, lapiseiras, etc...

Basicamente ela é feita enrolando-se uma barra de material metálico, que pode ter seção quadrada, retangular ou circular, em um molde perfeitamente cilíndrico ou cônico, adotando o movimento helicoidal, daí a origem do nome. (10) A figura 2 mostra as principais características de projeto de um a mola helicoidal.

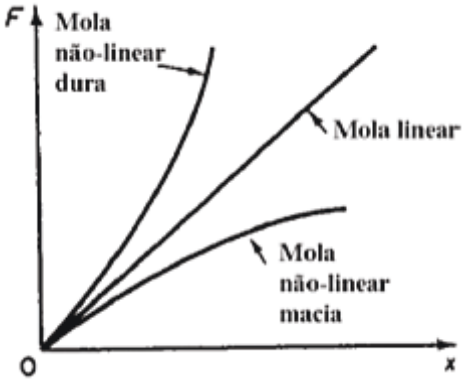
Figura 2 - Características dimensionais de uma mola helicoidal



Fonte: Budynas,. NISBETT, (2011)

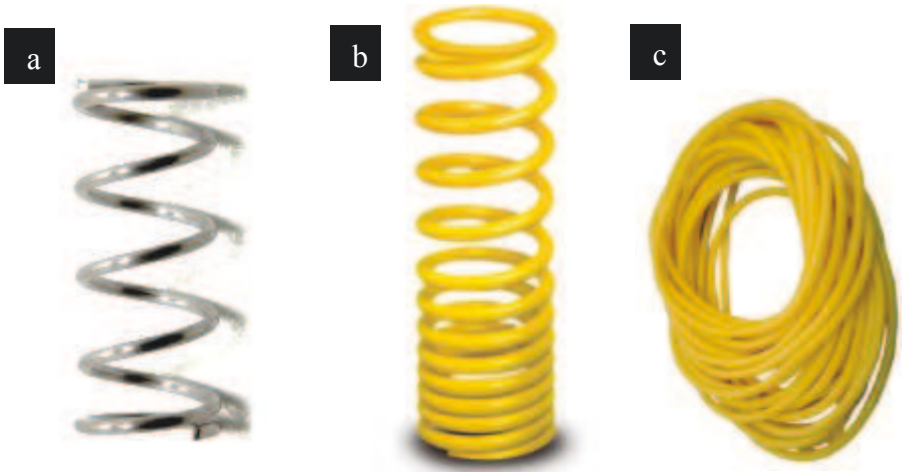
Esta classe de mola pode trabalhar em compressão, tração e torção. Além disso, uma mola helicoidal pode ser considerada linear e não linear. Para uma mola helicoidal ser considerada linear, esta precisa ter suas deformações diretamente proporcionais à carga que é submetida, obedecendo à lei de Hooke. Já a não linear não apresenta este comportamento. Este fato é gerado devido à geometria da mola, molas não lineares duras tendem a perder sua linearidade à medida que suas espiras são inativadas, o que faz com que o número de espiras disponíveis diminua, aumentando a rigidez da mola. (9) Já molas não lineares macias, tem este comportamento normalmente associado ao tipo de ligações químicas, pois esse tipo de fenômeno é observado em molas não metálicas. As figuras 3 e 4 mostram o comportamento e exemplos de molas lineares, e não lineares macias e duras respectivamente.

Figura 3 - Molas lineares e não lineares



Fonte: Aranha et . al., 2016

Figura 4- Exemplos de molas:

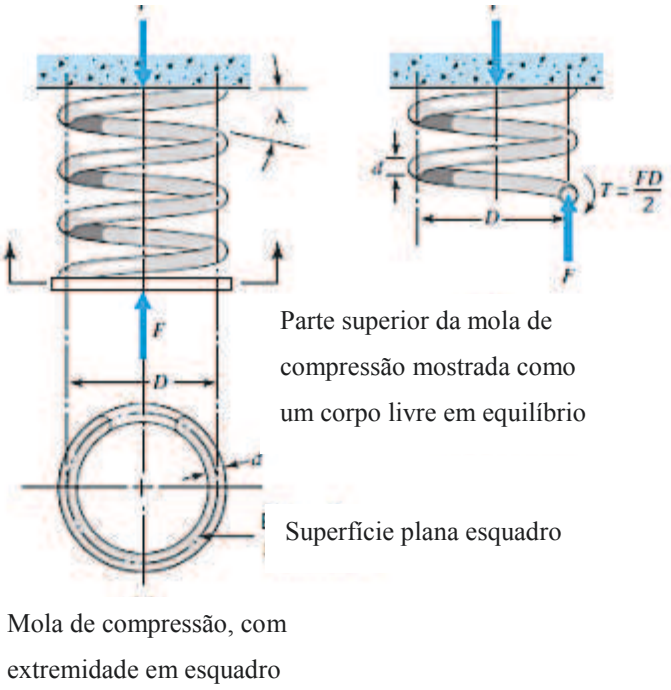


Fonte: Autor
Legenda: a) linear b) não linear dura c) não linear macia (elastômero).

3.1.2.1 Tensão e deformação em molas helicoidais

A figura 5 mostra a quais esforços são solicitados uma mola helicoidal durante a aplicação de uma força de compressão.

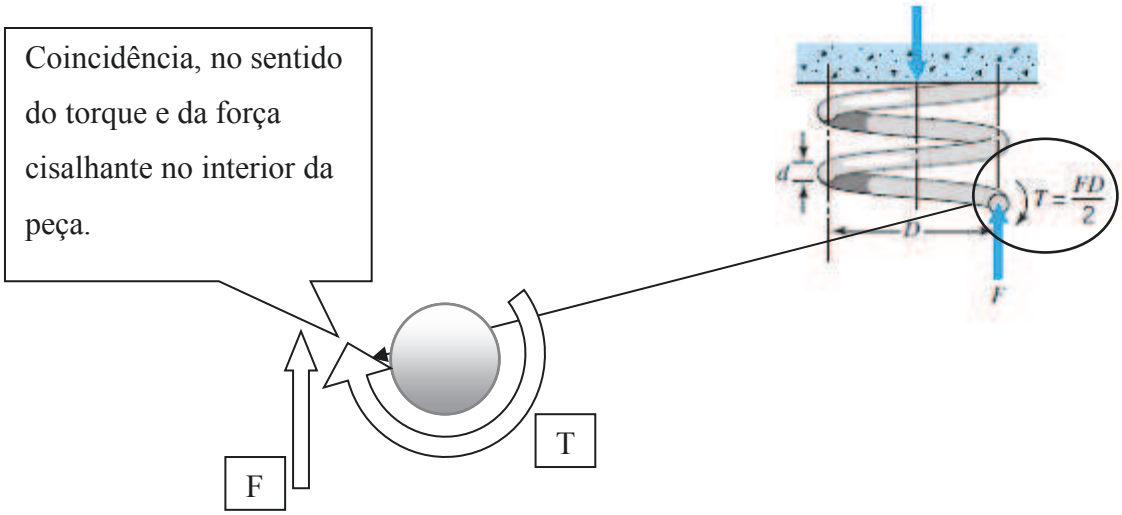
Figura 5 - Distribuição de forças estática ao longo da seção da mola



Fonte: Autor “adaptado de” Juvinal, 2012, p. 499.

Observando a figura 6, podemos notar que todo fio do arame está submetido a força F cisalhante, porém, somente as espiras que não representam assentamento ou seja, que não têm formato de hélice também estão submetidas ao torque.Podemos observar que existe um concentrador de tensão no interior da mola, devido à coicindência do sentido do torque com a força cisalhante. (9) Este efeito está detalhado na figura 6

Figura 6 – Distribuição de forças ao longo da seção transversal de uma mola helicoidal, com detalhe na concentração de tensão o interior da mola.



Fonte: Autor, adaptado de Juvinal, 2012, p, 499.

3.1.2.1.1 Tensão de torção

A equação que descreve a tensão de torção em molas helicoidais de seção circular é dada pela equação a seguir (9).

$$\tau = \frac{Tr}{J}$$

Sabendo-se que:

$$j = \frac{\pi d^4}{32} \quad T = \frac{FD}{2} \quad r = \frac{d}{2}$$

$$\tau = \frac{FD}{2} * \frac{d}{2} * \frac{32}{\pi d^4}$$

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} \qquad (1)$$

Onde:

D = Diâmetro médio da mola

F = Força aplicada para comprimir a mola

d = Diâmetro do fio do arame

3.1.2.1.2 Tensão cisalhante

A tensão cisalhante atuante no fio do arame é descrita pela fórmula 2.2

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{2}$$

Sabendo que A=$\frac{\pi d^2}{4}$, podemos descrever a fórmula da tensão cisalhante como:

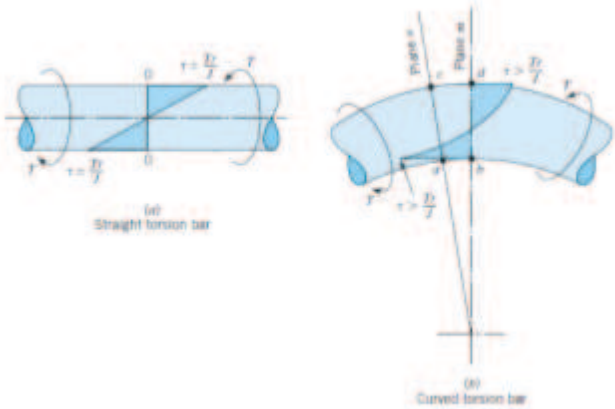
$$\tau = \frac{4F}{\pi d^2} \tag{3}$$

3.1.2.1.3 Concentradores de tensão.

Todas as fórmulas descritas acima se referem a um fio reto, a curvatura do fio provoca uma concentração de tensão. Para cálculo de tensões em molas helicoidais temos que considerar este fator determinante. (9,10)

Esta concentração de tensão ocorre, pois durante o processo de conformação do arame, em formato circular, existe uma distorção dos planos m e n causando uma variação de perímetro entre a parte interna e externa da peça, o que faz que haja uma concentração de tensão no lado interno da mola. (9,10) A figura 7 mostra a os planos de tensões interna e externa, para uma barra reta e uma barra curva ambas sob esforços torsonais.

Figura 7 - Efeito do concentrador de tensão na seção do arame devido à sua curvatura do arame em formato circular.



Fonte: Juvinal, 2012, p. 500.

Estes concentradores de tensão são previsto pelo fator de Whal, KW e KS onde a princípio consideraremos que KW é utilizado para prever concentração de tensão em ensaios dinâmicos e KS para ensaios estáticos. (9,10)

$$Ks = A + B \tag{4}$$

$$Ks = 1 + \frac{0,615}{C}$$

$$KW = A + B$$

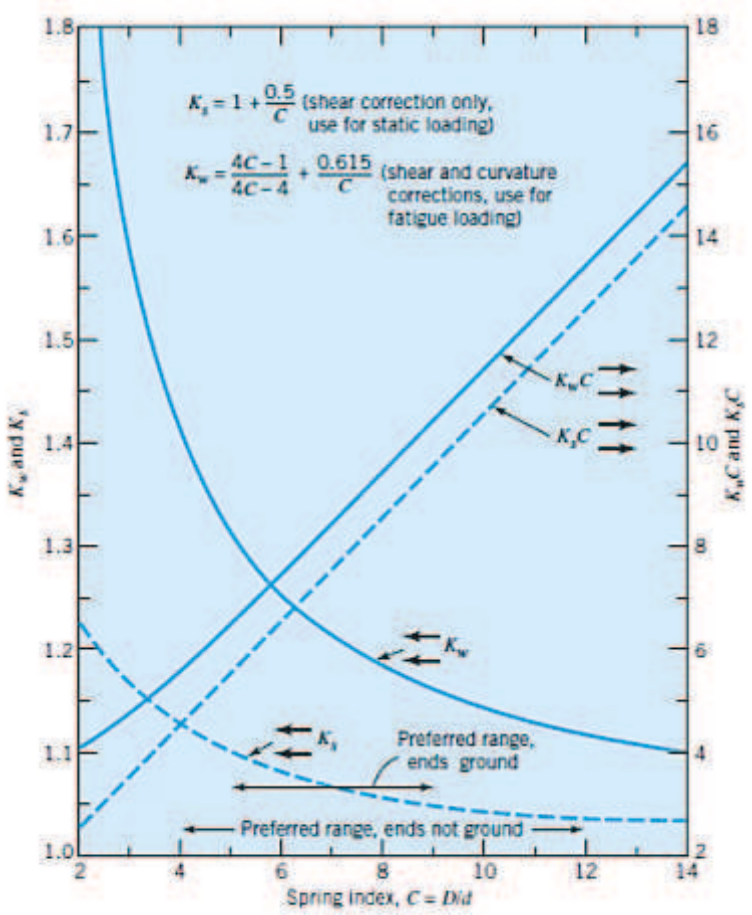
$$KW = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0,615}{C} \tag{5}$$

Onde, C é descrito como a razão entre o diâmetro médio da mola e o diâmetro da seção transversal.

$$C = \frac{D}{d} \tag{6}$$

De forma que podemos observar na figura 8 que quanto menor for a razão entre os diâmetros médio e transversal maior será o valor C e consequentemente os fatores KS e KW.

Figura 8 - Gráfico correlacionando, índice C e concentradores de tensão.



Fonte: Juvinal, 2012 p. 502

Nas equações de Ks e Kw, utilizou-se a nomenclatura A e B, e foi considerado que tanto para KS quanto para KW a formula é descrita como A+B, foi utilizado essa nomenclatura para facilitar o entendimento pois, o primeiro termo (A) refere-se à razão da curvatura do arame (Dm) e sua própria seção transversal (d), esta razão é a responsável pela concentração de tensão em molas helicoidais. Porém, para cargas estáticas o termo A da equação de Ks, não sofre influência de C, isto é considerado desta forma pois, durante o processo de carregamento estático, a peça sofrerá escoamento localizado e isso equilibrará novamente a tensão, por isso consideramos o valor do primeiro termo a igual a 1. Já quando submetida a fadiga a carga não é suficiente para que ocorra o escoamento, por isso para KW o valor de A e igual a $\frac{4C-1}{4C-4}$. Devemos considerar ainda que no fator Ks de Wahl tem-se embutido 23% de coeficiente de segurança, que normalmente é utilizado apenas para comparações finais de tensão(9). De forma que a fórmula mais usual para Ks é:

$$Ks = 1 + \frac{1{,}23*0.5}{C} \quad (7)$$

Desconsiderando o coeficiente de segurança temos

$$Ks = 1 + \frac{0.5}{C} \quad (8)$$

3.1.2.1.4 Tensões estáticas e dinâmicas

Podemos descrever as tensões em uma mola helicoidal de seção circular como sendo:

Para carregamento estático

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} * Ks + \frac{F}{A} \quad (9)$$

Para carregamento dinâmico

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} * Kw + \frac{F}{A} \quad (10)$$

Nota: essas equações são validas para molas com C > 3 e λ < 12 (9).

Ambas as formulações podem ser escritas sem a necessidade de se conhecer o D, desta forma obtemos as seguintes formulações:

Para carregamento estático

$$\tau = \frac{8F}{\pi d^2} * C * Ks + \frac{F}{A} \quad (11)$$

Para carregamento dinâmico

$$\tau = \frac{8F}{\pi d^2} * C * Kw + \frac{F}{A} \quad (12)$$

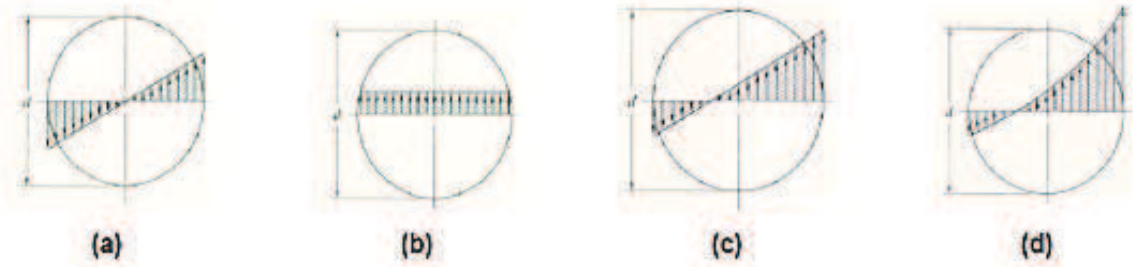
3.1.2.1.5 Influência da carga excêntrica na tensão de molas helicoidais.

Cargas excêntricas em molas helicoidais causam uma distorção na tensão, tornando-a mais agressiva em um lado do que no outro. Desta forma, dependendo do nível desta carga, ela pode invalidar as formulações acima. Apesar de estas cargas estarem presentes praticamente em todas as molas helicoidais, mantê-las sob controle é fundamental para otimização da vida da mola. (13,14).

Atualmente existem ensaios que conseguem mensurar essas cargas, para garantir que estas estejam em níveis seguros de projeto.

A figura 9 mostra como atuam as cargas cuja quais estão sujeitas as molas helicoidais, mostradas individualmente e combinadas.

Figura 9 - Distribuição de tensão ao longo da seção da mola.



Fonte: Arcanjo, 2008
Legenda: a) torção pura, b) Cisalhamento puro, c) torção e cisalhamento sem efeito da curvatura, d) Torção e cisalhamento com efeito da curvatura do arame.

3.1.2.2 Cálculo do deslocamento (δ) pelo método de Castigliano

Aplicando o teorema de Castigliano é possível calcular o deslocamento o deslocamento de uma mola helicoidal.

As fórmulas padronizadas para aplicação deste teorema são agrupadas na figura 10.

Figura 10 - Fórmulas do teorema de Castigliano

Load Type (1)	Factors Involved (2)	Energy Equation for Special Case Where All Three Factors Are Constant with x (3)	General Energy Equation (4)	General Deflection Equation (5)
Axial	P, E, A	$U = \frac{P^2L}{2EA}$	$U = \int_0^L \frac{P^2}{2EA}dx$	$\Delta = \int_0^L \frac{P(\partial P/\partial Q)}{EA}dx$
Bending	M, E, I	$U = \frac{M^2L}{2EI}$	$U = \int_0^L \frac{M^2}{2EI}dx$	$\Delta = \int_0^L \frac{M(\partial M/\partial Q)}{EI}dx$
Torsion	T, G, K'	$U = \frac{T^2L}{2GK'}$	$U = \int_0^L \frac{T^2}{2GK'}dx$	$\Delta = \int_0^L \frac{T(\partial T/\partial Q)}{GK'}dx$
Transverse shear (rectangular section)	V, G, A	$U = \frac{3V^2L}{5GA}$	$U = \int_0^L \frac{3V^2}{5GA}dx$	$\Delta^a = \int_0^L \frac{6V(\partial V/\partial Q)}{5GA}dx$

Fonte: Juvinal,2012 p. 211

Para o cálculo do deslocamento por torção, utilizaremos a fórmula abaixo (equação13).

$$\delta = \int_0^L \frac{T(\frac{dT}{dQ})}{GK'} \, dx \tag{13}$$

$$Onde\ Q = F\ \ J = \left(\frac{\pi d^4}{32}\right)\ \ N = número\ de\ espiras\ ativas$$

$$\delta = \int_0^{2\pi N} \frac{\left(\frac{FD}{2}\right) * \left(\frac{D}{2}\right)}{G\left(\frac{\pi d^4}{32}\right)} * \left(\frac{D}{2}\right) d\theta$$

$$\delta = \left(\frac{4FD^3}{\pi d^4 G}\right) \int_0^{2\pi N} d\theta$$

$$\delta = \left(\frac{8FD^3\boldsymbol{N}}{d^4 G}\right) \tag{14}$$

3.1.2.3 Constante elástica K.

A constante elástica ou *spring rate*, é o fator que mede a rigidez em Newton por milímetros, descrito pelas fórmulas 15 a 17 (9). Conforme mencionado anteriormente (fiura 2), o número de espiras (N) é dado pela quantidade de espiras ativas presentes na mola.

$$k = \left(\frac{F}{\delta}\right) \tag{15}$$

$$k = \left(\frac{d^4\boldsymbol{G}}{8D^3N}\right) \tag{16}$$

$$ou$$

$$k = \left(\frac{d\boldsymbol{G}}{8C^3N}\right) \tag{17}$$

3.1.2.4 Resistência de molas helicoidais.

Molas helicoidais estão sujeitas ao processo de fluência conhecido popularmente pelo seu termo em inglês “creep”. Este fenômeno é descrito como a relaxação do material, que no caso de molas seria a redução de altura em função do tempo. Para evitar isso durante o processo de fabricação, pode-se aplicar uma pré carga para eliminar as deformações plásticas existentes, processo este conhecido como “presetting”. (9)

Uma forma de prever o efeito da fluência em molas helicoidais e uma correlação entre com o limite de resistência a tração, denominado Su. Estudos mostram que para não ocorrer

escoamento maior que 2% da altura da mola, a tensão limite não pode atingir um determinado valor de (Su), de forma que para confecção de molas com materiais ferrosos é necessário manter a tensão inferior a 0,45(Su) já para materiais não ferrosos essa tensão é um pouco inferior não podendo ultrapassar (0,35 Su) em ambos os casos não está sendo considerado a utilização do presetting, porém quando atribuído este processo as peças este valor aumenta para ambos os casos atingindo,0,65(Su) para os ferrosos e 0,55(Su) para não ferrosos (9).

Figura 11- Limite de resistência ao escoamento para molas metálicas

$\tau_s \leqq 0.45S_u$ (ferrous—without presetting)

$\tau_s \leqq 0.35S_u$ (nonferrous and austenitic stainless—without presetting)

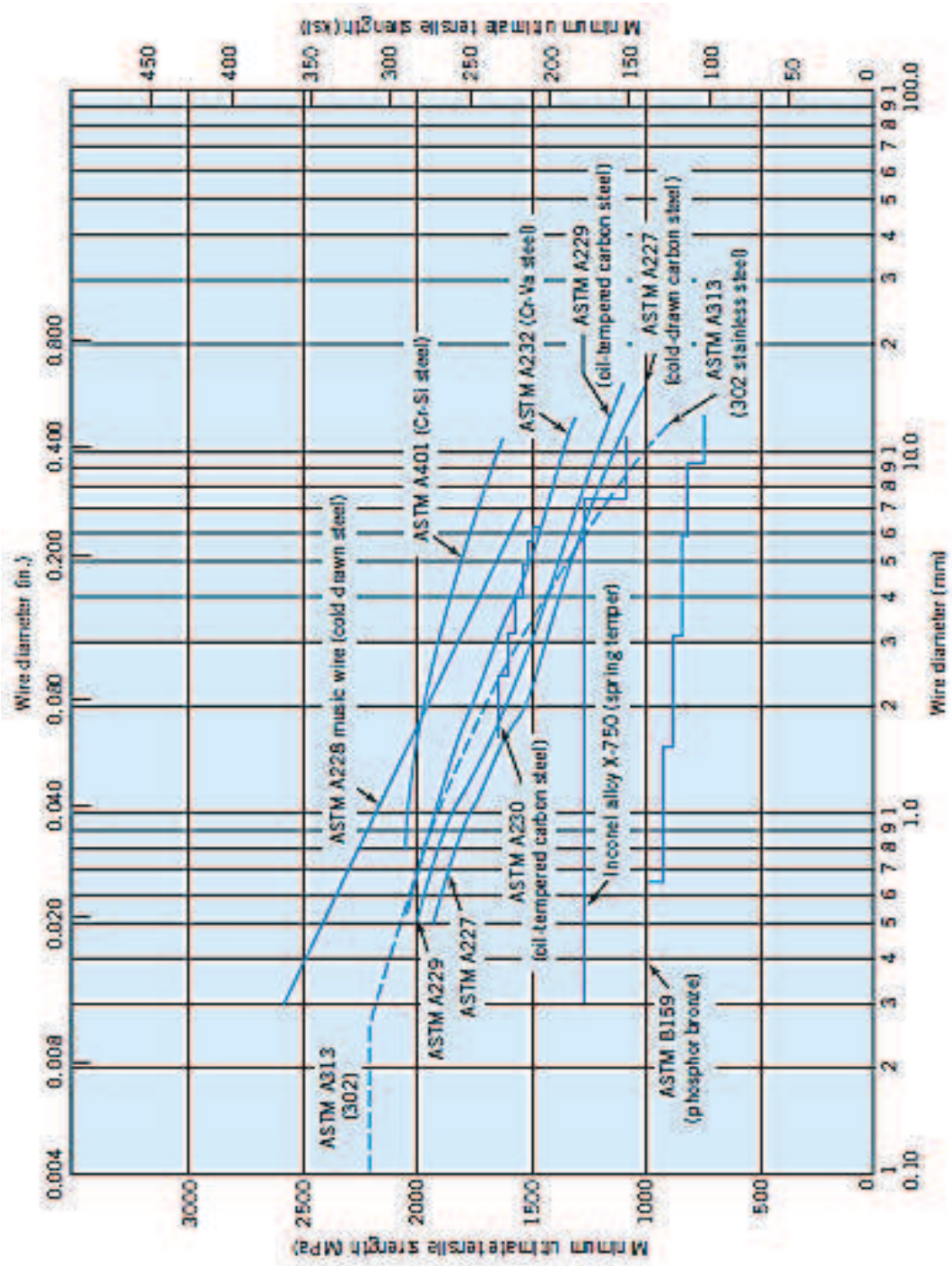
$\tau_s \leqq 0.65S_u$ (ferrous—with presetting)

$\tau_s \leqq 0.55S_u$ (nonferrous and austenitic stainless—with presetting)

Fonte: Juvinal, 2012 p. 506

É possível encontrar na literatura algumas informações específicas de materiais para a fabricação de molas. A figura 12 mostra a resistência à tração para alguns tipos destes materiais (9).

Figura 12 Resistências à tração de vários materiais para confecção de molas.



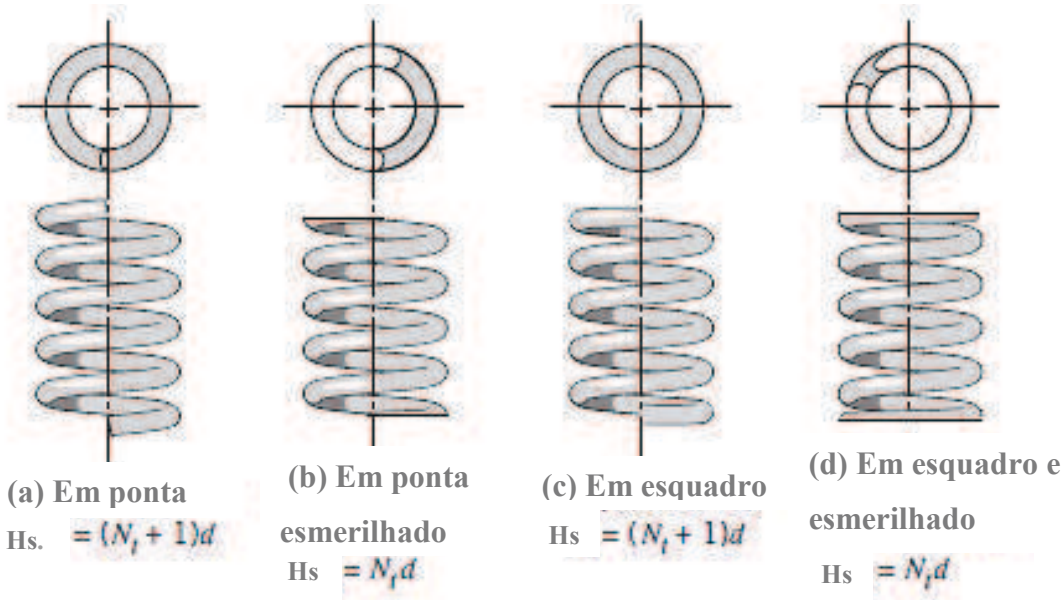
Fonte: Juvinal, 2012 p. 505

3.1.2.5 Comprimento sólido e total de espiras.

A recomendação de deflexão máxima de uma mola helicoidal é de no máximo 90% do total, considerando assim 10% de folga para evitar o toque entre as espiras, uma vez que nem

todas as espiras defletem da mesma forma. (13) O toque entre espiras deve ser evitado, pois pode causar danos à peça, como remoção da camada de pintura, ou marcas superficiais que poderão levar a quebra prematura por fadiga. (9,10) O cálculo do comprimento sólido de uma mola (todas as espiras fechadas) pode ser visto na figura 13, considerando os quatro tipos de extremidades possíveis em mola helicoidais(9,10,14)

Figura 13 – Comprimento sólido de molas helicoidais com diferentes tipos de extremidade:



Fonte: Autor adaptado de Juvinal, 2012 p. 507
Legenda: a) em ponta, b) em ponta esmerilhado, c) em esquadro, d) em esquadro e esmerilhado.

