

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS COSTA DE CARVALHO

**ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE MOLAS HELICOIDAIS DE SEÇÃO
RETANGULAR DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR
FUNDIÇÃO DE PRECISÃO**

Campina Grande – PB

2024

CARLOS COSTA DE CARVALHO

**ANÁLISE TERMOMECÂNICA DE MOLAS HELICOIDAIS DE SEÇÃO
RETANGULAR DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR
FUNDIÇÃO DE PRECISÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Dr. Carlos José de Araújo

Coorientador: Dr. Jackson de Brito Simões

Campina Grande – PB

2024

- C331a Carvalho, Carlos Costa de.
- Análise termomecânica de molas helicoidais de seção retangular de ligas com memória de forma Ni-Ti obtidas por fundição de precisão / Carlos Costa de Carvalho. – Campina Grande, 2025.
95 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.
"Orientação: Prof. Dr. Carlos José de Araujo, Prof. Dr. Jackson de Brito Simões".
Referências.
1. Molas de Seção Retangular. 2. Ligas com Memória de Forma. 3. Ligas de Ni-Ti. 4. Ligas de Ti-Ni-Cu. 5. Comportamento Mecânico Experimental – Estudo. 6. Fundição de Precisão. 7. Simulação. 7. Software ProCAST. I. Araujo, Carlos José de. II. Simões, Jackson de Brito. III. Título.

CDU 669.018.2(043)

**ANALISE TERMOMECAÂNICA DE MOLAS HELICOIDAIS DE SEÇÃO RETANGULAR DE
LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR FUNDIÇÃO DE PRECISÃO**

CARLOS COSTA DE CARVALHO

Dissertação Aprovada em 18/12/2024 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes membros:



Prof. Dr. CARLOS JOSÉ DE ARAUJO
ORIENTADOR



Prof. Dr. JACKSON DE BRITO SIMÕES
CO-ORIENTADOR



Prof. Dr. ANTONIO ALMEIDA SILVA
EXAMINADOR INTERNO



Prof. Dr. CARLOS EDUARDO SILVA ALBUQUERQUE
EXAMINADOR EXTERNO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar saúde, força e sabedoria ao longo desta jornada.

Aos meus familiares, em especial às minhas irmãs Kalline e Kaliane pelo amor, apoio e compreensão incondicionais, que sempre foram fundamentais para o meu progresso e bem-estar.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Carlos José, pelo apoio contínuo, orientação valiosa e paciência ao longo de todo o processo de pesquisa. Agradeço também ao meu co-orientador Dr. Jackson Simões.

Um agradecimento especial à UFCG pela infraestrutura, recursos e apoio técnico, sem os quais a realização deste projeto não seria possível.

Agradeço também à FAPESQ/PB pelo financiamento da pesquisa.

Aos meus colegas do laboratório, pelo companheirismo, troca de ideias e suporte técnico, que enriqueceram minha experiência acadêmica e profissional.

Agradeço aos amigos que fiz ao longo dessa jornada, em especial à Suelene, Vitória, Glauco, Railson, Toni e Carlos Albuquerque.

Agradeço também aos amigos Diego, Walber e Jackson, pelas caronas até Campina Grande, e a Rickson, pelas caronas até Sousa, o que tornou possível a continuidade deste trabalho, especialmente nos momentos em que a logística era um desafio.

A todos, minha eterna gratidão por estarem ao meu lado e contribuírem, de diversas maneiras, para a realização deste projeto.

RESUMO

As molas de seção retangular (MSR) de maneira geral são utilizadas em aplicações com espaço limitado e especialmente onde a altura total é limitada. Esse tipo de mola armazena mais energia em um espaço menor do que molas de arame circular quando comparáveis, embora a distribuição de tensão não seja uniforme. Assim, unir uma maior capacidade de armazenamento de energia desse tipo de mola com as características ativas e funcionais das ligas com memória de forma (LMF) oportunizou um melhoramento das funcionalidades desse elemento mecânico. O estudo do comportamento desse tipo de mola é importante, pois ajuda a prever o comportamento mecânico desses componentes, vislumbrando aplicações específicas em equipamentos onde existe a necessidade de pouco espaço e maior armazenamento de energia. Na literatura é bastante comum encontrar trabalhos com molas LMF tipo fio ou arame, mas há poucos relatos na literatura sobre trabalhos que envolvam molas SMA com seção retangular. Nesse trabalho foi feito o estudo do comportamento mecânico experimental de molas fabricadas de ligas com memória de forma, e teve sua execução garantida pela infraestrutura do LaMMEA/UFCG. Assim, as molas de materiais clássicos foram adquiridas comercialmente e os protótipos foram obtidos via processo de fundição de precisão. Assim, nessa pesquisa foi estudado o comportamento de molas de seção retangular fabricadas por fundição de precisão utilizando duas ligas: Ni-Ti e Ti-Ni-Cu. Foi feito um estudo de fundibilidade utilizando simulação computacional, e a partir desses resultados, foi escolhido o melhor desenho de canais para a fundição das molas. Por fim, as molas foram tratadas termicamente e caracterizadas com ensaios de tração, tração e compressão a temperaturas constantes e DSC.

Palavras-chaves: Molas de seção retangular; Ligas com memória de forma; NiTi; TiNiCu; Fundição de precisão; Simulação; Software ProCAST.

ABSTRACT

Rectangular cross section springs are generally used in applications with limited space, especially where total height is constrained. This type of spring stores more energy in a smaller space than circular wire springs of comparable dimensions, despite the non-uniform stress distribution. Thus, combining the higher energy storage capacity of this type of spring with the active and functional characteristics of shape memory alloys (SMA) has enabled an enhancement of this mechanical element's functionalities. The study of the behavior of this type of spring is crucial for predicting its mechanical performance, enabling its use in applications that demand compact designs and high energy storage capacity. In the literature, studies on SMA springs made from wire or filament are quite common, but there are few reports on SMA springs with rectangular sections. This work focused on the experimental mechanical behavior of springs made from shape memory alloys, which was made possible by the infrastructure of LaMMEA/UFCG. Classical material springs were commercially acquired, while prototypes were produced using the investment casting process. In this research, the behavior of rectangular section springs manufactured through investment casting was studied using two alloys: Ni-Ti and Ti-Ni-Cu. A castability study was conducted using computational simulations, and based on the results, the optimal runner system design for spring casting was selected. Finally, the springs underwent heat treatment and were characterized through tensile tests, tension and compression at constant temperatures, and DSC analysis.

Keywords: Rectangular Cross Section Springs; Shape Memory Alloys; NiTi; TiNiCu; Investment Casting; Simulation; ProCAST Software.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Estruturas cristalinas em uma LMF.	18
Figura 2: Mecanismo de mudança de fase em uma LMF.	19
Figura 3: Mudanças na microestrutura durante a transformação de fase entre austenita e martensita.	20
Figura 4: Curva característica de um ensaio de DSC.	21
Figura 5: Superelasticidade em uma mola LMF.	22
Figura 6: Curva tensão-deformação em uma mola LMF SE.	23
Figura 7: Efeito memória de forma para uma mola.	24
Figura 8: Efeito memória de forma simples (EMFS).	25
Figura 9: Breve resumo dos tipos de mola.	28
Figura 10: Parâmetros dimensionais para o projeto de mola.	30
Figura 11: Tipos de extremidades.	31
Figura 12: Áreas para o cálculo do fator de perda (η).	35
Figura 13: Distribuição de deformação em molas com fio de seção circular (esquerda) e de seção retangular (direita).	37
Figura 14: Curva força-deslocamento para duas molas, sendo uma de seção circular e outra de seção retangular.	38
Figura 15: Etapas do processo de fundição de precisão por cera perdida.	40
Figura 16: Processos de fundição utilizando dois métodos.	44
Figura 17: Metodologia utilizada no projeto.	47
Figura 18: Molas comerciais adquiridas para estudo (esquerda) e molas desenhadas no software Autodesk Inventor (direita).	48
Figura 19: Nomenclatura utilizada para as molas estudadas.	49
Figura 20: Canais de alimentação que foram testados para esse estudo.	51
Figura 21: Sistema de aquisição de temperatura.	52
Figura 22: Processo de fabricação do encapsulamento do termopar e do molde adaptado com furo para aquisição de dados.	53
Figura 23: Aquisição da temperatura da pastilha metálica dentro da powercast.	54
Figura 24: Cadinho desenhado no Autodesk Inventor.	55
Figura 25: Canais de alimentação de mola desenhado no Autodesk Inventor (esquerda) e montagem real do modelo em resina (direita).	55
Figura 26: Detalhe dos tamanhos da malha.	56

Figura 27: Etapas para a fabricação de componente LMF.....	57
Figura 28: Impressão dos modelos em resina.....	58
Figura 29: Etapas para a fabricação do molde.....	59
Figura 30: Jateamento com óxido de alumínio.....	60
Figura 31: Metodologia de caracterização das molas fabricadas.....	61
Figura 32: Posicionamento das testemunhas para ensaio de DSC.	61
Figura 33: Temperatura do molde em função do tempo.	63
Figura 34: Curvas de temperatura na powercast com o uso do sensor óptico e termopar.....	64
Figura 35: Ponto de injeção da pastilha metálica no molde.	65
Figura 36: Curvas de fração sólida em função da temperatura calculadas no ProCAST.....	66
Figura 37: Modelo em resina (esq.) e mola fabricada com os canais (dir.).	67
Figura 38: Detalhes da mola fraturada no ensaio de tração.....	68
Figura 39: Porosidades no interior da peça apresentadas em simulação.	68
Figura 40: Desenho CAD dos canais de alimentação.....	69
Figura 41: Detalhe de uma bolha de gás saindo do molde na simulação.	70
Figura 42: Mola fabricada com defeitos provocados por bolhas de gás.....	70
Figura 43: Canais de alimentação com a adição de <i>vents</i>	71
Figura 44: Canais de alimentação posicionados nas espiras da mola.	72
Figura 45: Tipos de acoplamento da mola com a máquina de ensaio. (a) modelo inicial, com o uso de parafusos, porcas e arruelas. (b) Mandril em aço inox. (c) sistema de abas embutidas na mola.	73
Figura 46: Sistema de canais de alimentação com abas.	73
Figura 47: Canais de alimentação com ataques posicionados fora das espiras.	74
Figura 48: Prováveis porosidades na peça, obtidas por simulação.....	75
Figura 49: Processo simplificado para a obtenção da mola.	75
Figura 50: Molas prontas com os canais de alimentação.....	76
Figura 51: Molas de seção retangular prontas após a remoção dos canais de alimentação.....	77
Figura 52: Curvas características para as ligas 50,2Ni49,8Ti e 47Ti32Ni21Cu tratadas termicamente.....	78

Figura 53: Curvas força-deformação para as duas molas da liga Ni50,2Ti49,8 (%at) em diferentes temperaturas.	80
Figura 54: Curvas força-deslocamento para as molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) em diferentes temperaturas: PRet_TiNiCu (esq.) e GRet_TiNiCu (dir.)..	81
Figura 55: Curvas força-deformação para as duas molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) em diferentes temperaturas.	81
Figura 56: Forças máximas para as molas estudadas em cada temperatura. .	83
Figura 57: Curvas força-deslocamento para as duas molas da liga 50,2Ni49,8Ti (%at) na temperatura de 30 °C.....	83
Figura 58: Curvas força-deformação para as duas molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) na temperatura de 30 °C.....	84
Figura 59: Curvas força-deslocamento para as molas de seção circular equivalente das ligas 50,2Ni49,8Ti (esquerda) e 47Ti32Ni21Cu (direita) na temperatura de 30 °C.	85
Figura 60: Curvas força-deslocamento das molas de seção retangular e circular equivalente, na temperatura de 30 °C, para as ligas NiTi e TiNiCu.	86
Figura 61: Curvas força-deformação para as duas molas de aço inox 304 na temperatura de 30 °C.	87
Figura 62: Mola de aço inox 304 após o ensaio.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura utilizada para as molas fabricadas, com suas medidas.	50
Tabela 2: Características das LMF utilizadas.....	51
Tabela 3: Parâmetros escolhidos para o estudo.	56
Tabela 4: Temperaturas de transformação de fase das molas fabricadas.	79
Tabela 5: Dados de força máxima e rigidez secante calculados para as molas estudadas em cada ensaio de ciclagem a temperaturas constantes.	82
Tabela 6: Parâmetros calculados com base nos ensaios realizados nas molas fabricadas com deslocamento de 8 mm.....	88

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1.	LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF).....	17
2.1.1.	Aspectos gerais	17
2.1.2.	Comportamento termomecânico	22
2.1.3.	Ligas do sistema Ni-Ti.....	26
2.2.	MOLAS	27
2.2.1.	Principais parâmetros de projeto	29
2.2.3.	Molas de seção retangular (MSR).....	36
2.3.	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	38
2.3.1.	Fundição de precisão	39
2.3.2.	Principais parâmetros de fundição	41
2.3.3.	Simulação de fundição	41
2.3.4.	Softwares comerciais	44
2.3.5.	ESI ProCAST	45
3.	METODOLOGIA	46
3.1.	DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA	48
3.2.	PROJETO DOS CANAIS DE ALIMENTAÇÃO	50
3.3.	LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS.....	51
3.4.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO	52
3.4.1.	Ensaio da perda de calor do molde quando sai do forno	52
3.4.2.	Análise da temperatura da pastilha metálica dentro da máquina <i>powercast</i>	53
3.5.	SIMULAÇÃO DE FUNDIÇÃO	54
3.6.	FABRICAÇÃO.....	57
3.7.	CARACTERIZAÇÃO DAS MOLAS	60
4.	RESULTADOS	63
4.1.	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A CALIBRAÇÃO DO MODELO	63
4.1.1.	Ensaio da perda de calor do molde quando sai do forno	63
4.1.2.	Análise da temperatura da pastilha metálica dentro da máquina <i>powercast</i>	64
4.2.	FABRICAÇÃO E SIMULAÇÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DOS DESENHOS DE CANAIS DAS MOLAS.....	66

4.3.	CARACTERIZAÇÃO	77
4.3.1.	Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)	77
4.3.2.	Ensaio mecânico	80
5.	CONCLUSÕES	90
6.	REFERÊNCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

Materiais clássicos como metais e ligas metálicas têm sido fundamentais em aplicações estruturais por séculos. A seleção desses materiais se dá com base em suas propriedades macroscópicas para atender a funções específicas. Com o passar do tempo, a demanda por materiais de alto desempenho aumentou, fazendo surgir avanços na área de ciência dos materiais, de forma que se tornou possível adaptar a microestrutura dos materiais para atender a funções específicas, criando materiais ativos ou multifuncionais que combinam propriedades como atuação, sensoriamento e controle em uma única estrutura. Assim, tais materiais abrem caminho para aplicações inovadoras, demonstrando seu potencial para enfrentar desafios futuros da engenharia (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015).

O avanço na pesquisa permitiu o surgimento de materiais capazes de reconhecer estímulos externos não mecânicos provenientes do ambiente e responder de forma reversível a eles. Esses materiais avaliam a magnitude do estímulo recebido e reagem de maneira otimizada, geralmente alterando suas propriedades físicas ou mecânicas, como uma mudança macroscópica de forma (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). Esses são os materiais inteligentes - um subgrupo dos materiais ativos/multifuncionais, onde se encontra as ligas com memória de forma (LMF).

As ligas com memória de forma (LMFs) são materiais metálicos que reagem a variações de temperatura gerando uma deformação macroscópica significativa, que pode variar de 4% a 10% em tração uniaxial. Essa característica as torna atuadores termomecânicos naturais, capazes de realizar trabalho mecânico de forma eficiente (SIMÕES, 2017).

As ligas com memória de forma podem apresentar dois comportamentos característicos bem distintos: a superelasticidade (SE) e efeito memória de forma (EMF). O comportamento superelástico recebe essa denominação devido à capacidade das ligas com memória de forma (LMF) de suportarem grandes deformações, alcançando até 10% em tração uniaxial, sob carregamento mecânico, que são completamente recuperadas após o descarregamento (SIMÕES, 2017). Efeito de memória de forma refere-se à capacidade dessas

ligas de recuperar uma determinada quantidade de deformação aparentemente plástica que ocorre a uma baixa temperatura ($T < M_f$) através do aquecimento acima de uma temperatura crítica (A_f) (ELAHINIA, 2016; SIMÕES, 2017).

Dentre as ligas com memória de forma, as que mais se destacam são as que possuem capacidade de recuperar uma quantidade substancial de deformação ou de gerar uma força de restituição significativa durante a mudança de forma. Elas podem ser classificadas em duas famílias: as ligas à base de Ni-Ti (Ni-Ti, Ni-Ti-Cu, Ni-Ti-Nb) e as de base cobre (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Mn). As ligas que mais se destacam comercialmente são as de Ni-Ti por suas propriedades (SIMÕES, 2017). Nesse trabalho foram utilizadas duas ligas de base NiTi: uma liga NiTi superelástica e uma TiNiCu termoativada. A liga de Níquel-Titânio (NiTi) tem sido cada vez mais utilizada na prática ortodôntica, sendo aplicada em arcos ortodônticos, braquetes e molas helicoidais (ASSAWAKAWINTIP et al., 2022).

A capacidade das ligas com memória de forma de responderem de maneira reversível às mudanças de temperatura externa, alterando suas propriedades físicas e mecânicas, permitiu sua aplicação em diversas áreas. Em sistemas termomecânicos, as LMFs podem atuar como sensores e atuadores combinados, detectando mudanças em estímulos externos e monitorando funções específicas. Tais características permitiram o surgimento de diversas aplicações em diversas áreas, como a biomédica, automotiva, aeroespacial, amortecimento de vibrações e sensoriamento e controle (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015).

As LMFs têm sido utilizadas de diversas formas, mas uma em especial têm se destacado: as molas. As molas de ligas com memória de forma têm atraído a atenção dos pesquisadores devido às suas características excepcionais no campo de atuadores e controle de vibrações (ABUBAKAR et al., 2020). Além disso, um atuador de mola, quando comparado ao seu equivalente em forma de fio, oferece uma maior amplitude de movimento em um espaço mais compacto, exigindo uma força de atuação reduzida (ELAHINIA, 2016).

Atualmente, a literatura apresenta uma ampla gama de estudos sobre molas, abrangendo diversos tipos, como molas helicoidais, planas, belleville,

entre outros. Contudo, a maioria desses trabalhos foca em molas helicoidais com fio de seção circular, enquanto são escassos os estudos que exploram molas com fio de seção retangular. Além disso, conforme destacado por SANTIAGO (2018), os trabalhos relacionados à fabricação de molas por fundição de precisão são raros, tornando esta técnica, utilizada na produção dos protótipos deste estudo, ainda pouco explorada academicamente.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho de pesquisa foi a simulação, fabricação e caracterização de protótipos de molas de seção retangular, a partir de Ligas com Memória de Forma (LMF) utilizando a tecnologia de fundição de precisão rápida. Foi possível otimizar os desenhos dos canais de alimentação através da simulação de fundição e caracterizá-las através de ensaios mecânicos.

Além do objetivo geral, foram traçados objetivos específicos, com o intuito de guiar o andamento da pesquisa. Os objetivos específicos são:

- Selecionar uma liga LMF do sistema Ti-Ni para fabricação de protótipos de molas de compressão de seção retangular;
- Simular o processo de fundição de precisão para a otimização dos desenhos dos canais de alimentação para obtenção de protótipos de molas em software comercial (ESI ProCAST);
- Fabricar protótipos de molas de compressão de seção retangular de LMF;
- Realizar a caracterização termomecânica dos protótipos de molas de seção retangular.

2. REVISÃO DA LITERATURA

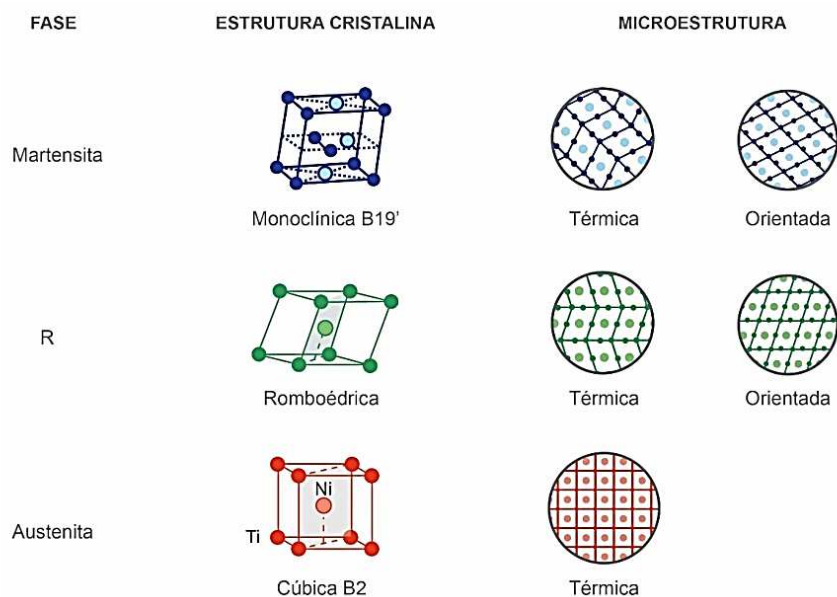
2.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF)

As ligas com memória de forma, também chamados de materiais inteligentes, são uma classe de metais que têm a capacidade de reverter grandes deformações mecânicas (em torno de 10% para ligas Ni-Ti), mesmo sob tensões consideráveis (DE SOUZA et al., 2021). Nesse capítulo, serão abordados os principais aspectos sobre as LMF e seus diferentes comportamentos termomecânicos e aplicações.

2.1.1. Aspectos gerais

Com relação à estrutura cristalina, as mudanças de fase nas LMF são em meio sólido e ocorrem entre as fases austenita (A) e martensita (M). A fase austenita é mais dura e de alta temperatura, já a martensita é menos rígida e de temperatura mais baixa (ELAHINIA, 2016). A fase austenita apresenta estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC). Já a martensita não possui uma estrutura cúbica, podendo ser tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica (SIMÕES, 2017). Além disso, algumas ligas podem apresentar uma fase pré-martensítica ou romboédrica, chamada de fase R, como mostra a Figura 1.

