

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

**FABRICAÇÃO E TESTES DE PARAFUSOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE
FORMA DO SISTEMA NiTi**

Francisco Fernando Roberto Pereira

Campina Grande, Paraíba

Dezembro/2014

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

**FABRICAÇÃO E TESTES DE PARAFUSOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE
FORMA DO SISTEMA NiTi**

Francisco Fernando Roberto Pereira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica como
requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Orientador: Dr. Carlos José de Araújo

Agência Financiadora: CNPq/CAPES

Campina Grande, Paraíba

Dezembro/2014

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA
UFCG**

P436f

Pereira, Francisco Fernando Roberto.

Fabricação e testes de parafusos de ligas com memória de forma do sistema NiTi / Francisco Fernando Roberto Pereira. – Campina Grande, 2014.

221 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos José de Araújo".
Referências.

1. Ligas com Memória de Forma. 2. Superelasticidade. 3. Parafusos de LMF. 4. Cisalhamento Transversal Cíclico. 5. Planejamento Experimental. I. Araújo, Carlos José. II. Título.

CDU 669.018.2 (043)

À minha família, pelo apoio e amor incondicional de sempre.

CURRICULUM VITAE DO CANDIDATO

Vencedor do 1º Prêmio Ciser de Inovação Tecnológica. Aplicação de Arruelas Belleville de Ligas com Memória de Forma como Atuadores no Setor de Petróleo e Gás, Joinville, SC, 2009.

Semestre de estudos (*Fall Semester*) na Universidade de Kentucky, Lexington, KY, EUA, 2011.

Estágio Integrado, Universidade de Kentucky, Departamento de Engenharia Agrícola e Biosistemas, 2011.

Engenheiro Mecânico, Universidade Federal de Campina Grande, UFCG, Campina Grande, PB, 2012.

PUBLICAÇÕES DURANTE O PERÍODO DO MESTRADO

Trabalhos completos publicados em periódicos

1. **PEREIRA, F. F. R.**; COUTINHO, M. G. F; MIRANDA, B. M.; ARAÚJO, C. J. DE 2014. STUDY OF A CU-AL-MN SHAPE MEMORY ALLOY PRODUCED BY PLASMA MELTING FOLLOWED BY INJECTION MOLDING. MRS Proceedings, 1611, imrc2013-4a-006 DOI:10.1557/opl.2014.753.

2. SIMÕES, J. B.; **PEREIRA, F. F. R.**; OTUBO, JORGE; ARAÚJO, C. J. DE, 2014. INFLUENCE OF THE REPROCESSING BY PLASMA MELTING AND INJECTION MOLDING ON THE THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF A NI-TI SMA MANUFACTURED BY VIM. MRS Proceedings, 1611, imrc2013-4a-007 DOI:10.1557/opl.2014.754.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1. MARTINS, L. V.; **PEREIRA, F. F. R.**; ARAÚJO, C. J. DE; ARAÚJO, A. C. M. DE; FRESAMENTO DE ROSCAS DE NIQUEL-TITÂNIO PARA FABRICAÇÃO DE CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO. In: XXI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica – CREEM 2014, Rio de Janeiro, RJ, 2014.
2. SIMÕES; **PEREIRA, F. F. R.**; ARAUJO, C. J. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO REPROCESSAMENTO POR FUSÃO A PLASMA E MOLDAGEM POR INJEÇÃO NAS PROPRIEDADES TERMOMECÂNICAS DA LMF NI-TI FABRICADA PELO PROCESSO VIM. In: XI CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CIBEM 2013, 2013, Buenos Aires. Materiais e estruturas ativas, 2013.
3. SIMÕES; **PEREIRA, F. F. R.**; ARAÚJO. DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ATUADORES CÔNICOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA. In: XI CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CIBEM 2013, 2013, Buenos Aires. Materiais e Estruturas Ativas, 2013.
4. ARAUJO, S. S.; **PEREIRA, F. F. R.**; GRASSI, E. N. D.; ARAUJO, C. J. ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES DINÂMICAS DE LIGAS Cu-Al-Ni COM MEMÓRIA DE FORMA. In: XI CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CIBEM 2013, 2013, Buenos Aires. Processos de Fabricação, 2013.
5. **PEREIRA, F. F. R.**; COUTINHO, M. G. F.; GRASSI, E. N. D.; ARAÚJO. ESTUDO DE UMA LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA Cu-Al-Mn PRODUZIDA POR FUSÃO A PLASMA SEGUIDA DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO. In: XI CONGRESSO IBERO-AMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CIBEM, 2013, Buenos Aires. Materiais e Estruturas Ativas, 2013.