O número de espiras de uma mola Nt, é a simples contagem de todas as espiras presentes na peça. A fórmula mais utilizada para este cálculo é a somatória das espiras ativas com as inativas, por exemplo, uma mola que tenha assentamento de uma espira em ambos os lados o total de espiras será dado pela fórmula:

$$Nt = N + 2 \tag{18}$$

3.1.2.6 Flambagem em molas de compressão.

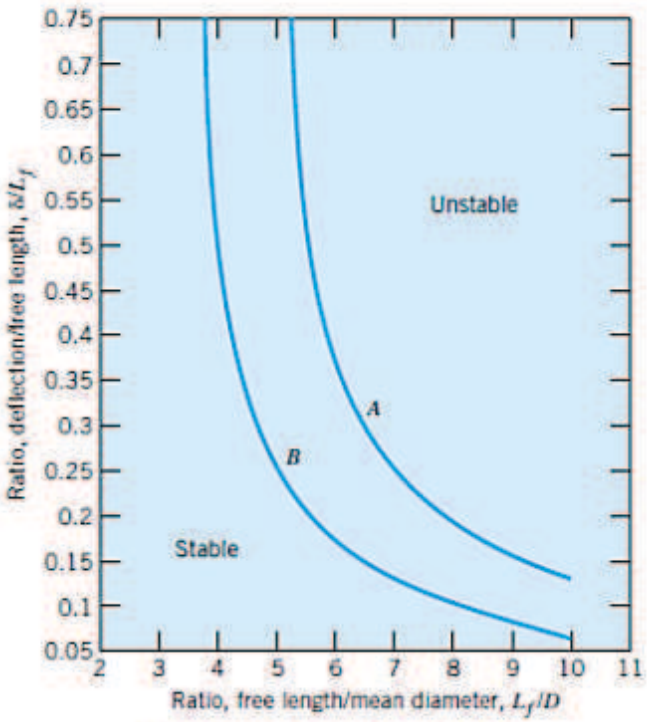
Molas helicoidais de compressão estão sujeitas a flambagem, assim como colunas.

Considerando-se que a relação entre L (comprimento da mola livre) e D (diâmetro médio), a mola poderá sofrer flambagem se (9):

$$H > 4D \tag{19}$$

A figura14 mostra um gráfico de estabilidade de molas helicoidais. A curva A está considerando que a mola esteja totalmente presa na extremidade, e na curva B a mola está livre para se deslocar transversalmente.

Figura 14 - Gráfico de relação de flambagem de molas helicoidais



A- As extremidades das molas estão fixadas em paralelo

B- Uma das extremidades livre para girar

Fonte: Juvinal, 2012 p. 508

3.1.3 Molas helicoidais de seção transversal quadrada ou retangular.

Molas helicoidais de seção quadrada ou retangular são normalmente utilizadas para casos onde é necessária uma alta absorção de energia, com pequeno deslocamento. Apesar de apresentarem desvantagem na distribuição de tensão ao longo fio, comparado com molas de secção circulares, para aplicações estáticas ou para solicitações cíclicas não muito severas esse tipo de mola pode ser indicado. Um problema que pode ocorrer na produção de molas com seção quadrada ou retangular é que, durante a conformação da barra em um formato helicoidal, a seção transversal pode apresentar características trapezoidais, com o lado interno

maior que o lado externo, devido ao esmagamento do arame durante a conformação. Isso tende a diminuir a deflexão da mola, bem como a capacidade de absorver energia. Tais complicações serão desconsideradas nas fórmulas seguintes, onde foram considerados um quadrado e um retângulo perfeitos. (10)

Os efeitos dos concentradores de tensão nas molas de seção quadrada ou retangular são mais expressivos do que nas molas de seções circulares, podendo exceder 15% de erro no projeto. (10)

3.1.3.1 Cálculo de tensão em molas com seção quadrada.

Nesta seção serão descritas as formulações que descrevem o cálculo de tensão em molas helicoidais de seção quadrada.

3.1.3.1.1Tensão incorreta.

Esta formulação recebe este nome, pois, considera a mola helicoidal como uma barra reta, submetida apenas a um esforço de torção. Nestas condições é desconsiderado o efeito do concentrador de tensão causado pela curvatura do arame, assim como da força cisalhante(10).

$$\tau = \frac{2.4FD}{a^3} \tag{20}$$

Onde:

D = Diâmetro médio da mola

F = Força aplicada para comprimir a mola

a = Lado do quadrado da seção do arame

3.1.3.1.2 Tensão correta.

Os efeitos dos concentradores de tensão nas molas de seção quadrada ou retangular são mais expressivos, pois além da curvatura do arame, as peças apresentam quatro arestas, devido a sua forma geométrica.

$$\tau' = \tau * K' \tag{21}$$

$$K' = 1 + \frac{1,2}{c} * \frac{0,56}{c^2} * \frac{0,5}{c^3} \tag{22}$$

Onde o índice “c” da mola é dado pela equação 23

$$c = \frac{D}{a} \tag{23}$$

3.1.3.2 Cálculo de deflexão em molas helicoidais com seção quadrada.

$$\delta = \left(\frac{5.59FD^3n}{a^4G}\right) \tag{24}$$

n = Número de espiras ativas

G = Módulo elástico de cisalhamento

Esta fórmula tem entre 2 e 4 por cento de erro para molas com índice "c" entre 3 e 4.

3.1.3.3 Cálculo do rate em molas helicoidais com seção quadrada.

A constante elástica de uma mola pode ser medida de forma experimental, dividindo-se a carga F, pelo deslocamento obtido δ, ou teoricamente pela equação.25

$$k = \frac{P}{\delta} = \left(\frac{a^4G}{5.59D^3n}\right) \tag{25}$$

3.1.3.4 Cálculo de tensão em molas com seção retangular.

Nesta seção serão descritas as formulações que descrevem o cálculo de tensão em molas helicoidais de seção retangular.

3.1.3.4.1 Tensão incorreta.

As considerações feitas nas molas de seção quadrada são as mesmas aplicadas para molas de seção retangular. A tensão incorreta é descrita pela equação.26

$$\tau = \frac{FD}{K1ab^2} \tag{26}$$

Onde:

a = Lado maior do retângulo

b = Lado menor do retângulo

K1 = Fator de correção conforme a tabela 1

Tabela 1- Valores dos fatores de correção K1 e K2.

Relação a/b	1	1,2	1,5	2	2,5	3	5	10	∞
Fator K1	0,416	0,438	0,462	0,492	0,516	0,534	0,582	0,624	0,666
Fator k2	0,180	0,212	0,250	0,292	0,317	0,335	0,371	0,398	0,424

Fonte: Autor adaptada de Wahl mecanical springs 1967

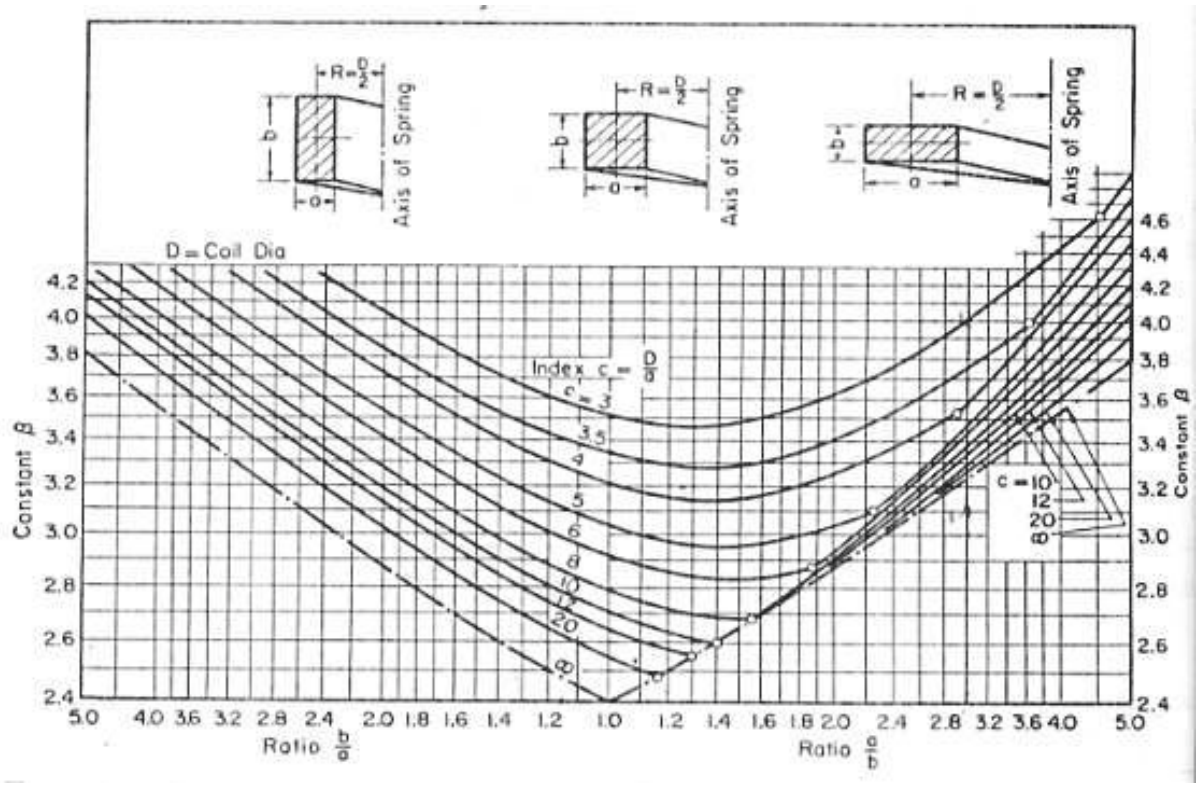
3.1.3.4.2 Tensão correta.

Calcular a tensão máxima corrigido de uma mola de seção retangular é mais complicado do que as circulares e quadradas, pois além dos concentradores de tensão, o sentido de enrolamento, influencia na tensão máxima.

A fórmula que descreve a tensão corrigida é acrescida de um fator de correção beta, oriundo do gráfico mostrado na figura 15, que correlaciona o índice c e a razão entre os lados do retângulo b/a (10).

$$\tau' = \beta\left(\frac{FD}{ab\sqrt{ab}}\right) \tag{27}$$

Figura 15 - Gráfico para obtenção do fator beta



Fonte: Autor adaptada de Wahl mecanical springs 1967, p. 128

Podemos observar que na figura 12 o lado b está sempre paralelo ao eixo da mola enquanto, o lado a permanece perpendicular.

3.1.3.5 Cálculo de deflexão em molas com seção retangular.

O cálculo de deflexão, deste tipo de mola, depende diretamente do seu índice podendo até mesmo negligenciar os fatores de concentração de tensão.

Para peças com índice c maior que 8, é plausível considera a mola como uma barra reta, sujeita apenas a torção, desconsiderando a carga cisalhante e o efeito da curvatura (10). Para este caso vale a equação 2.28

$$\delta = \left(\frac{FD^3n}{k2ab^3G}\right) \tag{28}$$

n = Número de espiras ativas

G = Módulo elástico

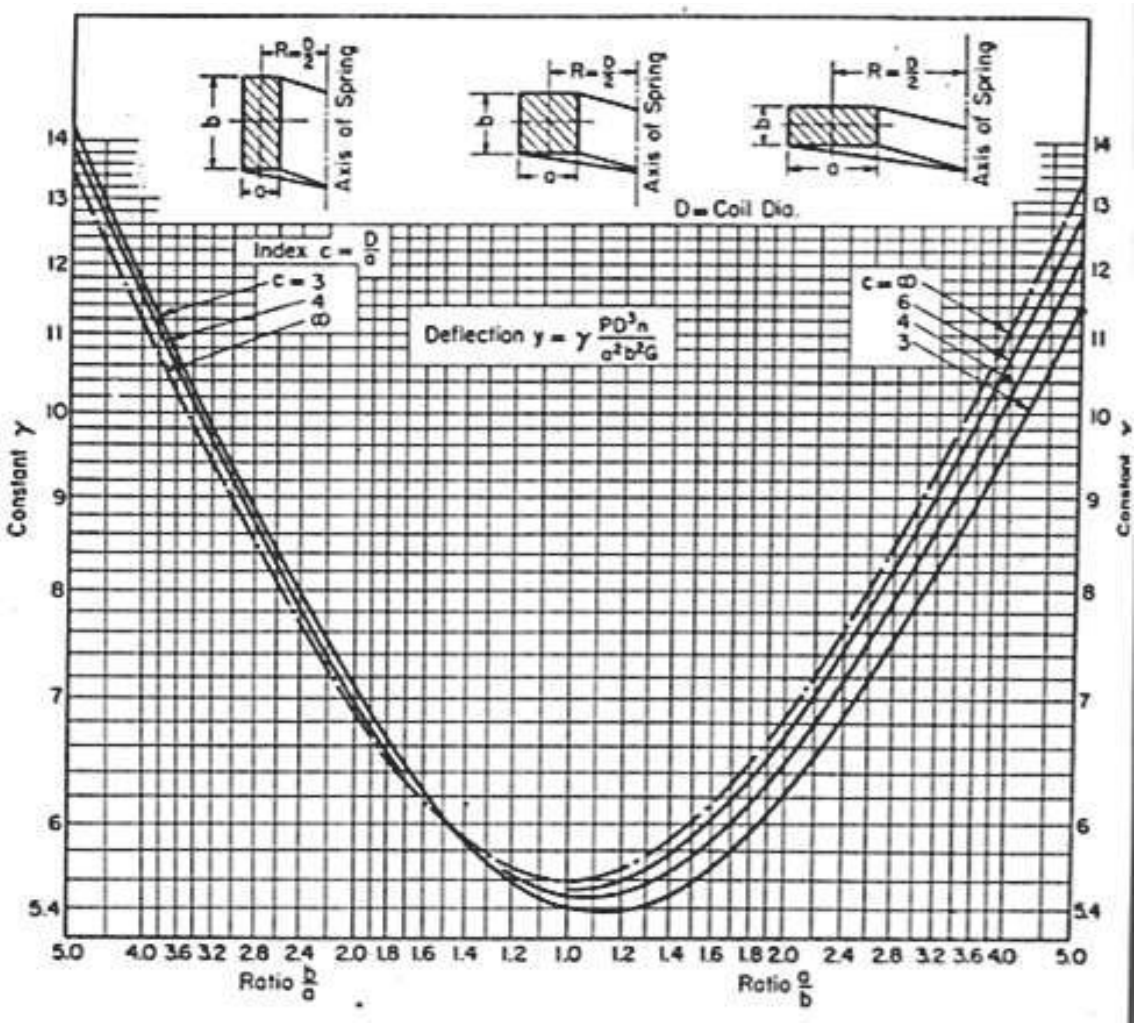
k2 = Fator que depende da razão a/b.(tabela1)

Quando o projeto tem um índice menor que 8, é necessário considerar a força cisalhante, bem como o efeito da curvatura(10). A equação 29descreve este caso.

$$\delta = \ddot{Y}\left(\frac{FD^3n}{a^2b^2G}\right) \tag{29}$$

Para esta relação um novo fator de correção é necessário, trata-se do fator Ÿ. Este fator depende do índice c e da razão a/b, sendo obtido pelo gráfico representado na figura 16

Figura 16 - Gráfico para obtenção do fator delta



Fonte: Autor adaptada de Wahl mecanical springs 1967, p. 130

3.1.3.6 Cálculo da constante elástica em molas helicoidais com seção retangular.

A fórmula 29 descreve a constante elástica para molas helicoidais com seção retangular.

$$k = \frac{P}{\delta} = \left(\frac{a^2 b^2 G}{D^3 n\ \ddot{Y}}\right) \tag{30}$$

3.1.4 Limitações em molas helicoidais metálicas

No geral, molas helicoidais são fabricadas com materiais metálicos e estão sujeitas às limitações impostas a esse tipo de material, como oxidação, baixa inércia química e aumento da ductilidade com a temperatura. Como o aquecimento leva a uma redução do limite de

proporcionalidade entre tensão e deformação, a temperatura de trabalho de molas metálicas normalmente não excede 600°C, pois a partir disso, os efeitos de fluência descaracterizariam o efeito reversível normal de uma mola. (1) As características de oxidação e baixa inércia química são solucionadas normalmente com uma camada protetora na superfície, como pintura eletrostática, o que limita ainda mais a aplicação destes produtos em alta temperatura.

Para solucionar estes problemas, e poder obter molas que possam atuar em altas temperaturas e ambientes quimicamente agressivos, será necessário trabalhar em outras classes de materiais, observando as características de materiais metálicos, poliméricos e cerâmicos (15). Fica claro que uma mola cerâmica poderia atuar em ambientes e temperaturas onde metais e polímeros não poderiam, um exemplo seria dentro de fornos de têmpera para materiais metálicos onde as temperaturas ultrapassam 800°C.

3.2 MATERIAIS CERÂMICOS

Materiais cerâmicos têm sido utilizados pela humanidade há milhares de anos, comum em todo globo terrestre, podendo ser encontrado como areia (SiO_4^{-4})ou argila (Al_2O_3 SiO_2 H_2O). Este material carrega consigo o título de material manufaturável mais antigo do mundo (16). O termo cerâmica, veio do grego keramikos que significa matéria prima queimada, indicando que este tipo de material e obtido através de algum tipo de processo, que envolva calor(17). Por definição, eles são materiais inorgânicos, não metálicos, à base de silicato, insolúveis em água podendo ser ácidos ou alcalinos, e contêm pelo menos 30% de compostos cristalinos. A estrutura atômica deste tipo de material é considerada mista e é constituída basicamente de ligações (iônicas e covalentes) ou em alguns casos totalmente covalente.(18)

3.2.1 Características dos materiais cerâmicos

Materiais cerâmicos apresentam algumas limitações, que inviabilizam seu uso em certos tipos de aplicações, principalmente por serem extremamente frágeis com baixa tenacidade e pouca resistência ao choque mecânico (2).

A razão pela qual os cerâmicos têm essas características é atribuída às ligações químicas mistas, iônica-covalente, por se tratarem de ligações primárias, são extremamente fortes. Além disso, materiais cerâmicos apresentam estruturas cristalinas mais complexas que a dos metais, o que dificulta a movimentação de átomos e de linhas de discordância. Isso faz com que o material perca propriedades como ductilidade e tenacidade a fratura (19).

Outro ponto crucial para utilização de cerâmicos em engenharia é a maior resistência à compressão do que à tração, devido à baixa tenacidade do material cerâmico, comportamento bem diferente dos metais que tem a resistência muito parecida quando ensaiados em tração e compressão(20).

Dentre os materiais cerâmicos, em especial o vidro, é possível observar uma queda da fragilidade e um aumento da tenacidade com o aumento da temperatura.

O vidro possui uma temperatura chamada temperatura de transição vítrea, que quando é ultrapassada, o vidro passa a se comportar como um líquido viscoso (21).

Porém apesar de algumas características que dificultam a utilização dos materiais cerâmicos, outras os tornam indispensáveis em algumas (22).

Materiais cerâmicos são quimicamente estáveis, portanto resistem em ambientes agressivo tanto térmica quanto quimicamente. Possuem elevada dureza e baixo coeficiente de expansão térmico. Essas características permitem que materiais cerâmicos atuem onde metais e polímeros não apresentam bom desempenho (22).

3.2.2Tipos e aplicações de materiais cerâmicos.

Materiais cerâmicos podem ser divididos em dois grupos quando pensamos em aplicações, sendo eles, cerâmicas tradicionais e avançadas (22).

As cerâmicas tradicionais também conhecidas como cerâmicas naturais, correspondem a todo e qualquer material cerâmico obtido através de matérias primas que tenham sido extraídas de fontes naturais. Suas aplicações são um pouco mais limitadas quando comparadas com as cerâmicas avançadas, pois cerâmicas naturais são utilizadas normalmente em artesanato, utensílios de cozinha e construção civil.

Com um grau de pureza bem mais elevado, as cerâmicas avançadas são obtidas de matérias primas sintéticas como, por exemplo, a alumina (Al_2O_3), zircônia (ZrO_2), nitreto de silício (Si_3N_4) e carbeto de silício (SiC).(22,23)

A lista de cerâmicas avançadas é bem maior, e suas aplicações, são mais abrangentes, podendo ser utilizadas em aplicações óticas, mecânica, térmica, elétrica, magnética e dielétrica. Tais propriedades permitem que cerâmicas sejam usadas em peças de alta tecnologia como turbinas de avião ou em implantes ósseos por exemplo.

Entre inúmeras possibilidades, a figura 17 faz uma breve relação entre algumas cerâmicas avançadas com suas propriedades e aplicações (16).

Figura 17- Características e aplicações de materiais cerâmicos

Property	*Example*	*Application*
Electrical	$Bi_2Ru_2O_7$	Conductive component in thick-film resistors
	Doped ZrO_2	Electrolyte in solid-oxide fuel cells
	Indium tin oxide (ITO)	Transparent electrode
	SiC	Furnace elements for resistive heating
	$YBaCuO_7$	Superconducting quantum interference devices (SQUIDs)
	SnO_2	Electrodes for electric glass melting furnaces
Dielectric	α-Al_2O_3	Spark plug insulator
	$PbZr_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ (PZT)	Micropumps
	SiO_2	Furnace bricks
	$(Ba,Sr)TiO_3$	Dynamic random access memories (DRAMs)
	Lead magnesium niobate (PMN)	Chip capacitors
Magnetic	γ-Fe_2O_3	Recording tapes
	$Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$	Transformer cores in touch tone telephones
	$BaFe_{12}O_{19}$	Permanent magnets in loudspeakers
	$Y_{2.66}Gd_{0.34}Fe_{4.22}Al_{0.68}Mn_{0.09}O_{12}$	Radar phase shifters
Optical	Doped SiO_2	Optical fibers
	α-Al_2O_3	Transparent envelopes in street lamps
	Doped $ZrSiO_4$	Ceramic colors
	Doped (Zn,Cd)S	Fluorescent screens for electron microscopes
	$Pb_{1-x}La_x(Zr_zTi_{1-z})_{1-x/4}O_3$ (PLZT)	Thin-film optical switches
	Nd doped $Y_3Al_5O_{12}$	Solid-state lasers
Mechanical	TiN	Wear-resistant coatings
	SiC	Abrasives for polishing
	Diamond	Cutting tools
	Si_3N_4	Engine components
	Al_2O_3	Hip implants
Thermal	SiO_2	Space shuttle insulation tiles
	Al_2O_3 and AlN	Packages for integrated circuits
	Lithium-aluminosilicate glass ceramics	Supports for telescope mirrors
	Pyrex glass	Laboratory glassware and cookware

Fonte: Cartwer e Norton, 2013

3.2.2.1 Alumina

Pertencente à classe das cerâmicas técnicas, a alumina atualmente é utilizada em inúmeras aplicações estruturais na engenharia graças ao seu custo benefício. Contudo seu primeiro registro de utilização comercial data de uma patente de 1907 (24) que descrevia a produção de alta alumina como material cerâmico, porém a aplicação inicial deste material data do final da década de 1920 e começo da década de 1930, sendo sua aplicação em questão para equipamentos de laboratório (25). O uso da alumina ocorreu inicialmente de forma modesta entre a indústria eletrônica e mecânica, porém após a segunda grande guerra, com o

aumento da tecnologia dos fornos de alta temperatura, o interesse por este material cresceu, pois o aumento na temperatura permitia a fabricação de peças com melhor qualidade (26)

A partir dos anos 40 a cerâmica de alta alumina começou a ser utilizada em fins estruturais, bioengenharia, componentes automotivos, ferramentas de usinagem e indústria bélica.

Três características tornam este óxido um dos mais usados no mundo, correspondendo atualmente a 80% do mercado mundial para aplicação de cerâmicas avançadas. Primeiro, a disponibilidade futura pois as estimativas das reservas ocidentais garantem o seu fornecimento para vários anos, segunda suas propriedades mecânicas e químicas como boa capacidade refratária, elevada dureza boa inércia química, alta, resistência em temperaturas altas e baixas, entre outras características. E terceiro seu baixo custo de aquisição e manufatura (27). No entanto, sua baixa resistência à tração, flexão, fratura e choque térmico acabam por impedir seu uso em determinadas situações.

3.2.3 Processamento de matérias cerâmicas

De fato, como materiais cerâmicos têm alto ponto de fusão, baixa ductilidade e alto módulo elástico, sobram poucas opções para o processamento. O método mais comum de se obter as propriedades das cerâmicas é trabalhar com materiais particulados, facilitando a moldagem e conformação de geometrias complexas (2,3).

Geralmente materiais cerâmicos são moldados em temperatura ambiente, podendo ser compactados ou contar com a adição de líquidos com intuito de dispersar ou hidratar as partículas, atribuindo a esse material a plasticidade ou fluidez necessária para conformação de geometrias complexas (3).

Independente do método de processamento, uma peça feita com material cerâmico particulado só terá suas propriedades mecânicas atingidas quando passar pelo processo de queima, processo este que é feito sob altas temperaturas (acima de 1400°C), e é responsável por transformações físico químicas, resultando em uma retração da peça acompanhada por redução da porosidade e da plasticidade do material. Após a sinterização, o material cerâmico já não pode ser reidratado (3).

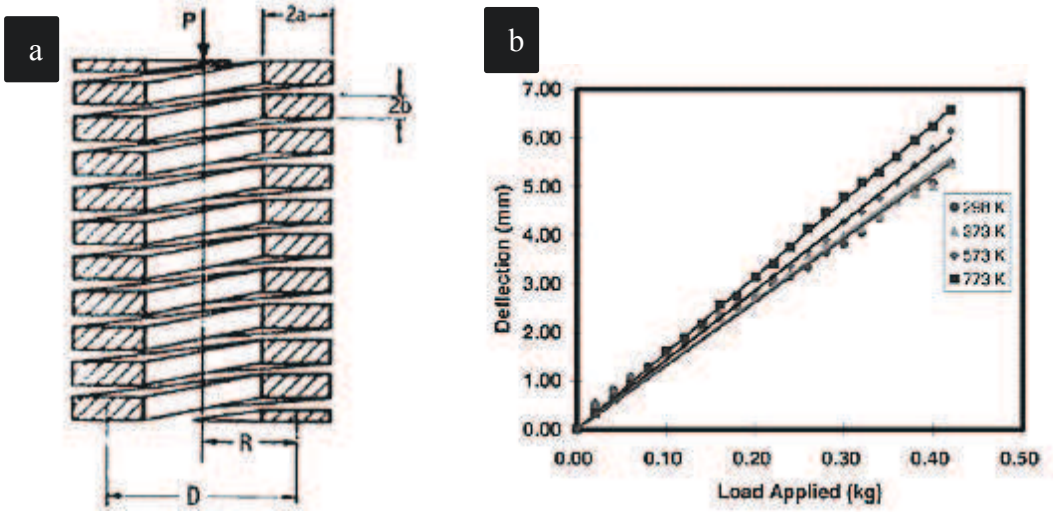
3.3 MOLAS CERÂMICAS

Existe um interesse crescente em produção de molas cerâmicas, devido à necessidade destes componentes. Possibilitando a utilização dentro de fornos por exemplo. Esta necessidade gera um enorme potencial econômico, pois o aperfeiçoamento e posterior aplicação de molas cerâmicas proporcionariam uma vasta aplicação em diversos setores dos mais distintos segmentos. Os autores mencionados a seguir, contribuíram com informações relevantes no desenvolvimento de molas helicoidais cerâmicas.