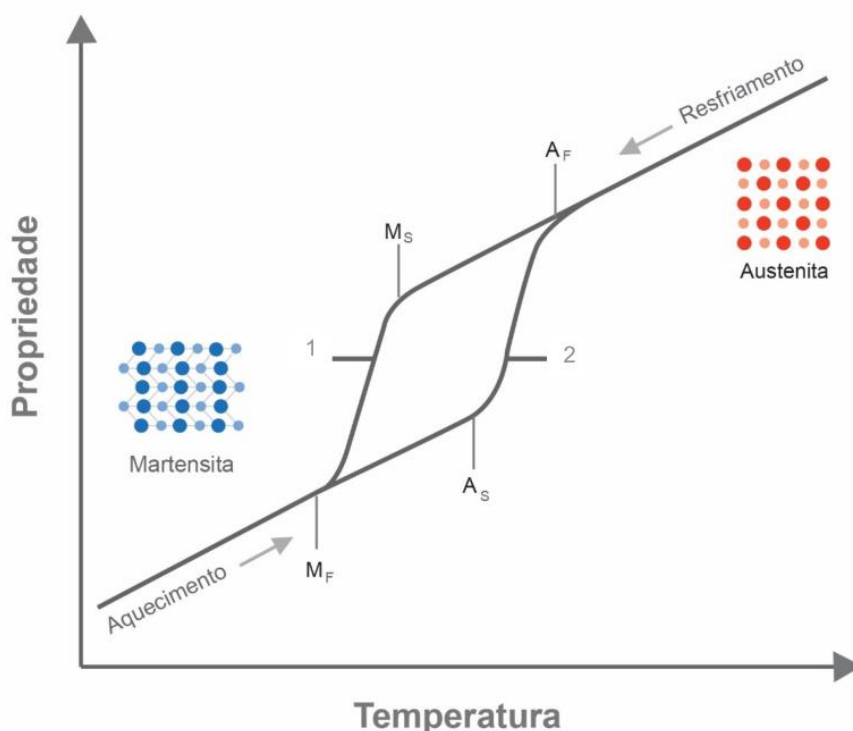
Figura 1: Estruturas cristalinas em uma LMF.



Fonte: SIMÕES (2017).

Como já mencionado, os processos de transformação de fase em uma LMF ocorrem através da transformação de fase entre a martensita (M) e austenita (A). Como ocorre em todos os processos desse tipo, nas mudanças de fase das LMF, calor latente é liberado nas transformações diretas ($A \rightarrow M$) (processo exotérmico) e nas transformações reversas ($M \rightarrow A$) o calor é absorvido (processo endotérmico). Ambos os processos de SE e EMF estão associados com a dissipação de energia. Assim, o comportamento de uma LMF está intimamente relacionado à temperatura (DE SOUZA et al., 2021). Segue na Figura 2 o funcionamento básico do mecanismo de mudança de fase em uma LMF qualquer.

Figura 2: Mecanismo de mudança de fase em uma LMF.

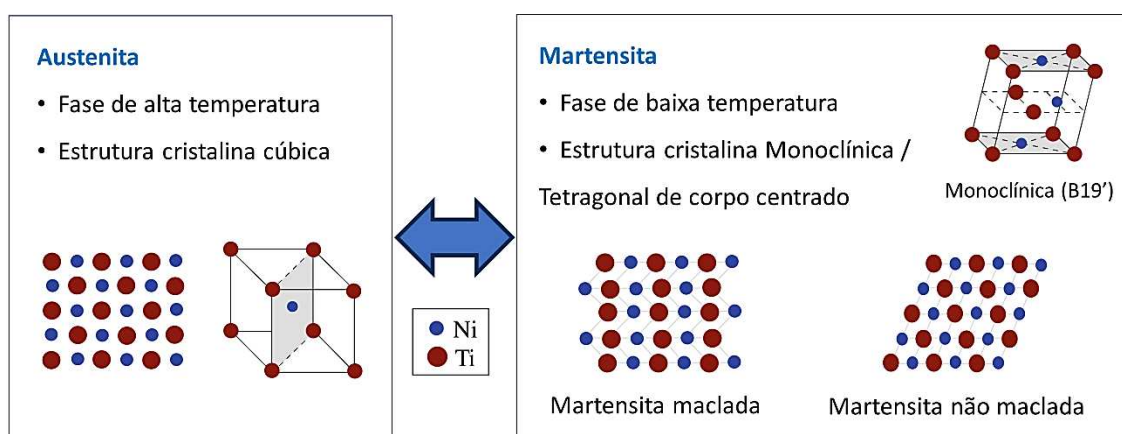


Fonte: SIMÕES (2017).

Com base na Figura 2, temos uma representação de uma transformação de fase em uma liga com memória de forma, onde podemos ver as fases martensita (esquerda) e austenita (direita). Seguindo pela linha 1, temos o processo de transformação direta, que trata do resfriamento da liga. O processo começa pela austenita e termina na fase martensita. Note que a transformação de fase passa por uma transição, iniciando pela austenita final (A_f) e terminando na martensita inicial (M_s). De maneira similar, durante o aquecimento, temos a transformação reversa, da martensita para a austenita. De forma análoga, temos uma transição entre as fases, da martensita final (M_f) para a austenita inicial (A_s) (LAGOUDAS 2008). Ainda sobre o fenômeno de mudança de fase, vale salientar que ele apresenta 3 regiões diferentes; os trechos lineares são de expansão térmica das fases A e M e uma região que está relacionada à mudança de fase. A área entre as curvas de histerese é relacionada com a energia dissipada durante o processo (SIMÕES, 2017).

As transformações de uma fase para outra não ocorre por difusão de átomos, mas pelas distorções de cisalhamento. Cada cristal de M formado pode ter diferentes direções de orientação, chamadas de variantes (LAGOUDAS 2008). As variantes podem se apresentar de duas formas distintas: martensita maclada (do inglês *twinned martensite*), formada pelo resfriamento do material, e a martensita não-maclada ou reorientada (do inglês *detwinned martensite*), que é obtida após aplicação de um carregamento mecânico (MONTENEGRO, 2016). A reversibilidade de transformação entre as fases A (fase mãe) e M (fase produto) e vice-versa são a base para o comportamento único das LMF (LAGOUDAS 2008). As mudanças de microestrutura podem ser vistas na Figura 3.

Figura 3: Mudanças na microestrutura durante a transformação de fase entre austenita e martensita.



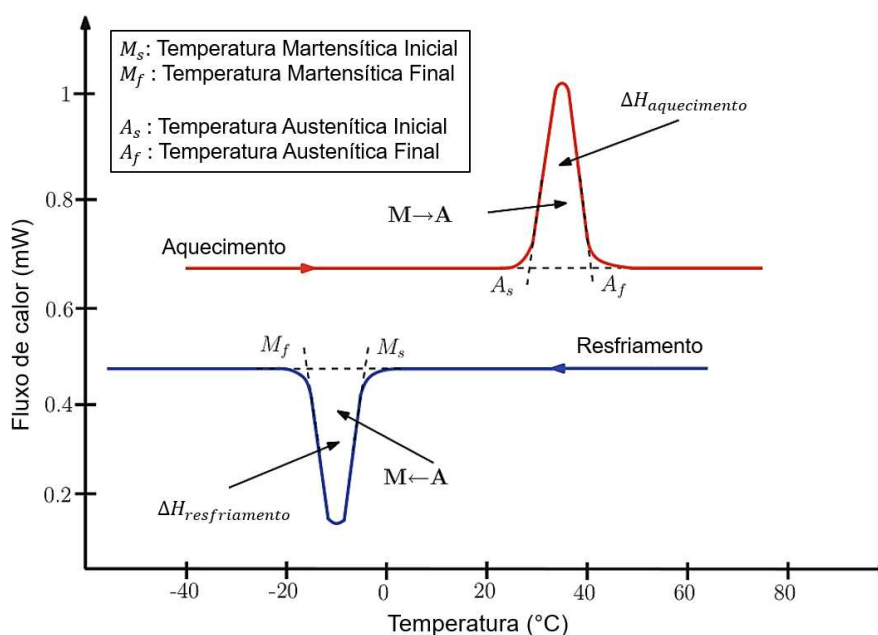
Fonte: Adaptado de RAO; SRINIVASA; REDDY (2015).

As temperaturas da mudança entre as fases A e M, também chamadas temperaturas de transformação (TTs), são algumas das propriedades mais importantes no estudo das LMF (ELAHINIA, 2016). A temperatura que inicia a transformação de A em M no resfriamento é a martensita inicial (M_s) e termina na martensita final (M_f), onde há somente a fase martensita. De forma similar ocorre no aquecimento, onde há a transformação de martensita em austenita, com as fases austenita inicial (A_s) e austenita final (A_f) (SIMÕES, 2017). Para

medir essas temperaturas são feitos alguns testes, tais como a calorimetria exploratória diferencial (DSC) (SIMÕES, 2017).

Segundo LAGOUDAS (2008, p. 21), o calor de transformação e as temperaturas de transformação são mais comumente determinados através da técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os detalhes do uso dessa técnica para ligas Ni-Ti são abordados pela norma ASTM F2004-05R10, que diz que as amostras devem ser recozidas e postas em pequenas placas de alumínio, onde é realizado o teste. Em alguns casos, uma das placas, a de referência, fica vazia. O aparelho de DSC é capaz de aquecer e resfriar as amostras a uma taxa de até 10 °C/min (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). O aparelho de DSC é ligado a um computador, e automaticamente salva a diferença entre as energias das amostras nas duas placas, e gera uma curva de fluxo de calor em função da temperatura (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). Segue na Figura 4 uma típica curva de um resultado de DSC, com os característicos picos que representam o fluxo de calor latente devido às mudanças de fase.

Figura 4: Curva característica de um ensaio de DSC.



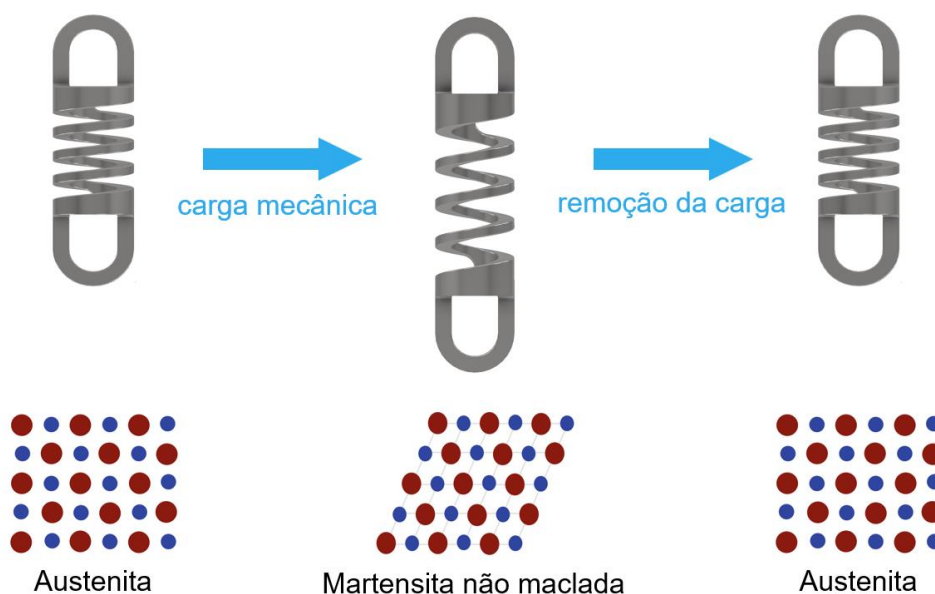
Fonte: Adaptado de RAO; SRINIVASA; REDDY (2015).

2.1.2. Comportamento termomecânico

O comportamento de uma liga de memória de forma pode ser classificado em 2 tipos principais: superelasticidade (SE), efeito memória de forma (EMF) (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). As mudanças de propriedades nas LMF podem ser notadas pela transformação martensítica. A fase martensítica induzida por tensão promove a superelasticidade (SE); martensita induzida pela temperatura é relacionada ao efeito memória de forma (EMF) (BRAGA, 2022). Essa é a classificação seguida por esse trabalho e será explicada com mais detalhes a seguir.

Superelasticidade (SE) ou pseudoelasticidade é uma propriedade das LMF que se refere ao processo de recuperação de uma grande deformação (até 10% em tração uniaxial) em temperatura constante, acima da temperatura austenita final (A_f) (Simões, 2017, CHO; PARK; KIM, 2021). Na figura 5 pode ser visto o fenômeno de superelasticidade em uma mola helicoidal de tração.

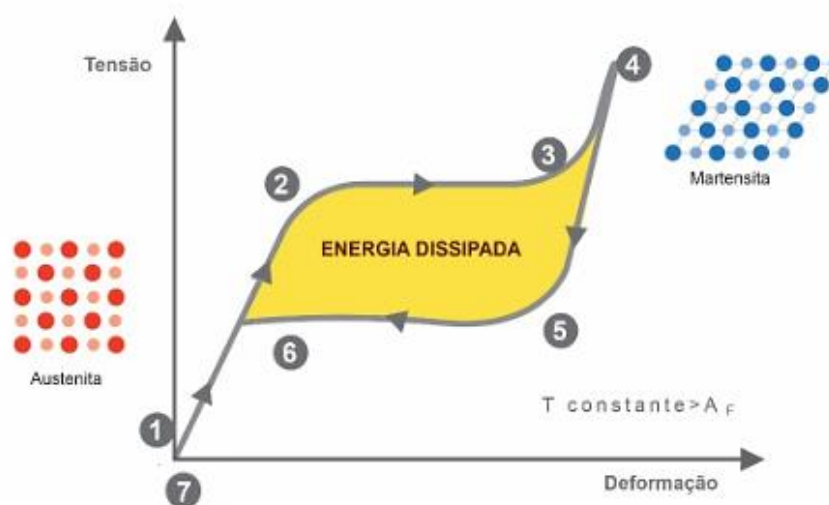
Figura 5: Superelasticidade em uma mola LMF.



Fonte: Adaptado de SANTIAGO (2018).

Esse efeito ocorre quando o material se encontra em temperaturas superiores a A_f , estando com uma estrutura completamente austenítica (parte 1). Da Figura 6, pode-se verificar que do ponto 1 para o ponto 2 a mola é submetida a um carregamento mecânico, fazendo ela se deformar elasticamente até um limite crítico. Aumentando a carga para o ponto 3, temos uma nova fase: a martensita orientada. Nessa fase, a estrutura cristalina cúbica monoclínica proporciona grandes deformações, de 6 a 8% em tração uniaxial. Existe um limite para que a deformação seja no regime elástico, que, caso seja ultrapassado, gera deformações permanentes no material. Caso esse limite não tenha sido ultrapassado, ao remover a carga, a mola retornará ao seu estado 4, que é igual ao estado inicial (1). O efeito superelástico foi graficamente representado em uma curva tensão-deformação de acordo com a Figura 6 (SIMÕES, 2017).

Figura 6: Curva tensão-deformação em uma mola LMF SE.

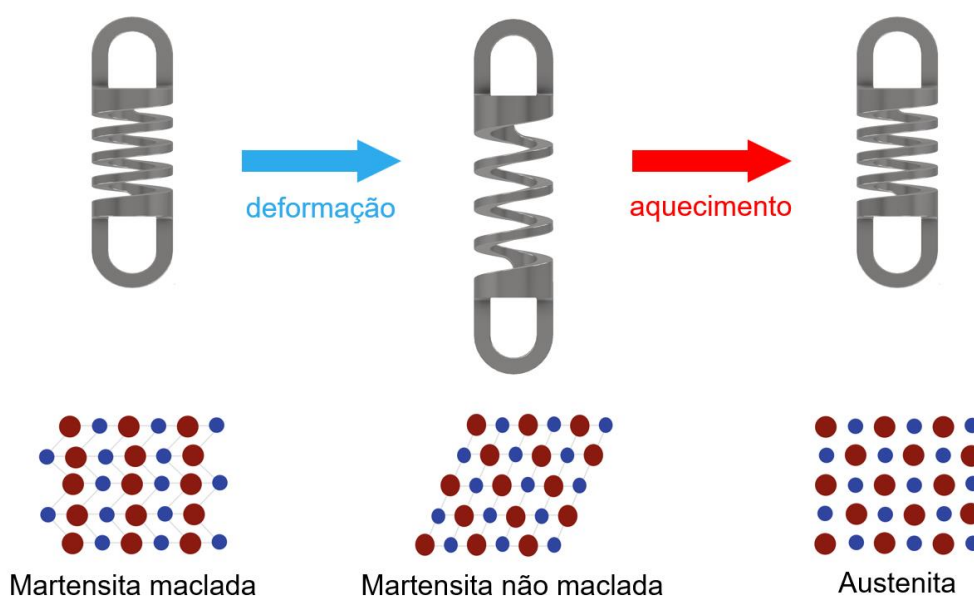


Fonte: Simões (2017).

O efeito memória de forma (EMF) é mostrado quando o material é submetido a uma deformação aparentemente plástica enquanto está na forma martensita maclada (*twinned martensite*) a baixa temperatura e então a carga é removida numa temperatura abaixo de A_s . Quando se aquece o material deformado acima de A_f , a LMF vai recuperar sua forma original (LAGOUDAS, 2008, SIMÕES, 2017).

O efeito memória de forma simples (EMFS) é mostrado na Figura 7 para uma mola. No início, o atuador está a uma temperatura abaixo da martensita final (M_f), e então é aplicada uma força que deforma a mola. Quando descarregada, apenas a deformação elástica é restabelecida, restando uma deformação residual que pode ser recuperada. Para recuperar completamente a sua forma, basta aquecer a mola acima da temperatura austenita final (A_f) (SIMÕES, 2017).

Figura 7: Efeito memória de forma para uma mola.



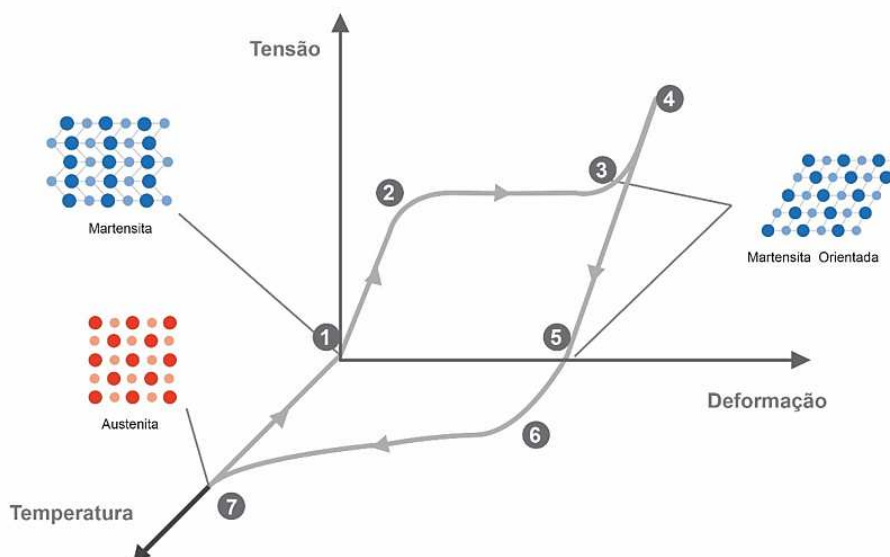
Fonte: Adaptado de SANTIAGO (2018).

O EMF pode ser observado em uma curva tensão deformação na Figura 8, com os pontos de 1 a 7 indicando as mudanças de fase. Assim, entre os pontos 1 e 2, a LMF está abaixo de M_f e há um carregamento praticamente elástico, com baixa deformação. Do ponto 2 para o 3, há uma grande deformação (de 6 a 8%), com as variantes martensíticas se orientando na direção do carregamento. Continuando as deformações a partir do ponto 3, as deformações podem se tornar irreversíveis devido ao deslizamento de planos. Além disso, durante o descarregamento entre os pontos 3 e 4, é possível perceber a recuperação elástica da fase martensítica, com uma deformação residual (entre

4 e 6%); assim, o material não irá retornar ao ponto 1, tal como ocorre com os metais clássicos (SIMÕES, 2017).

Tais deformações podem ser recuperadas após o aquecimento, o que torna as LMF tão distinta dos metais tradicionais. No caminho 5 a 7, ocorre a recuperação com o aquecimento acima de A_s (ponto 6). Com isso, temos a alteração estrutural para uma fase mais rígida, a austenita. No ponto 7, a transformação está completa, com a temperatura igual ou superior a A_f . Portanto, temos o efeito memória de forma simples (EMFS), mostrado na Figura 8 (SIMÕES, 2017).

Figura 8: Efeito memória de forma simples (EMFS).



Fonte: Simões (2017).

2.1.3. Ligas do sistema Ni-Ti

De acordo com SIMÕES (2017, p. 28), as ligas com memória de forma (LMF) são materiais metálicos que possuem a capacidade de responder a mudanças de temperatura, se deformando de 4 a 10 % em tração uniaxial; assim, eles são atuadores capazes de realizar trabalho mecânico. Existem diversas ligas que possuem essas características, mas grande parte são de duas famílias: ligas à base de cobre (Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Al-Mn, Cu-Al-Be, etc) e ligas à base de níquel-titânio (Ni-Ti, Ni-Ti-Cu, Ni-Ti-Nb, etc). As LMF de Ni-Ti são as mais utilizadas, apresentando propriedades de recuperação de deformação mais expressivas.

Segundo LAGOUDAS (2008, p. 23), dentre as ligas LMF conhecidas, as do sistema Ni-Ti são as que têm sido mais estudadas, com um número maior de aplicações comerciais. Além disso, essas ligas possuem uma grande variedade de aplicações, que podem ser superelástica (SE), efeito memória de forma (EMF) e EMF duplo. Isso se dá porque mínimas variações na composição química e no processamento influenciam significativamente o comportamento termomecânico dessas LMF (SIMÕES, 2017).

As ligas NI-Ti possuem boas propriedades, como resistência à corrosão e são biocompatíveis, podendo ter aplicações biomédicas. Outro ponto interessante é que as propriedades cristalográficas e termomecânicas dessas ligas são mais conhecidas, quando comparadas com outras ligas. Além disso, para cada composição, os efeitos dos tratamentos térmicos e suas temperaturas de transformação são bastante estudados (LAGOUDAS, 2008).

Com base no exposto, uma das ligas escolhidas para esse trabalho foi a liga superelástica de composição 50,21Ni-49,8Ti (%at). Um dos motivos que justifica a seleção é que a tecnologia de fabricação e caracterização de componentes a partir dessa liga é dominada pelo laboratório LaMMEA/UFCG, mesmo com todas as dificuldades relacionadas ao seu processamento. Tais dificuldades incluem o alto ponto de fusão do titânio e sua reatividade com o oxigênio, exigindo assim equipamentos específicos com atmosfera controlada.