6. **PEREIRA, F. F. R.**; SIMÕES; ARAUJO, C. J. DEVELOPMENT AND THERMOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF SHAPE MEMORY ALLOY CONICAL ACTUATORS. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013, Ribeirão Preto. Smart Materials and Structures, 2013.

7. SIMÕES; **PEREIRA, F. F. R.**; OTUBO, J.; ARAUJO, C. J. EVALUATION OF THE INFLUENCE OF PLASMA REMELTING FOLLOWED BY INJECTION MOLDING ON THE THERMAL PROPERTIES OF A NI-TI SHAPE MEMORY ALLOY OBTAINED BY PROCESS VIM. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013, Ribeirão Preto. Smart Materials and Structures, 2013.

8. **PEREIRA, F. F. R.**; ALMEIDA, J. P. S.; Filho; ARAUJO, C. J. SIMULTANEOUS MEASUREMENT OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF SHAPE MEMORY ALLOYS USING A PERIODIC TEMPERATURE FIELD. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering, 2013, Ribeirão Preto. Smart Materials and Structures, 2013.

Resumos expandidos publicados em anais de congressos

1. SIMÕES, J.; **PEREIRA, F. F. R.**; ARAÚJO. THERMOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF SHAPE MEMORY ALLOY BELLEVILLE ACTUATORS. In: Symposium of Intelligent Materials and Control, 2012, Ilha Solteira. SIMC, 2012.

2. De Oliveira; GRASSI, E. N. D.; **PEREIRA, F. F. R.**; ARAÚJO. SMART LOCKWIRE: A SHAPE MEMORY ALLOY WIRE FOR IMPROVED RELIABILITY IN BOLTED FIXING APPLICATIONS. In: IV Symposium of Intelligent Materials and Control, 2012, Ilha Solteira. Smart Materials and Structures, 2012.

Resumos publicados em anais de congressos

- 1. PEREIRA, F. F. R.;** ARAÚJO, A. C. M. DE; SIMÕES, J. B.; ARAUJO, C. J DE; ANALYSIS OF MECHANICAL TURNING ON TRANSFORMATION TEMPERATURES OF NITINOL BARS. In: XXIII International Materials Research Congress, 2014, Cancun. Advanced Structural Materials, 2014.
- 2. SIMÕES, J. B.;** **PEREIRA, F. F. R.;** OTUBO, J.; ARAUJO, C. J. INFLUENCE OF HEAT TREATMENTS ON A NI-TI SHAPE MEMORY ALLOY OBTAINED USING VIM AND REPROCESSED BY PSPP. In: XXIII International Materials Research Congress, 2014, Cancun. Advanced Structural Materials, 2014.
- 3. SIMÕES, J. B.;** **PEREIRA, F. F. R.;** OTUBO, J.; ARAUJO, C. J. INFLUENCE OF THE REPROCESSING BY PLASMA MELTING AND INJECTION MOLDING ON THE THERMOMECHANICAL PROPERTIES OF A NI-TI SMA MANUFACTURED BY VIM. In: XXII International Materials Research Congress, 2013, Cancun. Advanced Structural Materials, 2013.
- 4. PEREIRA, F. F. R.;** COUTINHO, M. G. F.; MIRANDA, B. M.; ARAUJO, C. J. STUDY OF A CU-AL-MN SHAPE MEMORY ALLOY PRODUCED BY PLASMA MELTING FOLLOWED BY INJECTION MOLDING. In: XXII International Materials Research Congress, 2013, Cancun. Advanced Structural Materials, 2013.

**FABRICAÇÃO E TESTES DE PARAFUSOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE
FORMA DO SISTEMA NiTi**

Francisco Fernando Roberto Pereira

Dissertação aprovada em 05 de Dezembro de 2014, pela banca examinadora constituída dos seguintes membros:



Dr. Carlos José de Araújo

Orientador

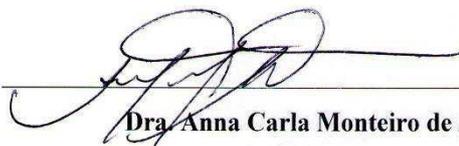
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Walman Benicio de Castro

Examinador Externo

UAEM/CCT/UFCG



Dra. Anna Carla Monteiro de Araújo

Examinadora Externa

COPPE/UFRJ

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu criador, que proporciona esta intensa e vibrante alegria de viver, não só por ter me dado a oportunidade de vivenciar essa enriquecedora experiência de mestrado, mas também pela sanidade mental e emocional durante todo esse período de estudos.