O primeiro relato de estudo de um filamento cerâmicas em formato de mola data de 1961, R. H. Rudolph (1961), que confeccionou suporte de filamentos de alta temperatura, em formato helicoidal, utilizando uma seção transversal quadrada e fabricadas com alumina com ligações vítreas, os suportes em formato de mola foram objetivadas a ter a mesma massa e o mesmo volume. O autor submeteu esse suporte de filamentos até a temperatura de 649°C. Porém em seu experimento ele verificou que era possível atuar com temperaturas até 1094°C(27).

Anos mais tarde, em 2003, Hamilton confeccionou molas cerâmicas, em alguns testes preliminares, ele constatou que a molas cerâmicas mantinham sua linearidade ou seja, obedecem a lei de Hooke mesmo em altas temperaturas. Para isso ele utilizou uma mola com seção retangular, feita de zircônia, e comparou as curvas de carga por deformação, em um ensaio uiaxial de tensão com as temperaturas de 298K, 373K, 573K e 773K conforme a figura 18, os dados relevantes da mola foram calculados utilizando a literatura de molas metálicas, devido a ausência de um cálculo específico considerando as particularidades da cerâmica (29).

Figura 18-Desenho de uma mola cerâmica, e curva de deflexão em função da temperatura

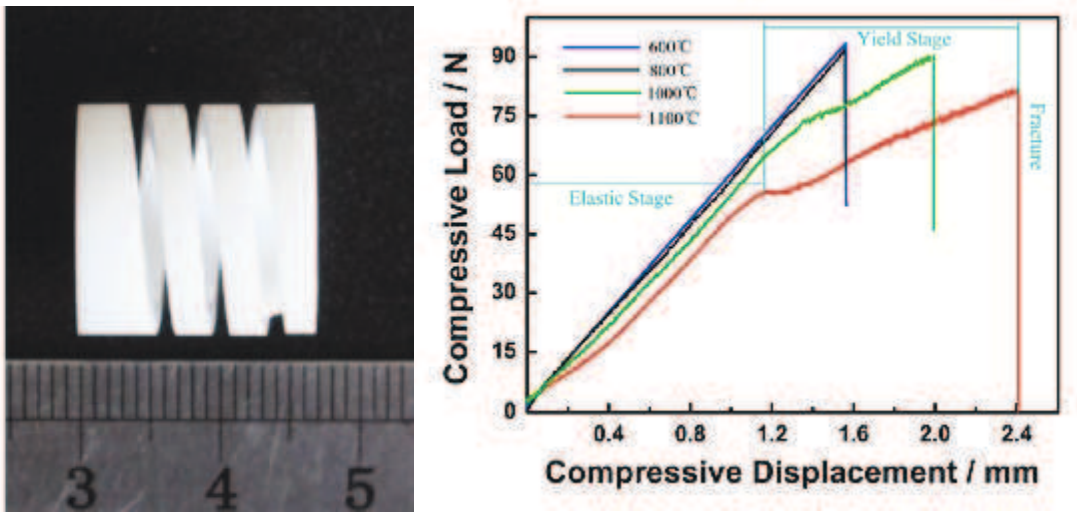


Fonte Hamilton, 2003.
Legenda: a) Desenho de mola cerâmica retangular b) curva deflexão em função da carga, variando a temperatura.

Com os dados obtidos por Hamilton é possível propor, um modelo de uma mola cerâmica para determinar o comportamento através de cálculos simples aplicados as molas metálicas, sabendo que ao contrário dos metais as molas cerâmicas se mantem em regime linear elástico em temperaturas superiores 773K .

Em 2015 MENGMENG confeccionou molas relativamente similares em geometria e material, porém em uma escala menor, e submeteu estas amostras a ensaios uniaxiais de compressão a temperaturas que atingiram 1373K, superando e muito o experimento de Hamilton. O experimento destacou o comportamento das molas em 4 faixas de temperatura partindo de 873K. Incrivelmente, a constatação foi que mesmo nesta faixa de temperatura as molas obedecem a lei de Hooke. Outro dado importante levantado neste trabalho foi que a constante elástica das molas diminuiu com o aumento da temperatura, na medida em que a deformação aumenta, um comportamento parecido com o dos materiais metálicos, porém em uma escala muito menor. A figura 19 mostra a imagem das molas bem como os gráficos gerados pelo ensaio de compressão em alta temperatura (1).

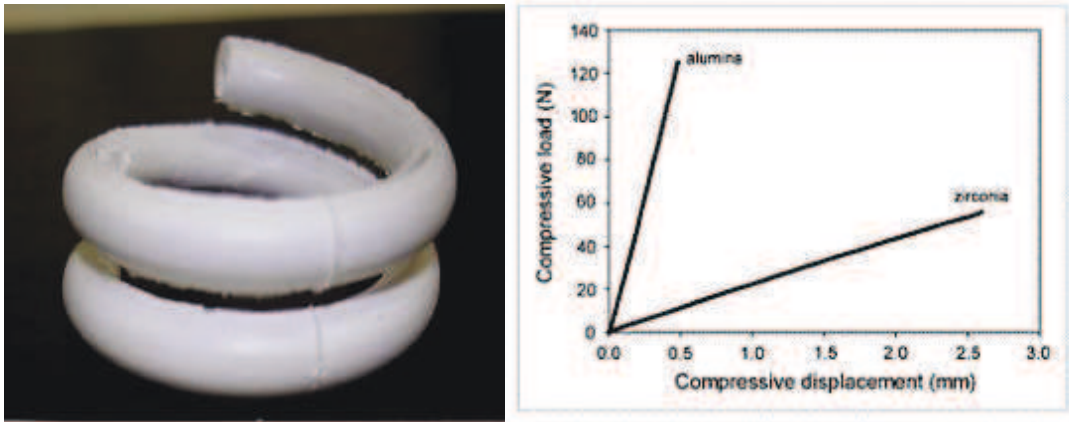
Figura 19- Imagem da mola e do resultado do ensaio de compressão realizado por Mengmeng (2015)



Fonte: Mengmeng
Legenda: a) Mola cerâmica de zircônia, b) Curva de força por deformação em quatro faixas de temperatura.

Andreola (5) confeccionou molas helicoidais cerâmicas com seção transversal cilíndrica, fabricando molas de alumina e zircônia. Em seu trabalho ela constatou que molas confeccionadas com geometrias idênticas, e dimensionalmente muito parecidas, quando se altera o material cerâmico entre alumina e zircônia ocorre que, molas feitas em alumina tem uma aumento na resistência e uma redução deformação quando comparado com zircônia a Figura 20, mostra o modelo de uma mola injetada pelo método de baixa pressão e o gráfico de deformação, alternando o material entre alumina e zircônia.

Figura 20 – Mola cerâmica seção circular e resultado do teste de compressão em ensaio uniaxial comparando o material alumina e zircônia.



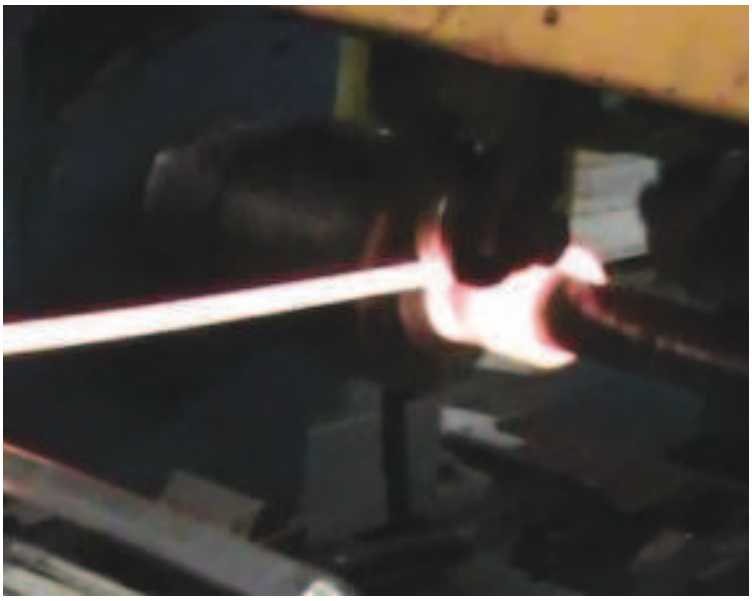
Fonte: Andreola, 2007Legenda:
Legenda: a) Mola cerâmica com seção circular, b) Gráfico de força por deformação comparando mola de alumina e zircônia

3.3.1 Processamento de molas cerâmicas

Como visto na seção anterior, uma mola cerâmica poderia atuar em situações onde a mola metálica não poderia, porém quando comparamos os processos de fabricação para molas metálicas, observamos que o grau de dificuldade para confecção de molas cerâmicas é muito superior.

Molas helicoidais metálicas são produzidas enrolando uma barra aquecida (~900°C enrolamento a quente) ou a temperatura ambiente (enrolamento a frio), em torno de um molde cilíndrico, dando assim à forma da peça a figura 21 mostra um exemplo de enrolamento a quente. Materiais cerâmicos não podem ser conformados desta forma, tampouco usinados em formato helicoidal, de modo que a melhor solução para o processamento de molas cerâmicas é trabalhar com material particulado (3).

Figura 21 - Linha de enrolamento a quente de molas helicoidais de aço.



Fonte: Autor

3.3.1.1 Injeção de baixa pressão

A injeção de baixa pressão é uma opção economicamente barata, para obtenção de peças com geometria complexa em pequena escala de produção,

Este processo parte de uma mistura entre o material cerâmico particulado e um ligante polimérico, que pode ser feita na própria injetora. Como a temperatura de injeção é

relativamente baixa e a pressão aplicada varia em torno de 0,2 a 0,6MPa, não há necessidade de moldes super-resistentes e caros para realizar a injeção. Após a injeção, a peça, fica em um estado conhecido como ”a verde”, onde existe alguma resistência mecânica devido ao material polimérico, porém muito inferior à da peça cerâmica propriamente dita. Em uma peça moldada por injeção de baixa pressão, existe um processo intermediário de aquecimento a uma temperatura mais amena, no qual é feita a queima e extração do material polimérico presente na peça a verde. Só após a total remoção deste material a temperatura pode ser elevada para que as peças possam ser sinterizadas, e assim atingir as propriedades reais de uma material cerâmico (30,31, 32).

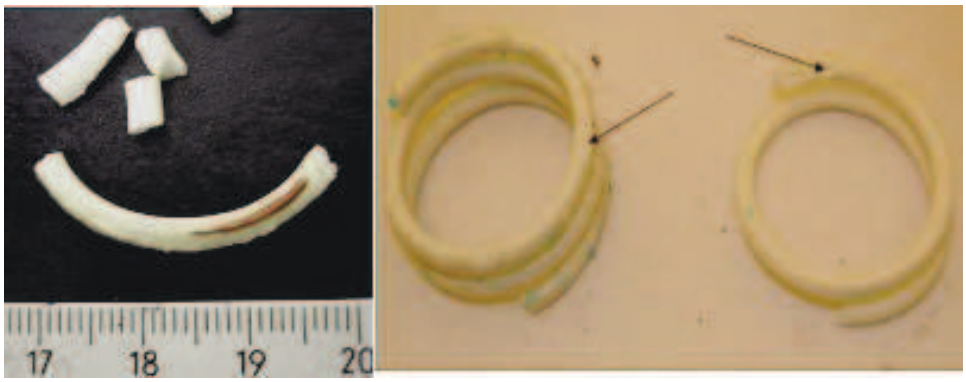
Estima-se que este método esteja em uso há mais de 70 anos onde se iniciou com utilização de ceras com baixo ponto de fusão como ligantes. Este processo não é indicado para partículas com tamanho inferior a um mícron, pois durante a extração dos ligantes, podem aparecer rachaduras e distorções devido a maior fluidez da mistura (31,32).

Raquel Andreola (2007) estudou algumas possibilidades de processamento de uma mola helicoidal cerâmica com injeção de baixa pressão. Utilizando um molde feito em tubos de cobre, ela verificou que durante a remoção do molde, tanto por eletrólise quanto por solução ácida, foi notória a presença de macro defeitos, bem como de resíduos do próprio molde na peça (5). A figura 22 mostra as duas formas utilizadas por ela para a confecção do molde com tubo de cobre. Já na figura 23 podemos observar alguns defeitos gerados por este método.

Figura 22 - Molde tubular de cobre para injeção de baixa pressão.

Fonte: Andreola, 2007

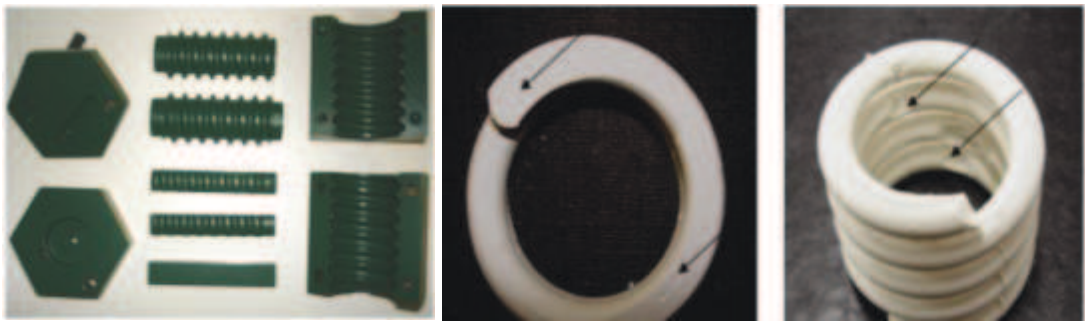
Figura 23 - Defeitos, com peças conformadas pelo molde tubular.



Fonte: Andreola, 2007

O melhor resultado obtido por ela, foi com um molde metálico revestido de teflon. Na figura 24 (a), podemos observar o molde utilizado para a fabricação de molas helicoidais cerâmicas de seção circular. É possível observar que o interior do molde foi feito em 5 partes, de forma a possibilitar a desmoldagem após a secagem. Na figura 24 (b) temos o detalhe dos defeitos gerados por este processo (injeção de baixa pressão, moldada em molde metálico).

Figura 24 – Detalhe do molde metálico e mola cerâmica a verde



Fonte: Andreola, 2007
Legenda a) Molde metálico revestido com teflon, b) Detalhes de defeitos presentes nas peças moldadas por injeção de baixa pressão.

3.3.1.2 "gelcasting"

O processo "gelcasting" foi desenvolvido na década de 90 como uma resposta a necessidade de processos de fabricação de materiais cerâmicos que fossem mais robustos e capazes de gerar produtos mais confiáveis. Essas características não eram atendidas pelos processos de fabricação tradicionais. A origem deste processo é atribuída ao laboratório Oak Ridge National (ORNL) (33)

Este processo consiste em fabricar corpos cerâmicos (podendo ter uma geometria complexa), através da polimerização de uma suspensão constituída de material particulado

cerâmico disperso em uma solução aquosa de monômero, capaz de reproduzir facilmente a geometria de um molde (34).

Uma das vantagens do “gelcasting” , é que é possível controlar o percentual de sólidos na suspensão. Se por um lado a conformação fluida pode gerar uma maior concentração de sólidos devido a acomodação das partículas, por outro lado a polimerização dará resistência a verde até para peças com baixo teor de sólidos.

O primeiro passo no “gelcasting” é produzir uma suspensão, misturando pó cerâmico e uma solução de monômetro, os componentes básicos para esta técnica são o solvente (normalmente água), um monômero formador de cadeia e um monômero reticulante. Adicionando aos elementos descritos o material particulado, forma-se uma suspensão com alta concentração de sólidos e baixa viscosidade. Então é adicionado a esta suspensão agentes iniciadores contendo radicais livres que dão início à polimerização. Uma vez a suspensão polimerizada (in situ), forma-se um gel reticulado de polímero-solvente, onde o material particulado é mantido no formato da cavidade do molde pelo gel, formando assim o corpo a verde (31,32).

Os aditivos envolvidos na polimerização são orgânicos, por isso pode se utilizar o “gelcasting” em qualquer material cerâmico.

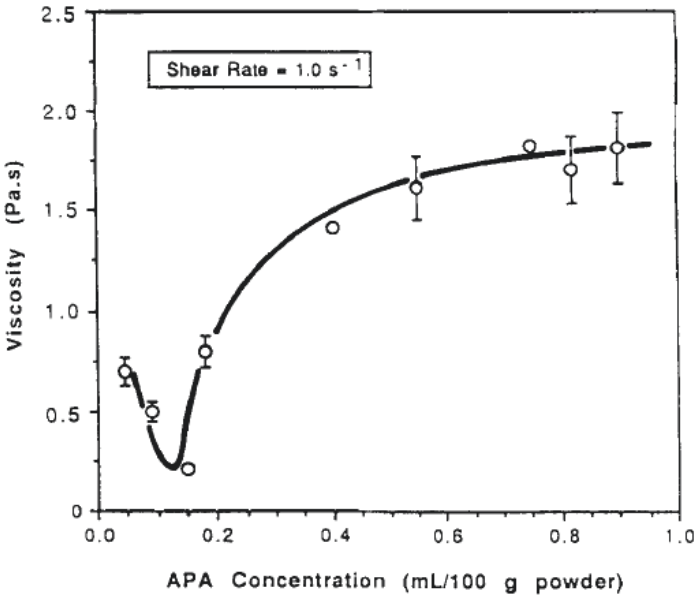
O processo “gelcasting” , fornece uma boa resistência após a polimerização (a verde). Esta resistência está diretamente ligada à concentração do monômero na solução, assim como a proporção entre monômero e reticulante, onde a solubilidade destes monômeros no solvente é o fator limitante.

Um fator importante para a boa qualidade da peça é manter a maior concentração de sólidos possível na suspensão, isso auxiliará na diminuição da retração da peça, durante os processos de secagem preliminar, extração de ligante e queima, impactando positivamente para redução de trincas e defeitos pontuais (poros) na peça. Um ponto importante é que quando a suspensão de alumina estiver com a concentração de sólidos próxima à sua concentração máxima apresentará um comportamento não newtoniano, passando de pseudoplástico dilatante à medida que a concentração de sólidos aumenta.

Durante a moldagem é essencial uma baixa viscosidade, pois isso acarretará na diminuição de bolhas e macro defeitos durante esta etapa, indo na direção oposta a concentração. Uma suspensão com menor concentração de sólidos apresenta uma melhor fluidez, o que diminui os defeitos gerados na moldagem, mas contribui para uma maior retração e consequentemente, aumenta a probabilidade de defeitos após a sinterização, por isso o equilíbrio entre essas características é de extrema importância. Para minimizar este

conflito é imprescindível a adição de um dispersante, esta adição deve ser definida dentro do ponto ótimo de dispersão, ou seja, deve se levantar uma curva experimental para que seja verificado qual a quantidade de dispersante que gera a menor viscosidade, uma vez que, passando o ponto de saturação da superfície das partículas, a viscosidade deixa de diminuir e passa a aumentar conforme a Figura 25 (36).

Figura 25 - Viscosidade em função da concentração do dispersante Darvan 821A (APA)



Fonte: Autor adaptado autor de Young et al .,1991, p614.

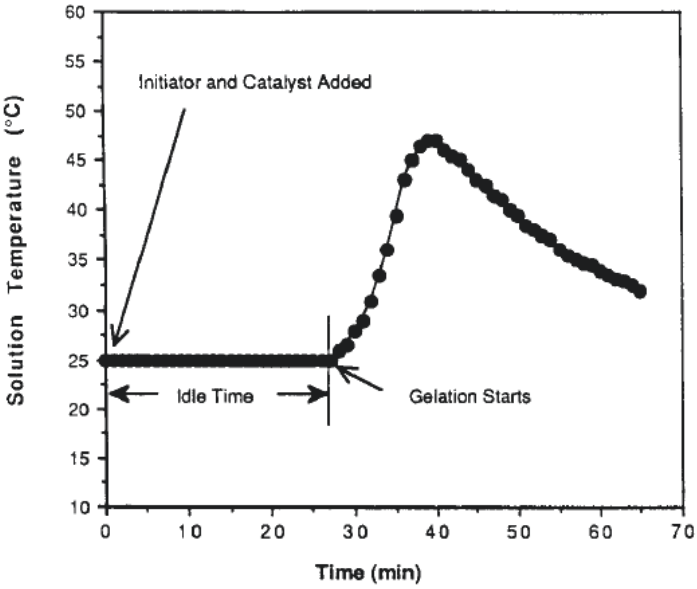
Outra etapa muito importante do "gelcasting" , é a remoção de bolhas de ar de dentro da suspensão. Esta remoção não impacta na reação de polimerização, e só não é efetuada quando o objetivo é maximizar a densidade das peças, pois este processo permite também a fabricação de cerâmicas porosas). O ar fica dissolvido na suspensão durante a mistura, levando à formação de defeitos internos como poros, também sendo observados defeitos externos, pois durante a queima do material este ar expande e tende a ir na direção da superfície da peça. Ambos os defeitos atuarão como concentradores de tensão, o que levará a peça a fraturar com uma solicitação menor do que o esperado.

A polimerização que leva a suspensão a gelificar pode ser dividida em 2 estágios: iniciação (conhecido como etapa inativa) e propagação. A temperatura e a concentração dos reagentes influenciam no tempo do primeiro estágio. Uma suspensão à temperatura ambiente pode demorar até 50 horas para reagir desde que contenha apenas iniciador considerando que este seja o persulfato de amônia. Por outro lado, adicionando junto com o iniciador o

catalizador (considerando o mesmo iniciador e o catalizador tetrametiletilenodiamina) este tempo de reação diminui ficando entre 5 e 20 minutos (33).

No segundo estágio (propagação) é onde realmente a reação química acontece por ser um processo exotérmico e geralmente é evidenciada através do aumento da temperatura da mistura. É possível verificar os dois estágios na figura 26 (36).

Figura 26 - Temperatura da solução em função do tempo.



Fonte: Autor adaptado autor de Young et al., 1991, p615.

Durante a sinterização e necessário remover os materiais não cerâmicos da peça e esta remoção ocorre em duas etapas: secagem para remoção da água, feita ao ar em temperatura ambiente ou em temperaturas abaixo de 40°C, seguido de extração do material polimérico, que ocorre em temperaturas de até 500°C dentro de um forno, com uma taxa de aquecimento baixa para evitar danificar a peça durante esse processo. A peça então segue para sinterização, onde será obtida a densificação total (35).

O primeiro relato de aplicação do processo "gelcasting" para produzir uma mola cerâmica é de 2015 (1). No referido trabalho, uma mola helicoidal de seção retangular foi fabricada com zircônia policristalina estabilizada com ítria (Y-TZP) e teve avaliadas suas propriedades de compressão em uma faixa de temperatura que foi de temperatura ambiente até 1100°C.

4 METODOLOGIA

Devido à escassez de informações na literatura acerca da fabricação de molas cerâmicas pelo processo “gelcasting” , foi necessário realizar alguns testes preliminares para levantar dados que pudessem auxiliar no projeto do molde final para a fabricação de molas cerâmicas. Assim, os experimentos foram divididos, descritas a seguir:

a) Parte 1 - Testes preliminares na fabricação de molas cerâmicas, avaliação da suspensão, densidade a verde e sinterizada, geometria e material do molde e resultados preliminares de ensaios mecânicos (seção 4.1);
b) Parte 2 - Confecção de corpos de prova para validar o processamento, ajustes na solução de monômeros, substituição do material para fabricação do molde, comparação dos resultados antes e depois das modificações (seção 4.2);
c) Parte 3 – Fabricação de um molde de alumínio, aplicando os conhecimentos adquiridos nos testes preliminares e moldagem final das molas, seguido de caracterização mecânica e simulação do comportamento esperado, utilizando um software de análise por elementos finitos (Ansys). (seção 4.3)

Sendo que, cada parte citada acima, tem suas subseções contendo método experimental, análise de dados, discussões e conclusão.

5 TESTES PRELIMINARES

Devido à poucas fontes de informações na literatura, a definição da geometria do molde para a confecção do primeiro protótipo de uma mola teve um foco experimental, sem um embasamento matemático mais avançado. O objetivo inicial foi de levantar resultados que pudessem posteriormente alimentar um projeto mais elaborado, e com possibilidades de comparar dados reais e teóricos. Outro aspecto avaliado nesta fase é a complexidade de moldagem de molas cerâmicas pelo processo “gelcasting” .

5.1 MATERIAIS E MÉTODOS

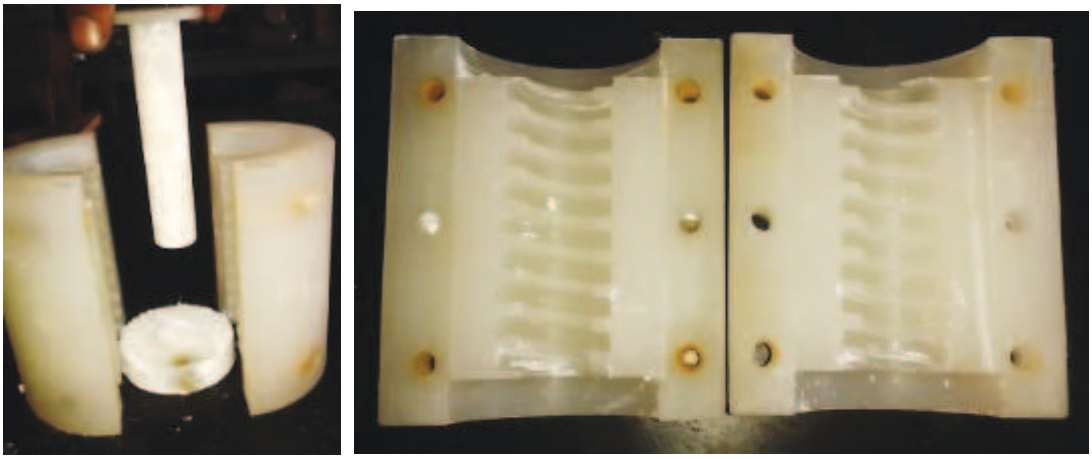
Nesta seção são descritos os materiais e métodos utilizados nesta etapa do trabalho. Alguns dos procedimentos foram aplicados nas etapas posteriores e, sempre que necessários, são referenciados nesta seção.

5.1.1 Confecção do molde

A geometria da mola é helicoidal, com espiras de seção transversal quadrada, pois apesar deste formato ter um maior acúmulo de concentradores de tensões, a confecção do molde é mais simples e, como está previsto a fabricação de pelo menos dois moldes, esta etapa será de extrema importância.

O molde para a conformação da peça foi produzido em nylon, com intuito diminuir a aderência entre a suspensão e a parede do molde, sendo subdividido em quatro partes para auxiliar na desmoldagem da mola: um corpo bipartido, uma tampa ao fundo e um êmbolo (Figura 27).

Figura 27 - Molde de nylon usado para conformar molas cerâmicas de seção transversal retangular, constituído de um corpo bipartido, fundo e um êmbolo.



Fonte: Autor.

Todas as partes do molde receberam uma fina camada de desmoldante (WD40) para facilitar a remoção das peças após a gelificação. Após a preparação da suspensão, esta é vertida dentro do molde fechado sem o êmbolo e ao se pressionar o pino central, esta é comprimida, preenchendo os canais helicoidais usinados na superfície interna do molde, dando assim o perfil da mola.