A liga Ni-Ti é a mais estudada de todas as LMF por causa de suas propriedades e porque pode apresentar SE e EMF, ou seja, histerese mecânica e térmica (BRAGA et al., 2022). Hoje, mais de 90% de todas as aplicações comerciais de LMF são das ligas Ni-Ti binárias ou ternárias, com Ni-Ti-Cu e Ni-Ti-Nb (ELAHINIA, 2016).

As proporções de níquel e titânio na liga Ni-Ti podem provocar mudanças significativas em suas propriedades. Ligas com altas quantidades de níquel (acima da equiatômica) apresentam SE, enquanto com titânio em maior quantidade elas podem apresentar comportamento EMF (BRAGA et al., 2022).

2.2. MOLAS

Norton (2013) diz que praticamente qualquer componente feito de um material elástico possui alguma ‘mola’ dentro de si. Esta afirmação faz sentido, visto que todos os componentes de uma máquina se deformam quando uma carga externa é aplicada sobre eles (GONEN; ORAL; CAKIR, 2015). Alguns materiais têm maior facilidade para se deformar, outros quase não se deformam, como é o caso dos materiais frágeis. Um elemento só se torna uma “mola” caso a deformação esteja dentro do limite elástico do material, (GONEN; ORAL; CAKIR, 2015) caso contrário, a peça se deforma e pode até se romper. Assim, durante o esforço a peça armazena energia e, depois disso, o material volta à sua forma inicial, liberando energia.

De acordo com Gonen (2015), a tal “mola” que existe nos componentes (de máquinas) se deforma em uma escala bem pequena, podendo ser imperceptível em alguns casos. Porém, nas molas, este fenômeno ocorre em uma escala muito maior (GONEN; ORAL; CAKIR, 2015). Isso se dá por causa de inúmeros fatores, como por exemplo, o material da mola, o formato, tamanho e outras especificações de projeto.

As molas são elementos de máquina presentes em praticamente todo lugar, desde coisas simples como um prendedor de roupas até uma mola complexa utilizada em uma suspensão automotiva. Mola pode ser definida como

2.2.1. Principais parâmetros de projeto

Como já foi mencionado, existem diversos tipos de mola no mercado. Quando estamos desenvolvendo o projeto de uma máquina, o ideal é que o façamos de tal forma que possamos utilizar molas comerciais, produzidas em larga escala. O mesmo ocorre para rolamentos, parafusos, tubos, perfis, etc. Essa é uma ótima prática, pois facilita a reposição de peças e torna o custo mais acessível.

Entretanto, em alguns casos é necessário que se fabrique alguns componentes sob medida, devido às especificidades do projeto. Assim, é necessário que se faça o projeto da mola. Não há segredos no projeto de uma mola. Os métodos disponíveis atualmente evoluíram de antigos métodos empíricos até os métodos mais modernos, que utilizam computador (CARLSON, 1978). Para projetar uma mola, pode-se usar um conjunto de fórmulas matemáticas, gráficos que relacionam variáveis ou programas de computador.

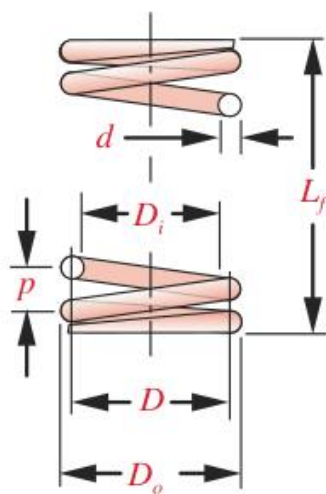
Além disso, todos os métodos de projeto de mola derivam de uma série de propriedades dos materiais como a resistência, tensão e deformação. Assim, as fórmulas são derivadas desses princípios, e através de sua resolução para algumas faixas de valores temos a produção das conhecidas curvas e tabelas de projeto. A partir daí, pode-se armazenar estes dados em um computador e pode-se calcular os principais parâmetros de desenho de mola rapidamente (CARLSON, 1978).

Contudo, as fórmulas não são exatas para este caso: elas precisam de fatores de correção, pois as fórmulas funcionam para o comportamento do torque aplicado em um eixo linear, mas não para uma mola em que o arame é torcido. Para o caso de uma mola submetida a uma carga, o torque é maior na parte interna da espira da mola do que na parte externa (CAIN, 1988). Um exemplo dessa característica pode ser visto na comparação de uma mola e uma barra de torção. Se faz necessário utilizar o fator de correção na mola helicoidal, mas não para uma barra de torção. Assim, ao longo dos anos, uma vasta gama de materiais, tamanhos e formatos foram aperfeiçoados. Além disso, mesmo com os cálculos, algumas vezes temos que ajustar a mola através de tentativa e erro.

Porém, pode-se ajustar uma mola com algumas poucas tentativas e, às vezes, uma só já é suficiente (CAIN, 1988).

Com relação às dimensões, os principais parâmetros para o projeto de molas helicoidais são os mostrados na Figura 10 (NORTON, 2013). Assim, o diâmetro do fio (d), o diâmetro médio da espira (D), comprimento livre (L_f), número de espiras (N_t) ou o passo (p) são parâmetros essenciais para o cálculo de carga, deflexão, constante da mola, dentre outros. O diâmetro externo é obtido somando-se o diâmetro médio com o diâmetro do fio ($D_o = D + d$); Para o diâmetro interno é feita a subtração ($D_i = D - d$). Os diâmetros interno e externo são úteis para saber o tamanho mínimo do furo onde a mola deve ser assentada, assim como o máximo tamanho de pino. Outras fórmulas serão mostradas no decorrer deste material (NORTON, 2013).

Figura 10: Parâmetros dimensionais para o projeto de mola.

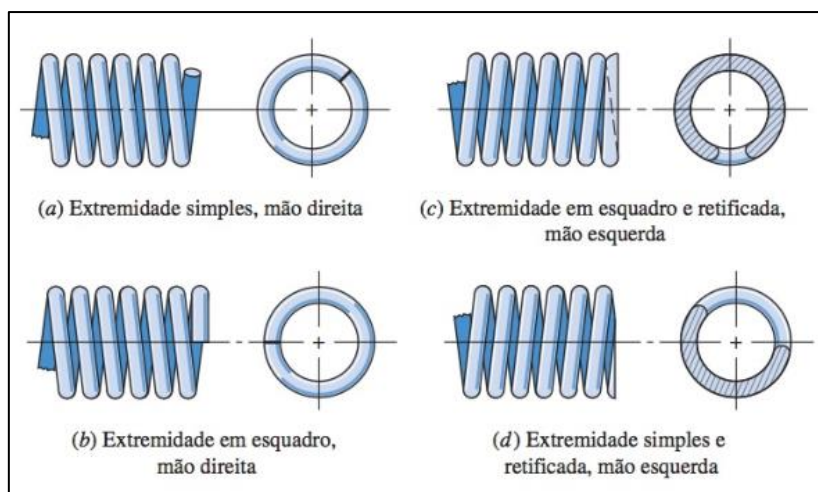


Fonte: NORTON (2013).

Uma característica importante para o projeto de uma mola de compressão é com relação às suas extremidades, podendo elas serem de extremidade simples, simples esmerilhada, esquadrejada e extremidade esquadrejada e esmerilhada, como pode ser visto na Figura 11 (BUDYNAS; NISBETT, 2016. NORTON, 2013. CARLSON, 1978). Além disso, dependendo do tipo de

acabamento a mola pode possuir mais ou menos espiras ativas, pois “sacrificam” algumas espiras da mola para facilitar seu assentamento, de forma que elas não funcionam mais.

Figura 11: Tipos de extremidades.



Fonte: BUDYNAS; NISBETT (2016).

De acordo com CARLSON (1978), o tipo de extremidade mais utilizado e mais barato é o esquadrado (b), com D/d maior que 10 e fios de mola com pequenos diâmetros (abaixo de 0,80 mm). Norton (2013) diz que “esquadrear as extremidades envolve levar as espiras de extremidade ao escoamento para torná-las planas e remover os seus passos. Isso melhora o alinhamento.”

O segundo tipo mais utilizado é a extremidade esquadrejada e esmerilhada (também chamada de esquadrada e retificada), que torna o carregamento mais uniforme e deixa a mola alinhada sem entortar. Além disso, molas com este tipo de extremidade devem possuir pequena tolerância de carga ou mínima flambagem (CARLSON, 1978). Segundo NORTON (2013), este tipo de tratamento de extremidade mais caro, e é recomendado para molas de máquinas. Entretanto, molas com fios de diâmetro do fio menor que 0,5 mm devem ser esquadrejadas, porém sem esmerilhamento.

As extremidades também podem ser simples ou simples e esmerilhada. O tratamento simples se dá somente pelo corte das espiras, mantendo o passo original da mola. Neste tipo, mais barato e raramente utilizado, há um pobre alinhamento da mola com relação à superfície onde ela é assentada (NORTON, 2013). Esmerilhar as extremidades é uma alternativa para melhorar o alinhamento da mola, produzindo uma superfície normal para aplicação de carga. Algo em comum entre estes dois tipos é que elas se enroscam durante o transporte; além disso, ambos os tipos não conseguem ser fixadas retas nem ficam alinhadas sem tombar.

O Quadro 1 fornece algumas fórmulas para o cálculo do comprimento sólido, comprimento livre, passo e total de espiras. Note que as extremidades simples não “sacrificam” nenhuma espira, logo o número de espirais de extremidade é zero. Já as outras possuem espirais de extremidade, sendo uma para a simples e retificada e duas para as extremidades esquadradas e esmerilhadas.

Quadro 1: fórmulas para o cálculo do comprimento sólido, comprimento livre, passo e total de espiras.

Termo	Tipo de extremidades de mola			
	Simples	Simples e retificada	Em esquadro ou fechada	Em esquadro e retificada
Espirais de extremidade, N_e	0	1	2	2
Total de espirais, N_t	N_a	$N_a + 1$	$N_a + 2$	$N_a + 2$
Comprimento livre, L_0	$pN_a + d$	$p(N_a + 1)$	$pN_a + 3d$	$pN_a + 2d$
Comprimento sólido, L_s	$d(N_t + 1)$	dN_t	$d(N_t + 1)$	dN_t
Passo, p	$(L_0 - d)/N_a$	$L_0/(N_a + 1)$	$(L_0 - 3d)/N_a$	$(L_0 - 2d)/N_a$

Fonte: BUDYNAS; NISBETT (2016).

2.2.2. Equações de projeto de mola

Existem relações entre os principais parâmetros de projeto de uma mola, onde sua variação pode aumentar ou reduzir a capacidade de carga que a mola suporta. Tais relações podem servir como base para o ajuste das características da mola na fase de projeto. A carga (F) é calculada com base na equação do torque e a equação da força máxima de cisalhamento. A distância r é a metade do diâmetro médio da espira. Assim, para o torque, temos:

$$T = F \cdot r = F \cdot \frac{D}{2} = \frac{FD}{2} \quad (1)$$

Onde:

F = força aplicada na mola

r = distância do ponto de aplicação da força até o fio da mola

Substituindo T na fórmula da força máxima de cisalhamento, teremos:

$$f_s = \frac{16T}{\pi d^3} = \frac{16FD}{2\pi d^3} = \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (2)$$

Resolvendo para a carga, temos:

$$\boxed{F = \frac{f_s \pi d^3}{8D}} \quad (3)$$

Esta é a equação da carga em uma mola de compressão helicoidal. Com base na fórmula, pode-se observar que a carga suportada por uma mola é diretamente proporcional ao cubo do diâmetro do fio, ou seja, ela aumenta se

aumentarmos o diâmetro do fio e vice-versa. Em outras palavras, se dobrarmos o diâmetro do fio, a mola fica 8 vezes mais rígida (CAIN, 1988). Além disso, se relacionarmos o diâmetro médio e a carga, podemos concluir que a carga é inversamente proporcional ao diâmetro médio. Logo, dobrando-se o diâmetro médio D , a mola fica com metade da capacidade de carga (CAIN, 1988).

Outro ponto interessante é com relação ao número de espiras, que por sua vez não faz diferença nenhuma na capacidade de carga de uma mola (CAIN, 1988). Por isso, pode-se aplicar diferentes tipos de acabamento de extremidades que a capacidade da mola não varia, mesmo com a diferença entre o número de espiras ativas. Entretanto, o número de espiras tem influência na deflexão da mola (y), de forma que quanto maior o número de espiras, maior a deflexão da mola. A fórmula da deflexão é dada por:

$$y = \frac{8FD^3N}{Gd^4} \quad (4)$$

A constante da mola (k) é dada pela carga (F) sobre a deflexão (y). Assim:

$$y = \frac{8FD^3N}{Gd^4} \rightarrow \frac{F}{y} = \frac{Gd^4}{8D^3N} \quad (5)$$

Como F/y é a constante da mola, temos:

$$\boxed{k = \frac{Gd^4}{8D^3N}} \quad (6)$$

SANTIAGO (2018) fabricou molas de seção circular com uma liga NiTi e extraiu alguns parâmetros, tais como a rigidez secante (k_s), energia dissipada

por ciclo (W_d) e fator de perda (η). A rigidez secante pode ser calculada através da fórmula a seguir:

$$k_s = \frac{F_{max} - F_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (7)$$

Onde:

F_{min} = Força mínima (N)

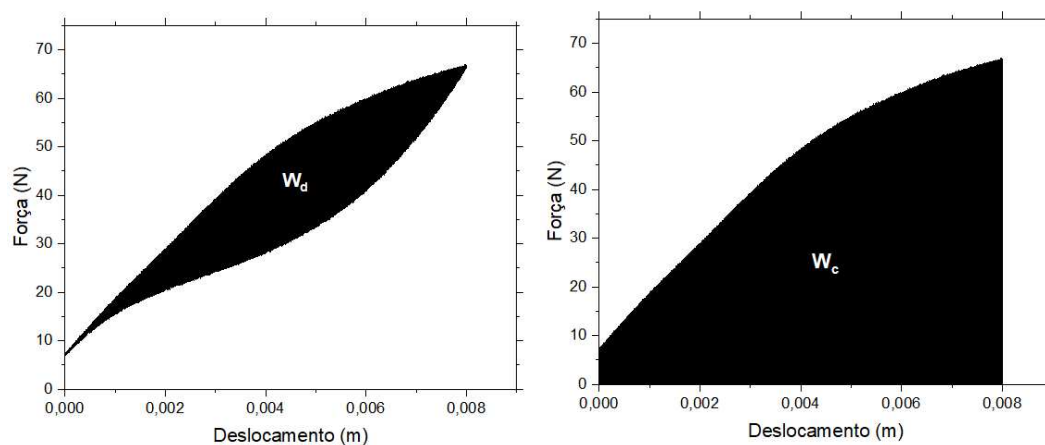
F_{max} = Força máxima (N)

D_{min} = Deflexão mínima (N)

D_{max} = Deflexão máxima (N)

Outro parâmetro analisado foi o fator de perda, que é uma medida utilizada para avaliar a dissipação de energia em materiais ou sistemas mecânicos durante carregamentos cíclicos. SANTIAGO (2018); NESPOLI et al., (2017). O cálculo do fator de perda é feito levando em consideração duas áreas, a energia armazenada durante o carregamento (W_d) e a energia total durante o ciclo (W_c), como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12: Áreas para o cálculo do fator de perda (η).



Fonte: Adaptado de NESPOLI et al. (2017).

A fórmula para o cálculo do fator de perda pode ser vista a seguir:

$$\eta = \frac{W_d}{2\pi W_c} \quad (8)$$

Onde:

W_d = Energia armazenada durante o carregamento

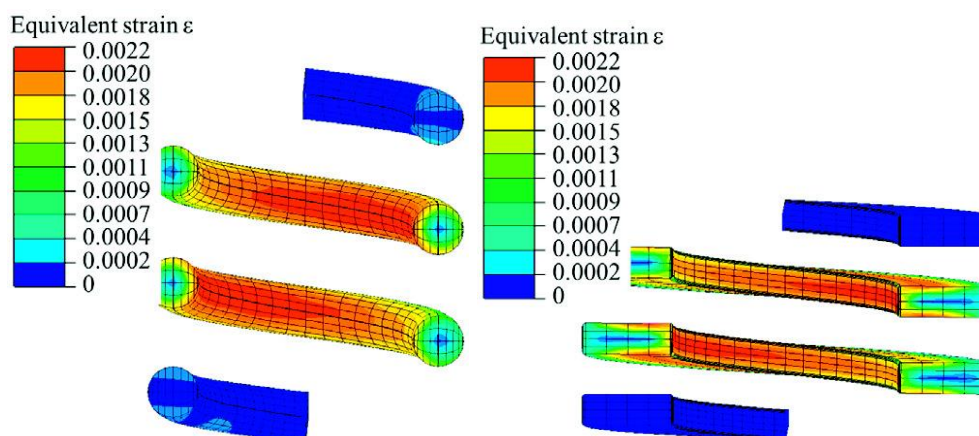
W_c = Energia total durante o ciclo

2.2.3. Molas de seção retangular (MSR)

Molas de seção retangular (MSR) são comuns na indústria, embora sua fabricação seja difícil e cara, quando comparado com molas de seção circular (GONEN; ORAL; ÇAKIR, 2015). Por esse motivo, Molas de fio redondo são as mais comumente utilizadas para molas helicoidais. As molas de seção retangular são mais utilizadas em processos industriais onde é necessário maior rigidez em um menor espaço (GONEN; ORAL; ÇAKIR, 2015).

Uma desvantagem das MSR quando comparadas às molas de fio redondo é a maior concentração de tensão com a curvatura da espira, e por isso a equação do fator de curvatura não se aplica. Além disso, quando uma MSR se deforma, há uma deformação na seção do fio da mola, provocando uma distribuição de tensão não-linear durante o uso (NORTON, 2013). Esse comportamento pode ser visto na Figura 13.

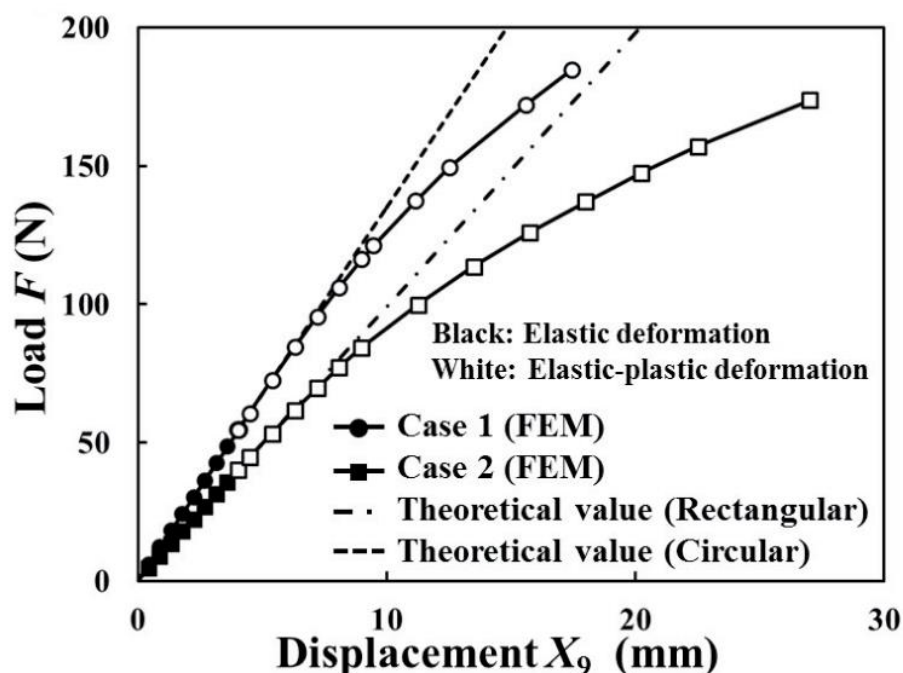
Figura 13: Distribuição de deformação em molas com fio de seção circular (esquerda) e de seção retangular (direita).



Fonte: TSUBOUCHI; TAKAHASHI; KUBOKI (2014).

Assim, quando se trata da constante elástica (k), o formato da seção transversal de uma mola possui grande influência devido às diferenças no comportamento de deformação sob tensão (TSUBOUCHI; TAKAHASHI; KUBOKI, 2014). Se tomar como exemplo duas molas com mesmo momento polar de inércia (J) na seção do fio, a mola de seção circular apresentará uma constante k (rigidez) maior em comparação com a de seção retangular, como mostra a Figura 14. Isso ocorre devido ao comportamento simétrico da deformação e da distribuição uniforme do material na forma circular, enquanto na mola de seção retangular, ocorre maiores concentrações de tensão na parte interna do fio.

Figura 14: Curva força-deslocamento para duas molas, sendo uma de seção circular e outra de seção retangular.



Fonte: TSUBOUCHI; TAKAHASHI; KUBOKI (2014).

2.3. PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Fundição é um processo metalúrgico de fabricação que consiste em vaziar o metal líquido em um molde contendo uma cavidade com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser fabricada (MORO; AURAS, 2007).

A Fundição de metais é um dos mais antigos e versáteis processos de fabricação; por meio dela é possível obter peças com formatos dos mais diversos, seja geometrias simples ou complexas, muitas das quais de difícil obtenção através de outros processos de fabricação. Este processo permite a fabricação de peças praticamente de qualquer forma, com pequenas limitações em dimensões, forma e complexidade (CHIAVERINI, 1986).

2.3.1. Fundição de precisão

O processo de fabricação utilizado nesse trabalho é o de fundição de precisão, tradicionalmente chamada de fundição por cera perdida ou fundição de investimento (do inglês Investment Casting); esse é um dos processos mais antigos de conformação mecânica de metais, com registros de sua utilização há mais de seis mil anos (ALBUQUERQUE, 2023).