À minha família, em especial aos meus pais, Evanilza e Francisco, que mesmo tendo pouca escolaridade, sempre me incentivaram e apoiaram os meus estudos. Agradeço também às minhas irmãs, Fernanda e Renata, pelo apoio e incentivo incondicionais dados à minha formação, desde o primeiro dia em que eu entrei na escola.

Aos meus amigos, sempre presentes nas minhas conquistas e nas minhas desventuras, sempre alegres e dispostos a me ajudar. Nesse caso, cito principalmente: Josué, Rafaela e Leonardo Faustino, Tiago Eduardo e Euller Gonçalves.

Aos amigos LaMMEA, que sempre estiveram presentes em todos os momentos, seja compartilhando glórias ou angústias. Nesse caso, cito principalmente: Jackson, Bruno Moura, Leonardo Pereira, Daniella Bezerra, Suelene, Estephanie e Henrique, George Anselmo e Zoroastro.

Ao Professor Carlos José de Araújo, pela oportunidade de participar de seu grupo de pesquisa desde 2008 e também por sua atenção e orientação em todos os trabalhos que realizei durante o meu período de graduação e mestrado.

À Professora Anna Carla, da UFRJ, pela paciência e dedicação ao meu trabalho, não só durante o período em que estive no Rio de Janeiro, mas também depois durante toda a fabricação dos meus corpos-de-prova. Estendo o agradecimento ao pessoal do CEFCON, principalmente Lucy e Milena, e ao Sandro do SENAI Barreto, pela colaboração fundamental nesse trabalho.

Ao Professor Walman, pelos ensinamentos nas disciplinas e por ter aceitado o convite para compor a banca.

Aos professores da banca, que se dispuseram a colaborar com seus conhecimentos e experiência.

E a todos que de forma direta ou indireta contribuíram com a realização deste trabalho. Muito obrigado.

FABRICAÇÃO E TESTES DE PARAFUSOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA DO SISTEMA NiTi

RESUMO

Em muitas situações, os parafusos de sistemas mecânicos são encarados como componentes de importância secundária, quando na verdade podem ser fundamentais para seu funcionamento, desde que sejam utilizados dentro dos limites e modos de carregamento estabelecidos pelo fabricante. Caso isso não ocorra, os parafusos podem falhar de diversas formas. Visando solucionar ou minimizar esses inconvenientes, novos materiais têm sido estudados, a exemplo de materiais funcionais, como é o caso das Ligas com Memória de Forma (LMF). Essas ligas metálicas pertencem à classe dos materiais inteligentes e possuem a surpreendente capacidade de recuperar uma deformação “aparentemente plástica”, quando aquecidas acima de uma determinada temperatura crítica. Em virtude não apenas das propriedades especiais das LMF (Efeito Memória, Superelasticidade e outras), a aplicação desses materiais vem crescendo em diversos setores. Nesse contexto, uma possível alternativa para minimizar/eliminar os inconvenientes associados ao uso de parafusos convencionais seria a fabricação desses elementos a partir de LMF. Nesse panorama, o principal objetivo desse trabalho foi fabricar e testar parafusos de LMF do sistema NiTi (NiTiNol). Os testes realizados visaram analisar o comportamento dos parafusos de LMF do ponto de vista da geração de força por meio do Efeito Memória de Forma (EMF), da deformação por Superelasticidade (SE) e do afrouxamento por Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC). Para analisar os efeitos das diversas variáveis na resposta ao CTC, estes testes foram conduzidos de acordo com uma metodologia de planejamento experimental (PE). Com base nos resultados obtidos em geração de força, deformação superelástica e relaxação cíclica, é possível afirmar que os parafusos de LMF NiTi possuem um grande potencial aplicativo, atestando o caráter inovador deste trabalho, que servirá de base para futuros estudos na área de fixadores de LMF.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Superelasticidade, Parafusos de LMF, Cisalhamento Transversal Cíclico, Planejamento Experimental.

MANUFACTURING AND TESTS OF SHAPE MEMORY ALLOY BOLTS FROM NITI-SYSTEM

ABSTRACT

In many situations, the bolts of a mechanical design are considered as having a secondary importance, when in fact they have fundamental aspects of its operation, once they are used within the loading limits established by the manufacturer. If not, the bolts may failure through different manners. In order to solve or minimize these problems associated with bolts, new materials have been studied, such as Shape Memory Alloys (SMA). Such alloys belong to the class of active materials and have the surprising ability to recover an "apparently plastic" strain through a subsequent heating above a critical temperature. The application of these materials has increased on many fields, due to the special properties of these alloys (Shape memory, superelasticity and others). In this context, a possible alternative to minimize or even eliminate the drawbacks associated with conventional bolts would be manufacturing these elements from SMA. In this regard, the main objective of this work was to manufacture and test bolts made of SMA from NiTi-system. The tests aimed to analyze the behavior of SMA bolts from the viewpoint of Shape Memory Effect (SME), Superelasticity (SE), and Transverse Cyclic Shear (TCS). Thus, to analyze the effects of many factors on the response variable, some of the tests were carried out according to a methodology of Design of Experiments (DOE). Based upon the results, one can establish that the SMA bolts have a strong application potential and, in this way, it was possible to attest the innovative nature of this work, which might be the basis for future studies on the field of SMA fasteners.