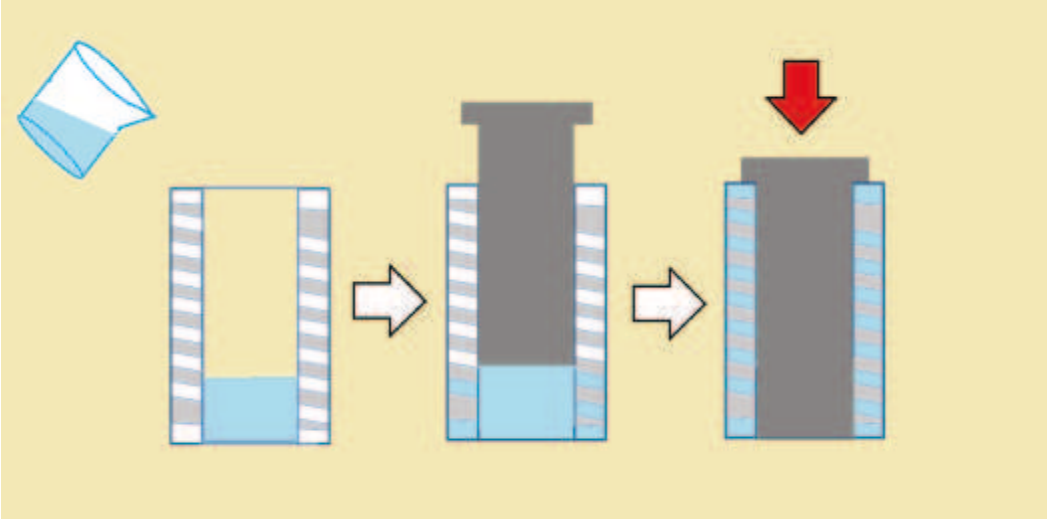
5.1.2 Preparação da suspensão e moldagem

A alumina utilizada foi a CT3000-SG (Almatis) com tamanho de partícula D50 de 0,4 μm e área superficial específica de 7,43 m^2/g, conforme informado pelo fabricante. A solução de monômeros utilizada para dispersar a alumina foi baseada no trabalho de Maida, P. C. et al (37) e consistia nos seguintes componentes:

a) Água destilada
b) Poliacrilato de sódio (Dispex AA 4140, Basf, concentração 46% em peso) - dispersante, ajuda a diminuir a viscosidade da suspensão.
c) Persulfato de amônia (APS) - iniciador, responsável pela polimerização dos monômeros (Sigma-Aldrich, concentração 98%).
d) Tetrametiletilenodiamina (TEMED) - catalisador, possui a função de acelerar a reação (Sigma-Aldrich, concentração 99%).
e) Hidroximetilacrilamida (HMAM) – monômero, possui a função de formar o gel (Sigma-Aldrich, concentração 48% em peso).

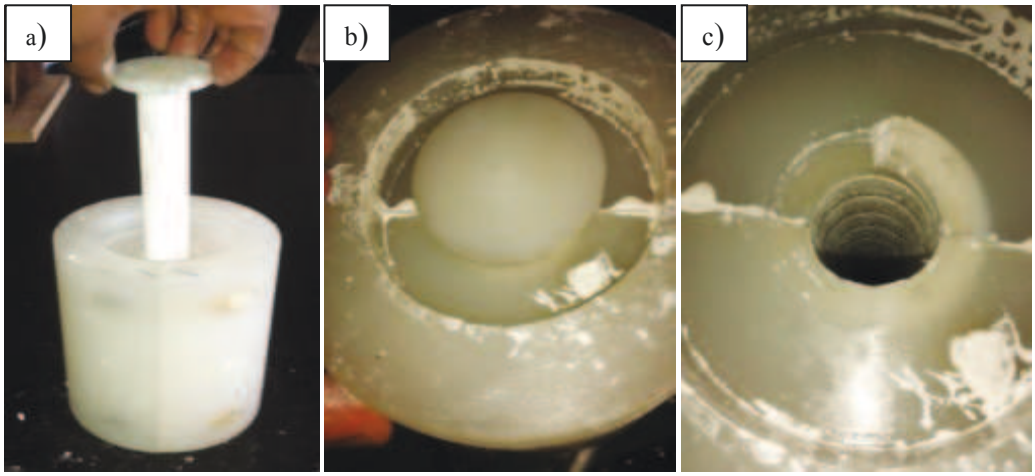
A suspensão para o processo *"gelcasting"* foi preparada com fração em volume de sólidos de 0,55 dispersa em uma solução aquosa de hidroximetilacrilamida com concentração em peso de 20% e uma quantidade previamente determinada (1,5% em peso, em relação à massa de pó) de poliacrilato de sódio como dispersante (Dispex AA 4140). A suspensão foi homogeneizada em um misturador de alto cisalhamento do tipo rotor-estator (Silverson L5-M) e em seguida foi desareada em um dessecador ligado a uma bomba de vácuo, para diminuir a porosidade causada por bolhas de ar. Para que a polimerização do monômero ocorresse, foi adicionado um catalisador (TEMED) e uma solução aquosa a 10% em peso de iniciador químico (APS). Após homogeneização, a suspensão foi vertida no molde, inseriu-se o êmbolo cilíndrico e aguardou-se alguns minutos até que ocorresse a gelificação da suspensão. O método de moldagem pode ser observado na figura 28. A figura 29 traz fotos reais do método de moldagem durante a confecção das amostras.

Figura 28 - Processo de conformação da mola cerâmica



Fonte: Autor

Figura 29 – Moldagem da mola cerâmica com o molde em perfil helicoidal fabricado com nylon



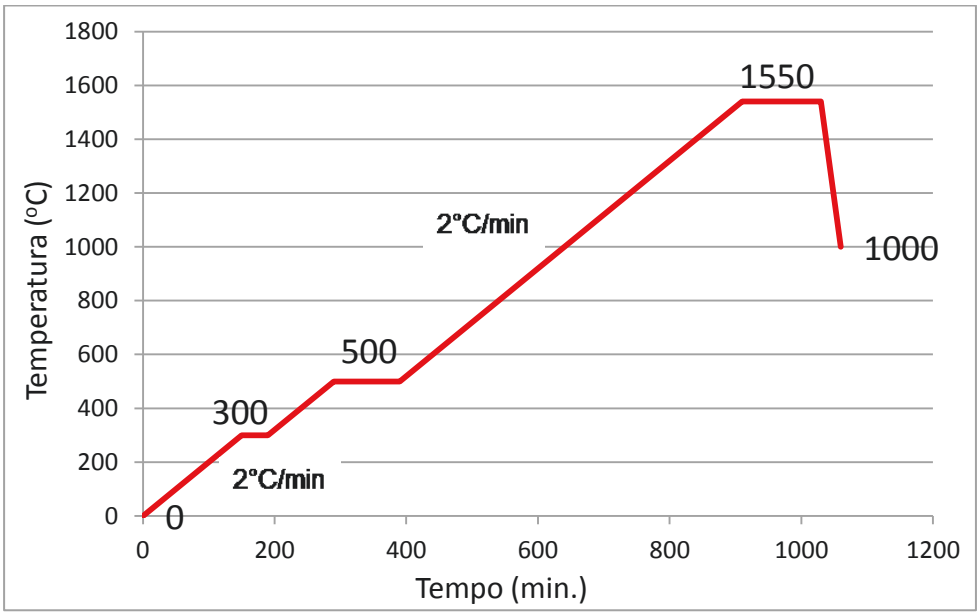
Fonte: Autor
Legenda: a) Inserção do êmbolo no molde preenchido com a suspensão; b) molde com o êmbolo inserido durante o processo de gelificação; c) peça gelificada no interior do molde, após a remoção do êmbolo.

Parte da mesma suspensão vertida no molde foi colocada num béquer, e com o auxílio de um termômetro foi monitorada a reação de gelificação através da temperatura, pois a polimerização é exotérmica. Após a estabilidade e posterior decréscimo da temperatura, o molde foi aberto, a peça cuidadosamente removida e colocada em um suporte cilíndrico, onde foi feita uma secagem preliminar por 24 horas a temperatura ambiente, até que ganhasse resistência mecânica. A secagem final foi feita em estufa a 90°C por mais 24h e em seguida, com uma lixa fina foram eliminadas rebarbas e imperfeições de moldagem.

A sinterização foi feita com uma taxa de aquecimento de 2°C por minuto o primeiro patamar foi feito a 300°C por 40min, com o objetivo de eliminar totalmente a umidade e iniciar a queima do polímero. Posteriormente, a temperatura foi elevada a 500°C e permaneceu por um período de 60 min., eliminando totalmente os componentes orgânicos da peça. Por fim, a sinterização da peça ocorreu a 1540°C por 2h. A Figura 30 ilustra o ciclo de queima das molas.

Antes e após a sinterização das molas, as dimensões principais destas foram mensuradas (diâmetro interno, altura e largura da seção do arame) para verificar o grau de contração após a sinterização, gerado pelas ligações primárias entre as partículas, bem como a redução da porosidade e aumento densidade das peças. Após isso as molas seguiram para o ensaio mecânico em uma máquina de ensaio universal (Instron 5567).

Figura 30 - Ciclo de queima empregado para sinterizar as molas cerâmicas.

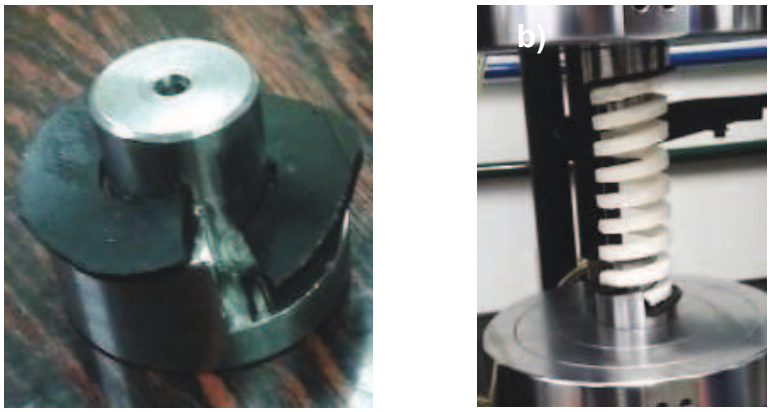


Fonte: Autor

5.1.3 Caracterização mecânica e microestrutural

Em um ensaio uniaxial de compressão, foi levantada a curva de força em função da deformação para seis peças. Durante os testes, estas foram apoiadas em duas bases metálicas com perfil em hélice (figura 31), de forma a apoiar uma espira de cada lado. Para evitar possíveis concentrações de tensões, foi utilizado um fino anel de borracha, entre a mola e a base metálica. A velocidade compressiva da máquina foi de 0,5 mm/s. O carregamento ocorreu continuamente até a fratura das peças.

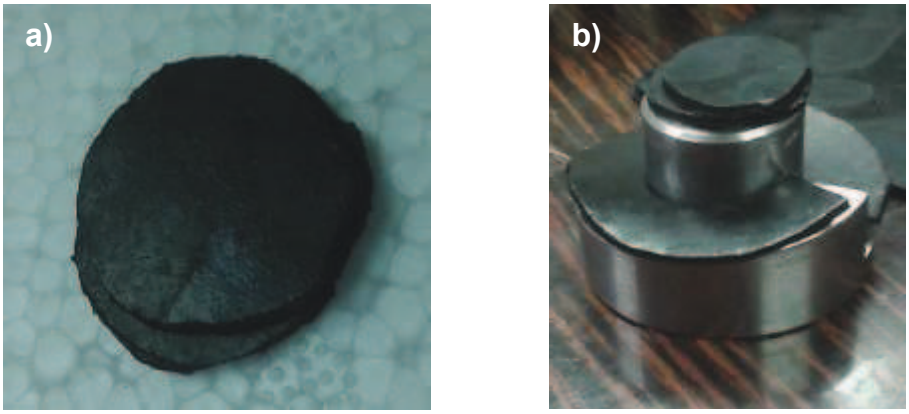
Figura 31 Teste de compressão uniaxial das molas cerâmicas.



Fonte: Autor.
Legenda: a) Bases helicoidal de apoio com anel de borracha; b) conjunto montado para ensaio de compressão.

Com o intuito de corrigir possíveis alterações no resultado, devido à aplicação do anel de borracha, foi levantado a curva denominada *baseline*. O ensaio foi realizado no círculo retirado do centro do próprio anel de borracha, para que não houvesse alteração de material, então foi associado em série (figura 32), e posteriormente levantado a curva de carga em função do deslocamento através da deformação da borracha por força normal de compressão.

Figura 32 Bases de apoio para ensaio de compressão da mola helicoidal cerâmica.



Fonte: Autor
Legenda: a) apoios de borracha associados em série; b) apoios de borracha em série posicionados para o ensaio de compressão.

Após a sinterização e o ensaio mecânico, as peças seguiram para a medição da densidade, para isso foi utilizado o método Arquimedes, conforme a norma ASTM C 373 – 88. As peças foram aquecidas por 24 horas a 90°C para garantir que não houvesse umidade, então foram medidas suas respectivas massas em uma balança analítica. Após isso as peças foram totalmente submersas em água dentro de um dessecador, separadas individualmente dentro de copos plásticos vasados, e com o auxílio de uma bomba de vácuo, criou-se a condição para que a água entrasse em ebulição dentro do dessecador, as peças permaneceram nesta condição por 5 horas. Após isso, as molas ficaram totalmente submersas por 48h. Então as amostras foram pesadas totalmente submersas. E por fim, as peças foram levemente secas com um pano úmido, e mediu-se a massa do corpo úmido.

Para uma boa acurácia dos resultados foi utilizado em todo o experimento água destilada, pois todas as considerações deste método consideram um líquido com densidade de 1g/cm³.

Os parâmetros avaliados são dados pelas equações 31 a 36

$$V = M - S \tag{31}$$

Onde V é o volume externo em cm³, M a massa do sólido úmido e S a massa do sólido submerso, ambos em g.

$$Vop = M - D \tag{32}$$

Onde Vop é o volume de poros abertos em cm³ e D a massa do sólido seco em g.

$$Vip = D - S \tag{33}$$

Onde Vip é o volume impermeável do sólido em cm³.

$$P = \frac{M-D}{D} * 100 \tag{34}$$

Onde P é a porcentagem de absorção de água.

$$T = \frac{\mathrm{D}}{\mathrm{D-S}} \tag{35}$$

Onde T é a densidade aparente do sólido com relação ao fluido. Considera o volume que é impermeável à água – inclui apenas os poros fechados

$$B = \frac{D}{V} \tag{36}$$

Onde B é a densidade volumétrica do sólido em g/cm³. Considera o volume externo da amostra – inclui poros abertos e fechados.

Para uma melhor compreensão da fratura da peça, foi realizado um ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), o objetivo e permitir uma visualização dos principais defeitos que possam ter levado a peça a falha catastrófica.

Para isso foi utilizado a superfície fraturada das amostras seccionado em pequenas partes com o auxílio de um disco diamantado de espessura de 0,5mm. As peças seguiram para um recobrimento com uma fina camada de ouro devido a alumina ser uma mau condutor de eletricidade, só então as amostras seguiram para o equipamento (MEV) CamScan CS 3200, onde realizou-se as devidas análises.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta os resultados dos testes conduzidos para o levantamento dos dados preliminares do processo de fabricação de molas helicoidais por “gelcasting” .

5.2.1 Solução de monômeros

A solução de monômero (HMAM) utilizada na suspensão apresentou dois problemas que dificultaram muito a reprodução das peças.

Primeiro, o tempo de gelificação é muito instável, variando entre alguns segundos a mais de uma hora para mesma quantidade de reagente e suspensão, demonstrando que a gelificação está sujeita a grandes alterações em função de várias variáveis, sendo a principal delas a temperatura ambiente. Para obter as peças que foram ensaiadas, foi necessário entender o comportamento da reação em função do tempo e temperatura, e mesmo assim exceto uma peça (nº2) todas foram moldadas em um mesmo dia, após calibrar a quantidade reagente e catalisadores utilizados. Isso possibilitou a reprodução dos protótipos e diminuiu, mas não inibiu a variação do tempo de reação ao durante a moldagem, sendo necessário ajustar a quantidade de reagente de acordo com a variação da temperatura ao longo do dia.

O segundo ponto, foi a baixa resistência da peça a verde antes da secagem, o que levou muitas peças a quebraram na desmoldagem ou no manuseio, como mostra a Figura 33.

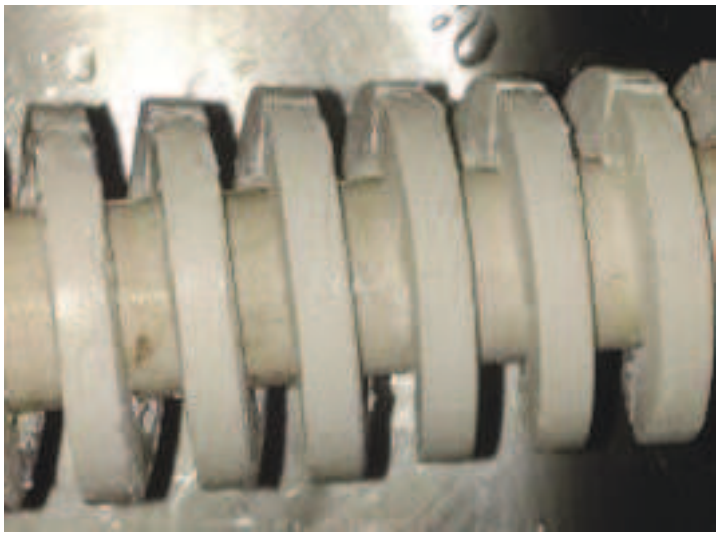
Figura 33 - Molas sendo extraídas do molde após a gelificação.

Fonte: Autor

5.2.2 Moldagem das molas

A Figura 34 mostra a imagem de uma das molas após desmoldagem, apoiada sobre um suporte cilíndrico para a secagem preliminar. Observa-se que a geometria foi fielmente reproduzida, mantendo-se uma distância regular entre espiras.

Figura 34 - Mola a verde, após remoção do molde, apoiada em suporte cilíndrico, para processo preliminar de secagem.



Fonte: Autor

Apesar do bom resultado na conformação da mola, o material de confecção do molde mostrou-se não ser o mais adequado, pois, após a confecção deste, foram necessários ajustes para corrigir problemas dimensionais, como uma pequena conicidade presente nos canais helicoidais, gerada durante a usinagem. Também foi necessário lixar todo interior para eliminar rebarbas e diminuir as marcas deixadas pela ferramenta de usinagem. Mesmo após esse procedimento manual de ajuste, o acabamento das molas reproduziu algumas imperfeições superficiais do molde, bem como a linha de partição do mesmo. Por ser um material de baixa rigidez, durante a etapa de fechamento o aperto dos parafusos para garantir uma boa fixação das partes gerava uma pequena deformação no diâmetro do molde, que impedia a inserção do êmbolo. Por isso era necessário o alívio desse aperto, evidenciando as marcas de partição. Isso gerou a necessidade de adotar-se um material mais rígido e que proporcione melhor acabamento superficial para a confecção do molde.

5.2.3 Sinterização

Devido ao processo "gelcasting" dar uma boa resistência mecânica nas peças ainda na condição a verde, as molas foram sinterizadas sem a necessidade de um eixo de apoio, o que não foi possível em peças conformadas por injeção de baixa pressão, conforme descrito por Andreola (5). A Tabela 2 mostra o percentual de retração e as principais características da mola após a sinterização e a Tabela 3 mostra os dados referentes ao cálculo da densidade das amostras.

Tabela 2-Taxa de retração média das características geométricas principais das molas após a sinterização.

Característica	*Peça a verde*	*Peça sinterizada*	*Taxa de retração*
Largura espira (a), mm	8,4	7	17%
Altura da espira (b), mm	8,1	6,95	14,2%
Diâmetro interno (D), mm	25,16	21,02	16,5

Fonte: Autor

Tabela 3 - Valores obtidos através do ensaio de Arquimedes (*).

Mola	*V (cm^3)*	*Vop (cm^3)*	*Vip (cm^3)*	*P (%)*	*T (g/cm^3)*	*B (g/cm^3)*
1	20.746	0.404	20.342	1.947	3.811	3.737
2	17.692	0.074	17.618	0.418	3.759	3.743
3	19.536	0.339	19.197	1.735	3.781	3.715
4	24.046	0.68	23.366	2.828	3.776	3.669
5	27.565	0.391	27.174	1.4185	3.719	3.666
Média	**-**	**0.378**	**-**	**1.669**	**3.769**	**3.706**

Fonte:Autor

(*) V=volume da peça; Vop = volume de poros abertos; Vip = volume de massa densa e poros isolados; P = porosidade aparente; T = densidade aparente; B = densidade volumétrica.

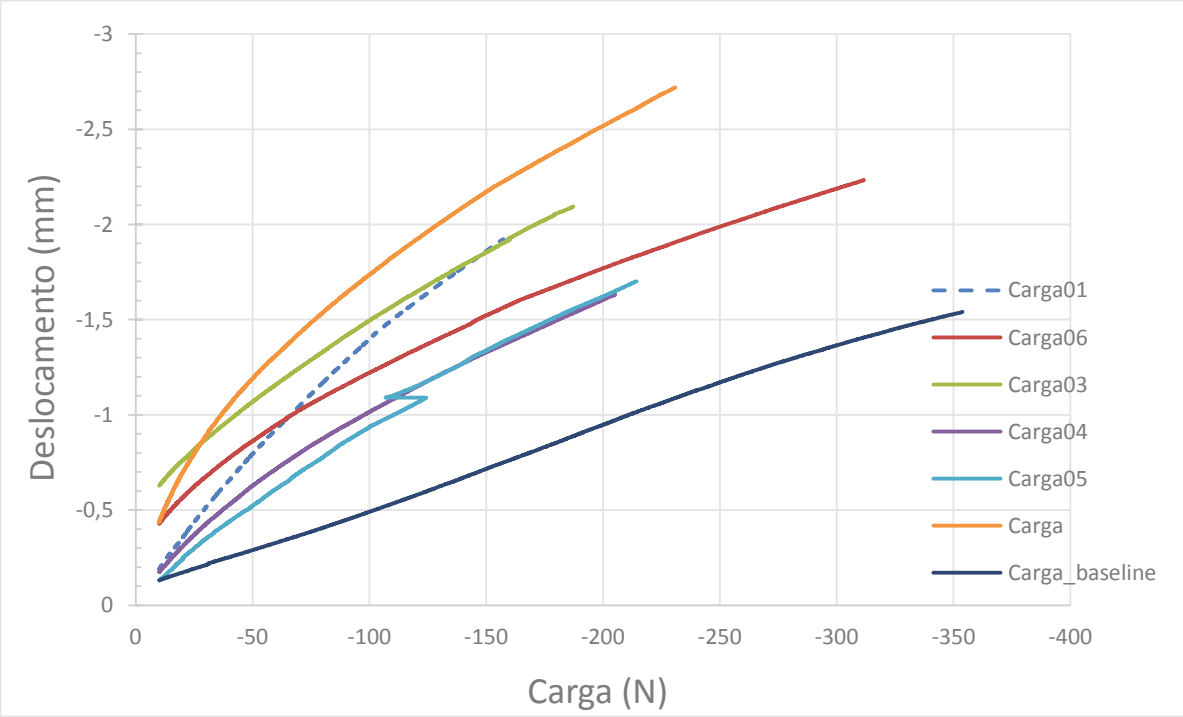
Considerando uma densidade teórica para a alumina de 3,98g/cm^3, obteve-se uma densidade relativa de 93,8%. Esse dado sugere que as amostras tiveram uma porosidade de cerca de 6,2%, o que difere bastante do valor de P medido, que foi de cerca de 1,67%. Como P considera apenas poros abertos, significa que grande parte da porosidade se refere a poros

isolados, possivelmente bolhas de ar que ficaram retidas na suspensão. Essa suposição será confirmada na seção 5.2.5, através de imagens por MEV da microestrutura.

5.2.4 Caracterização mecânica

A figura 35 mostra o resultado das curvas de força em função do deslocamento, obtidas na máquina universal de ensaios para a associação em série entre a mola cerâmica, as bases metálicas e os anéis de borracha. Também demonstra a curva entre o anel de borracha e a base metálica, denominada no gráfico como *Baseline*.

Figura 35 Gráfico de deslocamento em função da força para as seis molas ensaiadas, além da curva obtida para o ensaio do dispositivo de apoio, denominada Baseline



Fonte: Autor

Observando a figura 35, é notória a existência de um erro na descrição das curvas de carga em função do deslocamento, devido ao formato parabólico que todas seguiram, embora o comportamento esperado de uma mola cerâmica seja linear-elástico, conforme descrito na seção 3.3 Em uma tentativa de correção, foi levantado a curva denominada “baseline”, que consistiu em um ensaio de compressão nos apoios de borracha. Porém esta curva apresentou um comportamento próximo à linearidade, de modo que qualquer correção que viesse a ser

aplicada sobre as curvas obtidas com as molas continuaria resultando em uma curva parabólica. Esta aparente incongruência deve-se a dois fatores. Primeiro e menos impactante é que, durante o ensaio das molas, a tensão que predominou na borracha foi a cisalhante, enquanto que no levantamento da curva "baseline", predominou tensão normal compressiva. E o segundo e principal ponto é que quando submetidos a tensões, os elastômeros sofrem uma contínua acomodação de sua estrutura (fluência), implicando em uma redução momentânea da carga aplicada. De fato, analisando-se a tabela de dados obtida no ensaio, nota-se a redução de carga aplicada em alguns pontos, embora o deslocamento aumente continuamente, conforme destacado na figura 36.

Figura 36 -Relatório do teste gerado pelo equipamento de ensaio, destacando a redução momentânea de carga em alguns pontos, apesar do contínuo aumento do deslocamento compressivo

Tempo	Carga	deformação
52.4	-10.1099	-0.43677
52.5	-10.034	-0.43762
52.6	-9.9965	-0.43832
52.7	-10.1367	-0.43907
52.8	-10.0558	-0.43993
115.7	-34.404	-0.96418
115.8	-34.4166	-0.96498
115.9	-34.6211	-0.96579
116	-34.4368	-0.96664

Fonte: Autor.

Tal comportamento não pode ser atribuído à mola cerâmica, nem tampouco às bases metálicas, sendo, portanto, decorrente da relaxação da borracha sob tensão cisalhante. Por esta razão, a constante elástica da mola não pôde ser calculada da forma como o teste foi conduzido. Este problema poderá ser solucionado na fabricação de um novo molde, fazendo-se com que as extremidades da cavidade do molde sejam usinadas em formato cilíndrico, e não helicoidal. Com esta nova geometria, serão moldadas molas com uma base de

assentamento plana, eliminando a necessidade de uma base de material flexível para uniformizar a distribuição de tensões sobre a amostra. Ou ainda, caso se verifique a necessidade de utilizar uma base flexível, esta será submetida a uma condição de compressão, idêntica à que é submetida durante o ensaio das molas. Assim, uma curva tensão-deformação obtida apenas com as bases de borracha e o apoio do corpo-de-prova seria representativa das deformações sofridas pelo dispositivo durante o ensaio da mola.

A carga de ruptura variou entre 157,4 e 311,6 N (Tabela 4), demonstrando um grande espalhamento de valores. Considerando as dimensões de cada peça, foi possível calcular a tensão de ruptura de cada mola conforme a equação 21, válida para uma mola helicoidal de seção transversal quadrada.

$$\sigma_f = \frac{2{,}4FD}{a^3} * \left(1 + \frac{1{,}2}{c} + \frac{0{,}56}{c^2} + \frac{0{,}5}{c^3}\right)$$

Onde: P = carga de ruptura, D = diâmetro médio da mola, a = largura da espira e c = D/a. Os valores de carga e tensão de ruptura são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de tensão e carga de ruptura das molas.

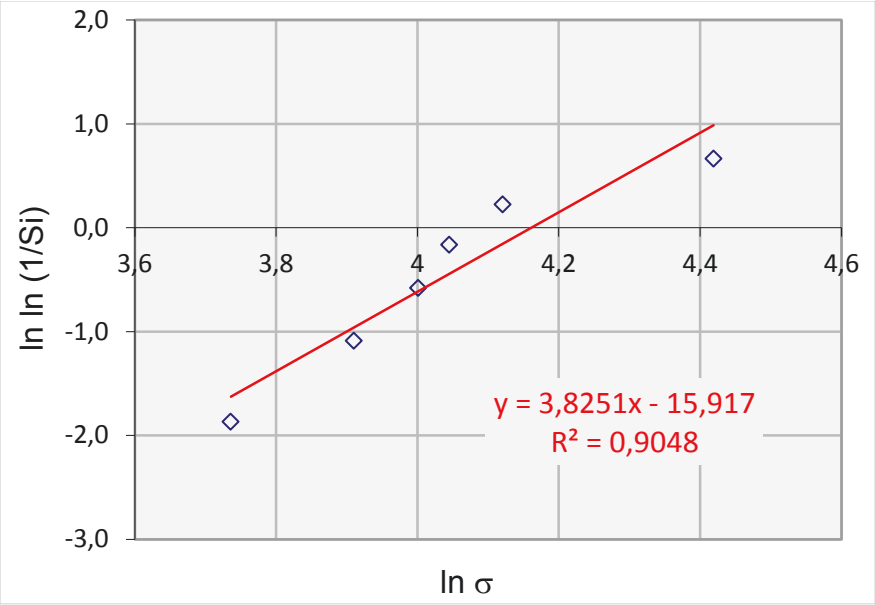
Mola	*Carga de ruptura (N)*	*Tensão (MPa)*
1	157,4	41,9
*2**	311,6	83,0
3	187,3	49,9
*4***	205,2	54,7
5	214,4	57,1
6	231,2	61,6

Fonte:Autor

* Amostra com o melhor acabamento superficial, obtida com a aplicação de uma camada mais fina de desmoldante e menos iniciador; **amostra produzida sem a desaerar a suspensão.