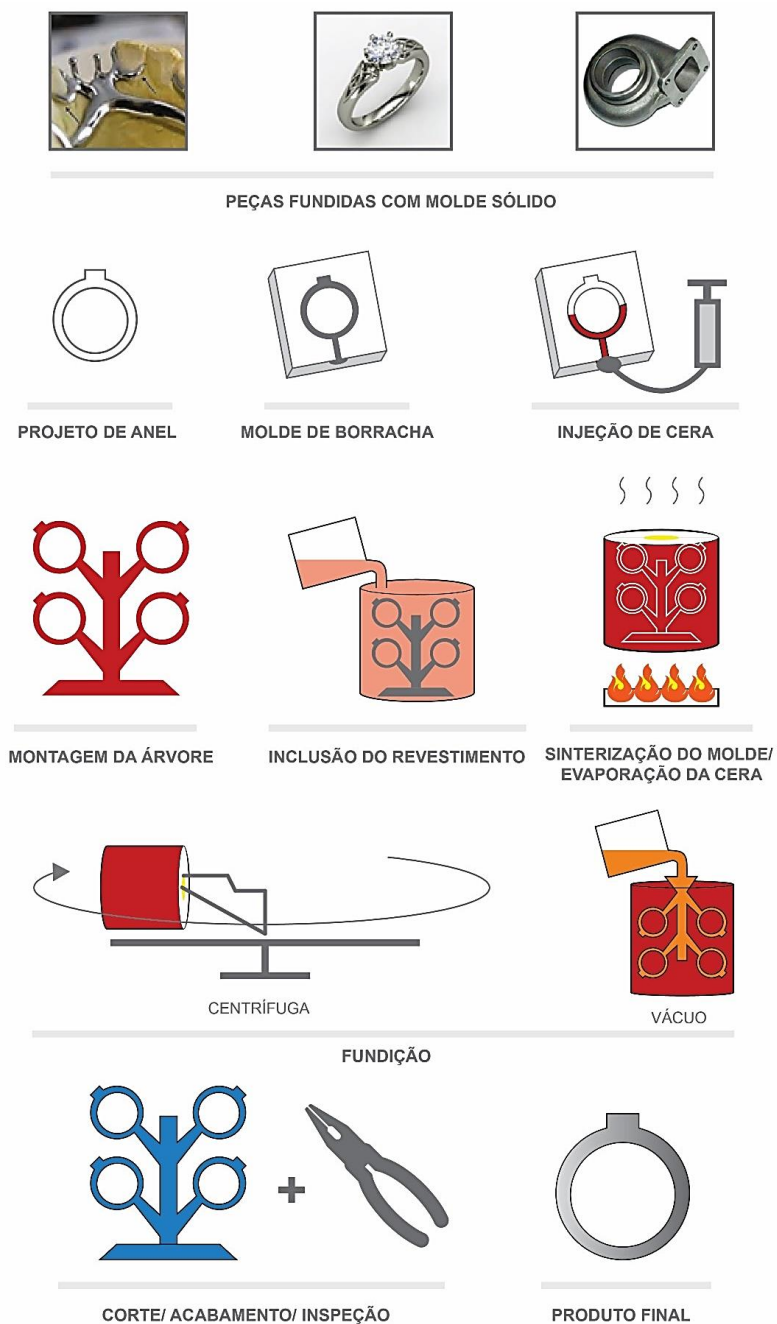
O processo possui algumas variações, podendo utilizar molde de casca ou molde sólido. O processo de fundição de precisão (FP) com molde sólido é bastante semelhante ao método de molde casca, diferenciando-se principalmente pelo volume de material utilizado e pelas taxas de solidificação envolvidas (SIMÕES, 2017). No processo com molde sólido, o molde é feito em volta do modelo, com a cera sendo vertida em um recipiente contendo o modelo em cera; após essa etapa, o molde vai para um forno (sinterização) e o modelo em cera é derretido no processo, dando origem às cavidades do molde. As etapas desse processo são mostradas na Figura 15, que ilustra as principais etapas do processo, que é amplamente utilizado tanto para a produção de uma única peça quanto para a fabricação de múltiplas peças em cada ciclo de vazamento:

- a) Peças a serem obtidas – Identificação das peças finais desejadas;
- b) Projeto da peça – Desenvolvimento do desenho técnico e especificações;
- c) Produção do molde – Confeção do molde de borracha vulcanizada ou silicone, com dimensões e geometria específicas;
- d) Injeção do modelo – Uso de cera ou resina para criar os modelos da peça;
- e) Montagem da árvore – Agrupamento dos modelos em uma árvore para fundir vários componentes no mesmo ciclo;
- f) Produção do molde cerâmico – Cobertura da árvore com lama cerâmica dentro de um anel para formar o molde;
- g) Preparação do molde – Secagem, remoção da cera (deceragem) e sinterização do molde cerâmico;
- h) Fusão e vazamento – Derretimento do metal e preenchimento do molde cerâmico;
- i) Desmoldagem – Extração das peças, que pode ser manual ou mecânica;

- j) Acabamento e inspeção final – Limpeza, ajustes e verificação de qualidade das peças produzidas.

Esse processo é amplamente utilizado devido à sua precisão e capacidade de criar geometrias complexas (SIMÕES, 2017).

Figura 15: Etapas do processo de fundição de precisão por cera perdida.



Fonte: SIMÕES (2017).

2.3.2. Principais parâmetros de fundição

A fundição é um processo de fabricação complexo e que envolve inúmeras variáveis, onde algumas se mostram mais relevantes do que outras. Dentre essas variáveis é possível destacar: HTC, temperatura do molde, temperatura de fundição e tempo de enchimento.

Das variáveis citadas, sem dúvidas a mais complexa é o coeficiente de transferência de calor (*heat transfer coefficient* - HTC) devido à dificuldade de ser determinada experimentalmente e raramente ser encontrada em literaturas. O HTC é relacionado com a capacidade de troca de calor na interface entre o molde e a cavidade onde se encontrará o metal líquido; desta forma, ela pode variar de acordo com o tipo de molde e do metal a ser fundido.

Por outro lado, há outras variáveis que são mais simples de se determinar, mas não deixam de ser importantes, como é o caso do tempo de enchimento e das temperaturas do molde e de vazamento. A temperatura do molde pode ser a ambiente ou pode ser aquecido de acordo com o desejado pelo fabricante, mas a temperatura de fundição deve ser superior à temperatura de fusão do metal. O tempo de enchimento é relacionado com a vazão do metal no molde, e influencia na velocidade em que o metal líquido percorre os canais de enchimento.

2.3.3. Simulação de fundição

A fundição é um processo de fabricação essencial em nosso cotidiano, responsável por uma grande quantidade de peças produzidas diariamente. Com o objetivo de aumentar a produtividade e economizar recursos, inúmeros estudos foram realizados ao longo dos anos, resultando no desenvolvimento de novas técnicas de fundição. Esses avanços foram potencializados pelo advento da simulação computacional, que trouxe benefícios significativos, tais como a eliminação do método de tentativa e erro no projeto de canais, redução substancial do tempo de desenvolvimento dos projetos e a identificação de possíveis defeitos de fabricação antes da produção do protótipo.

Apesar dessas inovações, o número de estudos voltados à simulação de fundição ainda é limitado, assim como a formação de profissionais capacitados para atuar na área. Isso ocorre porque a tecnologia é relativamente recente e ainda não está amplamente acessível a todos.

Historicamente, os projetos de molde nos processos de fundição são frequente feitos através de um método empírico, fazendo-se o uso de tentativa e erro. Essas práticas têm causado desperdício de tempo e recursos financeiros na confecção de moldes e protótipos, que são feitos buscando a otimização de parâmetros, bem como uma alta sanidade metalúrgica. Dessa forma, entender quais variáveis são importantes no processo de fundição e qual a influência delas na geração de defeitos é de extrema importância.

Antes de adentrar na parte de simulação de fundição, é essencial comentar acerca de conhecimentos básicos que norteiam um bom projeto de molde. Antes de se fazer o desenho CAD e começar a simulação, é essencial seguir algumas diretrizes para o desenho do molde; a implementação de conceitos físicos como a turbulência através do cálculo do número de Reynolds, lei da continuidade e o teorema de Bernoulli facilitam bastante as etapas posteriores de simulação. Além disso, é necessário ter conhecimento acerca de alguns parâmetros de fundição, tais como o coeficiente de transferência de calor (HTC), temperatura de fusão e temperatura do molde (CARVALHO, 2021).

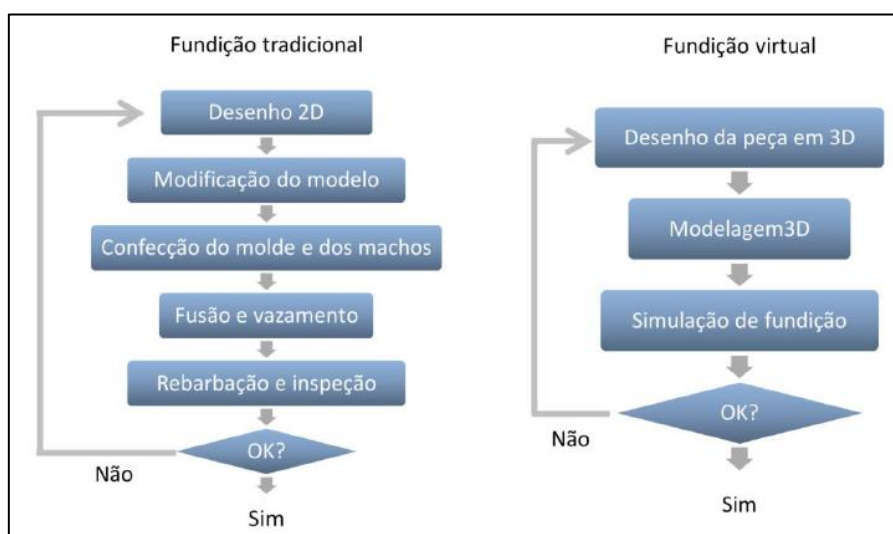
O principal desafio enfrentado pelas empresas de fundição no Brasil é o elevado tempo investido em experimentos baseados no método de tentativa e erro. A maioria dessas empresas, sendo de pequeno porte, ainda não adota tecnologias modernas em seus processos. Esse longo tempo de desenvolvimento resulta em altos custos de produção, comprometendo sua competitividade no mercado. Nos últimos anos, houve uma transformação significativa na maneira como essas empresas oferecem seus produtos e serviços. Elas deixaram de atuar apenas como subcontratadas e passaram a participar ativamente no desenvolvimento de produtos em parceria com os clientes. Nesse contexto, a adoção da simulação computacional tornou-se essencial para as empresas que desejam permanecer competitivas, permitindo um planejamento mais eficiente, redução de custos e maior agilidade na entrega de soluções (GOMES DE OLIVEIRA; LUIZ GUESSER; BAUMER, 2003).

A simulação tem inúmeros benefícios, tais como a predição de defeitos na peça, redução do tempo de projeto e a consequente redução de custos. Com o uso da simulação, é possível detectar falhas no projeto já nos seus instantes iniciais. Pode-se garantir a fundibilidade de um componente durante a sua criação, definir sistemas de canais de distribuição e sistemas alimentação e definir dados de processo, tudo isto sem vazar uma só gota de metal (GOMES DE OLIVEIRA; LUIZ GUESSER; BAUMER, 2003). Portanto, reduzir custos e tempo de fabricação aumenta a competitividade da empresa, e a simulação computacional é parte fundamental nesse processo.

Em grande parte dos processos de fundição por gravidade convencionais, o acabamento e a precisão dimensional adquiridos não são adequados para o consumidor final; dessa forma, torna-se necessário que se faça modificações nos parâmetros de projeto (SULTANA et al., 2018). Para que tais ajustes sejam realizados, é de fundamental importância o uso da simulação, definida como sendo o processo de imitar um fenômeno real usando um conjunto de equações matemáticas implementadas em um programa de computador (RAVI, 2008).

Os programas de computador são um conjunto de conhecimento adquirido ao longo de décadas de pesquisa, contendo um vasto banco de dados, equações e métodos que podem ser simulados através de um computador. Assim, a utilização de softwares de simulação traz vantagens na fundição e a principal delas é no ponto de vista econômico, visto que o método tradicional exige que sejam feitos vários retrabalhos até que se atinja o projeto de molde ideal. Outra característica que pesa contra esse método é um tempo de projeto maior, o que faz a empresa perder competitividade. Quanto ao método de fundição virtual, o ponto negativo é a baixa disponibilidade de profissionais qualificados para tal tipo de trabalho e o custo inicial de um software de simulação. Os processos e suas etapas podem ser vistos na Figura 16:

Figura 16: Processos de fundição utilizando dois métodos.



Fonte: Adaptado de RAVI (2008).

2.3.4. Softwares comerciais

Atualmente, existem diversos softwares comerciais para simulação de fundição; dentre os mais difundidos no mercado, se destacam o MAGMASoft, SOLIDCast e ESI ProCAST. Segue no Quadro 2 uma lista dos principais softwares comerciais disponíveis atualmente:

Quadro 2: Principais softwares de simulação de fundição comerciais.

Software	Empresa e origem
AutoCAST	Advanced Reasoning Technologies Ltd., Mumbai, Índia
CAP/WRAFTS	EKK, Inc., Walled Lake, Michigan, EUA
CastCAE	CT-Castech Inc, Oy, Espoo, Finlândia
Castflow, Casttherm	Walkington Engineering, Inc., Austrália
JSCast	Komatsu Soft Ltd., Osaka, Japão
MAGMASoft	MAGMA GmbH, Aachen, Alemanha
MAVIS	Alphacast Software, Swansea, Reino Unido
Nova-Solid/Flow	Novacast AB, Ronneby, Suécia
PAM-CAST/ProCAST	ESI Group, Paris, França
RAPID/CAST	Concurrent Technologies Corp., EUA
SIMTEC	RWP GmbH, Roetgen, Alemanha
SOLIDCast	Finite Solutions, Inc., Illinois, EUA

Fonte: Adaptado de RAVI (2008).

2.3.5. ESI ProCAST

Um dos softwares mais utilizados no Brasil atualmente é o ESI ProCAST, devido ao fato de ser bem difundido, confiável, versátil e utilizado em universidades parceiras, como é o caso da UFCG. Este software foi desenvolvido pela empresa francesa ESI Group, líder mundial em prototipagem virtual e simulação avançada desde 1973, que possui clientes como a Volkswagen, Renault e MAN (ESI Group).

De acordo com o manual do usuário do ESI ProCAST 2019, este software utiliza o método de elementos finitos (FEM) para realizar os cálculos necessários na simulação; ele possui diferentes módulos, que permite a modelagem de transferência de calor, fluidodinâmica (preenchimento do molde), radiação e tensões residuais (stress). Além disso, é possível fazer simulações de microestrutura, tratamento térmico e porosidade. Quanto aos tipos de fundição, é possível trabalhar com os principais métodos disponíveis atualmente, como por exemplo a fundição por gravidade (GDC), fundição de alta pressão (HPDC) e de baixa pressão (LPDC), fundição contínua, centrífuga, dentre outros.

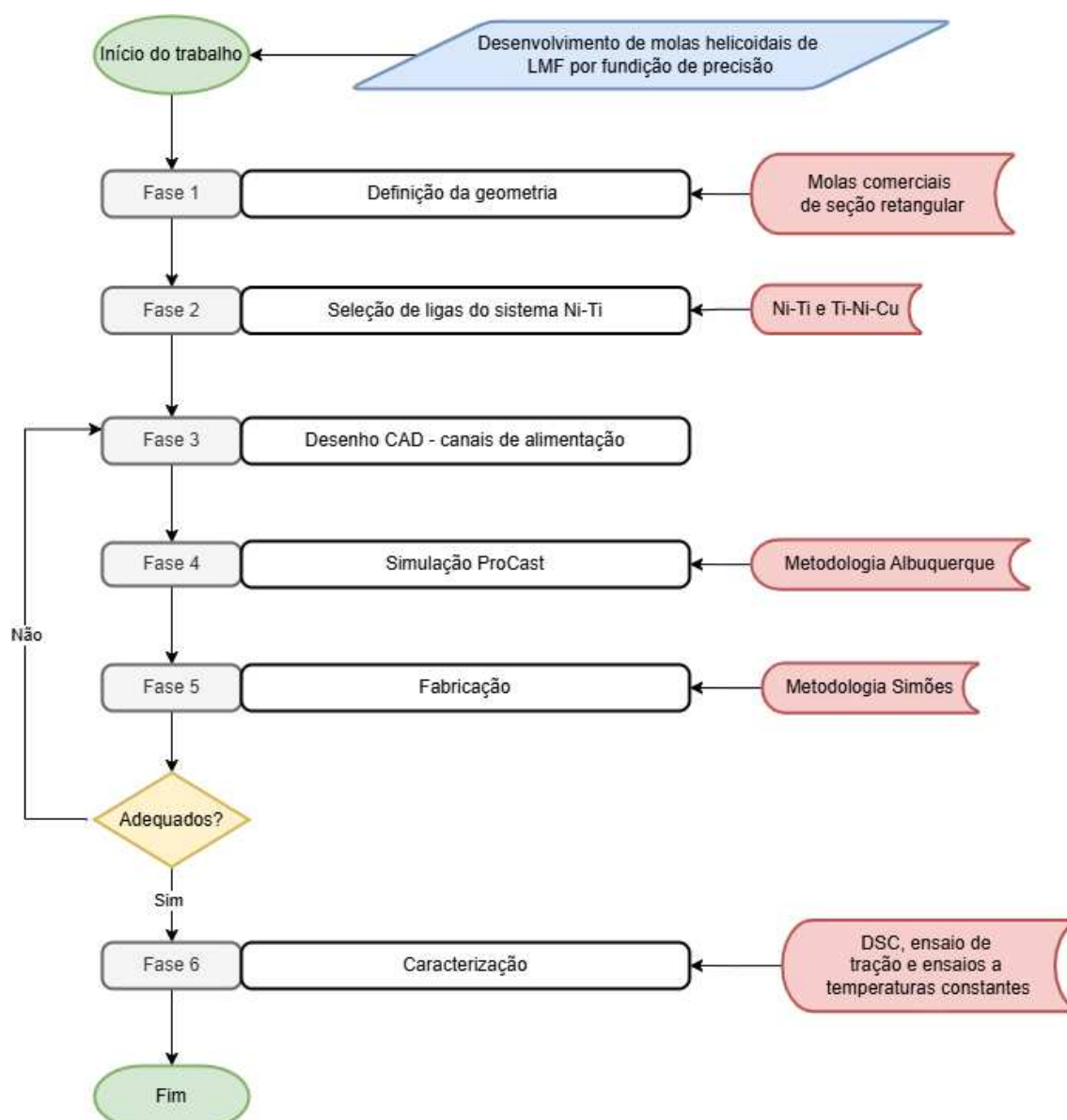
Através desse trabalho foi possível verificar a complexidade que envolve o processo de fabricação de uma peça através da fundição. Além dos diversos parâmetros que podem impactar na qualidade da peça final, é preciso também atentar aos princípios físicos que envolvem o desenho dos canais de alimentação. Desta forma, o projeto para a fabricação de uma peça através de tentativa e erro se torna bastante oneroso, pois consome tempo e recursos da empresa.

Assim, torna-se cada vez mais necessário o uso de softwares de simulação de fundição, que possuem a capacidade de prever os diversos defeitos possíveis, tais como a porosidade, trincas, rechupe, dentre outros. Entretanto, vale salientar que essa tecnologia ainda é inviável para empresas de fundição de pequeno porte, pois além do custo elevado das licenças ainda é necessário ter mão de obra qualificada para operar os softwares.

3. METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa segue as etapas de atividades, conforme o fluxograma da Fig. 16. O trabalho teve início com a seleção das geometrias das molas; em seguida, foi feita a avaliação da liga metálica a ser utilizada. Depois disso, foram feitos os desenhos em software CAD das molas escolhidas para então desenhar os canais de alimentação. A partir dessa etapa, foram feitas simulações para a escolha da(s) melhor(es) geometria(s), para então fabricar os protótipos. Por último, foi feita a caracterização das molas fabricadas e a avaliação dos resultados. Todas as etapas podem ser vistas na Figura 17:

Figura 17: Metodologia utilizada no projeto.



Fonte: Autoria própria.

3.1. DEFINIÇÃO DA GEOMETRIA

A primeira etapa iniciou-se com a aquisição de molas comerciais de seção retangular para estampos e matrizes. Pensando-se na fabricação, optou-se por molas pequenas, pois há uma limitação quanto à massa das molas que podem ser fabricadas por essa técnica; essa limitação se dá porque a máquina centrífuga Powercast tem capacidade máxima para peças de 25 gramas. As molas comerciais são fabricadas de acordo com a norma ISO 10243. Geralmente, as marcas comercializam 5 tipos de molas, com base na capacidade de trabalho: verde (leve), azul (média), vermelha (pesada), amarela (extrapesada) e bronze (superpesada). Foram compradas apenas molas da categoria leve (verdes), pois são menores.

Com as molas em mãos, foram feitas medidas utilizando um paquímetro digital para o posterior desenho delas no software Autodesk Inventor. Duas molas foram escolhidas para esse estudo. As molas escolhidas foram modeladas em 3D e podem ser vistas na Figura 18.

Figura 18: Molas comerciais adquiridas para estudo (esquerda) e molas desenhadas no software Autodesk Inventor (direita).

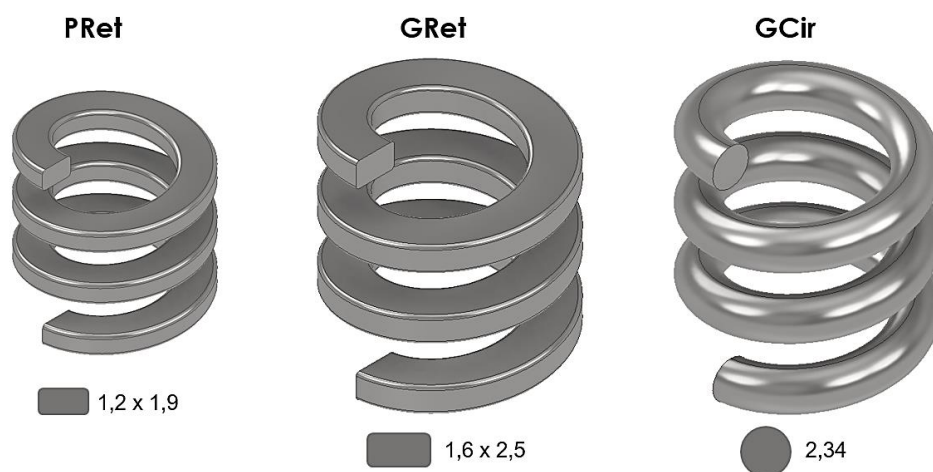


Fonte: Autoria própria.

Com base nos desenhos, surgiu a necessidade de atribuir nomes às molas, seguindo uma sequência lógica. A primeira letra é o tamanho, podendo ser pequena (P) ou grande (G). As três próximas letras indicam o formato da

seção do fio da mola, podendo ser retangular (Ret) ou circular (Cir). A terceira parte do nome é a liga utilizada, podendo ser NiTi, TiNiCu ou Aço, como mostra a Fig. 19. Por exemplo, se a mola em questão for a pequena de seção retangular de NiTi, o nome dela será PRet_NiTi.

Figura 19: Nomenclatura utilizada para as molas estudadas.



Fonte: Autoria própria.

A nomenclatura seguida de outros parâmetros como a massa, dimensões da seção do fio e passo podem ser vistos na Tabela 1.

Tabela 1: Nomenclatura utilizada para as molas fabricadas, com suas medidas.

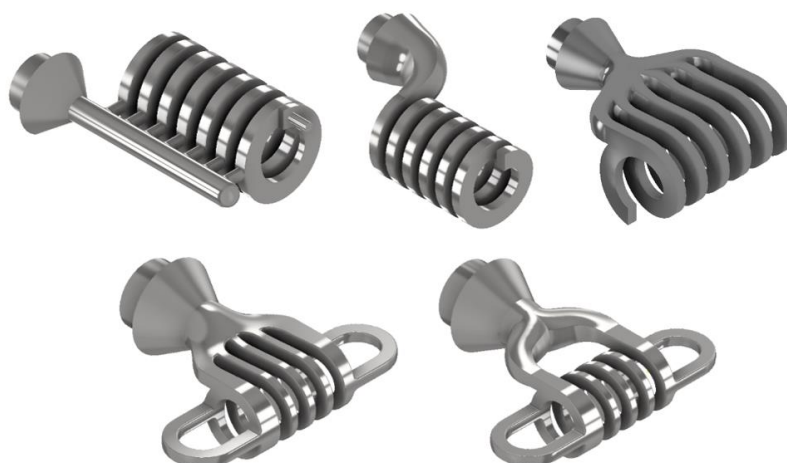
Código	Volume estimado (cm^3)	Massa estimada (g)	Massa – somente espiras (g)	Dimensões da seção do fio (mm)	Passo (mm)
PRet_NiTi	0,53	3,43	1,08	1,2 x 1,9	3
GRet_NiTi	1,13	7,31	2,39	1,6 x 2,5	4
GCir_NiTi	1,15	7,44	2,63	2,34	4
PRet_TiNiCu	0,53	3,43	1,08	1,2 x 1,9	3
GRet_TiNiCu	1,13	7,31	2,39	1,6 x 2,5	4
GCir_TiNiCu	1,15	7,44	2,63	2,34	4
PRet_Aço	0,53	4,25	1,34	1,2 x 1,9	3
GRet_Aço	1,13	9,07	2,96	1,6 x 2,5	4

Fonte: Autoria própria.

3.2. PROJETO DOS CANAIS DE ALIMENTAÇÃO

Depois de ter as molas modeladas em software CAD, voltou-se a atenção para o estudo dos canais de alimentação. Alguns tipos de canais foram testados para esse estudo da alimentação, sendo pela vertical ou pelas espiras, com as molas na horizontal e na vertical, como pode ser visto na Fig 20. Assim, foram desenhadas diferentes configurações de canais de alimentação, que posteriormente foram simulados no software ESI ProCAST.

Figura 20: Canais de alimentação que foram testados para esse estudo.



Fonte: Autoria própria.

3.3. LIGAS METÁLICAS UTILIZADAS

Os materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova e das molas foram obtidos através da metodologia de SIMÕES (2017). Serão utilizadas duas ligas metálicas da família Ni-Ti, sendo uma superelástica e a outra termoativada à temperatura ambiente. As características das LMF utilizadas são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2: Características das LMF utilizadas.

	TiNiCu	NiTi
% atômico	47Ti-32Ni-21Cu	50,2Ni-49,8Ti
% peso	41,2Ti-34,4Ni-24,4Cu	55,3Ni-44,7Ti
Efeito funcional (25 °C)	EMF	SE

Fonte: Autoria própria.

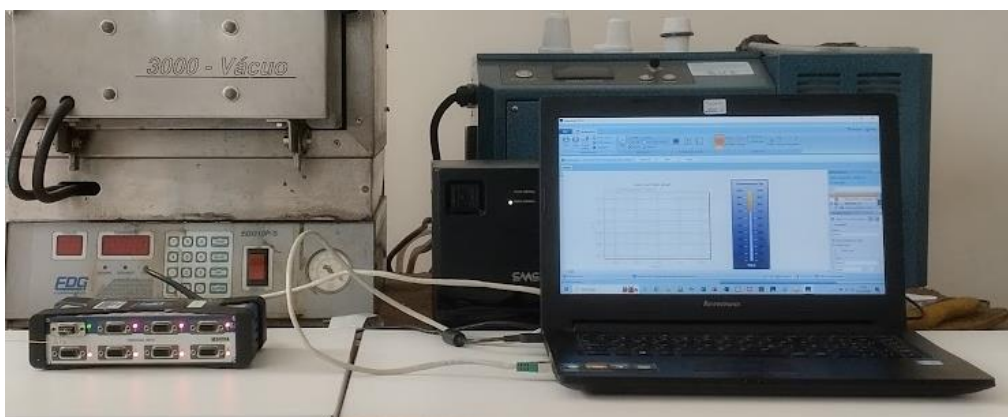
3.4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO

3.4.1. Ensaio da perda de calor do molde quando sai do forno

A simulação do processo de fundição envolve diversas variáveis. Assim, é necessário que se obtenha os dados de entrada com a maior precisão possível. Um exemplo disso é a medição da temperatura de injeção da liga e a temperatura do molde. Para a temperatura do molde, pode-se considerá-la como sendo a temperatura do forno; entretanto, assim que tiramos o molde do forno, ele começa a trocar calor com o ambiente, de forma que essa perda de energia pode ser considerável – dependendo do tempo que se demora para posicionar o molde na máquina.

Para avaliar essa perda de calor, foi feito um estudo utilizando um sistema de aquisição de temperatura com um termopar tipo k acoplado a um computador, como pode ser visto na Figura 21.

Figura 21: Sistema de aquisição de temperatura.

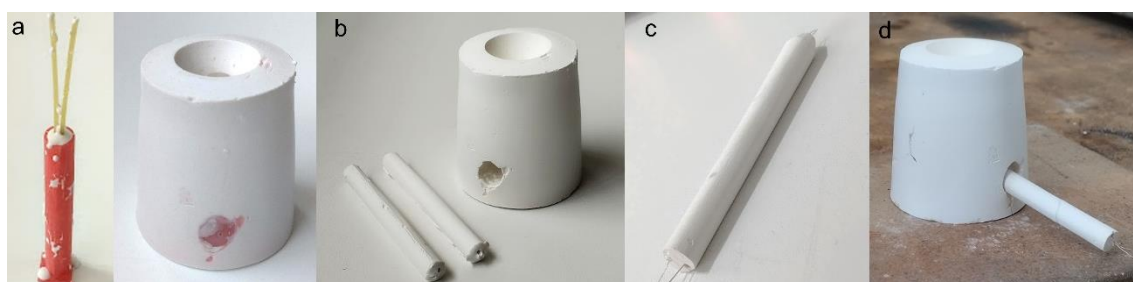


Fonte: Autoria própria.

Para evitar que o termopar seja danificado, foi feito um encapsulamento de material refratário (o mesmo do molde, revestimento Micro Fit) e um molde

com um furo na lateral, de forma que o encapsulamento encaixe no molde. Além disso, tomou-se o cuidado de posicionar o molde sobre um material refratário, para evitar que perdas por condução influenciem o resultado. O molde e o encapsulamento são mostrados na Figura 22. As partes (a) e (b) mostram o molde e o encapsulamento antes e depois da cura no forno. A parte (c) mostra o encapsulamento com o termopar, e (d) mostra o sistema montado.

Figura 22: Processo de fabricação do encapsulamento do termopar e do molde adaptado com furo para aquisição de dados.

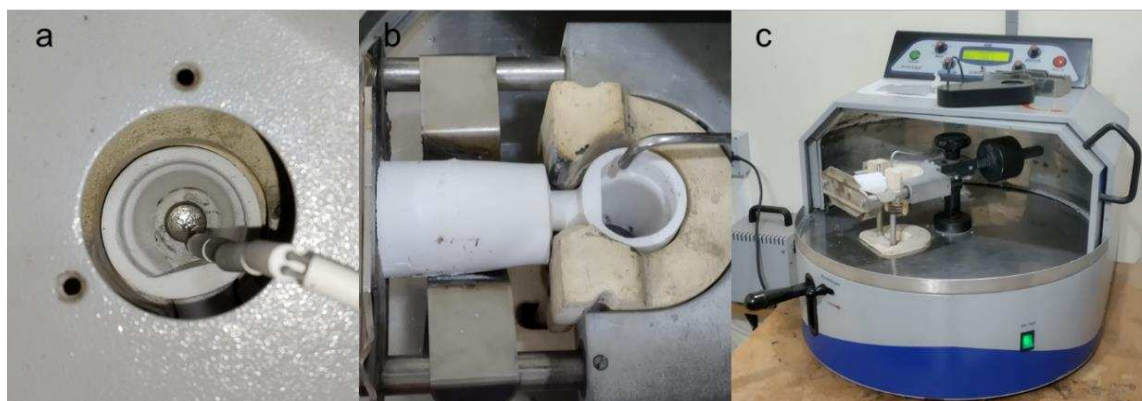


Fonte: Autoria própria.

3.4.2. Análise da temperatura da pastilha metálica dentro da máquina *powercast*

Um dos principais dados de entrada na simulação de fundição é a temperatura da liga metálica. Sendo assim, torna-se indispensável que sua aquisição seja obtida com o máximo de precisão. Nesse trabalho, foi utilizada a máquina Powercast, da EDG, que usa um sensor óptico para a medição da temperatura. Com base em testes prévios, Constatou-se que sensor não possui boa precisão, fazendo-se necessário o uso de sistema de aquisição de dados e termopar tipo k. Para isso, o visor de vidro foi removido e o termopar foi posicionado em contato com a pastilha de Ni-Ti, como mostra a Figura 23.

Figura 23: Aquisição da temperatura da pastilha metálica dentro da powercast.



Fonte: Autoria própria.

3.5. SIMULAÇÃO DE FUNDIÇÃO

Após a escolha da liga e a definição das geometrias dos canais de alimentação, deu-se início à etapa de simulação, que foi feita com o software ESI ProCAST. O principal objetivo das simulações foi a verificação de quais os tipos de canais de alimentação seriam mais viáveis para a fabricação de molas, com a validação experimental. Dessa forma, algumas considerações foram feitas para as simulações, como a definição de condições de contorno. Essa etapa teve como base a metodologia desenvolvida por ALBUQUERQUE (2023).

O primeiro desenho da montagem é o cadinho. Nele é feita a fusão da liga metálica através de indução e depois há o carregamento do metal líquido para o molde, por meio da força centrífuga. Como o cadinho possui geometria complexa, seu desenho foi feito usando um *scanner* 3D por ALBUQUERQUE (2023). O desenho CAD da parte interna do cadinho pode ser visto Figura 24.

Figura 24: Cadinho desenhado no Autodesk Inventor.



Fonte: Albuquerque (2023).

Em seguida, a peça a ser fabricada é modelada, que neste caso é uma mola. O modelo deve incluir os canais de alimentação e o encaixe da base do molde, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25: Canais de alimentação de mola desenhado no Autodesk Inventor (esquerda) e montagem real do modelo em resina (direita).

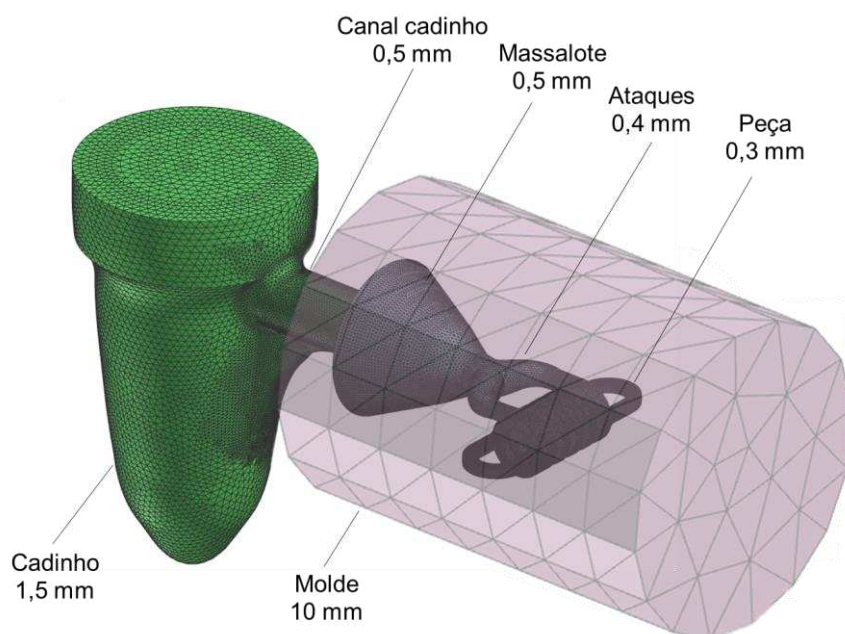


Fonte: Autoria própria.

Com os desenhos da peça e do cadinho prontos, a etapa seguinte é a montagem do conjunto, que deve ser salva em um formato específico (.IGS). Com isso, é possível abrir o arquivo no ESI ProCAST. Antes da simulação, é

necessário que se faça a geração da malha dentro do software, dentro do módulo *mesh*, como mostra a Figura 26.

Figura 26: Detalhe dos tamanhos da malha.



Fonte: Autoria própria.

Foram feitas simulações com diferentes geometrias e canais de alimentação. Dessa forma, os parâmetros de simulação foram fixos, como mostra a Tabela 3. Além disso, a velocidade de rotação se justifica devido à baixa massa específica da liga Ni-Ti (aproximadamente $6,5 \text{ g/cm}^3$). Como a velocidade de rotação é baseada nessa propriedade, selecionou-se a 400 rpm para a fabricação das molas.

Tabela 3: Parâmetros escolhidos para o estudo.

Parâmetro	Condição
Temperatura de injeção [°C]	1350
Temperatura do molde [°C]	300
HTC [$\text{W/m}^2.\text{K}$]	500
Rotação [rpm]	400

Fonte: Autoria própria.

Como as dimensões dos canais das molas e da geometria de rede são parecidas, resolveu-se manter os tamanhos de elementos de malha utilizados por ALBUQUERQUE (2023).

3.6. FABRICAÇÃO

A fabricação dos componentes é baseada na metodologia de Simões (2017) e é composta por três etapas: a produção das pastilhas LMF, preparação e cura do molde cerâmico e a fabricação da peça. A sequência das etapas de fabricação, que é a mesma para as molas e para a tela, é mostrada na Figura 27.

Figura 27: Etapas para a fabricação de componente LMF.



Fonte: Autoria própria.

A primeira parte é a fabricação das pastilhas de Ni-Ti. Para isso, as cargas são cortadas e pesadas na proporção das duas ligas utilizadas 56Ni-44Ti (%peso). Calcula-se a massa de metal com base no volume da peça, que é possível verificar no software CAD. A partir daí, posiciona-se a massa no cadinho

dentro da máquina EDG Discovery, para a fusão da pastilha LMF em atmosfera rica em gás argônio.

A etapa seguinte é a preparação do molde, que se inicia com a impressão do modelo 3D dos canais de alimentação em resina. A impressora utilizada é de resina Photon Mono M5s, da Anycubic. A resina utilizada é a Yller cosmos *castable*. Os modelos são mostrados na Figura 28.

Figura 28: Impressão dos modelos em resina.



Fonte: Autoria própria.

Depois que os modelos estão prontos, os moldes são produzidos. Eles são preparados utilizando revestimento cerâmico Micro Fine 1700, da Talmax. Para cada molde são utilizados dois pacotes de revestimento, de 90 g cada. A proporção para o preparo de um pacote do revestimento é de 18 ml do líquido que acompanha o produto para 5 ml de água destilada. Os produtos são misturados manualmente com uma espátula por 10 segundos e a lama cerâmica é levada para uma máquina de espatulação à vácuo, para a eliminação de bolhas por um período de 40 a 60 segundos (SIMÕES, 2017).

Depois de pronta, a lama cerâmica é vertida no anel metálico contendo o modelo, que deve estar posicionado em uma mesa vibratória. A vibração evita a formação de bolhas no molde. O molde deve passar por secagem em temperatura ambiente por 45 minutos antes de ser levado ao forno. Na

sequência, o molde segue para a sinterização em forno, passando por dois patamares de temperatura: 300 °C por 30 minutos e 950 °C por 20 minutos, com uma rampa de aquecimento de 30 °C por minuto. Depois, o forno é resfriado até 300 °C a uma taxa de 15 °C por minuto e está pronto para fazer a fundição (SIMÕES, 2017). As etapas para a fabricação do molde são mostradas na Figura 29.

Figura 29: Etapas para a fabricação do molde.

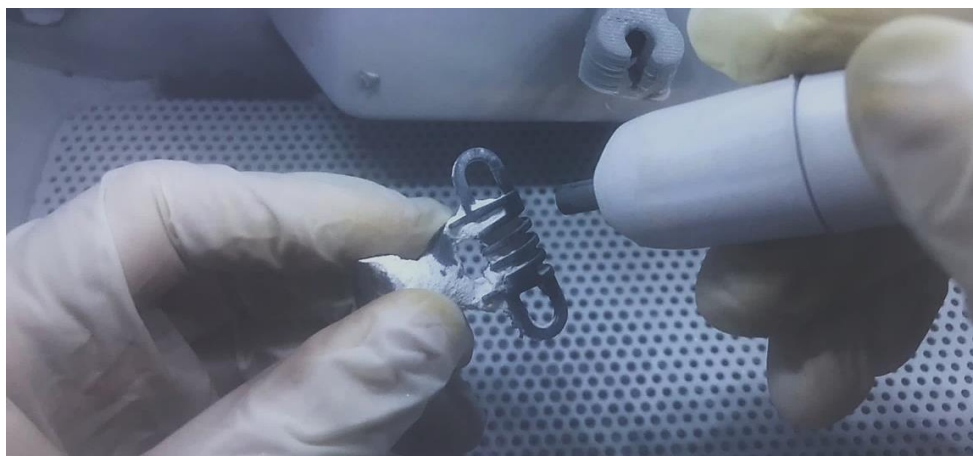


Fonte: Autoria própria.

Com o molde e a pastilha LMF prontos, parte-se para a fabricação, feita na máquina EDG PowerCAST 1700. Nela são posicionados o molde e o cadinho contendo a pastilha metálica. Além disso, é necessário um suprimento de argônio para evitar a oxidação da liga. O molde é retirado do forno na temperatura de 300 °C e posicionado rapidamente na máquina. Só então, insere-se os parâmetros de fundição na máquina, como a temperatura de fundição e a rotação de centrifugação.

Depois de todo o processo, é feita desmoldagem com o uso de um martetele pneumático e a limpeza da peça através de jateamento com óxido de alumínio, como consta na Figura 30.

Figura 30: Jateamento com óxido de alumínio.



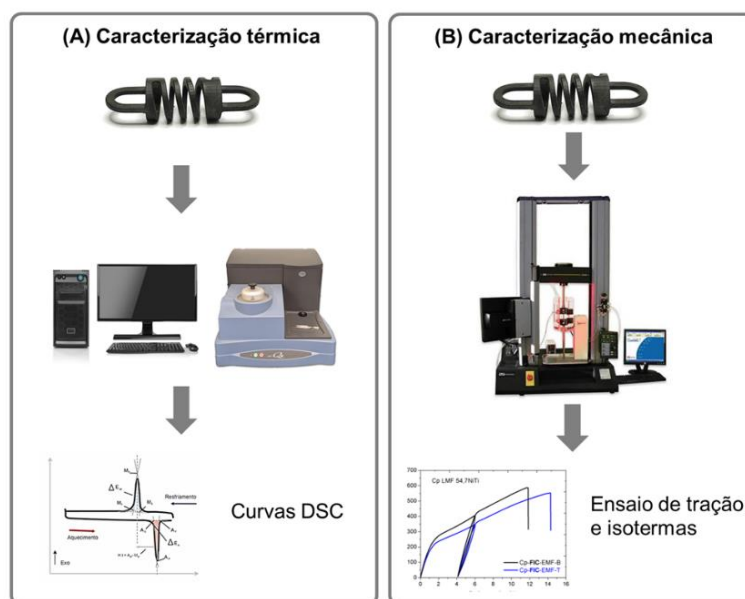
Fonte: Autoria própria.

Após o jateamento, a amostra foi submetida a tratamentos térmicos de homogeneização e envelhecimento utilizando um forno resistivo de vácuo. A homogeneização é feita com a peça a 850 °C por 1 hora; o envelhecimento é feito a 500 °C por 2 horas, ambos com resfriamento ao ar.

3.7. CARACTERIZAÇÃO DAS MOLAS

A caracterização das molas fabricadas é uma etapa essencial para a pesquisa, sendo feito dois tipos de caracterização: a térmica e mecânica. Na caracterização térmica foram feitos ensaios de DSC. Como já mencionado, esses ensaios vão mostrar as temperaturas de transformação das ligas Ni-Ti e TiNiCu. A caracterização mecânica envolve o ensaio de ensaios de ciclagem com tração e compressão a temperaturas constantes e ensaio de tração, com o intuito de revelar seu comportamento mecânico. O fluxograma contendo os detalhes da caracterização é mostrado na Figura 31.

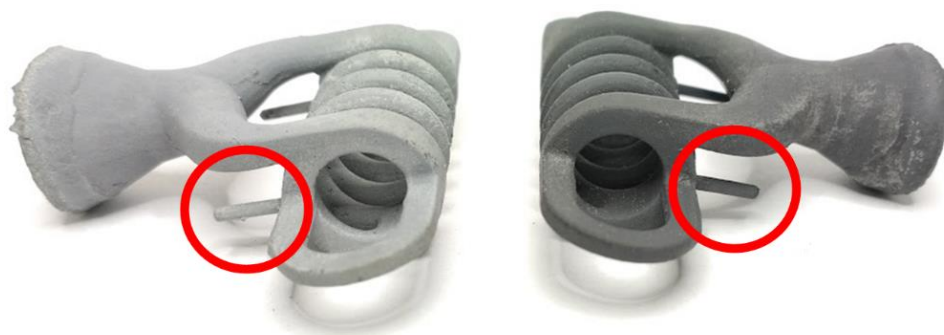
Figura 31: Metodologia de caracterização das molas fabricadas.



Fonte: Autoria própria.