Para inferir, ainda que grosseiramente (considerando o número limitado de amostras), os limites de tensões aos quais as molas foram solicitadas, foi utilizado o diagrama de Weibull para tratar os dados obtidos com as tensões de rupturas das peças durante o ensaio de compressão. O gráfico com a distribuição pode ser visto na figura 37.

Figura 37-Diagrama de Weibull, aplicado aos valores de tensão de ruptura em ensaio uniaxial das molas cerâ,icas, destacando os parâmetros da equação obtidos após regressão linear sobre os dados



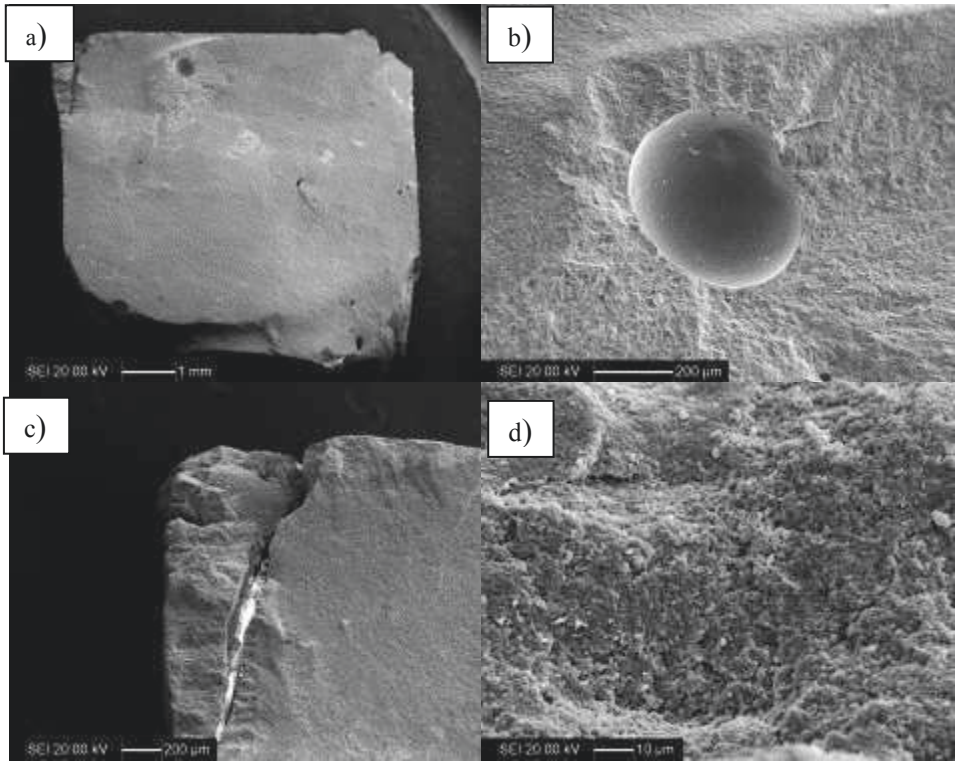
Fonte: Autor

O baixo valor do módulo de Weibull, de 3,8, está de acordo com o grande espalhamento observado para os valores de carga de ruptura e demonstra a ocorrência de um número significativo de falhas decorrentes do processamento, resultando em uma ampla distribuição de concentradores de tensão. De fato, conforme será na próxima seção, foram observados defeitos superficiais nas molas, decorrentes da linha de partição e de outras imperfeições na superfície do molde. Adicionalmente, a densificação das peças não foi totalmente satisfatória, conforme demonstrado na Tabela 3. Este resultado será de grande importância no desenvolvimento do projeto, tanto no que se refere à fabricação de um novo molde quanto na sinterização de novas peças que serão produzidas.

5.2.5 Caracterização Microestrutural

Após os ensaios de compressão, as peças numero 1 (menor valor de tensão de ruptura) e 2 (maior valor de tensão de ruptura) seguiram para análise de micro defeitos em um ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados obtidos para a mola 1 podem ser vistos na figura 38.

Figura 38- Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial:



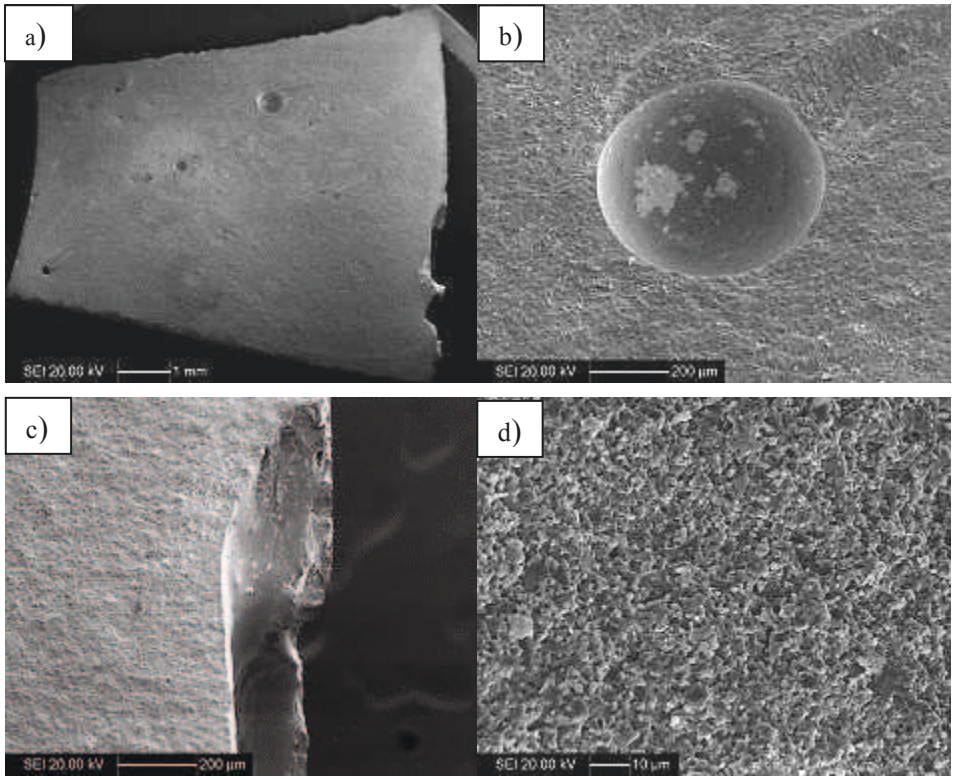
Fonte: Autor.
Legenda: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada do poro, c) imagem aproximada de uma trinca, d) imagem aproximada com maior resolução.

Analisando a figura 38-b fica comprovado a existência de bolhas no interior das amostras, sendo elas os principal fatores de redução da densidade teórica, conforme discutido na seção 5.2.2.

Esta mesma bolha na figura 37-b é o principal defeito interno na região da fratura ou seja, é o maior fator de influência a fragilidade nesta peça. Este poro tem tamanho um pouco superior a 500 microns, o que justificaria o pior resultado desta amostra.

A figura 39 mostra a mesma análise com a mola 2 (amostra com maior resultado), o intuito e comparar os defeitos em relação a tamanho, para verificar possíveis influencias internas na geometria do material.

Figura 39-Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial:



Fonte: Autor.
Legenda: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada do poro c)imagem aproximada de uma trinca d) imagem aproximada com maior resolução.

Analisando a figura 39-b, observamos que uma semelhança no principal defeito encontrado, onde o defeito mais significativo presente na superfície da fratura é um poro, com tamanho aproximado de 600 mícrons.

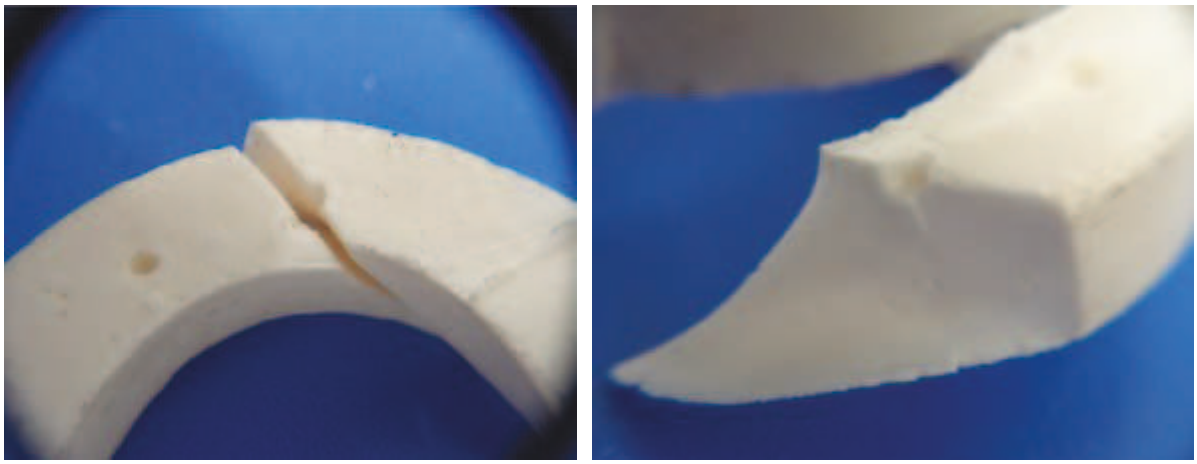
A semelhança entre forma e tamanho nos defeitos encontrados na mola de maior e menor resistência, mostra que para este nível de tensão, os defeitos internos ainda não são fatores determinantes na resistência da mola.

Para estas peças aparentemente o acabamento superficial foi o ponto de grande influência na resistência a tensão, como ilustra a mola dois, que possuía o melhor acabamento superficial e rompeu com uma tensão aproximadamente duas vezes maior que a da peça com pior acabamento superficial (mola1).

A figura 40 mostra a uma imagem de baixa ampliação da superfície de fratura da peça 1, realizada com uma lente de aumento. O perfil da fratura que tende a 45°, indica que a peça fraturou devido à solicitação excessiva por flexão associada a torção, e que a fratura originou-se num poro superficial, que atuou como concentrador de tensão.

O uso de molde de Nylon, bem como de polímeros em geral, não é recomendado, pois eles absorvem oxigênio da atmosfera, interferindo na reação de gelificação, o que gera uma pequena camada superficial de material não gelificado (39). Isso prejudica o acabamento superficial, que demonstrou a necessidade de desenvolver outro molde, de preferência com material metálico para que este fato não ocorra. Adicionalmente, a maior rigidez do molde metálico e capacidade de receber melhor acabamento superficial, contribuirão para a redução na linha de partição e menor rugosidade.

Figura 40 – Detalhe da fratura da mola 1, após o ensaio de com pressão, visível início da fratura em um poro superficial.



Fonte: Autor

5.2.6 Resumo dos dados obtidos

a) A solução de monômeros apresentou grande espaço para aprimoramentos demonstrando não ser a mais adequada, pois, apresentou muita instabilidade no tempo de gelificação, que impossibilitou a confecção de várias amostras. Com base nos dados obtidos, podemos concluir que o fator de maior influência para o tempo de gelificação foi a temperatura ambiente.

b) A densidade das peças sinterizadas produzidas nesta etapa mostra que ainda há margem para aprimoramentos entre moldagem e sinterização, pois as amostras atingiram a média de 93,8% da densidade teórica. Estudos envolvendo a dispersão do pó e aumento da temperatura de sinterização poderão contribuir para melhorar a densificação das peças.

c) A construção do molde em material polimérico foi um fator de grande influência negativa para o acabamento superficial, pois além de interferir na polimerização, existiam as marcas deixadas no molde durante a moldagem. Entretanto, permitiu realizar experimentos que levantaram informações valiosas para o desenvolvimento do projeto.

d) Como que já era esperado, a tentativa de eliminar concentradores de tensão com um anel de borracha descaracterizou a deformação da mola, e a tentativa de levantar uma curva de compressão das borrachas e posteriormente subtrair das molas ensaiadas, não foi eficaz. O projeto do novo molde incluirá as extremidades com uma superfície de assentamento plana para as molas.

e) Apesar da ocorrência de bolhas no interior das amostras, a resistência mecânica parece ter sido controlada principalmente por defeitos superficiais.

6 APRIMORAMENTO DA SUSPENSÃO E AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL.

Esta etapa teve como objetivos o aprimoramento das características da suspensão cerâmica, tanto em termos da formulação dos monômeros quanto em relação à reologia e dispersão do pó, ambos associados à ocorrência de defeitos, conforme discutido na seção anterior. Adicionalmente, foi fabricado um sistema de moldagem de baixa pressão para a confecção de corpos-de-prova em conformidade com a norma ASTM C1161 para ensaios de flexão em temperatura ambiente e ASTM C1259 para determinação dos módulos de Young e de cisalhamento através da técnica de excitação por impulso. Tais parâmetros irão possibilitar a simulação do comportamento de uma mola cerâmica a partir de sua geometria e da carga de ruptura, conforme será discutido na seção 7.

6.1 METODOLOGIA

Neste novo teste não houve alteração de matéria prima, ou forma de moldagem. As alterações se limitaram a novas formulações de monômeros, visando maior estabilidade do tempo de gelificação e maior resistência a verde, para minimizar defeitos durante a desmoldagem. Foi feito também um estudo para identificar a concentração ideal de dispersante e a temperatura de sinterização foi elevada, visando aumentar a densificação.

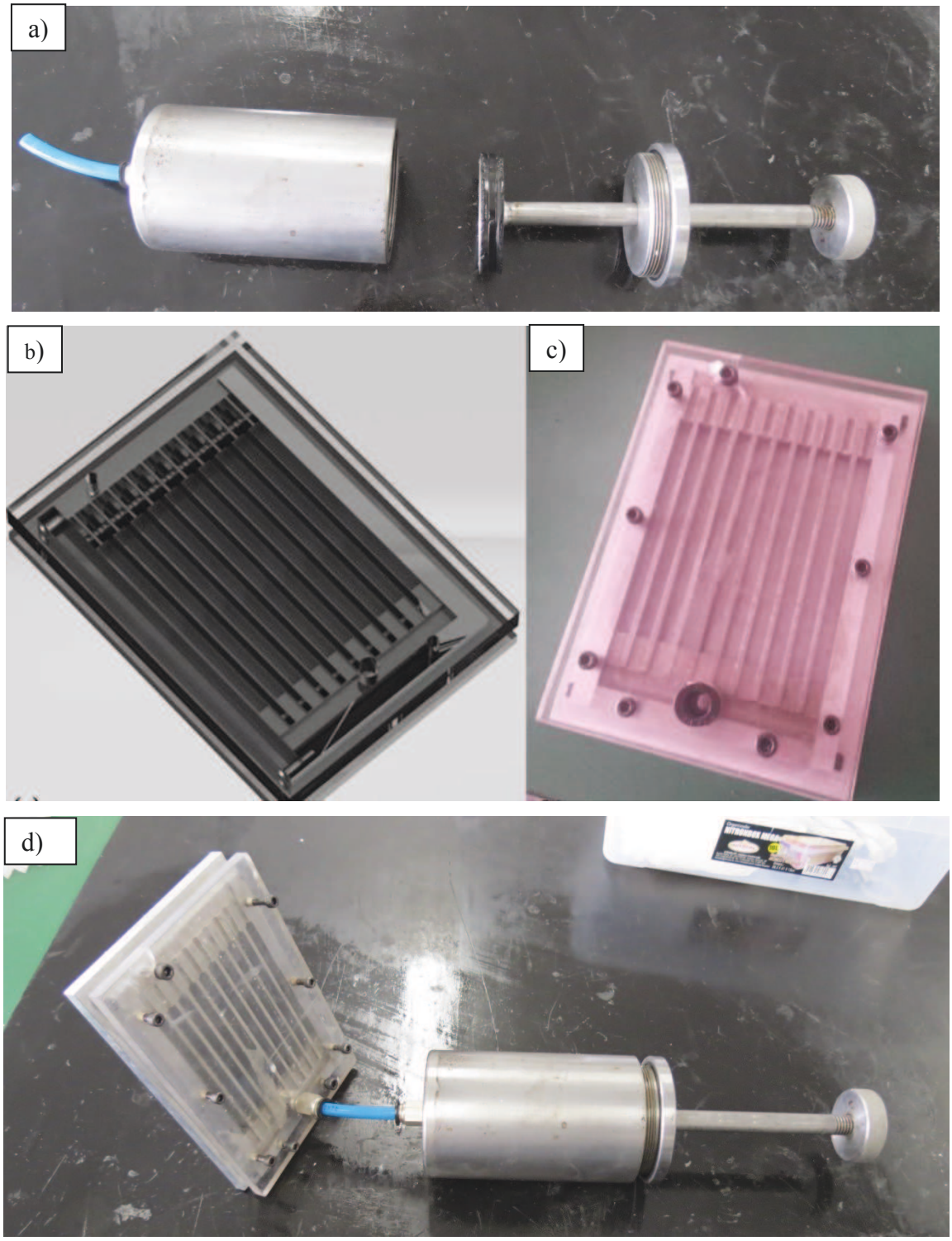
6.1.1 Preparação do molde e sistema de injeção.

Para obter as propriedades mecânicas (tensão de ruptura e módulos de elasticidade) decorrentes do processamento de molas cerâmicas pelo processo “gelcasting” é necessário utilizar corpos de prova em formatos de barras retangulares, em conformidade com as normas ASTM C1161 - 02c e ASTM C1259 – 98. Para isso foi construído um molde capaz de moldar 10 corpos de prova simultaneamente, possibilitando estudar o comportamento da suspensão durante a moldagem, resistência a verde e após sinterização, aplicando os mesmos métodos e experimentos utilizados na fabricação de molas cerâmicas.

O método de confecção consiste em utilizar um sistema de injeção mecânica em um molde metálico com cavidade para construção de dez corpos de prova. Para isso, além do molde, foi construído um cilindro injetor, (figura 41 a) onde a suspensão é depositada e

posteriormente, por força mecânica, é injetada no interior do molde através de uma mangueira plástica (figura 41-b,c,d).

Figura 41 - Ferramentas utilizadas na fabricação dos corpos de prova;



Fonte: Autor.

Legenda: a) cilindro injetor, b) projeto do molde, c) molde de conformação das amostras, d) conjunto montado.

O molde que dará forma aos corpos de prova foi construído em alumínio para verificar a possibilidade de encontrar um substituto para o nylon. Algumas propriedades favorecem a utilização deste material, pois o alumínio é um material relativamente barato de boa usinabilidade, com boa resistência a corrosão (39), e garante boa reprodutibilidade quando utilizado como molde. Uma tampa de policarbonado transparente vai permitir que possamos acompanhar o preenchimento do interior do molde enquanto a suspensão cerâmica preenche as cavidades internas.

Visando facilitar a desmoldagem do molde, este foi confeccionado de forma a ser desmontável, facilitando assim também sua limpeza após o uso. A geometria das barras está de acordo com a classe C da norma ASTM C1161.

6.1.2 Preparação da solução de monômeros.

Para substituir o sistema de monômero constituído somente por HMAM, foram testadas as seguintes formulações:

a) MAM-PEGDMA, com proporção de 3:1 respectivamente em peso e concentração total de 20% de monômeros, também em peso.
b) MAM-HMAM, com proporção de 4:1 respectivamente em peso e concentração total de 18% de monômeros, também em peso.
c) MAM, HMAM, MBAM, com proporção de 3:1:0,26 respectivamente em peso e concentração total de 23% de monômeros, também em peso.

Onde: MAM é metacrilamida (Sigma-Aldrich), monômero vinílico, responsável pela formação das cadeias poliméricas lineares, PEGDMA é polietilenoglicol-dimetacrilato (Mw=750g/Mol, Sigma-Aldrich) com função de agente reticulante, HMAM é hidroximetilacrilamida (Sigma-Aldrich), capaz de formar simultaneamente cadeias lineares e de promover a reticulação e MBAM é metileno-bisacrilamida (Sigma-Aldrich), que também atua como agente reticulante. A tabela 5 mostra um resumo das principais características obtida utilizando as propostas de solução de monômeros.

Tabela 5-Resultado das principais características das formulações de monômeros.

Formulação	MAM-PEGDMA	MAM-HMAM	MAM, HMAM, MBAM
Fração de sólidos	43%	55%	55%
Viscosidade	Alta	Média	Média
Tempo de gelificação (min.)	-	>60	10-15

Fonte :Autor

Conforme será discutido na seção de resultados, a formulação com melhor desempenho foi MAM-HMAM-MBAM, sendo portanto escolhida para seguir com os testes. Assim, além dos itens acima relacionados foram utilizados alguns materiais já descritos na seção 5.1.2 (água destilada, dispersante, iniciador e catalisador, além da alumina).

6.1.3Análise reológica.

O ensaio reológico foi feito com um viscosímetro Brookfield (LV DV-II+Pro). Para realizar esta análise foi utilizado o sensor de cisalhamento adequado de acordo com a viscosidade a ser medida. Foram preparadas algumas suspensões cerâmicas sempre na mesma proporção, variando somente a concentração do dispersante (dispex). Cada amostra de suspensão foi inserida no porta-amostras do equipamento e submetida a um teste que consistiu em variar a velocidade de rotação do sensor de cisalhamento de forma que a taxa de cisalhamento variou de forma crescente entre 2 e 44 s^{-1}, retornando posteriormente até 2 s^{-1}.

6.1.4 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão foram baseados na norma ASTM C1161-02c (36), que corresponde a normalização do método para testes a temperatura ambiente de cerâmicas avançadas, avaliando a resistência a flexão.

O equipamento utilizado foi uma máquina MTS 810 servo-hidráulica, munida de uma célula de carga com capacidade máxima de 25 kN, com a possibilidade do recurso (via software) de informar a carga máxima obtida por cada amostra no momento ruptura.

Sutilmente as peças foram posicionadas sobre os apoios de forma a gerar o correto alinhamento sobre os roletes de carga. A posição do apoio foi devidamente marcada para facilitar a investigação da fratura.

A tabela 6 mostra os parâmetros utilizados neste ensaio.

Tabela 6- Medidas padrões utilizadas no ensaio de flexão.

Distância entre os roletes de carga	*Distância entre os roletes de apoio*	*Velocidade do Ensaio*
40mm	80mm	1mm/min

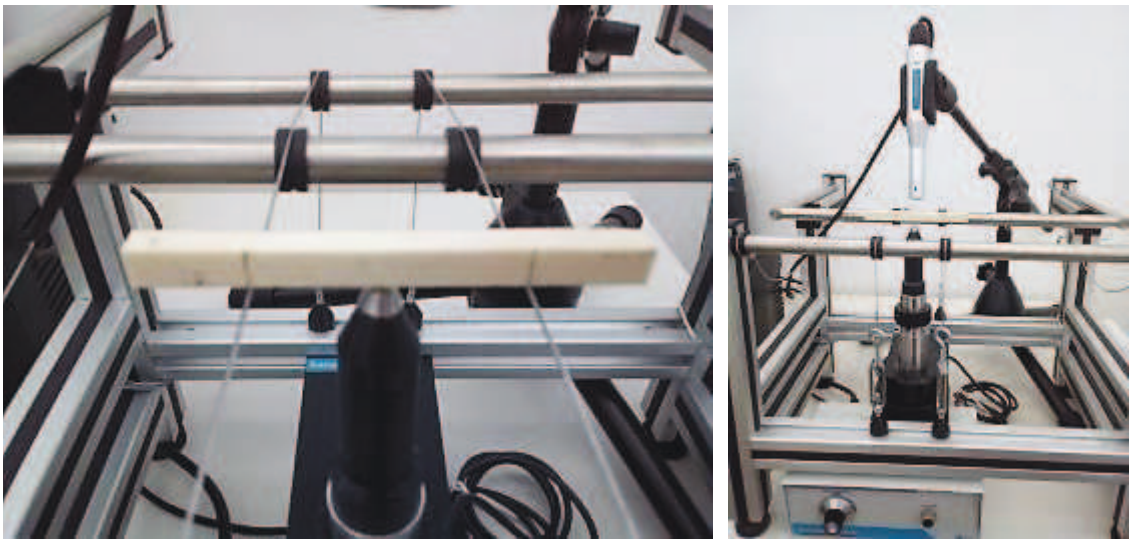
Fonte: Autor adaptado de ASTM C1161 (2008)

6.1.5 Módulo elástico e Razão de Poisson

Devido as cerâmicas terem seu comportamento diretamente ligado processamento, isso porque dados como módulo elástico e coeficiente de Poisson, podem ser influenciados pela porosidade gerada no processamento das amostras.

Para solucionar este problema foi realizado o ensaio de ultrassom com as barrinhas de corpo de prova para obter o coeficiente de Poisson bem como o módulo elástico *E*. O método utilizado seguiu a norma ASTM C1259-98 (41) Primeiro foi mensurado as geometrias principais das amostras, altura, largura e comprimento, posteriormente suas respectivas massas foram calculadas, e todas essas informações alimentaram o software do equipamento de medição. O software gerou as medidas onde deveriam ser posicionada a amostra sob dois cabos de aço, com isso as amostras foram marcadas de acordo com as informações geradas e então foram cuidadosamente colocadas e centralizadas sob os cabos de aço do equipamento (figura 42), para que se pudesse iniciar o ensaio a figura 42 mostras os corpos de prova sob os cabos de aço para início do ensaio.

Figura 42-Amostras posicionadas para ensaio de ultrassom.



Fonte: Autor

Após este posicionamento e feita a regulagem na altura das amostras de forma que o equipamento desfira um breve golpe na amostra, onde a intensidade desse contato e controlada pelo computador do equipamento, podendo ser ajustada de acordo com a necessidade, o golpe é aplicado de forma a emitir um som que é captado por um microfone posicionado acima da peça. O computador capta as ondas sonoras e gera os valores dos módulos elástico *E* e Poeson.

6.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES.

Esta seção apresenta e discute dados obtidos a partir de barras prismáticas produzidas de forma idêntica à que foi empregada para fabricar molas helicoidais, com o objetivo de caracterizar as propriedades do material conforme os parâmetros geométricos estabelecidos pela norma ASTM C1259-98

6.2.1 Solução de monômeros

Os resultados obtidos com a solução MAM-PEGDMA não atenderam as premissas do projeto, pois, a viscosidade desta suspensão ficou tão elevada que o máximo de concentração volumétrica de sólidos obtidos ficou em 43%, muito aquém do objetivo de 55%. Estes fatores inviabilizaram testes mais refinados com esta solução, por considerarmos que os testes

preliminares não mostraram um bom comportamento no "gelcasting" das partículas de alumina utilizadas no projeto.