As análises de DSC foram feitas para todas as molas testadas, utilizando o equipamento Q20, da TA *instruments*. Os testes foram feitos com rampa de 5 °C por minuto e intervalo de -80 a 100 °C. As amostras foram retiradas de pequenas hastes feitas para essa finalidade, como pode ser visto na Figura 32.

Figura 32: Posicionamento das testemunhas para ensaio de DSC.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios mecânicos foram divididos em duas partes: na primeira parte foram realizados ensaios de ciclagem com tração e compressão a temperaturas constantes e, na segunda, ensaios de tração. Os ensaios de ciclagem a temperaturas constantes foram feitos nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, com as duas molas de cada liga, com três ciclos de tração e compressão. Foi utilizada uma câmara térmica para estabilização da temperatura, com 30 minutos para estabilização. Para as molas pequenas, a compressão e tração de 3 milímetros; para as molas grandes, foi considerado um curso de 4 milímetros. A velocidade de avanço da travessa foi de 1 mm / min.

Depois dos ensaios de ciclagem com tração e compressão a temperaturas constantes, foram feitos ensaios de tração para avaliar o comportamento mecânico das molas. A máquina de ensaio utilizada foi a mesma, Instron 5582. O ensaio foi realizado com pré carga de 5 N e uma taxa de avanço de 2 mm por minuto, avançando e retornando a cada 0,5 mm.

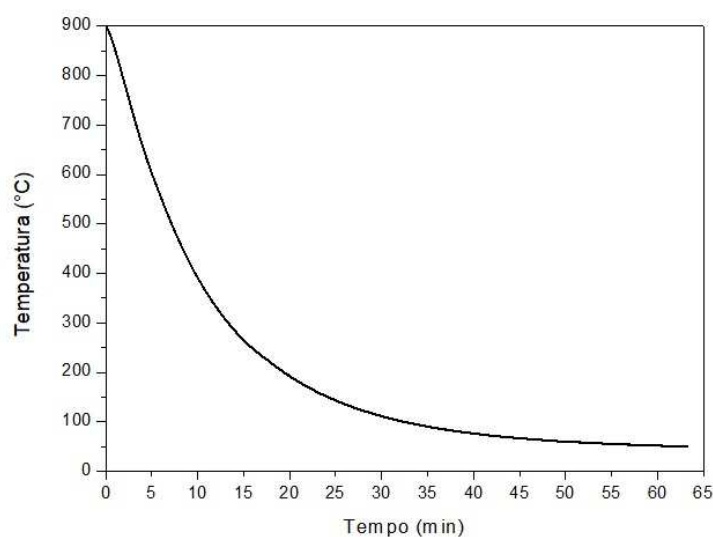
4. RESULTADOS

4.1. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA A CALIBRAÇÃO DO MODELO

4.1.1. Ensaio da perda de calor do molde quando sai do forno

O ensaio foi feito após o aquecimento do molde em um forno até sua estabilização com uma temperatura superior a 900 °C. Assim, o molde foi retirado do forno e o termopar foi posicionado; os resultados foram aquisitados a uma frequência de 10 Hz, por aproximadamente 1 hora. Os dados foram coletados e foi gerada uma curva de temperatura em função do tempo (Figura 33). Esses dados são úteis para a inserção de um dado de entrada na simulação – a temperatura do molde. Assim, o tempo médio que se leva para tirar o molde do forno e posicioná-lo na máquina foi medido e pôde-se verificar qual a temperatura aproximada que o molde realmente estava na hora da centrifugação. Verificou-se que o tempo médio desse procedimento é aproximadamente 1 minuto, sendo a temperatura de aproximadamente 270 °C – esse é o dado de entrada da simulação.

Figura 33: Temperatura do molde em função do tempo.



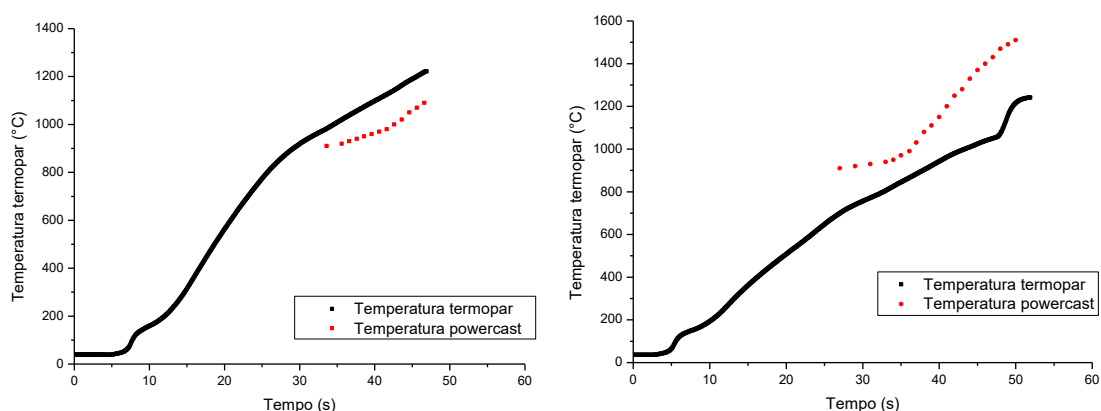
Fonte: Autoria própria.

4.1.2. Análise da temperatura da pastilha metálica dentro da máquina powercast

Como citado, o termopar utilizado foi do tipo k, que suporta temperaturas de até 1200 °C. Além disso, a temperatura *liquidus* da liga Ni-Ti é de 1310 °C. dessa forma, seria impossível fazer tais medições, visto que o termopar fundiria junto com a pastilha metálica. O ideal para esse processo seria a aquisição de um termopar do tipo S ou B, que suportam temperaturas mais altas.

Mesmo com tais limitações, foi possível verificar que as suposições iniciais sobre a baixa precisão do sensor da máquina eram verdadeiras. Essa comparação foi feita através do uso do termopar e do sensor ótico ao mesmo tempo; isso foi possível com o uso da gravação dos valores de temperatura no visor da máquina com uma câmera. Para garantir que a medição fosse o mais fiel possível, colocou-se o visor parcialmente na frente do sensor ótico. O termopar posicionado na lateral não obstrui a leitura do sensor da máquina. Assim, fez-se inicialmente três medidas com uma pastilha de 7 gramas, com os resultados mostrados na Figura 34.

Figura 34: Curvas de temperatura na powercast com o uso do sensor óptico e termopar.



Fonte: Autoria própria.

Dessa forma, o sensor óptico da máquina deixou de ser utilizado por causa da baixa confiabilidade da leitura da temperatura de injeção da liga metálica. Ao invés de fazer a leitura com o sensor óptico, passou-se a fazer a visualização do “ponto de gema”, que indica que o metal atingiu a temperatura *liquidus*. O ponto de injeção pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35: Ponto de injeção da pastilha metálica no molde.



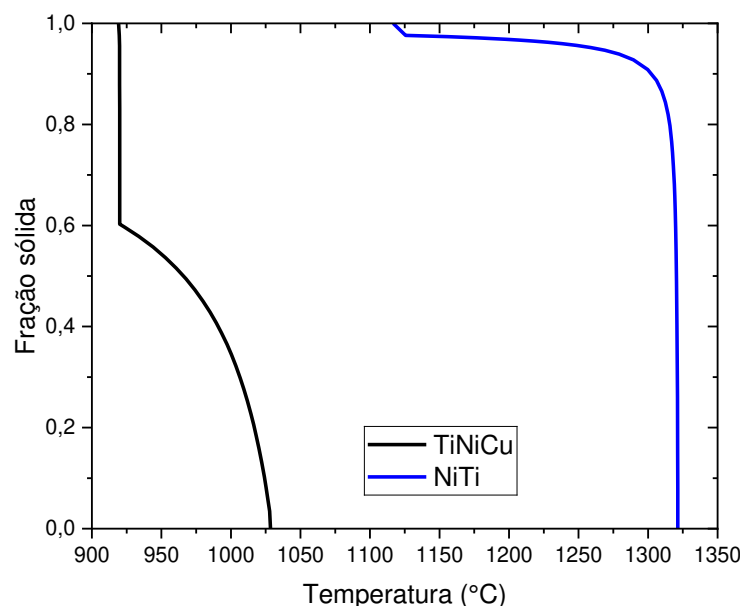
Fonte: Autoria própria.

A liga estudada não está contida na biblioteca do software; assim, é necessário que ela seja adicionada manualmente. Logo, suas propriedades são calculadas dentro do próprio programa, apresentando valores bem aproximados com os encontrados na literatura. Um exemplo disso são as temperaturas *liquidus* e *solidus* da liga. A temperatura *liquidus* com base nos cálculos é de 1321 °C, enquanto a temperatura *solidus* é de 1116 °C. Comparando os valores calculados com os do diagrama de fases da liga estudada (55,3Ni-44,7Ti %p), é possível notar que a temperatura *liquidus* é aproximadamente 1310 °C e a temperatura *solidus* é aproximadamente 1100 °C (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). Assim, nota-se que a aproximação que o software faz é aceitável, pois se aproxima da literatura.

A Liga 47Ti32Ni21Cu (%at) também teve que ser inserida no software, apresentando temperatura *liquidus* 1028 °C e *solidus* 919 °C. Tomando como exemplo a liga 50,8Ni49,2Ti, nota-se considerável diferença entre as temperaturas de fusão das ligas. Na Figura 36 pode ser observado as curvas de

fração sólida em função da temperatura. Note que para a liga 47Ti32Ni21Cu, a partir de 919 até 923 °C, poucos graus de diferença na temperatura são suficientes para transformação de sólido (1) para 60% líquido (0,6). A partir daí, necessitamos de mais energia para tornar a liga líquida. A liga 50,8Ni49,2Ti se comporta de maneira análoga, sendo que de 1116 a 1300 °C a liga ainda está 90% sólida, estando completamente líquida em 1321 °C. Tais informações podem ser reveladoras quanto ao comportamento da liga metálica quando preenche o molde.

Figura 36: Curvas de fração sólida em função da temperatura calculadas no ProCAST.



Fonte: Autoria própria.

4.2. FABRICAÇÃO E SIMULAÇÃO PARA A OTIMIZAÇÃO DOS DESENHOS DE CANAIS DAS MOLAS

As primeiras molas foram fabricadas utilizando os canais de alimentação na vertical, com um ataque em cada espira. As molas fabricadas podem ser vistas na Figura 37.

Figura 37: Modelo em resina (esq.) e mola fabricada com os canais (dir.).



Fonte: Autoria própria.

A mola fabricada apresentou alguns defeitos de fabricação visíveis, como rebarbas e bolhas de gás. Ensaios preliminares de tração mostraram defeitos de fabricação na mola, fazendo-a falhar prematuramente. Portanto, o resultado não foi satisfatório, pois não foi possível verificar o comportamento superelástico do componente. Na Figura 38 é possível observar a região onde ocorreu a fratura, que ocorreu em um ponto onde há defeitos visíveis, ocasionados provavelmente pelo aprisionamento de gás.

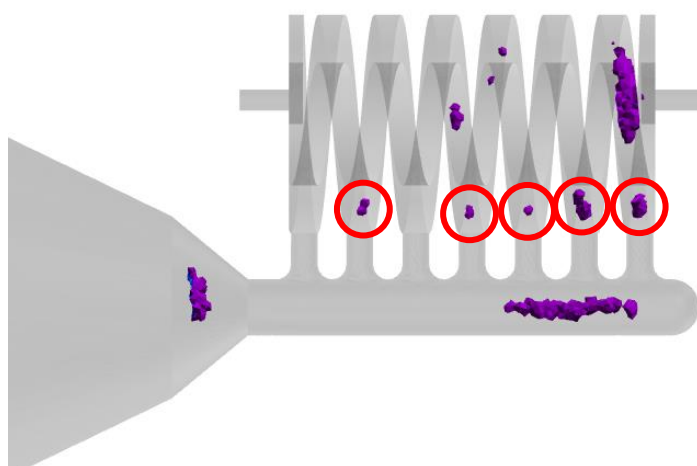
Figura 38: Detalhes da mola fraturada no ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

Além disso, observa-se a formação de porosidades, localizadas na junção das espiras da mola e os canais de ataque. A união dos canais de ataque com as espiras dá origem a pontos quentes na peça, causando o aparecimento de porosidades, como pode ser visto na Figura 39. Simulações mostram um aumento da turbulência do metal fundido nessa região, devido a mudanças bruscas de direção, além dos já mencionados problemas com relação ao aprisionamento de gás.

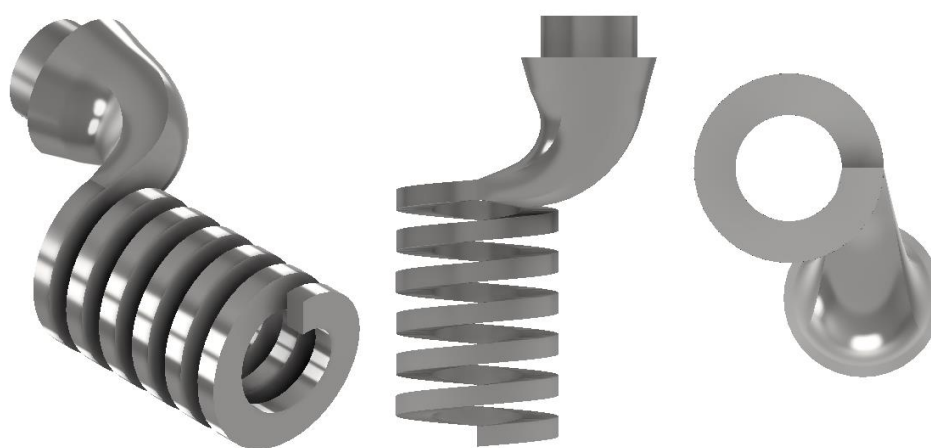
Figura 39: Porosidades no interior da peça apresentadas em simulação.



Fonte: Autoria própria.

Para reduzir esse problema, foi feito outro desenho de canais de alimentação, de tal forma que a alimentação ocorre seguindo a direção das espiras da mola. Além disso, há uma vantagem com relação ao modelo anterior: a facilidade de remoção do canal de alimentação. O desenho do novo canal de alimentação é mostrado na Figura 40.

Figura 40: Desenho CAD dos canais de alimentação.



Fonte: Autoria própria.

Simulações preliminares indicaram um bom preenchimento e redução da porosidade, porém o problema do aprisionamento de gás ainda persistia. Mesmo sabendo do problema, uma mola foi fabricada, com o intuito de entender mais sobre esse fenômeno. Na fabricação foram empregados os mesmos parâmetros da mola anterior, ou seja, 450 rpm de rotação, temperatura da liga de 1400 °C e temperatura do molde 900 °C. Na figura 41 é possível visualizar uma bolha de gás saindo do molde na simulação.

Figura 41: Detalhe de uma bolha de gás saindo do molde na simulação.



Fonte: Autoria própria.

O componente fabricado pode ser visto na Figura 42, evidenciando os problemas causados por bolhas de gás aprisionados no molde. Uma explicação para esse fenômeno é o trajeto que a bolha de gás precisa percorrer para sair, que é muito grande, em comparação com outros desenhos de canais de alimentação.

Figura 42: Mola fabricada com defeitos provocados por bolhas de gás.



Fonte: Autoria própria.

Esse problema de aprisionamento de gás no interior do molde pode ser contornado com a adição de canais de ventilação, também chamados de *vents*. Foram adicionados dois desses canais para a verificar a eficiência desses dispositivos na eliminação de defeitos dessa natureza. Os resultados foram bastante satisfatórios, eliminando quase completamente os defeitos provocados por bolhas de gás, como mostra a Figura 43. Porém, esse problema ainda persistia e precisava ser resolvido.

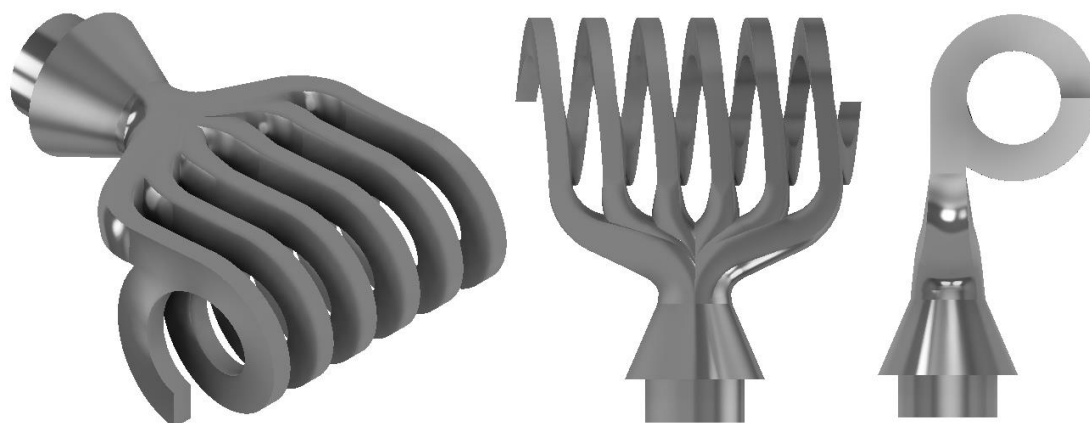
Figura 43: Canais de alimentação com a adição de *vents*.



Fonte: Autoria própria.

Para resolver o problema do aprisionamento de gás, foi desenhado outro tipo de canais de alimentação. Com base nos canais das figuras anteriores, foi desenhado um modelo com alimentação pelas espiras, porém com os ataques posicionados na tangente das espiras da mola, como mostra a Figura 44.

Figura 44: Canais de alimentação posicionados nas espiras da mola.

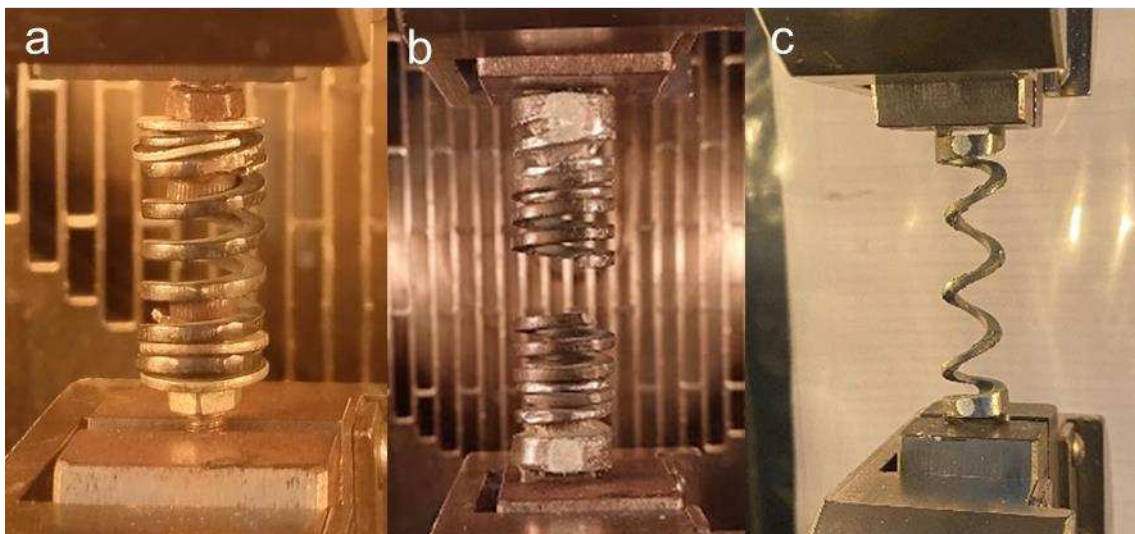


Fonte: Autoria própria.

Os canais de alimentação com a alimentação pela tangente apresentam um rápido preenchimento, com a retirada dos gases de dentro da peça. Porém, apresentam um defeito: a quantidade de canais para serem cortados na fase de acabamento da peça. Além disso, na junção entre os canais de ataque e a espira da mola formam-se pontos quentes, que dão origem a porosidades.

Outro problema de design a ser contornado é a forma de acoplamento da mola com a máquina de ensaio. Em testes anteriores, ocorreram problemas com relação ao escorregamento e alinhamento da peça na máquina de ensaio. No primeiro teste, foi usado um esquema rudimentar e pouco eficiente, com o uso de parafusos, porcas e arruelas, como mostrado na Figura 45 a. Em um outro momento, foi implementado uma espécie de mandril, onde a mola é rosqueada. O mandril foi fabricado em aço inox por fundição, em uma configuração parecida que foi utilizada anteriormente por SANTIAGO (2018) (parte b). Porém, o mandril fabricado em inox era difícil de alinhar na máquina de ensaio, bem como apresentava dificuldade de medição das espiras ativas da mola e do comprimento útil. Então, a partir das experiências anteriores, foi desenvolvido um novo sistema de acoplamento com abas que já vem embutido na própria mola (parte c).

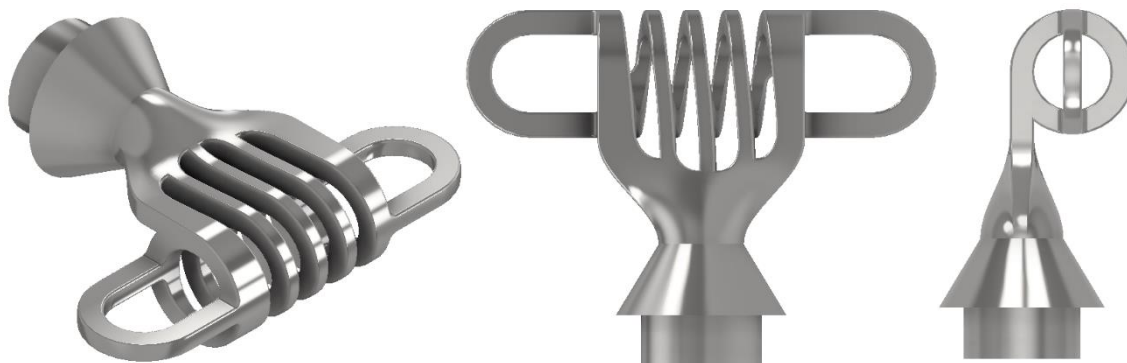
Figura 45: Tipos de acoplamento da mola com a máquina de ensaio. (a) modelo inicial, com o uso de parafusos, porcas e arruelas. (b) Mandril em aço inox. (c) sistema de abas embutidas na mola.



Fonte: Autoria própria.

Esse sistema apresentou excelentes resultados, sem problemas como escorregamentos ou rompimentos. Além disso, essas abas se mostraram versáteis, ficando possível fazer ensaios de tração e compressão. O ponto negativo desse sistema é que o conjunto ficaria maior e não caberia no molde com a mola fabricada anteriormente. Então, reduziu-se o tamanho da mola através da redução do número de espiras, passando a ser três (Figura 46).