Segundo Ortega, F. S., monômeros como o PGDMA que contém ácido metacrílico (MA) ou acrilato de amônio (AA), ou que possuam um grupo carboxilato na sua estrutura, interagem com as partículas de alumina, de forma que os locais positivos na superfície das partículas, e quando estas dispostas em meios aquosos, atraem os ânions derivados da ionização de grupos carboxilato, provocando assim a sua adsorção específica na superfície das partículas. (42)

O grupo carboxilato também é encontrado no poliacrilato de amônio utilizado para deflocular as suspensões e isso provoca a ancoragem de alguns segmentos de corrente na superfície das partículas de alumina. Porém ocorre que outros segmentos de corrente formam loops e caudas carregados negativamente, produzindo assim uma forte repulsão eletrostática entre as partículas cobertas com defloculante. Contudo, devido a repulsão estérica entre as partículas de alumina, gerada pela cobertura de polieletrólitos, ocorre um mecanismo indesejado de estabilização adicional, causada pela interpenetração das macromoléculas que são altamente hidrófilas. Com isso passa a existir uma competição entre a adsorção de monômeros ionizados e polieleletrólitos ionizados. Devido a concentração em massa dos monômeros ionizados ser muito superior, a superfície das partículas torna-se predominantemente coberta com monômeros, portanto, a repulsão interpartícula não é suficiente para estabilizar a suspensão

A solução de monômeros baseado na solução MAM-HMAM, com fração 4:1 respectivamente em peso e concentração 18%, também em peso. Esse sistema de monômeros além de permitir a concentração de sólidos prevista no projeto, resultou em uma suspensão com viscosidade relativamente baixa, o que permitiu uma boa fluidez na moldagem dos corpos de prova. Porém, a gelificação ficou extremamente lenta, uma vez que considerando um tempo limite de 60 min, nenhuma das amostras gelificou completamente, mesmo aplicando quantidades significativamente alta de reagente e catalisador. A tabela 7 detalha a quantidade de APS e TMED que precisou ser utilizada nesta suspensão.

Tabela 7-Composição da mistura da suspensão com base na solução de monômeros MAM-HMAM.

Composição da alumina CT 3000	
Volume (ml)	195
Fração volumétrica Pó/Líquido	0,55
Volume líquido (ml)	87,75
Volume pó cerâmico (ml)	107,25
Massa de pó cerâmico (g)	423,64
Massa Dispex(g)	8,47
APS 20% (µl)	1200
TEMED (µl)	400

Fonte: Autor.

A terceira solução de monômeros MAM-HMAM-MBAM gerou os melhores resultados preliminares, o que motivou a dar seguimento nos testes pois além de uma boa viscosidade, o tempo de gelificação é estável, ficando entre 10 a 15 minutos, utilizando uma quantidade pequena de dispersante. A tabela 8 a formulação da suspensão, onde destaca-se a diferença entre a quantidade de APS e TMED, quando comparamos com a solução de monômeros MAM-HMAM.

Tabela 8-Composição da mistura da suspensão com base na solução de monômeros MAM-HMAM MBAM.

Composição da alumina CT 3000	
Volume (ml)	200
Fração volumétrica Pó/Líquido	0,55
Volume líquido (ml)	90
Volume pó cerâmico (ml)	110
Massa de pó cerâmico (g)	434,5
Massa Dispex(g)	8,69
Aps 20% (µl)	600
TEMED (µl)	200

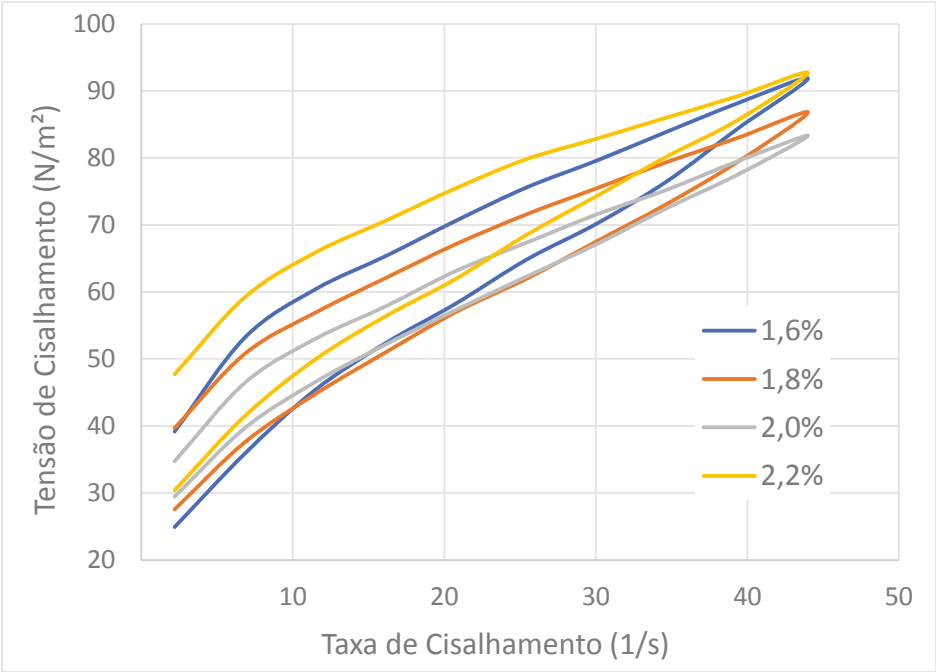
Fonte: Autor

6.2.2 Propriedades reológicas

A figura 43 mostra a relação entre tensão e taxa de cisalhamento para suspensões com diferentes adições de dispersante. Nota-se que a suspensão que apresentou os menores valores de tensão de cisalhamento foi a que utilizou 2% de dispersante, e que a partir deste ponto a

adição de dispersante resultou em aumento da viscosidade. Nota-se também que todas as curvas apresentaram uma área de histerese situada entre as regiões de aumento e de redução da taxa de cisalhamento, indicando certa tixotropia. No entanto, a área de histerese para a suspensão contendo 2% de dispersante foi a menor, o ocorre quando a concentração de dispersante é a ideal. Por fim, todas as suspensões apresentaram comportamento pseudoplástico, dado pela concavidade negativa das curvas (a derivada segunda é negativa). Este comportamento está de acordo com informações verificadas na literatura e indica que esta é a concentração ideal para o dispersante avaliado é de 2%.

Figura 43 - Gráfico de taxa de cisalhamento em função da quantidade de dispersante



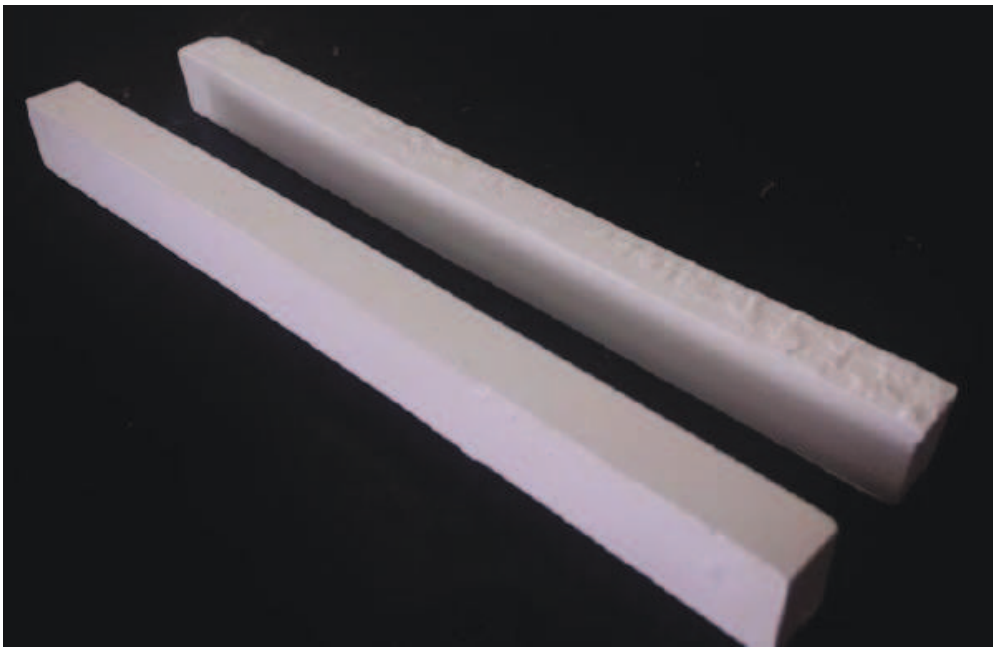
Fonte: Autor

6.2.3 Produção dos corpos-de-prova

O resultado da solução MAM-HMAM-MBAM mostrou-se adequado para a produção dos corpos de prova, desenvolvendo uma considerável resistência a verde, comparando com as demais soluções. Não houve problemas significativos durante a desmoldagem e, na maioria dos casos, observou-se um ótimo acabamento superficial, principalmente na região metálica do molde (alumínio), como mostra a Figura 44. Observa-se, entretanto, que a face que

permaneceu em contato com a placa de policarbonato apresentou acabamento superficial inferior, o que é normalmente observado com superfícies poliméricas, conforme discutido na seção anterior. Isso não afetou, entretanto, os testes que foram feitos posteriormente, uma vez que as barras foram retificadas para garantir o perfeito paralelismo entre suas faces.

Figura 44 – Imagem dos corpos de prova a verde, onde a amostra à esquerda mostra como a face superior aquela que ficou em contato com a placa de alumínio e a amostra à direita mostra como face superior aquela que ficou em contato com a placa de policarbonato.



Fonte: Autor

6.2.4 Porosidade Aparente

A Tabela 9 apresenta os valores de porosidade aparente, densidade aparente e densidade volumétrica das barras cerâmicas produzidas. Verifica-se a evolução das propriedades mecânicas das peças sinterizadas ao comparar-se a porosidade aparente (P) com os valores obtidos na tabela 9, cuja média caiu de 1.669 para 0.092. Possivelmente essa melhora foi atribuída a alteração da curva de sinterização de 1550 para 1600°C, além da melhor dispersão do sistema, que gera um compacto a verde com um melhor empacotamento de partículas.

Tabela 9- Resultados de porosidade aparente, densidade aparente e densidade volumétrica para as barras de alumina produzidas por "gelcasting" .

Mola	*V*	*Vop*	*Vip*	*P*	*T*	*B*
1	4.346	0.009	4.337	0.054	3.864	3.856
2	4.382	0.01	4.372	0.059	3.876	3.867
3	4.453	0.029	4.424	0.169	3.868	3.843
4	4.313	0.009	4.304	0.054	3.864	3.856
5	4.544	0.02	4.524	0.115	3.855	3.838
6	4.525	0.017	4.508	0.098	3.862	3.848
7	4.399	0.011	4.388	0.065	3.852	3.842
8	4.290	0.015	4.275	0.091	3.854	3.841
9	4.145	0.008	4.137	0.050	3.870	3.863
10	4.420	0.016	4.404	0.094	3.863	3.849
11	4.338	0.03	4.308	0.183	3.811	3.785
12	4.294	0.012	4.282	0.072	3.873	3.862
Média	**4.371**	**0.016**	**4.355**	**0.092**	**3.859**	**3.846**

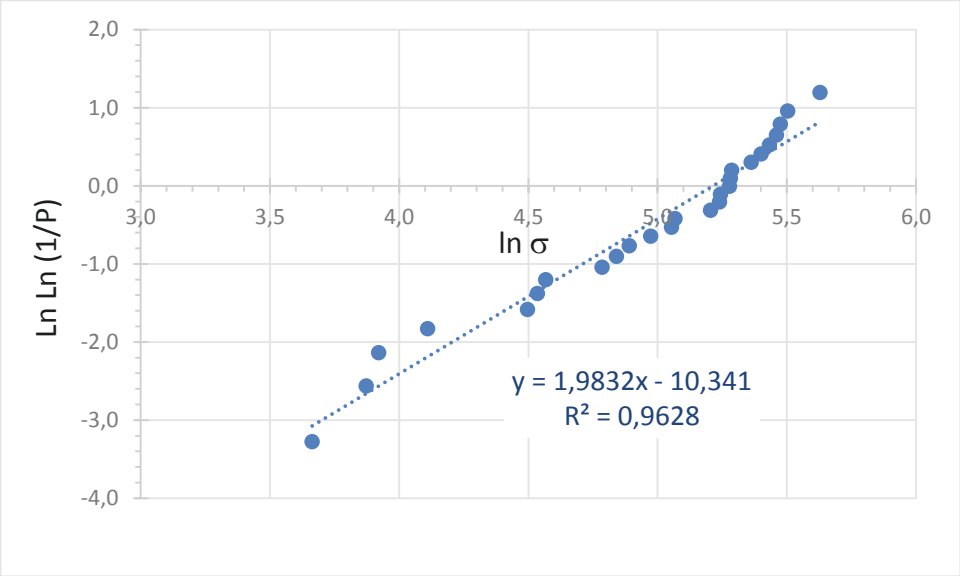
(*) V=volume da peça; Vop = volume de poros abertos; Vip = volume de massa densa e poros isolados; P = porosidade aparente; T = densidade aparente; B = densidade volumétrica.

Fonte: Autor

6.2.5 Resistência à flexão

Os resultados do ensaio de flexão foram tratados como anteriormente, ou seja, aplicando-se a distribuição de Weibull, como mostra a figura 45. É possível notar que houve um alto grau de dispersão no resultado da tensão de ruptura, decorrente da presença de defeitos com tamanhos muito variados, resultando em um valor de módulo de Weibull de 1,98. Isso é atribuído em parte ao processo de moldagem, pois em algumas delas observou-se posteriormente que havia alguma quantidade de ar retido no interior do pistão que foi introduzido no interior do molde junto com a suspensão. Assim, embora tenha sido feita uma etapa de desaeração das suspensões antes da moldagem, algumas bolhas de ar foram reintroduzidas durante a moldagem, gerando macrodefeitos. Além disso, apesar da otimização na concentração de dispersante, as suspensões permaneceram com alta viscosidade, devido à alta concentração de sólidos, o que favorece a retenção de bolhas de ar.

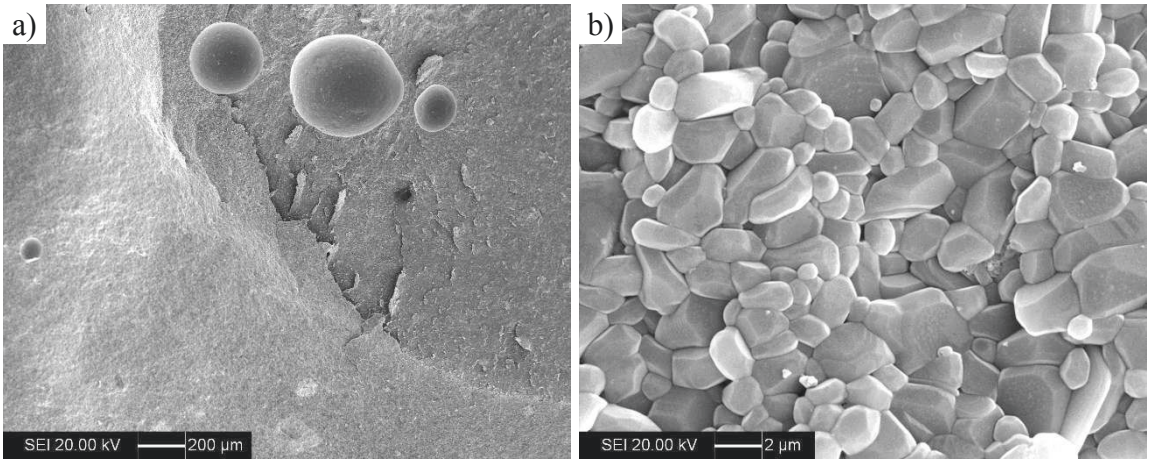
Figura 45-Distribuição de Weibull, para os resultados do ensaio de flexão dos corpos de prova cerâmicos.



Fonte: Autor

A Figura 46 mostra duas imagens obtidas por MEV da superfície de fratura das barras cerâmicas, onde destacam-se dois aspectos principais: a ocorrência de bolhas significativamente grandes e com tamanhos diversos, que atuam como concentradores de tensão reduzindo a resistência mecânica das peças e ii) a microestrutura bastante densificada, indicando que o processamento, exceto pela ocorrência das bolhas, é capaz de gerar uma microestrutura de altamente densificada e com baixa porosidade

Figura 46-Análise da superfície de fratura de um corpo de prova prismático realizado através do MEV.



Fonte: Autor
Legenda: a ocorrência de bolhas, b) micoestrutura com alta densidade

6.2.6 Avaliação das constantes elásticas

O resultado de módulo elástico e razão de Poisson foram obtidos com a média de 5 peças, sendo o módulo de cisalhamento G calculado a partir dos valores experimentais do módulo *E*, conforme a equação 38.

$$G = \frac{E}{2*(1+v)} \qquad 38$$

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10-Módulos elásticos e coeficiente de Poisson, obtidos experimentalmente.

	E (GPa)	*G* (GPa)	*v*
Valores experimentais	319	127,6	0,25

Fonte: Autor

Os valores dos módulos elásticos obtidos são menores do que os valores reportados em literatura que, para a alumina estão em torno de E=416 ±7% GPa e G-168,5 ±6% GPa, possivelmente devido à existência de poros na forma de bolhas no interior da peça.

Com os valores dos módulos elásticos G, *E* bem como o coeficiente de Poisson, é possível realizar uma análise de elementos finitos com dados reais do material.

6.2.7 Resumo dos dados obtidos

A solução de monômeros MAM-HMAM-MBAM, demonstrou ser estável suficiente para que se possa obter boa reprodutibilidade na confecção dos corpos de prova através do "gelcasting" , com alta estabilidade de gelificação, sofrendo pouca influência da temperatura.

O aumento da temperatura de sinterização para 1600°C contribuiu para a redução da porosidade, com a densidade real ficando em 97,37% do valor teórico.

O molde em alumínio teve boa reprodução na geometria das peças, além de contribuir para a diminuição dos defeitos superficiais, causados por marcas de usinagem bem como por interação entre o material do molde e o material polimérico.

A alta viscosidade das suspensões ainda é um fator limitante com relação à eliminação de bolhas de ar durante a etapa de moldagem.

7 MOLDAGEM DA MOLA CERÂMICA

Com os resultados obtidos na confecção das primeiras molas associados às melhorias geradas com a fabricação de corpos de prova, foi dado início à confecção de um segundo molde para produzir molas cerâmicas. O modelo da mola foi mantido (helicoidal de seção quadrada) para aproveitar o conhecimento adquirido e trabalhar na resolução dos problemas anteriores, entretanto as dimensões das espiras tiveram um leve acréscimo para melhorar a resistência a verde (úmida), facilitando a desmoldagem.

7.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

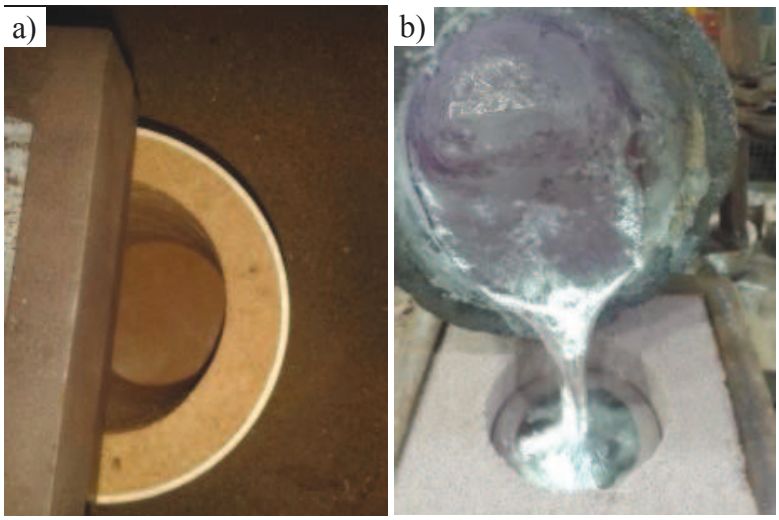
Esta seção descreve a metodologia utilizada para a confecção de molas helicoidais, introduzido aprimoramentos que foram estabelecidos após a etapa preliminar, tanto no processamento quanto no desenho do molde.

7.1.1 Confecção do molde em alumínio para moldagem da mola.

Neste teste o molde foi confeccionado em alumínio devido ao bom resultado obtido com a produção dos corpos de prova, por ser um material com maior rigidez e capaz de gerar uma superfície com menos marcas de usinagem. Além disso, devido à pequena interação entre molde e suspensão, nota-se uma melhora no acabamento superficial por não gerar uma camada não-gelificada na superfície das peças, como ocorre com superfícies poliméricas.

Foram produzidos dois moldes em areia de fundição com formato cilíndrico. Com auxílio de um forno a temperatura de 750°C foi fundida sucata de alumínio e cuidadosamente vertida no interior dos dois moldes de areia, para que, após a secagem gerassem tarugos com seção transversal circular, facilitando assim a usinagem da geometria do molde da mola cerâmica (Figura 47).

Figura 47 – Fundição do tarugo de alumínio



Fonte: Autor
Legenda: a) Molde de areia em formato cilíndrico; b) processo de fundição do alumínio.

Foram obtidos dois tarugos com geometria cilíndrica (com imperfeições) os quais foram pré-usinados para uniformizar a geometria das peças. Antes de serem seccionados longitudinalmente foi feita a furação para a fixação através de parafusos após a partição, para garantir o perfeito encaixe das partes e minimizar problemas de montagem. O método escolhido para partir o molde ao meio foi a eletro-erosão a fio, com intuito de, além de garantir o perfeito acoplamento, diminuir a ocorrência de defeitos na mola devido a esta partição. Então, as partes do molde seguiram para a usinagem onde foi realizada a furação central, para posterior confecção dos canais que darão origem à mola cerâmica, e por fim a fixação das partes. A figura 48 mostra o molde após a usinagem.

Figura 48 - Molde de alumínio para confecção de molas cerâmicas.

Fonte: Autor

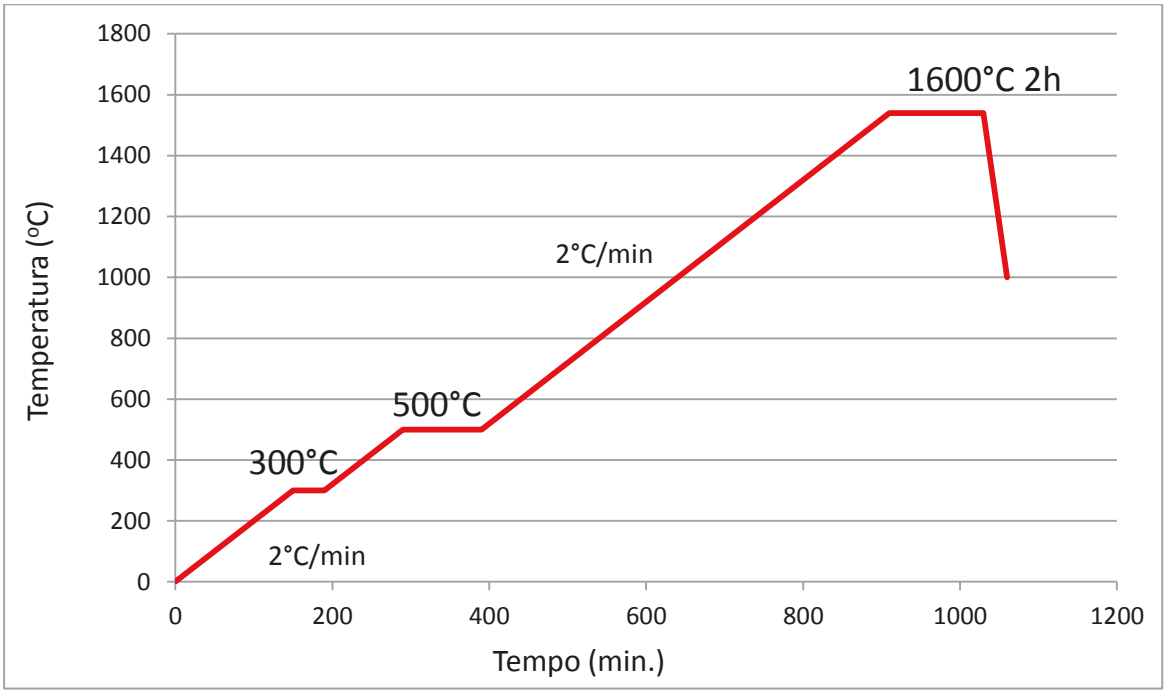
7.1.2 Moldagem da mola cerâmica, secagem e sinterização.

A preparação das suspensões cerâmicas seguiu o procedimento descrito no item 6 para a confecção dos corpos de prova. Já o procedimento de moldagem ocorreu conforme descrito no item 5.1.2, constituído basicamente pela mistura dos componentes seguido de uma desareação com bomba de vácuo acoplada a um dessecador, posterior adição dos catalisadores e reagentes, moldagem vertendo a suspensão no interior do molde, e por fim empurrando o eixo central para o fundo do molde por força mecânica, para que a suspensão preencha todas as cavidades.

Durante o processo de secagem, foram utilizados os mesmos parâmetros do primeiro teste, as peças seguiram para a estufa onde permaneceram por 24h a 90°C para que houvesse a secagem total da peça evitando assim, que uma possível presença de água expandisse e quebrasse a peça durante a sinterização. Após as 24 horas as peças foram retiradas do forno e colocadas a temperatura ambiente para resfriamento.

Devido aos resultados obtidos com a produção dos corpos de prova, a temperatura de sinterização foi elevada para 1600°C e a taxa de aquecimento (2°C por minuto) bem como os patamares, para que ocorresse a perfeita queima dos materiais poliméricos foram mantidos, conforme figura 49.

Figura 49 - Curva de sinterização adotada para as molas cerâmicas, com patamar de 2 horas a 1600°C.



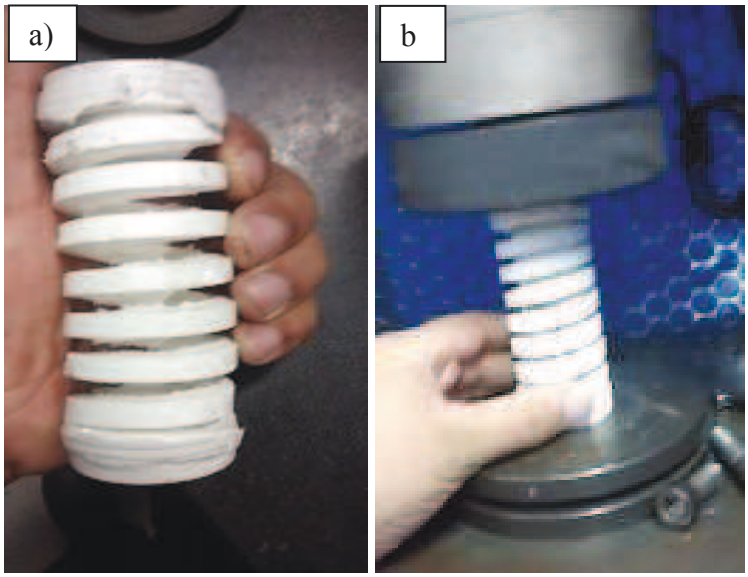
Fonte: Autor

7.1.3 Ensaio mecânico.

Após a sinterização e antes de seguirem para o ensaio mecânico, foi feito um embutimento de massa plástica em ambas as extremidades para corrigir a distorção na planicidade da mola, que foi afetada pela contração durante a sinterização. As peças foram embutidas em massa plástica e, após a cura, foi dado acabamento com uma lixa para garantir o perfeito assentamento dos apoios da mola (Figura 50).

Após a conclusão dos embutimentos, as peças foram encaminhadas para uma máquina universal de ensaios (EMIC 23-100), onde sob efeito de forças compressivas e com velocidade constante de 0,5 mm/min foi levantada a curva de força em função da deformação para 12 peças em um ensaio uniaxial de compressão até a fratura.

Figura 50 - Mola cerâmica preparada para compressão.



Fonte: Autor
Legenda: a) embutidas com massa plástica, b) posicionadas para o ensaio de compressão.

7.2 Resultados e discussões

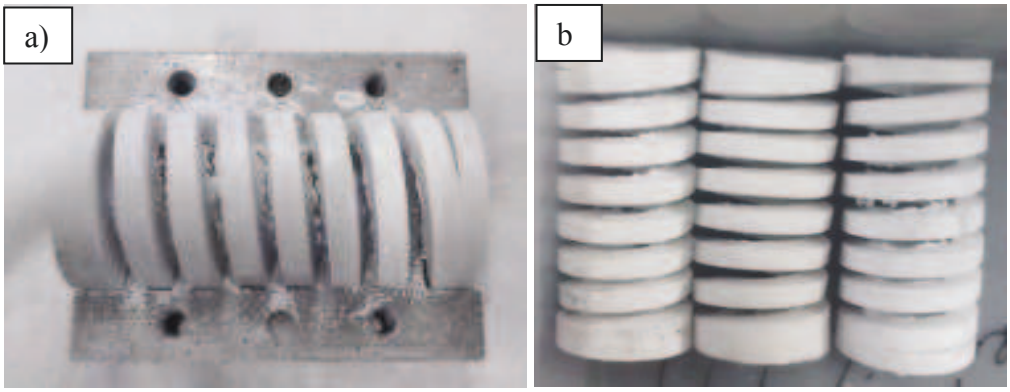
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após implementação de modificações no processo e na geometria do molde para a confecção de molas helicoidais de alumina.