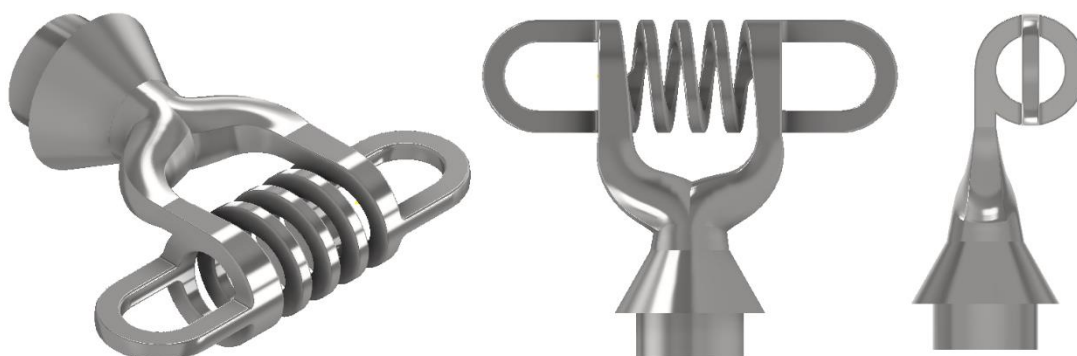
Figura 46: Sistema de canais de alimentação com abas.



Fonte: Autoria própria.

Foi fabricado um protótipo da mola com as abas para o ensaio e constatou-se o completo preenchimento do molde, sem defeitos superficiais aparentes. Porém, a mola se rompeu no momento da remoção dos canais de alimentação. Por esse motivo, partiu-se para um desenho onde os canais de alimentação não se conectam com as espiras. Esse desenho possui a vantagem de ter a remoção mais fácil dos canais de alimentação e evita o surgimento de micro porosidade no encontro das espiras com os canais. Assim, chegou-se ao desenho final dos canais para as molas fabricadas nesse trabalho, como mostra a Figura 47.

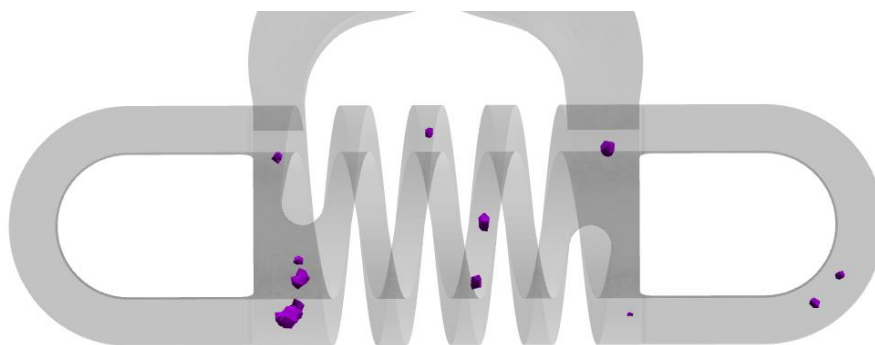
Figura 47: Canais de alimentação com ataques posicionados fora das espiras.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 48 verifica-se as prováveis porosidades na peça, obtidas por simulação. Note que a alimentação por fora das espiras permitiu que se evitasse pontos quentes na junção entre os ataques e as espiras das molas, como ocorreu nas simulações anteriores. Com isso, espera-se que haja menos microporosidades no interior das espiras das molas.

Figura 48: Prováveis porosidades na peça, obtidas por simulação.



Fonte: Autoria própria

Com o desenho final dos canais de alimentação, iniciou-se a etapa de fabricação dos protótipos. Na Figura 49 pode-se observar o passo a passo para a obtenção do componente final (mola) através da fundição de precisão, da esquerda para a direita. O processo de fabricação parte da fabricação da pastilha metálica a partir do níquel e do titânio. Depois disso é feito o modelo para a produção do molde e então é injetado a peça juntamente com os canais de alimentação. Ao final, os canais são cortados e é feito o acabamento.

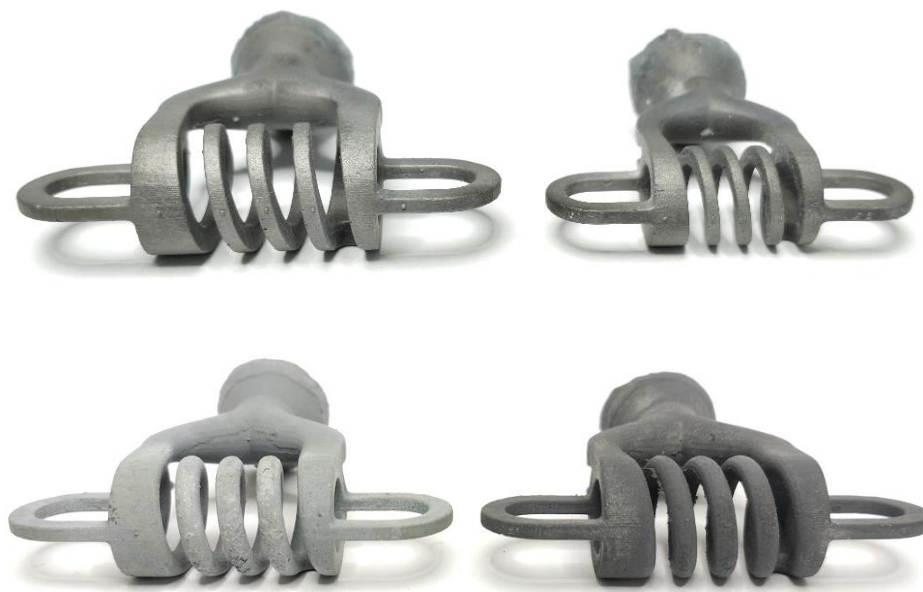
Figura 49: Processo simplificado para a obtenção da mola.



Fonte: Autoria própria.

Além das molas de seção retangular, foram fabricadas molas de seção circular equivalente; essas molas têm o mesmo momento polar de inércia (J). As molas fabricadas são mostradas na figura 50.

Figura 50: Molas prontas com os canais de alimentação.



Fonte: Autoria própria.

Após a fabricação, os canais de alimentação são removidos e são feitos acabamentos superficiais para a remoção de rebarbas, caso haja necessidade. Algumas das molas fabricadas podem ser vistas na Fig. 51, onde é possível comparar suas dimensões com uma mão.

Figura 51: Molas de seção retangular prontas após a remoção dos canais de alimentação.



Fonte: Autoria própria.

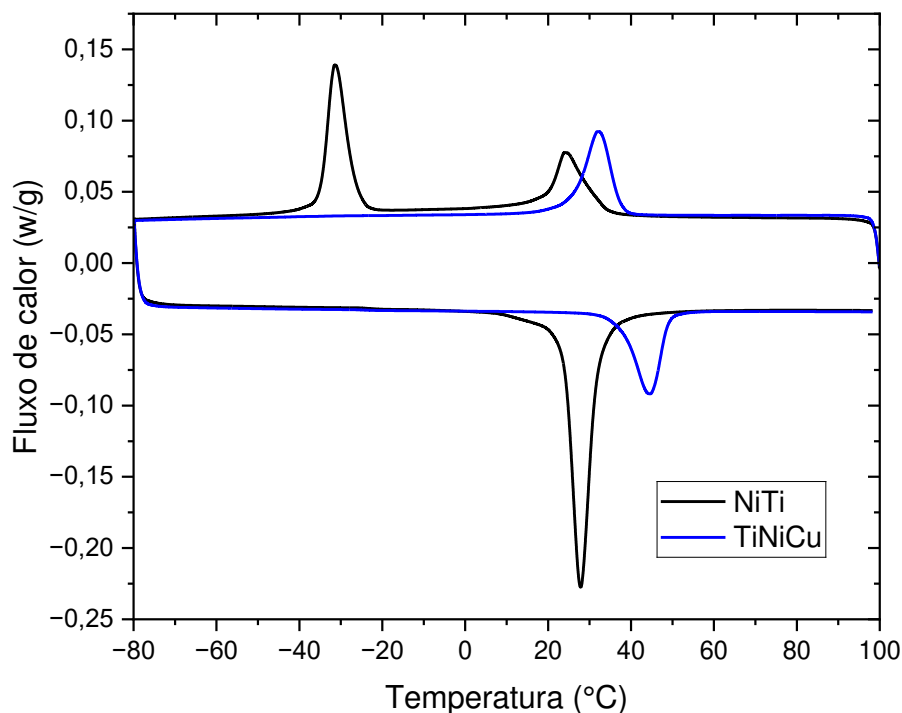
4.3. CARACTERIZAÇÃO

Como mencionado, após a fabricação das molas, foi feita a limpeza e o jateamento com óxido de alumínio. Depois disso é feita a caracterização térmica, com o teste de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e a variação de resistência elétrica em função da temperatura (RET). Ambos os testes são feitos com as duas molas tratadas termicamente. A segunda etapa é a caracterização através dos ensaios de tração e de isothermas, realizado na máquina Instron 5582.

4.3.1. Análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC)

As análises de DSC foram feitas para todas as molas testadas, sendo três de NiTi e três de TiNiCu. Na Figura 52 pode-se observar as curvas características para as duas ligas estudadas.

Figura 52: Curvas características para as ligas 50,2Ni49,8Ti e 47Ti32Ni21Cu tratadas termicamente.



Fonte: Autoria própria.

Através dos dados coletados nos ensaios é possível observar as temperaturas de transformação de fase de cada mola fabricada, sendo seis molas. Através da observação das curvas é possível perceber que a liga NiTi é superelástica à temperatura ambiente; além disso, ela apresentou fase R em todos os ensaios de DSC. Já as amostras da liga TiNiCu têm temperaturas da fase austenita final (A_f) na faixa de 50 °C, se mostrando uma liga termoativada. Na Tabela 4 pode-se verificar essas temperaturas para as duas ligas, 50,2Ni49,8Ti e 47Ti32Ni21Cu, chamadas de NiTi e TiNiCu respectivamente.

Tabela 4: Temperaturas de transformação de fase das molas fabricadas.

	PRet_ NiTi	GRet_ NiTi	GCir_ NiTi	PRet_ TiNiCu	GRet_ TiNiCu	GCir_ TiNiCu
M_s (°C)	-34,9	-21,3	-4,1	37,5	38,8	43,1
M_f (°C)	-26,3	-29,0	-19,7	26,0	26,8	33,6
R_s (°C)	32,7	27,2	23,6	-	-	-
R_f (°C)	20,0	15,1	13,6	-	-	-
A_s (°C)	23,7	23,7	30,6	37,5	38,1	47,5
A_f (°C)	32,1	30,0	44,4	49,1	52,3	57,5
Entalpia M (J/g)	7,5	8,8	8,3	5,8	8,0	9,8
Entalpia A (J/g)	15,0	16,8	16,8	5,5	7,9	9,5
Histerese (°C)	67	51,3	48,4	11,6	13,5	14,4

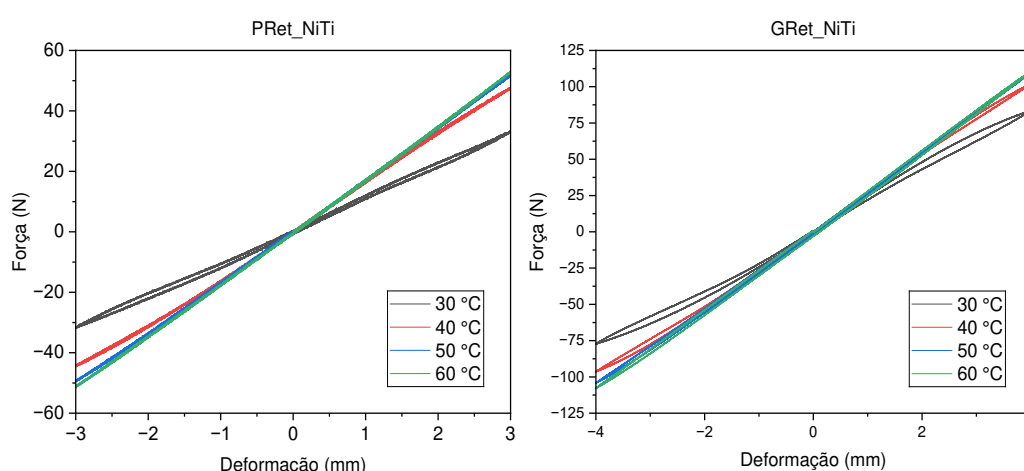
Fonte: Autoria própria.

Os resultados das análises de DSC estão de acordo com a literatura. Recentemente, PEREIRA et al. (2023) fabricou grampos a partir da liga TiNiCu, com temperaturas de transformação coerentes com as que foram apresentadas nesse trabalho. Um exemplo disso é a temperatura austenita final apresentada por ela foi de 60,4 °C, enquanto as molas fabricadas nesse trabalho possuem A_f que variam entre 50 e 60 °C. Além disso, SIMÕES (2017) fabricou diversos componentes a partir da liga NiTi, que apresentaram temperaturas de transformação compatíveis com as molas fabricadas nesse trabalho.

4.3.2. Ensaios mecânicos

Primeiramente, foi realizado o ensaio de ciclagem a temperaturas constantes para os dois tamanhos (pequena e grande) de molas de seção retangular da liga 51,2Ni49,8Ti (%at). As curvas das molas podem ser vistas na Figura 53:

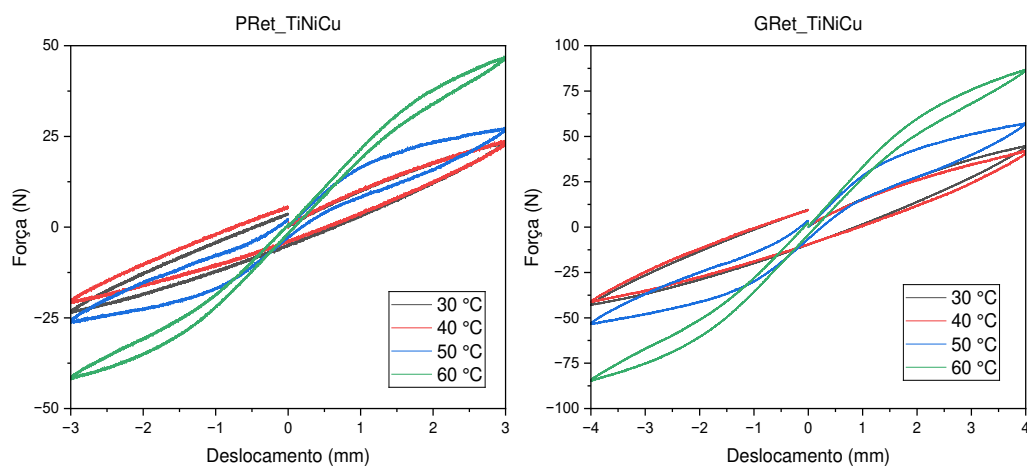
Figura 53: Curvas força- deslocamento para as duas molas da liga Ni50,2Ti49,8 (%at) em diferentes temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

Os mesmos testes foram feitos para as molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at). Com base nas temperaturas de transformação das molas, que apresentam os valores de A_f como 49,1 °C para a mola pequena e 52,3 °C para a mola grande. Assim, as curvas mostram que o comportamento da liga é coerente com as temperaturas de transformação, apresentando tensões residuais e aumento da força nas temperaturas de 30, 40 e 50 °C e comportamento superelástico na temperatura de 60 °C. O aumento da força em função da temperatura é uma característica intrínseca às LMFs, pois esses materiais são bastante sensíveis às mudanças de temperatura, obedecendo à lei de Clausius–Clapeyron (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). As curvas dos ensaios para as duas molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) são mostradas na Figura 54.

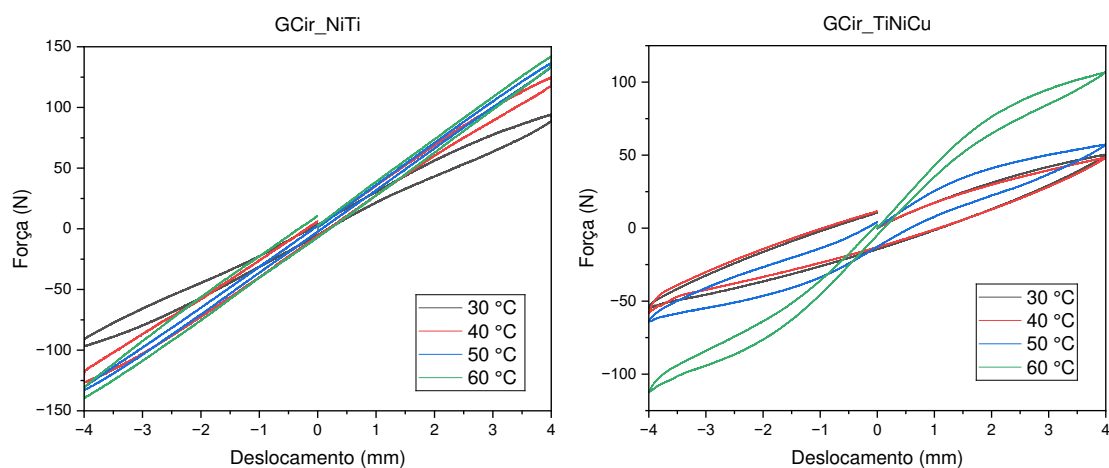
Figura 54: Curvas força-deslocamento para as molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) em diferentes temperaturas: PRet_TiNiCu (esq.) e GRet_TiNiCu (dir.).



Fonte: Autoria própria.

O ensaio de ciclagem a temperaturas constantes também foi realizado para as molas de seção circular equivalente, nas duas ligas estudadas (Figura 55).

Figura 55: Curvas força-deslocamento para as duas molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) em diferentes temperaturas.



Fonte: Autoria própria.

As forças máximas para cada temperatura são mostradas na Tabela 5, onde pode-se observar que para as molas de Ni-Ti a força aumenta gradativamente com o aumento da temperatura (30, 40 e 50 °C), até que chega em um patamar em que se mantém praticamente constante (de 50 para 60 °C). Para as molas de TiNiCu, o comportamento é quase o oposto: as forças se mantêm praticamente constantes até chegar próximo de A_f . Depois que atinge esse patamar, começam a aumentar.

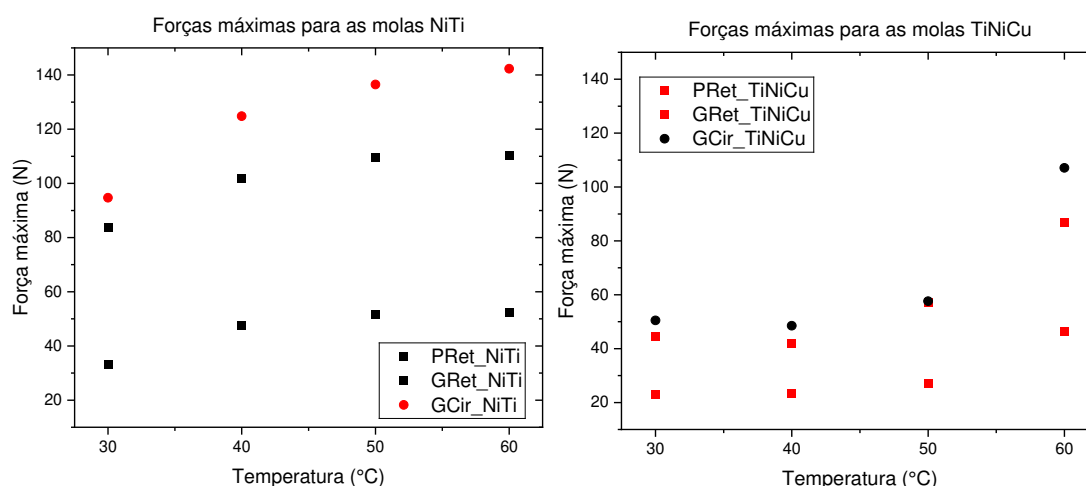
Tabela 5: Dados de força máxima e rigidez secante calculados para as molas estudadas em cada ensaio de ciclagem a temperaturas constantes.

Mola	Força em cada isoterma (N)				Rigidez secante $\times 10^3$ (N/m)			
	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
PRet_NiTi	33,3	47,6	51,7	52,5	11,1	15,9	17,2	17,5
GRet_NiTi	83,6	101,8	109,5	110,3	20,9	25,5	27,4	27,6
GCir_NiTi	94,7	124,8	136,5	142,3	23,7	31,2	34,1	35,6
PRet_TiNiCu	23,1	23,4	27,2	46,5	7,7	7,8	9,1	15,5
GRet_TiNiCu	44,6	41,8	57,3	86,8	11,2	10,5	14,3	21,7
GCir_TiNiCu	50,5	48,5	57,6	107,1	12,6	12,1	14,4	26,8

Fonte: Autoria própria.

Esse fenômeno pode ser mais bem observado na Figura 56, que mostra através das curvas de todas as molas estudadas em cada temperatura. Note que as duas molas de cada liga possuem comportamentos praticamente iguais entre si, mudando apenas a força que cada uma suporta.

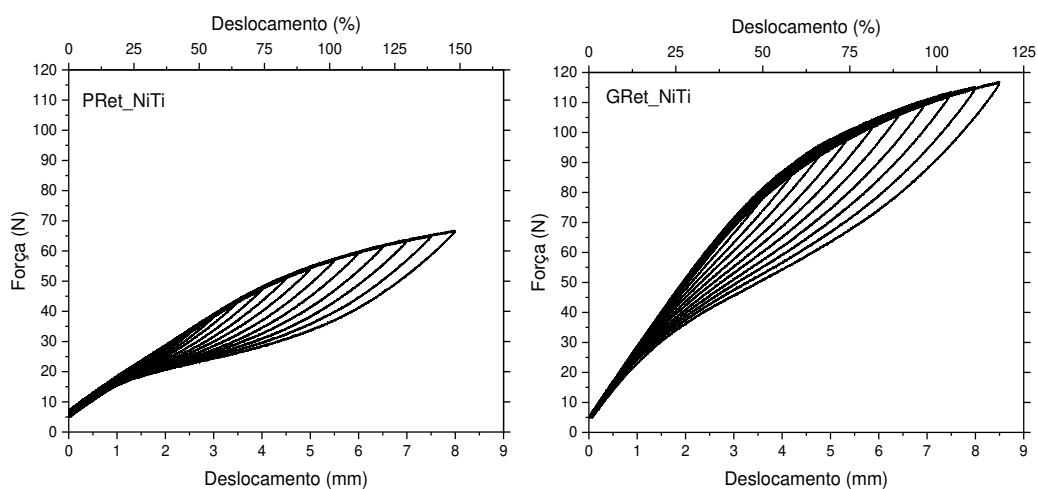
Figura 56: Forças máximas para as molas estudadas em cada temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Depois dos ensaios de ciclagem a temperaturas constantes, foram feitos ensaios de tração para avaliar o comportamento mecânico das molas. A mola pequena suportou uma deformação de 8 mm, e a mola grande suportou 8,5 mm. As curvas força-deformação para as duas molas da liga 50,2Ni49,8Ti são mostradas na Figura 57.