7.2.1 Moldagem das molas

A solução de monômeros utilizada (MAM-HMAM-MBAM) apresentou excelente estabilidade no tempo de gelificação, podendo ser confeccionadas peças com os mesmos parâmetros em dias diferentes, sem grande influência da temperatura ambiente. Outro ponto favorável foi a elevada resistência a verde, que permitiu a fácil desmoldagem das peças, sem que estas fraturassem, um problema muito recorrente na formulação antiga (figura 51).

Mesmo com a concentração elevada de sólidos (55% vol.), a fluidez da suspensão não apresentou problemas durante a mistura da solução de monômeros com as partículas de alumina, não havendo problemas para verter a suspensão nem para escoar no interior do molde durante a introdução da parte central.

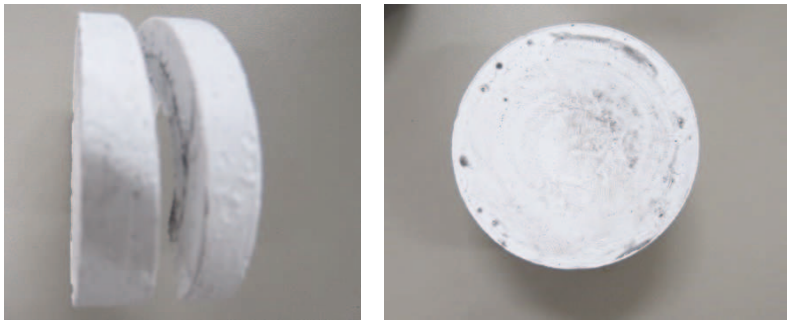
Figura 51-Resultado da conformação das molas no molde de alumínio:



Fonte: Autor
Legenda: a) abertura do molde; b) algumas molas durante a etapa de secagem em temperatura ambiente.

O molde feito em alumínio apresentou boa estabilidade dimensional que, associada a uma maior resistência proporcionada pela nova formulação do gel, resultou em uma cópia perfeita dos detalhes do molde na mola (figura 52), incluindo as extremidades paralelas, partes que sempre se rompiam no molde de nylon.

Figura 52-Detalhes das extremidades das molas conformadas com molde de alumínio.

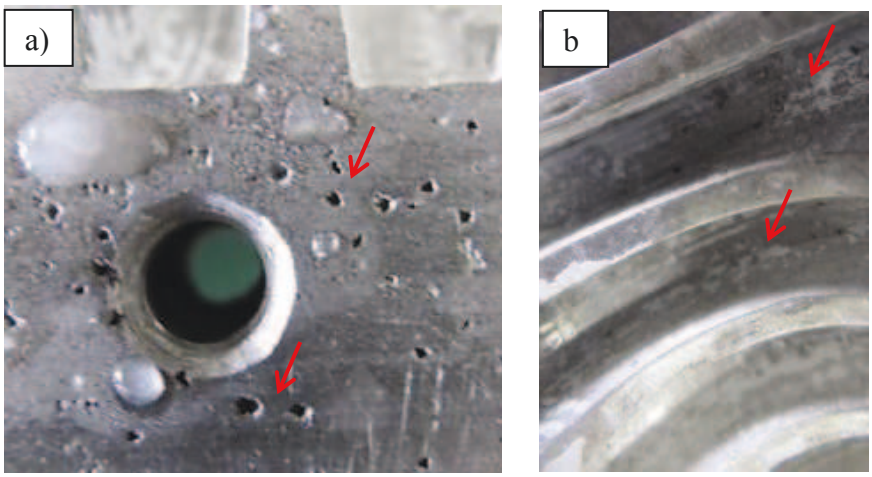


Fonte: Autor

O acabamento superficial do molde também foi superior quando comparado ao seu antecessor de nylon. Porém neste ponto ainda há espaço para evoluir, pois durante a fundição não foi realizado a desgaseificação do alumínio fundido, o que fez com que o interior do molde estivesse repleto de micro bolhas, gerando protuberâncias na superfície usinada, que foram transmitidas para a superfície da mola (figura 53),

Porém estes defeitos não tiveram impacto direto na vida da mola, pois com apenas algumas moldagens, grande parte dos micro furos do molde foram preenchidos por suspensão de alumina, e os que não foram, geraram pequenos defeito protuberantes que foram removidos com uma lixa.

Figura 53- Porosidade do molde de alumínio recoberta por suspensão cerâmica:

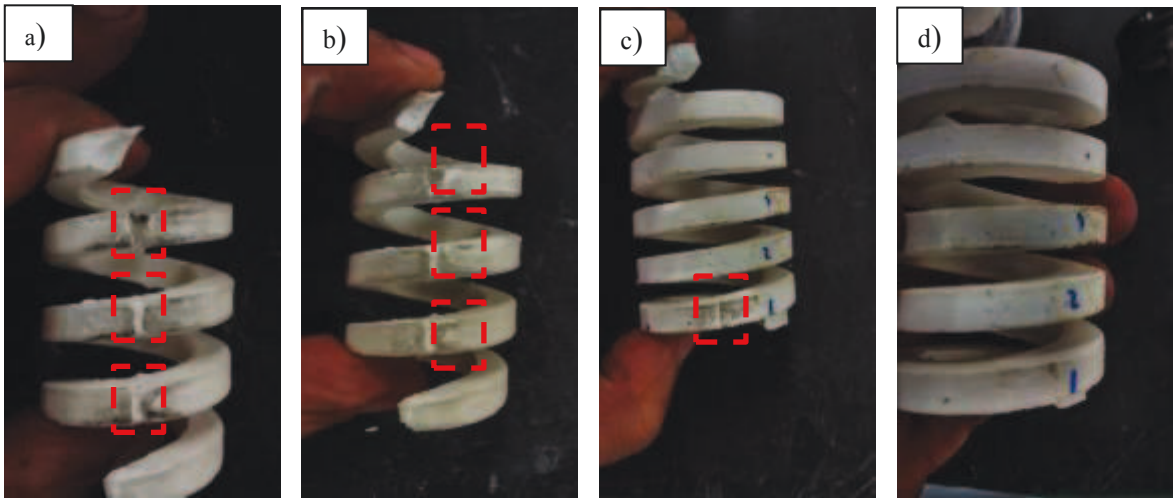


Fonte: Autor

Legenda: Detalhe do furo para fixação das partes móveis do molde com parafusos, mostrando a ocorrência de poros que surgiram durante a fundição do tarugo de alumínio; b) Detalhe de alguns poros na parede do molde preenchidos por suspensão gelificada após as primeiras moldagens.

Outro ponto de melhoria observado na utilização do alumínio para a confecção do molde foi a marca deixada pela linha de partição: no molde de nylon este era um dos maiores problemas (Figura 54-a e 54-b), porém podemos observar nas imagens da Figura 54-c e 54-d que praticamente não se observa a linha de partição.

Figura 54- Detalhe da marca da linha de partição do molde nas molas, comparando o primeiro com o segundo teste:



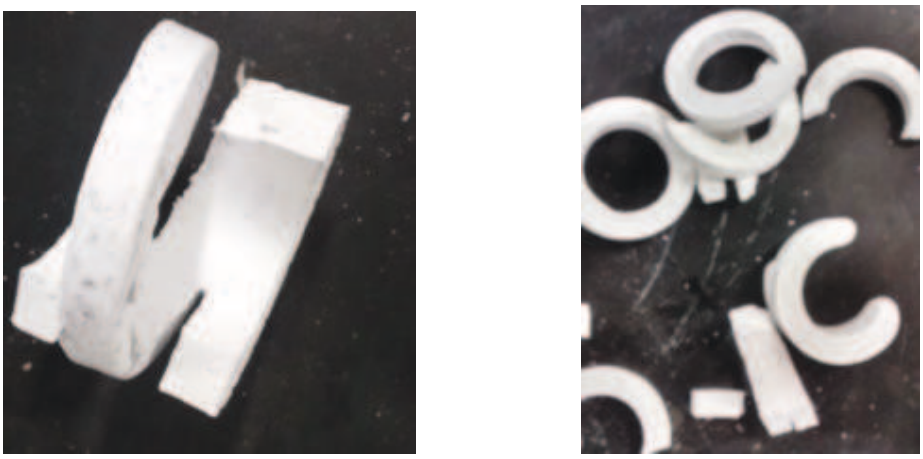
Fonte: Autor
Legenda: :a) e b) linha de partição do molde de nylon; c, e d) linha de partição do molde de alumínio.

7.2.2 Secagem

Conforme descrito na seção 5.1.2, o procedimento de secagem das peças consistiu em mantê-las a 90°C por 24 horas e posterior secagem a temperatura ambiente.

Porém, ocorreu que, quando se seguiu este procedimento, ao se expor a primeira remessa de peças à temperatura ambiente estas não resistiram ao choque térmico, notando-se a ocorrência de trincas, sendo emitidos estalos perceptíveis ao ouvido. Algumas peças chegaram a romper neste processo, conforme a Figura 55.

Figura 55 - Molas fraturadas a verde durante o processo de secagem, devido ao choque térmico.



Fonte: Autor

Este comportamento está associado à maior fragilidade do gel obtido com a nova formulação de monômeros, comparado com a solução de HMAM utilizada na primeira etapa deste trabalho. A maior tenacidade está provavelmente associada a uma maior temperatura de transição vítrea do polímero formado, tal que ao ser retirado da estufa o choque térmico foi suficiente para provocar a ocorrência de trincas no material.

Diante este problema, o segundo lote peças foi processado e a secagem foi alterada para ter um resfriamento menos agressivo. Assim, manteve-se a temperatura e o tempo de secagem (24h a 90°C), porém, ao invés de expor as peças ao ambiente enquanto essas estavam a 90°C, a temperatura foi baixada de forma gradual, 10°C por hora, e a estufa foi aberta somente com a temperatura de 30°C. Desta forma diminuiu-se consideravelmente o choque térmico e consequentemente as peças não apresentaram trincas. A figura 56 mostras as molas após secagem minimizando o choque térmico.

Figura 56 - Molas cerâmicas a verde, após processo de secagem minimizando o choque térmico.

Fonte: Autor.

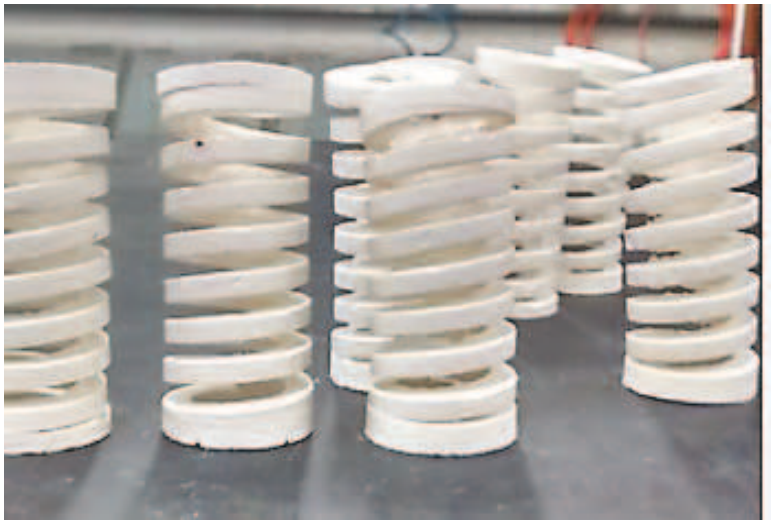
7.2.3 Sinterização

Seguiram para a sinterização as peças trincadas que não chegaram a romper e as peças sem trinca de choque térmico em lotes separados.

As boas propriedades mecânicas do "gelcasting" se repetiram para esta formulação de monômeros, pois após a sinterização as peças apresentavam boas características de dimensionamento. Porém, um novo efeito foi verificado, as peças sofreram grau de empenamento mais severo, principalmente nas extremidades. Isso foi associado à primeiro geometria mais robusta das peças e ao maior número de espiras, o que as tornam mais pesadas. Segundo, um efeito de memória erado durante a secagem, pois, as peças secaram sem nenhum dispositivo para garantir a equidistância entre as espiras e o paralelismo das extremidades.

Outra particularidade desta etapa do projeto é a presença de uma espira espessa, totalmente plana nas extremidades da peça, que não havíamos conseguido reproduzir anteriormente. A figura 57 mostra o grau de empenamento de algumas peças após a sinterização.

Figura 57 - Detalhe do empenamento gerado após a sinterização das molas cerâmicas.



Fonte: Autor

Novamente foram medidas as dimensões das molas antes e depois da sinterização. A Tabela 11 mostra o percentual de retração e as principais características da mola após esta etapa.

Tabela 11- Percentual de contração pós sinterização, das dimensões principais para as molas cerâmicas.

Característica	Peça a verde	Peça sinterizada	Taxa de retração
Largura espira (a), mm	9,85	8,20	16,75%
Altura da espira (b), mm	9,95	8,35	16,00%
Diâmetro interno (D), mm	33,30	28,05	16,00%

Fonte: Autor

Nota-se uma boa reprodutibilidade da taxa de contração em diferentes direções, com uma taxa de retração próxima a 16,5%. Deve-se destacar que esta é uma das informações mais importantes como dado de entrada de um projeto de uma mola cerâmica.

A densidade das peças foi verificada novamente pelo ensaio de Arquimedes, sendo os dados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12-Porosidade aparente, densidade aparente e densidade volumétrica das peças, medidas através do método de Arquimedes.

Mola	V	Vop	Vip	P	T	B
1	15,266	0,1272	15,139	0,222	3,782	3,751
2	21,918	0,2395	21,679	0,301	3,670	3,630
3	11,478	0,1075	11,371	0,251	3,768	3,733
4	31,626	0,1784	31,448	0,151	3,768	3,747
5	25,267	0,1576	25,109	0,167	3,755	3,732
6	29,359	0,168	29,191	0,153	3,773	3,751
7	31,960	0,2174	31,743	0,181	3,784	3,759
8	37,943	0,059	37,884	0,041	3,776	3,770
9	36,407	0,5324	35,875	0,393	3,779	3,723
10	25,280	0,1335	25,147	0,140	3,789	3,769
11	21,329	0,1177	21,211	0,148	3,759	3,738
12	15,857	0,239	15,618	0,407	3,756	3,699
Média	**25,308**	**0,190**	**25,118**	**0,213**	**3,763**	**3,733**

Fonte: Autor
Legenda: :(*) V=volume da peça; Vop = volume de poros abertos; Vip = volume de massa densa e poros isolados; P = porosidade aparente; T = densidade aparente; B = densidade volumétrica.

É possível notar uma significativa melhora na porosidade da peça, apesar de não termos conseguido atingir o mesmo resultado da densidade alcançada com as barras de corpo de prova. A tabela 13 mostra o comparativo do percentual da densidade teórica obtida pelo método de Arquimedes, para os três testes realizados.

Tabela 13- Comparativo de densidade, entre o primeiro teste de mola cerâmica (Mola 1), barra de corpo de provas e teste final com molas cerâmicas (Mola 2).

Característica	*Mola 1*	*Barras de corpo de prova*	*Mola 2*
Densidade da peça	93,8%	97,37%	94,55%

Fonte: Autor

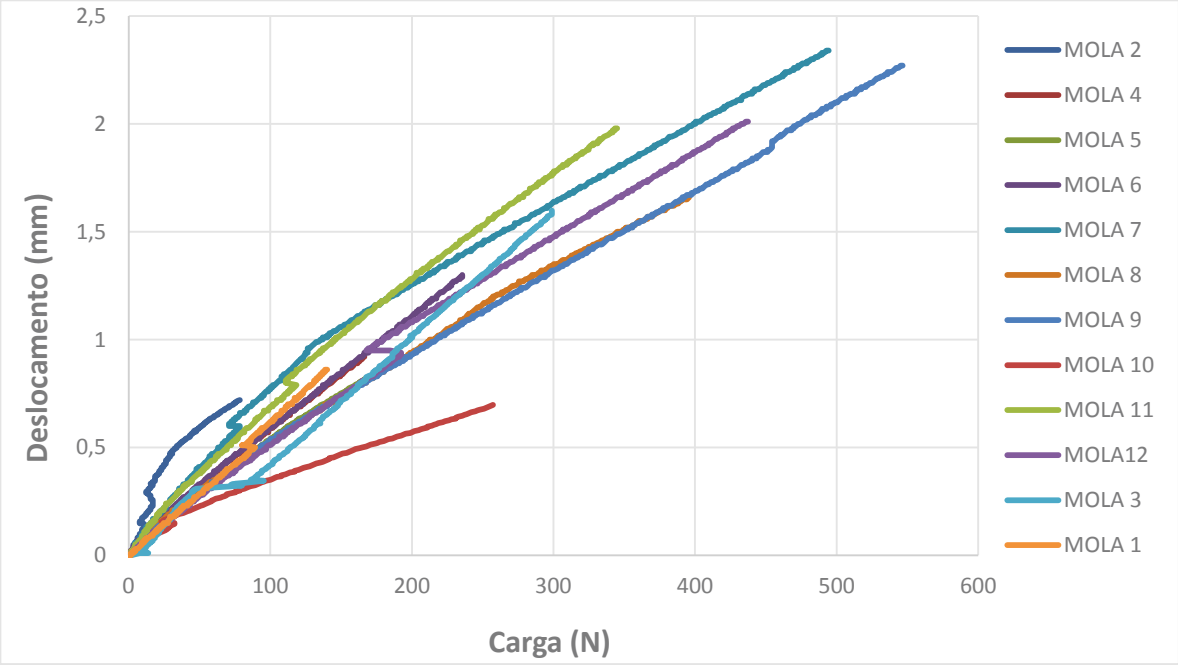
A diferença entre a densidade das molas produzidas no molde de alumínio (Mola 2) e a densidade das barras de corpo de prova é justificável, pois, existe uma diferença significativa no processo de injeção. Ocorre que, durante o processo de moldagem das molas cerâmicas, o a suspensão percorre um canal mais longo e estreito no interior do molde para gerar a mola.

Durante esse percurso não há saídas por onde eventuais bolhas retidas na suspensão possam chegar à superfície, aumentando a probabilidade de ficarem retidas no interior da amostra. Já na peça injetada (barras) há um maior número de superfícies livres, por onde eventuais bolhas poderiam colapsar durante o processo de injeção.

7.2.4 Ensaio mecânico

As amostras sinterizadas foram submetidas a um ensaio de compressão até a fratura, enquanto era levantada uma curva de força por deformação. Este método foi utilizado para cada uma das amostras e os resultados são apresentados na figura 58.

Figura 58-Variação dimensional da mola em função da carga aplicada.



Fonte: Autor

É possível observar que os gráficos dos ensaios apresentam uma linearidade, o que demostra que estas molas obedecem à lei de Hooke.

Houve uma grande variabilidade nos resultados, sendo que até a fratura as molas defletiram entre 0,6 a 2,2 mm.

Com os valores de carga máxima, obtidas no instante da fratura foi calculada a tensão de ruptura das peças pelo cálculo de Whal, conforme apresentado na tabela 14.

Tabela 14- Cálculo da tensão de ruptura das molas cerâmicas pelo método de Whal.

Mola	*Carga de ruptura (N)*	*Tensão (MPa)*
*1**	140	44,51
*2**	77	24,48
*3**	300	95,39
*4**	166	52,78
*5**	168	53,41
6	236	75,03
7	493	156,75
8	396	125,91
9	545	173,28
10	257	81,71
11	336	106,83
12	437	138,95

Fonte: Autor

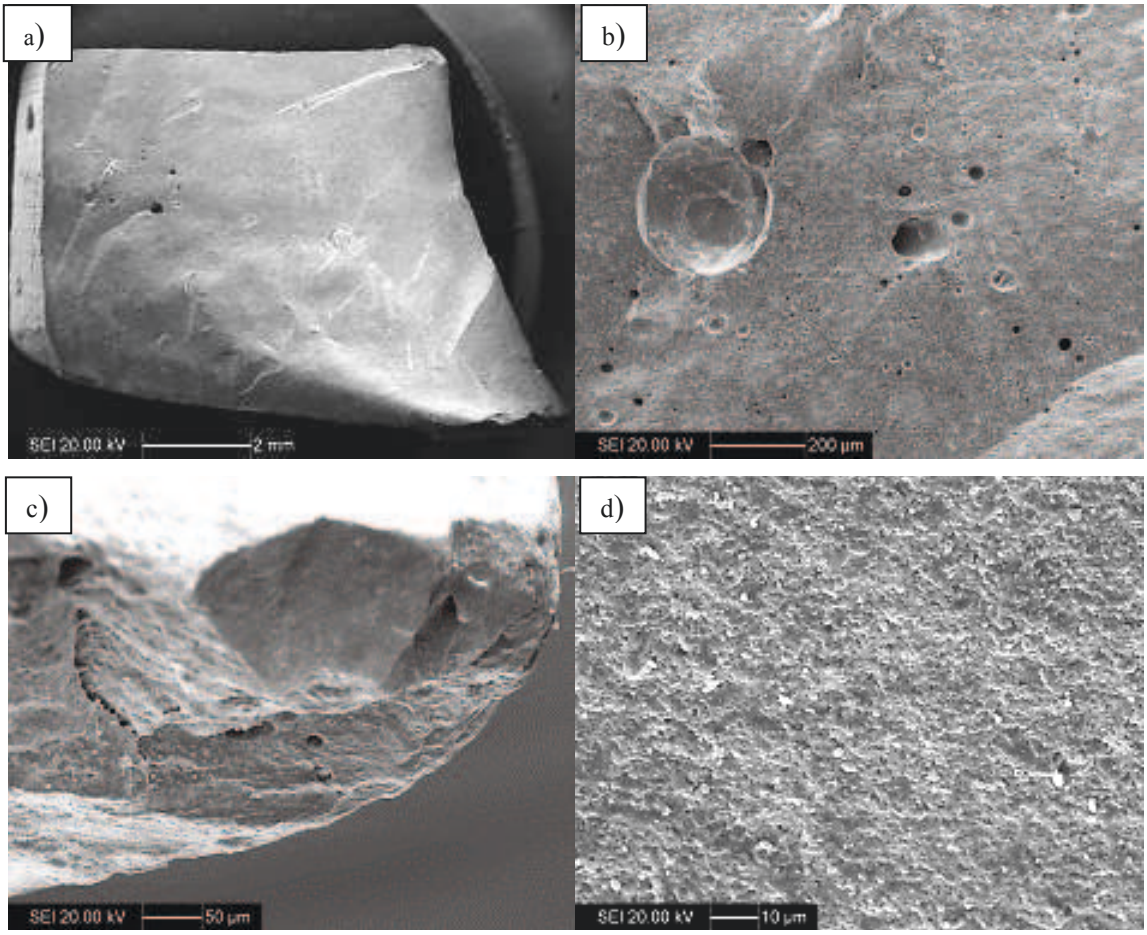
No resultado da tabela 14 precisamos considerar duas etapas: as peças 1 a 5 foram as molas que tiveram seu processo de resfriamento mais agressivo, sendo que das 7 peças produzidas duas se despedaçaram; e das peças 6 a 12, referem-se as peças com processo de secagem menos agressivo, e que acreditamos que não tenham trincado durante a secagem. Nota-se que neste segundo lote de peças os valores de tensão de ruptura aumentaram consideravelmente, evidenciando o efeito do choque térmico sobre as peças do primeiro lote, ao serem retiradas da estufa. Este resultado evidencia a necessidade de se evitar choques térmicos nas peças, ainda em seu estado “a verde”.

Comparadas com os valores obtidos para as molas que deram início a este trabalho de pesquisa (cujos valores de tensão de ruptura variaram entre 41,9 a 83,0 MPa), a resistência mecânica melhorou sensivelmente, o que evidencia o aprimoramento do processo na fabricação das molas em molde de alumínio.

Considerando apenas a tensão de ruptura das molas 6 a 12, os valores comparam-se favoravelmente àqueles obtidos por Barbieri et. al. para molas helicoidais de seção transversal circular produzidas por injeção de baixa pressão, os quais variaram entre 30 e 50 MPa (6).

Novamente uma análise de MEV foi realizada para tentar esclarecer o motivo da discrepância entre a resistência das amostras, com a expectativa de encontrar evidências de trincas originadas no choque térmico. A figura 59, mostra imagens ampliadas do interior da mola que teve a menor resistência nos testes.

Figura 59-Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial:



Fonte: Autor.

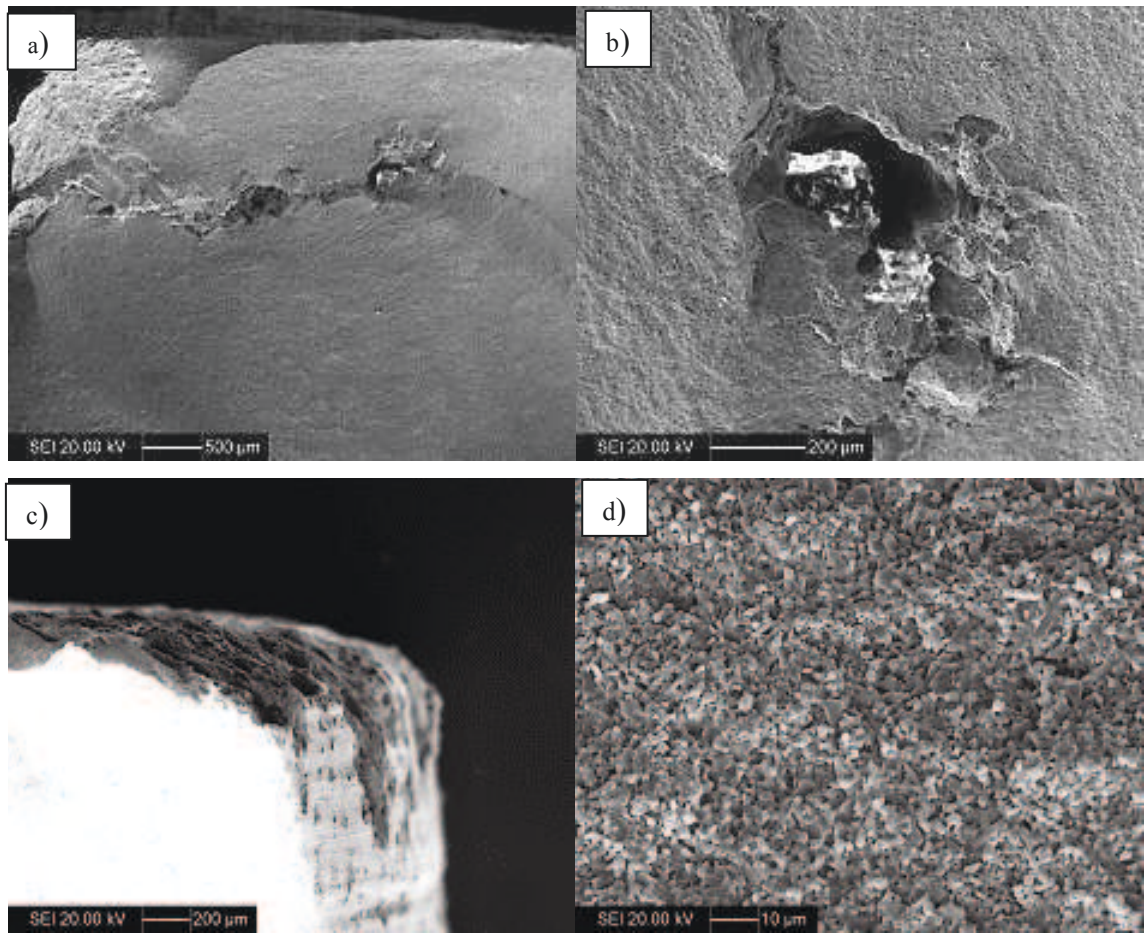
Legenda: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada do ponto de maior defeito interno, c) imagem aproximada de uma trinca, d) imagem aproximada com maior resolução.

Observa-se a ocorrência de alguns poros esféricos, decorrentes de bolhas aprisionadas durante a moldagem (Figura 59-a e 59-b). Tais defeitos provavelmente não foram os que controlaram a resistência mecânica, uma vez que estavam presentes em todas as amostras, independentemente de haver sofrido choque térmico ou não. A Figura 59-c mostra uma trinca próxima à superfície possivelmente originou-se do choque térmico, embora seja difícil afirmar que ela tenha sido o defeito crítico na peça. Nota-se também que a porosidade

diminuiu consideravelmente (Figura 59-d), resultando em uma microestrutura densa e com porosidade intergranular praticamente eliminada.

A mesma análise foi realizada para a mola que atingiu o maior valor de tensão, neste caso a análise foi um pouco prejudicada pois esta mola fraturou em 5 partes no ensaio de compressão, de forma que tivemos que escolher uma parte aleatória para a análise A Figura 60 mostra imagens realizadas por MEV na mola 12.

Figura 60-Análise de MEV para a mola que teve menor resistência no ensaio de compressão uniaxial



Fonte: Autor
Legenda: a) vista do pedaço de fratura inteiro, b) imagem aproximada de um poro c) imagem aproximada da superfície de fratura, d) imagem aproximada com maior resolução.

Neste pedaço fraturado, o maior defeito encontrado foi um poro com um pouco mais de 400 mícrons, porém pelo aspecto irregular, é difícil afirmar se foi gerado somente no processamento, ou teve influência da fratura. Entretanto, destaca-se que a presença de um defeito com tal dimensão na peça que apresentou maior resistência mecânica revela que há

espaço, dentro do processo de fabricação, para obter peças com valores mais elevados de tensão de ruptura.

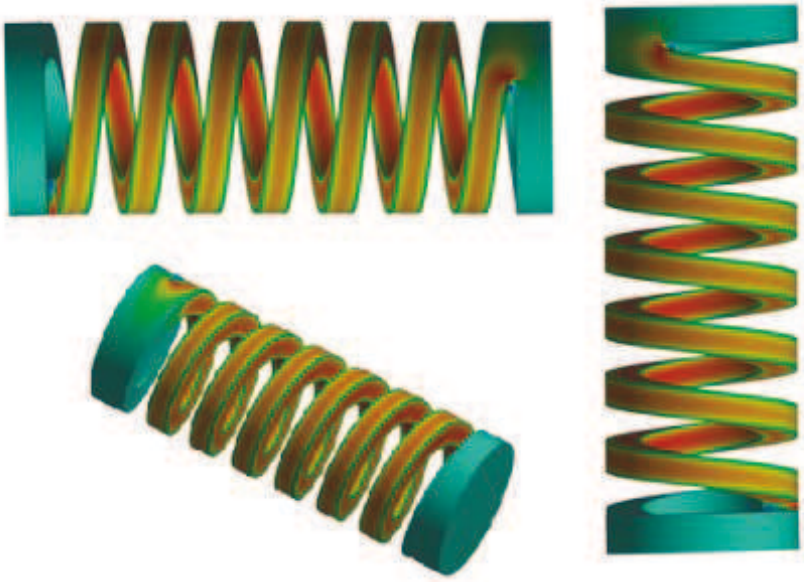
7.2.5 Análise de tensão por elementos finitos

Foi feito uma análise de tensão de ruptura por elementos finitos, utilizando a carga máxima que cada mola resistiu. Esse método tem objetivo de refinar o cálculo, pois considera a distribuição de tensões ao longo de toda a mola, demonstrando que a tensão não é igual em qualquer seção da peça, o que não é considerado pelo método de Whal, que admite uma distribuição de tensões homogênea ao longo da peça.

Entretanto, a distribuição de tensões gerada pela análise de elementos finitos resulta apenas de características geométricas da mola, sem considerar o efeito de concentradores de tensão na microestrutura da peça, que foi considerada homogênea. Teremos alguns erros de considerações já previstas, pois para ter exatamente a tensão de ruptura das peças, precisaríamos além dos dados reais dos materiais (que foram levantados experimentalmente) seria necessário conhecer tamanho e posição de todos os defeitos, e considerar isso na geometria.

Com essas informações poderíamos gerar o efeito dos concentradores de tensão. Porém, a análise realizada é robusta o suficiente para definir valores de entrada de projeto, bem como comparar as diferenças em relação ao método de Whal. A figura 61 mostra em escalas de cores a distribuição de tensão ao longo da mola.

Figura 61-Análise de elementos finitos de uma mola submetida a uma carga de 545 N.

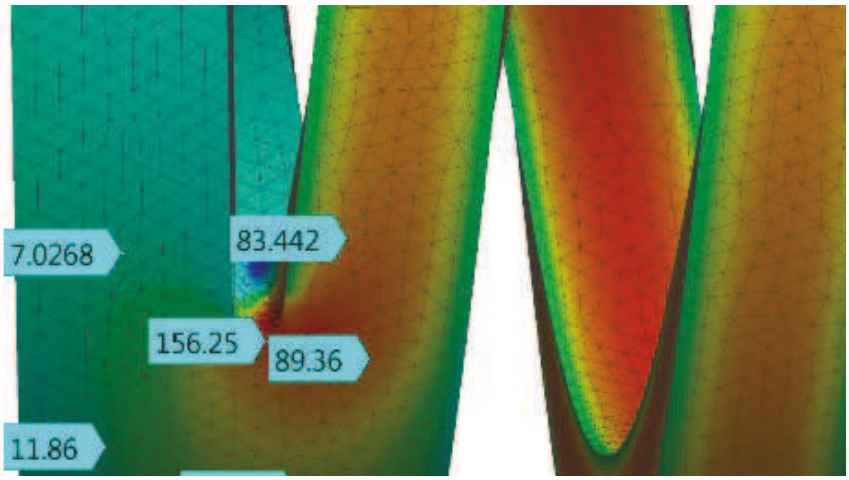


Fonte: Autor

As carcterísticas de cores deste método, segue uma escala de cores frias para menores tensões (azul) e cores quentes para maiores tensões (vermelho). É possível notar na simples escala de cor a coerência com a revisão bibliográfica (Seção 3.1.2.1), que prevê a maior incidência de tensão na face interna da mola, que nas figuras 61 e 62, estão indicadas pela cor vermelha.

Destaca-se também o pico de tensão situado na transição dos apoios para as espiras das molas, onde existe um ângulo agudo, destacado na figura 62.

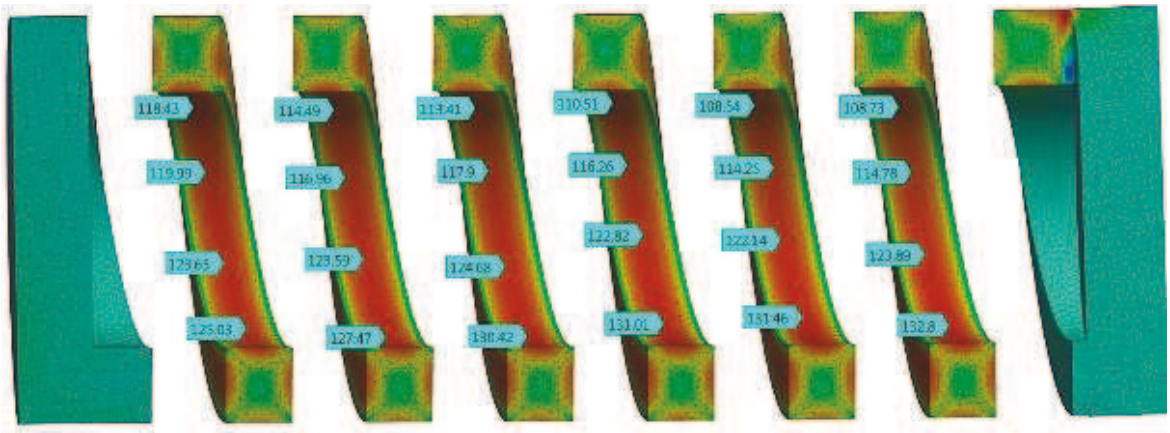
Figura 62- Pico de tensão evidenciado na transição da extremidade para as espiras.



Fonte: Autor

Este ponto de concentração de tensão foi desconsiderado nos cálculos, pois as molas foram embutidas com massa plástica nas extremidades. Foi reailzado o corte em 180° de uma das molas com o objetivo de mostrar a distribuição de tensões ao longo da seção da peça, como mostra a Figura 63.

Figura 63-Simulação de uma mola cerâmica em corte mostrando para carga de ruptura, a distribuição de tensão ao longo da seção transversal.



Fonte: Autor

A tabela 15 mostra um comparativo entre a carga de ruptura a tensão obtida pela mola através do cálculo de Whal e por elementos finitos.

Tabela 15- Comparativo de tensão de ruptura, entre cálculo de Whal e elementos finitos.

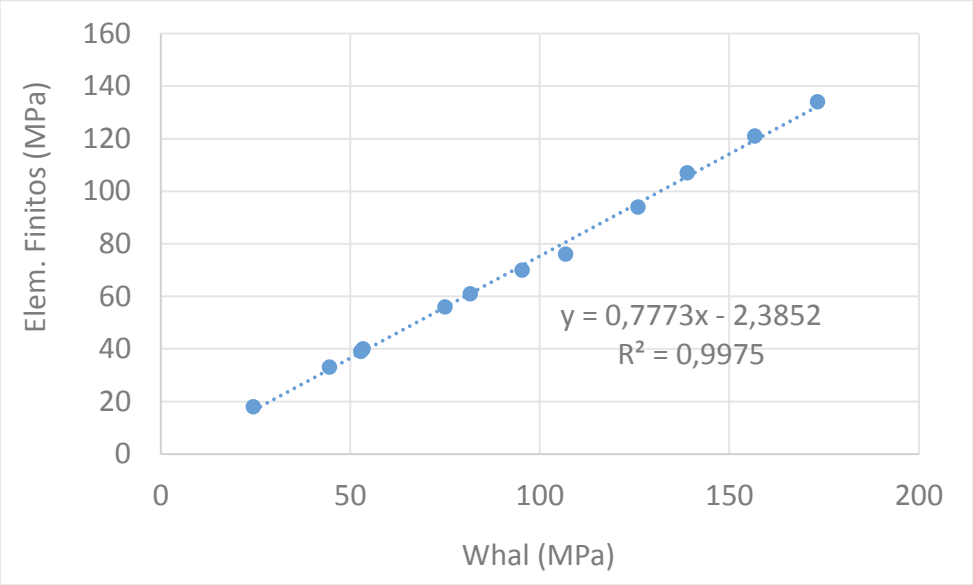
Mola	*Carga de ruptura (N)*	*Tensão (MPa) Whal*	*Tensão (MPa) Elementos finitos*
*1**	140	44,51	33
*2**	77	24,48	18
*3**	300	95,39	70
*4**	166	52,78	39
*5**	168	53,41	40
6	236	75,03	56
7	493	156,75	121
8	396	125,91	94
9	545	173,28	134
10	257	81,71	61
11	336	106,83	76
12	437	138,95	107

Fonte: Autor.

Os dados de tensão obtidos por elementos finitos mostram uma tensão menor do que os encontrados por cálculo de Whal. Isso ocorre, pois o cálculo de Whal não prevê alguns fatores que influenciam na tensão, como por exemplo o concentrador de tensões gerado pelas arestas das molas. Segundo o modelo de Whal, a tensão é basicamente força por área, associado a alguns poucos concentradores de tensão, como a torsão do arame em função do centro da mola. Outro ponto de divergência é que com a aplicação da carga a peça tende a se deformar dimensionalmente, então a carga aplicada deve ser avaliada na condição da mola deformada e com sua geometria original, livre de carregamento.

O método de elementos finitos tem um grau de assertividade bem maior, ao passo que tais fatores são embutidos no cálculo de Whal através de um coeficiente de segurança, para diminuir o erro e realizar um leve superdimensionamento. A relação entre os valores de tensão de ruptura calculados pelo método de Whal e pelo método de elementos finitos é melhor visualizada na Figura 64.

Figura 64--Correlação entre os dados de tensão de ruptura calculado pelo método de Whal e por elementos finitos.



Fonte: Autor

Porém, mesmo o método mais robusto (análise de elementos finitos), também poderia ser mais refinado com a realidade da peça, visto que três fatores que concentram tensões não foram considerados pelo software. Primeiro, o projeto que foi calculado no software de elementos finitos é baseado em uma mola de projeto, ou seja, a dimensão da seção transversal da mola é constante em todo o perfil. Uma pequena redução da seção da mola, implicaria em um aumento de tensão muito significativo. Segundo, a mola calculada tem equidistância perfeita entre as espiras, o que de fato não ocorreu. Terceiro e mais importante, em ambos os casos não foi considerada a porosidade. Isso em particular para o método de elementos finitos, poderia ter gerado valores de tensões muito maiores, pois estes poros atuam como concentradores de tensão.

7.2.6 Resultado do ensaio compressão uniaxial

Novamente os resultados de análise de tensão foram tratados através do método de Weibull, porém desta vez o método foi utilizado para os dados por cálculo de Whal (figura 63). É notória a abrangência deste método, pois, obtivemos um valor de R superior a 0,98. As dispersões nos valores de tensões também já estavam previstas, pois, os resultados tiveram

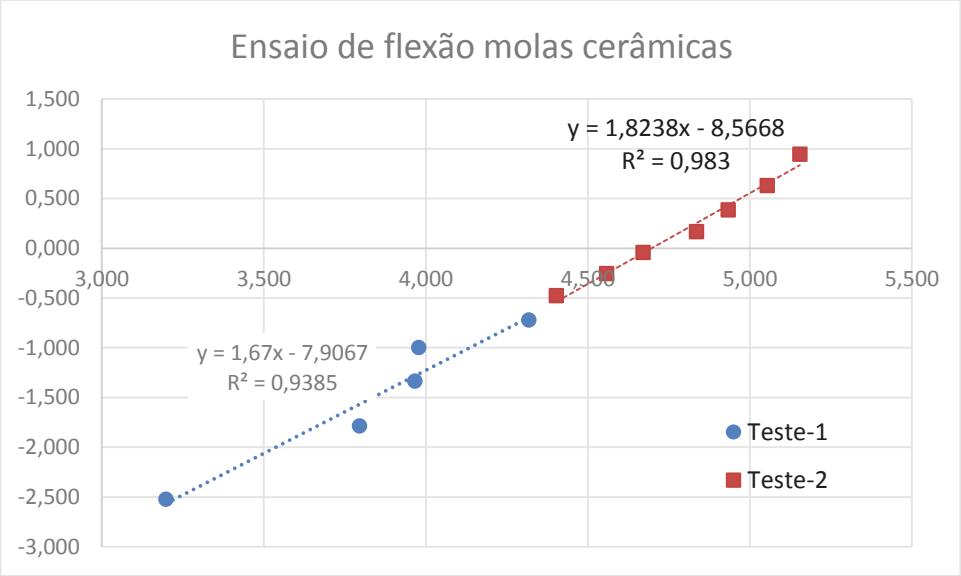
importantes influências de processamento, destacando três pontos cruciais para essa discrepância.

a) Durante o processo de secagem as molas 1 a 5, sofreram um choque térmico muito severo o que gerou a aparição de trincas, que provavelmente não foram fechadas durante a sinterização.

b) A densidade ficou em 94,55%, gerando assim margem de 5.45% de porosidade, defeito este que pode ser maior ou ser mais heterogêneo em algumas peças, podendo ainda estar situado em locais que influenciem mais ou menos na resistência mecânica da peça.

c) Algumas peças apresentavam macro defeitos na superfície, gerado por introdução de bolhas de ar no momento da moldagem.

Figura 65 - Distribuição de Weibull para resistência à compressão das molas produzidas na primeira (Teste 1) e na segunda (Teste 2) etapas do trabalho, calculada pelo método de Whal.



Fonte: Autor

7.2.7 Resumo dos dados obtidos

A solução de monômeros MAM-HMAM-MBAM, demonstrou ser estável suficiente para que se possa obter boa reprodutibilidade na confecção de molas cerâmicas através do "gelcasting" , sendo o tempo de gelificação facilmente controlável e minimamente

influenciado pela temperatura. A viscosidade da suspensão, apesar de alta devido à elevada concentração de sólidos, permitiu a moldagem em detalhes das molas cerâmicas

O aumento da temperatura de sinterização para 1600°C, conforme testes anteriores, contribuiu para redução porosidade, com a densidade volumétrica atingindo 94,55% do valor teórico. O molde em alumínio teve boa reprodução na geometria das peças, além de contribuir para a diminuição dos defeitos superficiais, principalmente o causado pela linha de partição.

A eliminação de bolhas de ar durante a etapa de moldagem ainda é um fator limitante, influenciando a densidade do material e gerando concentradores de tensão. Entretanto, a resistência mecânica foi influenciada principalmente por defeitos superficiais, e não pela ocorrência de poros esféricos no interior das molas.

O cálculo da tensão de ruptura, feito através dos métodos de Whal e de elementos finitos apresentou resultados coerentes, sendo que os valores calculados por elementos finitos foram, aproximadamente, cerca de 77% dos valores calculados pelo método de Whal.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do nylon, como matéria prima de confecção do molde, visando a menor aderência entre a suspensão e os canais deste, não foi a mais adequada devido a interação entre a suspensão e o material polimérico. Outro ponto desfavorável foi a elasticidade do nylon contribuiu para a deformação dos canais durante a usinagem, deixando-os levemente cônicos, impossibilitando a remoção da peça gelificada sem que este efeito fosse corrigido, provavelmente uma usinagem mais fina resolva este problema, porém devido ao problema de deformação na hora da fixação dos parafusos antes da moldagem, considero descartada a possibilidade de utilizar esse molde, outro ponto crucial foi que, a escolha deste material teve a intensão de minimizar ao máximo ou inibir a necessidade de dispersante, o que na prática não ocorreu. Porém mesmo com as dificuldades apresentadas este molde foi eficaz para validar a geometria da mola (helicoidal de seção transversal quadrada), bem como o método de injeção que permaneceu inalterado até o final do projeto. A utilização do alumínio garantiu uma perfeita interação entre suspensão molde associado a uma maior estabilidade geométrica, além de uma vida bem superior, provando que os metais são os matérias ideais para aplicação do “gelcasting” . O problema ocorrido com este molde foi a presença de bolhas no interior da estrutura, o que seria facilmente resolvido com uma desareação após a fundição do alumínio. Outro ponto que poderia gerar dificuldade era a aderência entre a peça gelificada e as paredes do molde, o que foi resolvido com uma camada fina de desmoldante.

A concentração de sólidos de 55% em volume demonstrou ser o limite a ser utilizado para a confecção de molas pelo método aplicado ao trabalho, pois apresentou uma elevada viscosidade, sendo observado a inclusão de bolhas no interior das amostras, contudo foi possível preencher todos os canais do molde, sem muito esforço. A desareação da suspensão antes da moldagem foi um fator de grande importância para reduzir a porosidade das molas, contribuindo para o aumento da resistência mecânica.

A formulação para o "gelcasting" evoluiu ao longo do trabalho onde a formulação inicial utilizada nas primeiras amostras (HMAM) demonstrou uma grande oportunidade de aprimoramento, pois fui severamente influenciado pela temperatura, seja ela a ambiente ou a inicial da suspensão, bem como sua resistência a verde, sendo evidenciado algum tipo de quebra em 100% das amostras produzidas com esta formulação. Estes problemas foram solucionados com a formulação (MAM MBAM HMAM) sendo possível moldar com os mesmos parâmetros molas em dias com temperaturas diferentes. A resistência a verde aumentou significativamente, evidenciado pela ausência de quebras durante a desmoldagem das peças. O processo de secagem foi alterado entre a primeira e segunda versão de molas devido à maior rigidez da nova formulação de monômeros, sendo necessário minimizar ao máximo o choque térmico.

A sinterização sofreu uma singela mudança, onde foi acrescidos 50°C a temperatura final para reduzir a porosidade, conforme resultados obtidos com os corpos de prova.

A retração e empenamento das peças, provavelmente estão associados a um efeito de memória das molas ainda a verde, pois antes da secagem as peças poderiam ser encurvadas e corrigido os passos sem problemas, para testes futuros será necessário criar um calibre que garanta a equidistância das espiras bem como o perfeito alinhamento da mola com suas extremidades isto deve resolver este problema.

O desempenho mecânico foi coerente com o tamanho e quantidade de defeitos, sendo no primeiro teste conduzido principalmente por problemas superficiais, que foram corrigidos com o molde de alumínio, porém em relação aos defeitos internos apesar da melhora na microestrutura as bolhas geradas no processo de injeção, ainda é um ponto a ser melhorado para trabalhos futuros.

Em vias gerais este trabalho comprovou que é possível reproduzir em todos os seus detalhes molas cerâmicas em esquadro pelo processo "gelcasting" , contribuído com dados importantes de projeto como taxa de retração pós queima, tensão limite de ruptura, temperatura de sinterização e uma formulação de monômeros bem estável.

REFERÊNCIAS

1. MENGMENG, Z. et al. Fabrication and high-temperature properties of Y-TZP ceramic helical springs by a gel-casting process. **Ceram. Int.**, v.41, n. 1, p. 5421-5428, 2015.
2. RICHERSON, D. W. **Modern ceramic engineering:** properties, processing and use in design. New York: John Wiley & Sons, 2005.
3. REED, J. S. **Principles of ceramic processing**. 2nd. ed. New York: Wiley-Interscience, 1995.
4. ALBERT, C. Y.; et al. "gelcasting" of alumina. J. **Am. Cer. Soc**., v.74, n.1, p.612-618, ;;
5. ,n1991.
6. ANDREOLA, R**. Conformação de molas Cerâmicas por Injeção de Baixa Pressão**., 104p. Dissertação (Mestrado em ciência dos materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2007
7. BARBIERI, Rodrigo A.; PEROTTONI, C. A.; ZORZI, Janete E. Influence of Sintering Temperature on the Mechanical Properties of Alumina Springs**. Int. J. Appl**. **Ceram. Technol.**, v. 9, n. 3, p. 599-605, 2012.
8. NOHUT, S.; SCHNEIDER, G.A. Failure probability of ceramic coil springs. **J. of the European Cer. Soc**. v. 29, p. 1013-1019, Apr. 2009.
9. NAKAO, Wataru et al. Self-Crack-Healing Behavior of Mullite/SiC Particle/SiC Whisker Multi-Composites and Potential Use for Ceramic Springs. **J. Armerican Cer. Society,** v. 89, p. 1352–135, Feb. 2006.
10. JUVINAL, R. C.; MARSHEK, K. M. **Fundamentals-of-machine-component-design.** 5. ed. Nova York: John Wiley, 2011.
11. WAHL, A. M. **Mechanical spring.** New York: Penton Publishing Co., 1944.
12. BANDELOW, L. A Audi aderiu às molas de fibra de vidro. **Tec Mundo** SC 7 de jul. 2014, 11 dez. 2016 Disponível em< http://www.observasc.net.br/polimeros/index.php/inovacao/291-a-audi-aderiu-as-molas-em-fibra-de-vidro> Acesso 11 dez. 2016.
13. ARANHA N. et al. lei de Hooke e as molas não lineares, um estudo de caso **Rev. Bras. Ensino Fís. vol.38 no.4** São Paulo Epub July 18, 2016 A
14. BUDYNAS, R.G. J.; NISBETT, K.J. **Elementos de Máquinas de Shigley** - Projeto de Engenharia Mecânica. 8 ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
15. ARCANJO, E.P.**Caracterização do comportamento à fadiga de molas**. Dissertação Mestrado em engenharia mecânica – Universidade técnica de Lisboa; Lisboa, 2008.
16. DOWLING, Norman E. **Mechanical Behavior of Materials**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2013.
17. HEIMANN, R. B. Classic and advanced ceramics from fundamentals to applications. Weinheim: WILEY-VCH, 2010.
18. CALLISTER,William D.;RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: u**ma introdução, uma introdução. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

19. VLACK, L.H.V. **Princípios de ciências dos materiais.** São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

20. CARTER, C. B.; NORTON, M.G. **Ceramic materials: s**ciense and engineering. 2nd ed. Washinton: Springer 2013.

21. SOMIYA, S, **Handbook of Advanced Ceramics.** London England: Elsevier, 2003.

22. WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. **The temperature dependence of relaxation mechnisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids.** Departament of Chemistry University of Wisconsis, p. 3701, 1955.

23. MUNZ, D. FETT.T. **Ceramic mecanical properties:** failure behavior, Springer-Velag Heidelberg Berlin 1999.

24. SHREVE, R. N. BRINK, J. A, **Industria de processos químicos**. São Paulo: Guanabara 1997.

25. DÖBNER, E.; HÜBNER, H. **Alumina**: processing, properties and applications. Berlin**:** Springer-Verlag, 1984. 329 p.

26. DAWIHL, W. Untersuchungen im gebiet hoher und höchster temperaturen. **Tonindustrie-Z**, v. 58, p. 3-25, 1934.

27. ASSIS, J. M. K. **Estudo comparativo de compósitos alumina-zircônia tetragonal e de cerâmicas de alumina adtivada com nióbia para aplicação estrututais**, 104p. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos São Paulo, 2007

28. MELO, F. C. L. **Conjugados cerâmicos obtidos a partir da sinterização reativa entre zirconita e alumina.** 1989. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 1989.

29. CHIRONIS, N. P. **Spring Design and Application**, New York, McGraw-Hill p. 86.1961

30. HAMILTON, T. et al. Experimental investigation on the mechanical performance of helical ceramic spring. **Journal of Materials Sciense,** v. 38, p. 3331-3335, 2003.

31. PIOTTER, V. et al. Injection molding of components for microsystems. **Microsistem Technologies**, v. 7, p. 99-102. 2001.

32. MANGELS, J.A.; TRELA,W.Ceramic components by injection molding.in advances in ceramics-Forming of Ceramics**. American Ceramic Society**. p. 220-223, 1983.

33. ZORZI, J.E.; PETROTTONI, C.A.; JORNADA, J.A. Moldagem por injeção em baixa pressão de peças complexas de cerâmicas avançadas produzidas com pós submicrometros. **Cerâmica,** v. 50, p. 202-208, 2004.

34. OGBEMI, O. OMATETE.; MARK, A. Janney; STEPHEN, D. Nunn.”gelcasting” : from Laboratory Development toward industrial. **Production**.Oak national laboratory. 22 July 1996.

35. GUO, X. **“gelcasting” of High Strength Ceramic** CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden, work No. 75/2011.

36. ALBERT, C. Young; OGBEMI, O. ORNATETE, Mark A. Janney, and Paul A. Menchhofer **Oak Ridge National Laboratory;Oak** Ridge Tenessee 37831-6069 1997

37. YOUNG, A. C. et. al.. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 74, n. 3, 1991.

38. MAIDA, P.C.; el. al.. S. Desenvolvimento e fabricação de placas de alumina pelo processo "gelcasting" para construção de um trocador de calor cerâmico. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 56**. 2012, Curitiba, PR, Brasil Anais São Paulo: ABC 2012

39. NAROTTAM P., Bansal, **Handbook of Ceramic Composites** Kluwer Academic Publishers, U.S.A 2005.

40. JANNEY, M. A. et al. **"gelcasting" Chapter**. In: RAHAMAN, M. N.; DEKKER, M. The Handbook of Ceramic Engineering, 1998.

41. AMERICAN SOCIETY FOR TESTIN AND MATERIAL. **Standard C1161 - 02c**: Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics at Ambient Temperature. West Conshohocken, 2008.

42. AMERICAN SOCIETY FOR TESTIN AND MATERIAL. **Standard C1259 – 98:** Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration. West Conshohocken, 2001.

43. ORTEGA, F.S.; SEPULVEDA, P.; PANDOFELLI, V. C. Monomer systems for the "gelcasting" of foams. **J. of the European Ceramic Society,** v. 22 p.1395–1401, 2002.