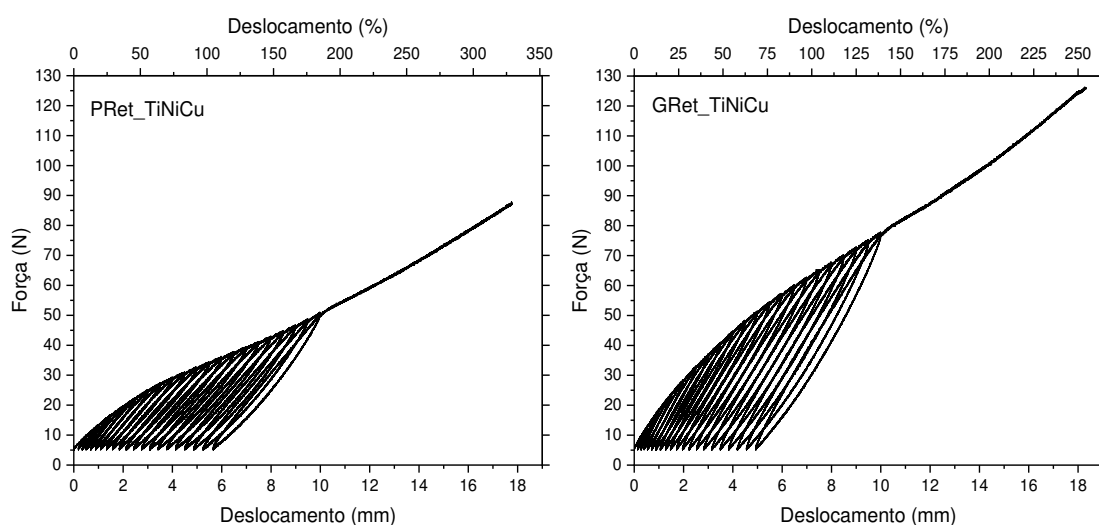
Figura 57: Curvas força-deslocamento para as duas molas da liga 50,2Ni49,8Ti (%at) na temperatura de 30 °C.



Fonte: Autoria própria.

Para os ensaios de tração, os resultados mostram curvas coerentes com a liga 47Ti32Ni21Cu (%at), pois apresenta tensões residuais devido à temperatura na qual o ensaio foi feito. Na Figura 58 podem ser vistas as curvas força-deformação para as duas molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) na temperatura de 30 °C.

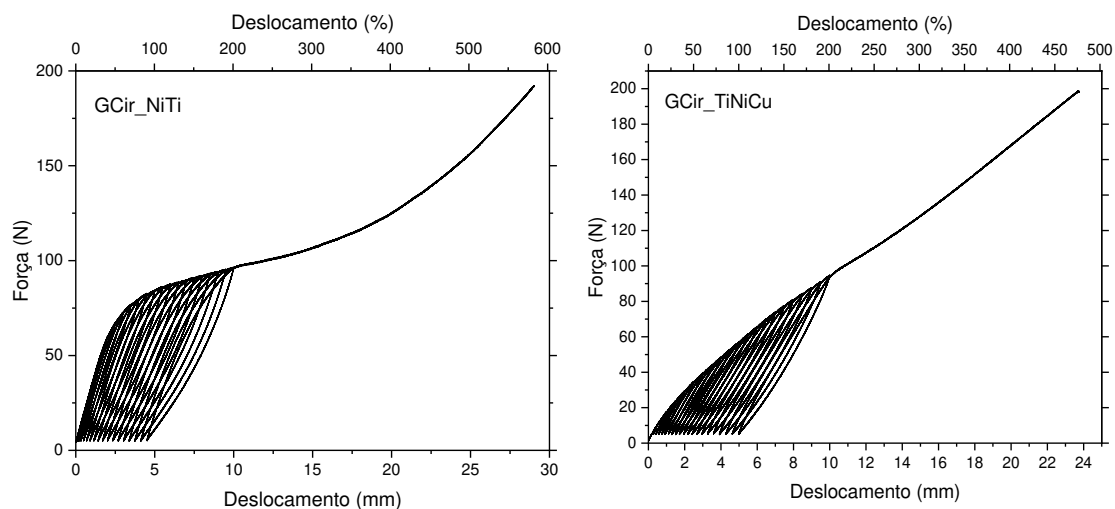
Figura 58: Curvas força-deslocamento para as duas molas da liga 47Ti32Ni21Cu (%at) na temperatura de 30 °C.



Fonte: Autoria própria.

Ensaio realizados com molas de seção circular equivalente fabricadas em ligas NiTi e TiNiCu evidenciaram seus comportamentos característicos. Observou-se que a curva da mola de seção circular em NiTi apresentou diferenças em relação à mola de seção retangular. Enquanto as molas de seção retangular exibiram comportamento superelástico, a mola de seção circular apresentou tensões residuais. Essa diferença é atribuída, principalmente, às temperaturas de transformação de fase das molas. Nas molas de seção retangular, a temperatura final de austenita foi de aproximadamente 30 °C, enquanto na mola de seção circular foi de 44,4 °C. As curvas força-deslocamento para as molas de seção circular equivalente das duas ligas são mostradas na Figura 59.

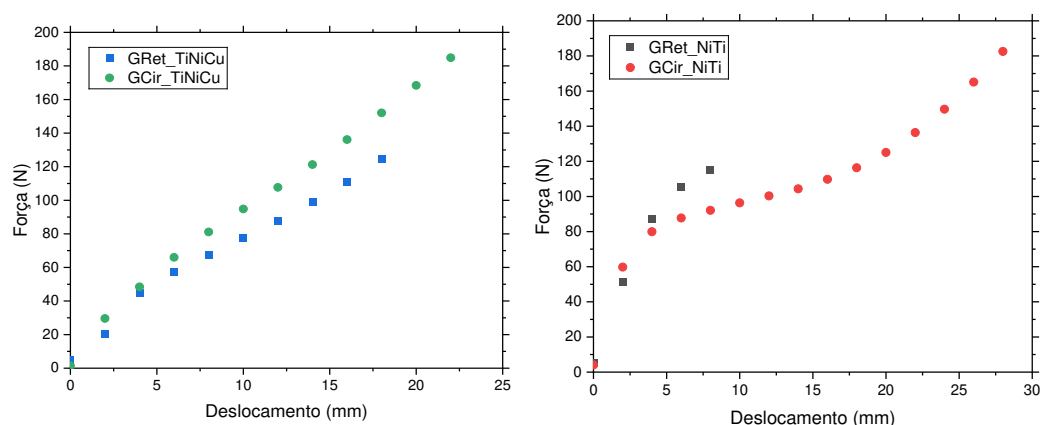
Figura 59: Curvas força-deslocamento para as molas de seção circular equivalente das ligas 50,2Ni49,8Ti (esquerda) e 47Ti32Ni21Cu (direita) na temperatura de 30 °C.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados mostrados, foram feitas duas curvas comparando as molas de seção retangular e circular equivalente, para as duas ligas estudadas: NiTi e TiNiCu. Foram coletados os dados da força nos deslocamentos múltiplos de 2 mm (por exemplo: 2, 4, 6 mm, e assim por diante) até o rompimento. O objetivo dessa coleta de dados foi a comparação entre o comportamento das curvas das molas de seção circular e retangular. As curvas com os dados coletados são mostradas na Figura 60.

Figura 60: Curvas força-deslocamento das molas de seção retangular e circular equivalente, na temperatura de 30 °C, para as ligas NiTi e TiNiCu.



Fonte: Autoria própria.

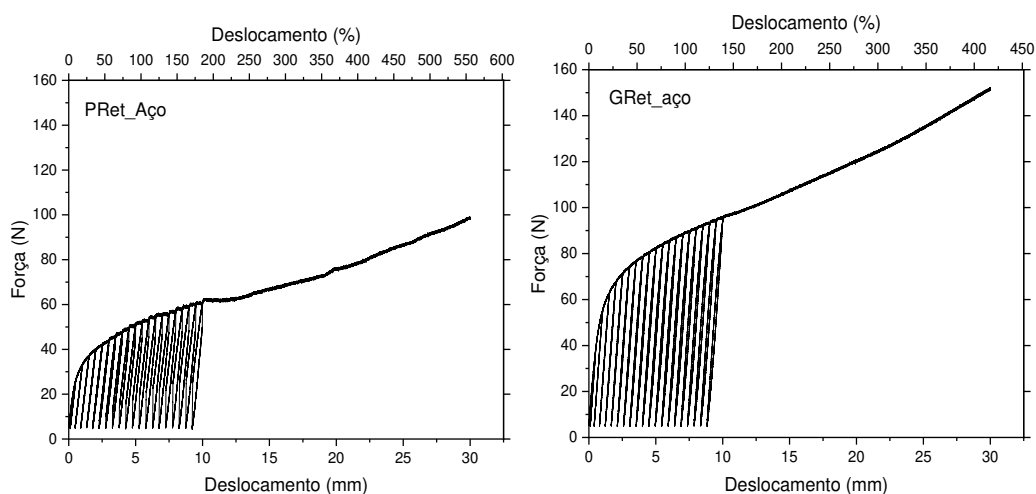
Observando as curvas, é possível observar que as molas de seção circular equivalente suportaram um deslocamento consideravelmente maior, quando comparadas com as de seção retangular. Isso provavelmente se deve à distribuição de deformação na seção do fio da mola durante o carregamento. De acordo com TSUBOUCHI; TAKAHASHI; KUBOKI (2014), na seção circular, sua simetria geométrica reduz concentrações de tensões e resulta em maior resistência, garantindo um comportamento mais previsível e linear da mola. Por outro lado, na mola de seção retangular, sua geometria alongada provoca um comportamento não uniforme sob carga, reduzindo a eficiência do material em resistir à deformação.

Outro ponto interessante foi o fato de a força das molas circulares serem maiores que as retangulares nos mesmos deslocamentos. Isso é visível nas molas de TiNiCu, mas o inverso ocorre nas molas de NiTi. Isso pode ser explicado pelas temperaturas de transformação de fase das molas. Nas molas de TiNiCu, o ensaio se deu a 30 °C, que é abaixo da temperatura A_f . Resultados similares foram apresentados por TSUBOUCHI; TAKAHASHI; KUBOKI (2014), que fez testes com molas de seção circular e retangular e demonstrou que as molas de seção circular apresentam forças ligeiramente maiores que as de seção retangular.

Nas molas de NiTi, as temperaturas de mudança de fase influenciaram o comportamento dos resultados; a A_f da mola de seção circular é de 44 °C, enquanto na mola de seção retangular, a A_f foi de 30 °C. Isso explica o formato das curvas, com a mola de seção circular apresentando tensões residuais e forças mais baixas, enquanto na mola de seção circular apresenta comportamento superelástico e forças mais altas.

Também foram feitos ensaios de tração com molas de aço inox 304, para efeito de comparação. As curvas são similares às das molas da liga 47Ti32Ni21Cu no sentido de que elas apresentam deformação residual (Figura 61). Entretanto, a mola de NiTiCu consegue recuperar as deformações residuais após aquecimento, enquanto as molas de aço apresentam deformações permanentes.

Figura 61: Curvas força-deslocamento para as duas molas de aço inox 304 na temperatura de 30 °C.



Fonte: Autoria própria.

Devido sua ductilidade característica, as duas molas de aço inox 304 não se romperam no ensaio. O ensaio foi até 30 mm em ambas as molas, limite de segurança da máquina. Na Figura 62 é possível verificar que a mola de aço inox 304 se plastificou, diferentemente das molas de ligas com memória de forma estudadas, que se romperam nos ensaios.

Figura 62: Mola de aço inox 304 após o ensaio.



Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de tração, foram realizados cálculos para comparação entre as molas e as ligas metálicas utilizadas. Na tabela 6 são mostrados os valores da força, rigidez secante, energia dissipada por ciclo e fator de perda para as molas fabricadas. Todos esses parâmetros foram obtidos com o deslocamento de 8 mm; esse valor foi escolhido devido ao fato da mola PRet_NiTi suportar 8 mm no ensaio. Assim, seria possível calcular os parâmetros para todas as molas em um mesmo patamar de deslocamento.

Tabela 6: Parâmetros calculados com base nos ensaios realizados nas molas fabricadas com deslocamento de 8 mm.

Código	Força (N)	Rigidez secante $\times 10^{-3}$ (N/m)	En. Dissipada por ciclo (MJ/m³)	Fator de perda (η)
Pret_NiTi	66,72	7,72	0,1680	0,0128
Gret_NiTi	115,33	13,87	0,1813	0,0178
Gcir_NiTi	92,12	16,43	0,0725	0,0146
Pret_TiNiCu	43,03	9,00	0,0489	0,0116
Gret_TiNiCu	67,72	12,87	0,0403	0,0121
Gcir_TiNiCu	81,13	16,08	0,0396	0,0114
Pret_Aço	56,82	41,47	0,0808	0,0376
Gret_Aço	91,12	54,15	0,0396	0,0233

Fonte: Autoria própria.

Com base nos dados apresentados, pode-se verificar que as forças apresentadas pela liga NiTi são maiores que as apresentadas pela liga TiNiCu. Isso também foi verificado nos ensaios de temperatura constante, devido às temperaturas de mudança de fase de cada material.

Os valores de rigidez secante mostraram uma aproximação entre as ligas, sendo que de maneira geral os valores das molas da liga TiNiCu são ligeiramente superiores aos de NiTi. Quanto às molas de aço inox, observa-se uma faixa muito superior de valores de rigidez secante. O que pode explicar esse fenômeno é o módulo de elasticidade do aço, muito superior aos das ligas LMF.

O fator de perda apresentado pelas molas NiTi são superiores aos calculados para as molas de TiNiCu. Além disso, eles se mostram coerentes com valores encontrados na literatura. SANTIAGO (2018) apresentou valores de fator de perda que variam entre 0,006 e 0,049 para molas de seção circular de NiTi, enquanto a faixa encontrada nesse trabalho varia entre 0,0116 e 0,0376. Isso mostra que embora as molas sejam diferentes, elas se encontram no mesmo patamar de fator de perda.

A energia dissipada por ciclo também foi mostrada por SANTIAGO (2018), variando de 0,08 a 6,93 MJ/m³, e nesse trabalho foram calculados W_d na faixa entre 0,0396 a 0,1813 MJ/m³. Além disso, nota-se que as molas superelásticas de NiTi apresentaram W_d consideravelmente superior às de TiNiCu. Isso se dá porque a área do laço superelástico é maior que a área do laço de uma liga termoativada, como é o caso da liga TiNiCu. Além disso, quando se compara as molas de ambas as ligas com relação à seção do fio, percebe-se que as de seção retangular apresentam valores mais altos de W_d ; isso ocorre também devido ao volume da mola, que é maior para as molas de seção circular.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho de pesquisa foram fabricadas molas de seção retangular e circular, de ligas com memória de forma da família NiTi e de materiais convencionais, como o aço. O projeto dos canais de alimentação foi otimizado através de simulação computacional, possibilitando a fabricação de protótipos com boa qualidade superficial e com o mínimo de defeitos possível. Após os ensaios, tratamento de dados e análise dos resultados obtidos nessa pesquisa, pode-se concluir que:

- Com o uso de fundição de precisão foram fabricadas molas LMF de boa qualidade baseada em molas comerciais;
- Através da simulação de fundição foi possível fazer a otimização dos desenhos dos canais de alimentação;
- As abas desenvolvidas para fixação da mola nas garras da máquina de ensaio funcionaram de forma satisfatória, sem que houvesse rompimento ou escorregamentos nessas áreas;
- As molas apresentaram resultados satisfatórios de resistência mecânica, com comportamento compatível com cada tipo de liga utilizada, sendo uma Ni-Ti superelástica e a outra TiNiCu termoativada;
- As molas de seção circular equivalente apresentaram forças e deslocamentos maiores quando comparadas às molas de seção retangular;
- As molas fabricadas em aço apresentaram grandes deslocamentos, sem se romper;
- Os valores de rigidez secante mostraram uma aproximação entre as ligas, sendo os valores das molas da liga TiNiCu ligeiramente superiores aos de NiTi;
- Quanto às molas de aço inox, observa-se valores mais altos de rigidez secante, quando comparados com as ligas NiTi e TiNiCu. O que pode explicar esse fenômeno é o módulo de elasticidade do aço, muito superior ao das ligas estudadas;
- O fator de perda apresentado pelas molas NiTi apresentou resultados superiores aos calculados para as molas de TiNiCu. Os valores de fator

de perda para as molas NiTi se mostram coerentes com valores encontrados na literatura;

- A energia dissipada por ciclo nesse trabalho foi encontrada na faixa entre 0,0396 a 0,1813 MJ/m³;
- As molas superelásticas de NiTi apresentaram energia dissipada por ciclo consideravelmente superior às de TiNiCu. Isso ocorre devido à área do laço superelástico, que é maior que a área do laço de uma liga termoativada, como é o caso da liga TiNiCu.
- As molas fabricadas e testadas nesse trabalho são passíveis de aplicação em projetos onde se necessita de molas que ocupem pouco espaço ou que necessitem de grandes deflexões.

6. REFERÊNCIAS

ABUBAKAR, R. A.; HU, Y.; WANG, F.; WANG, L. **Modeling and Experimental Validation of the Hysteretic Dynamics of Shape Memory Alloy Springs**. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, v. 13, n. 1, 2020.

ALBUQUERQUE, C. E. DA S. **Estudo de um processo de fundição de precisão rápida usando simulação computacional: aplicação à componentes miniaturizados de liga com memória de forma Cu-Al-Mn**. 2023. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ASSAWAKAWINTIP, T.; SANTIWONG, P.; KHANTACHAWANA, A.; SIPIYARUK, K.; CHINTAVALAKORN, R. **The Effects of Temperature and Time of Heat Treatment on Thermo-Mechanical Properties of Custom-Made NiTi Orthodontic Closed Coil Springs**. Materials, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15093121>.

BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquina de Shigley**. 10. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2016.

CAIN, T. **19. Spring design and manufacture - workshop practice series**. 1. ed. Hertfordshire, EN: Argus books, 1988.

CARLSON, H. **Spring designer's handbook**. New York: Marcel Dekker, 1978.

CARVALHO, C. C. DE. **Simulação computacional para avaliação e otimização de parâmetros de fundição em ligas alumínio-silício**. 2021. (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica Vol II - Processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: Makron Books do Brasil, 1986. v. 2.

DE SOUZA, E.F.; DA SILVA, P.C.S.; GRASSI, E.N.D.; DE ARAÚJO, C.J.; DE LIMA, A.G.B. **Critical Frequency of Self-Heating in a Superelastic Ni-Ti**

Belleville Spring: Experimental Characterization and Numerical Simulation. Sensors 2021, 21, 7140. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21217140>

ELAHINIA, M. H. **Shape Memory Alloy Actuators.** Toledo, OH, USA: Wiley, 2016.

GOMES DE OLIVEIRA, C.; LUIZ GUESSER, W.; BAUMER, I. **O USO DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR.** 2003. IV Seminário de Fundição, Volta Redonda, RJ. Disponível em: https://www.tupy.com.br/wp-content/uploads/2021/06/simulacao_processo_fundicao.pdf. Acesso em 10 jan. 2023.

GONEN, D.; ORAL, A.; CAKIR, M. C. **Investigating the benefits of using circular die springs instead of rectangular die springs.** Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, v. 38, n. 7, p. 799–812, jul. 2015.

LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications.** New York: Springer, 2008.

MONTENEGRO, E. DE O. S. **Estudo Do Comportamento Termomecânico De Telas De Ligas Com Memória De Forma Ni-Ti Obtidas Por Fundição De Precisão.** 127f, 2016. Dissertação (Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Processos de fabricação - Fundição.** Apostila do curso Técnico de Mecânica Industrial. Florianópolis: Centro federal de educação tecnológica de santa Catarina, 2007. Disponível em: <https://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/fundicao.pdf>. Acesso em: 15 Fev. 2023.

NESPOLI, A., BASSANI, E., TORRE, D. D., DONNINI, R., VILLA, E., & PASSARETTI, F. **An Experimental Study on Pseudoelasticity of a NiTi-Based Damper for Civil Applications.** Smart Materials and Structures, 2017. DOI:10.1088/1361-665x/aa882e

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2013. v. 4.

PEREIRA, A. B. DE A.; SILVA, P. C. S. DA; DOURADO, I. C.; ARAÚJO, C. J. DE. **Manufacturing and Analysis of a Heat-Activated Staple Using Ti-Ni-Cu Shape Memory Alloy**. In: 27th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Florianópolis, 2023.

RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. N. **Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. New York, USA. Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-03188-0.

RAVI, B. **Casting Simulation and Optimisation: Benefits, Bottlenecks and Best Practices**. Indian Foundry Journal, n. 2008, p. 1–12, 2008.

SANTIAGO, J. J. DE M. **Comportamento Térmico e Mecânico de Molas de Liga com Memória de Forma Ni-Ti obtidas por fundição de precisão**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

SIMÕES, J. DE B. **Fabricação de componentes miniaturizados de ligas com memória de forma usando fundição de precisão**. João Pessoa: Editora Ideia, 2017.

NAZMA SULTANA, MD. RAFIQUZZAMAN, YOUNOSUR RAHMAN, APURBA DAS. **Solidification and Filling Related Defects Analysis Using Casting Simulation Technique with Experimental Validation**. International Journal of Mechanical Engineering and Applications. Vol. 6, No. 6, 2018, pp. 150-160. DOI: 10.11648/j.ijmea.20180606.12

TSUBOUCHI, T.; TAKAHASHI, K.; KUBOKI, T. **Development of Coiled Springs With High Rectangular Ratio in Cross-Section**. Procedia Engineering, 2014. DOI:10.1016/j.proeng.2014.10.042.