Keywords: Shape Memory Alloys, Superelasticity, SMA Bolts, Transverse Cyclic Shear, Design of Experiments.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
2.OBJETIVOS	6
2.1.Objetivo Geral	6
2.2.Objetivos Específicos	6
3.JUSTIFICATIVA	8
4.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1.Ligas com Memória de Forma (LMF)	10
4.1.1.Breve Histórico	10
4.1.2.Definição e Comportamento Termomecânico	11
4.1.2.1. Efeito Memória de Forma Simples (EMF)	13
4.1.2.2. Superelasticidade (SE) ou Pseudoelasticidade	15
4.1.2.3. Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD)	17
4.1.3.Panorama Geral sobre as LMF	18
4.1.4.Ligas NiTi.....	20
4.1.5.Fabricação de LMF e seus atuadores	23
4.1.6.Caracterização das LMF	25
4.1.7.Aplicações.....	30
4.1.7.1. Categoria Superelasticidade	30
4.1.7.2. Categoria Atuador	35
4.1.7.3. Categoria Recuperação Livre	38
4.1.7.4. Categoria Recuperação Restrita	39
4.2.Parafusos.....	44
4.2.1.Definição e Classificação	44
4.2.2.Padrões de Roscas	45
4.2.3.Tensões em Roscas.....	47
4.2.4.Torque de Aperto	48
4.2.5.Fabricação Convencional de Parafusos	50
4.2.6.Perda de Pré-carga em Parafusos	53
4.2.7.Afrouxamento Espontâneo (<i>Self-Loosening</i>).....	55
4.2.7.1. O Trabalho de Junker.....	55
4.2.7.2. Deslizamento (<i>Slippage</i>) e Mecanismos de Afrouxamento	56

4.2.7.3. Mecanismos de Afrouxamento por CTC.....	63
4.2.7.4. Modelo Analítico	66
4.2.7.5. Ensaio de CTC	69
4.2.7.6. Tipos e classificação dos Métodos de Prevenção contra Afrouxamento.....	71
4.3.Planejamento de Experimentos.....	73
4.3.1.Introdução.....	73
4.3.2.Planejamento Fatorial 2^k	73
4.3.3.Análise de Variância (ANOVA).....	74
5.MATERIAIS E MÉTODOS	76
5.1.Seleção da LMF	77
5.2.Fabricação dos Parafusos de LMF.....	78
5.2.1.Fabricação dos pinos: Etapa 1	78
5.3.Usinagem das roscas: Etapa 2.....	81
5.4.Caracterização Térmica	84
5.4.1.Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)	85
5.4.2.Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET)	85
5.5.Tratamento Térmico	87
5.6.Caracterização Preliminar	88
5.7.Caracterização Termomecânica.....	89
5.7.1.Caracterização Estática.....	89
5.7.1.1. Ensaio Mecânico Isotérmico (ISO) em Parafusos SE	89
5.7.1.2. Ensaio de Geração de Pré-carga em Função da Temperatura (GPT) em Parafusos AT.....	90
5.7.2.Caracterização Dinâmica	93
5.7.2.1. Ensaio de Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC).....	93
5.7.2.2. Ensaio Dinâmico-mecânico (DMA)	97
5.7.3.Caracterização Morfológica.....	98
5.7.3.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	98
5.7.3.2. Microdureza Vickers	99
6.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	100
6.1.Caracterização Térmica das Barras de LMF NiTi.....	100
6.2.Fabricação dos Parafusos de LMF.....	102

6.3.Caracterização dos Cavacos de Usinagem.....	105
6.3.1.Caracterização Térmica: DSC e RET	105
6.3.2.Caracterização Mecânica via DMA	109
6.3.3.Microdureza Vickers	111
6.4.Caracterização Térmica dos Parafusos de LMF NiTi	113
6.5.Caracterização Preliminar dos Parafusos de LMF NiTi.....	118
6.6.Caracterização Termomecânica dos Parafusos de LMF.....	121
6.6.1.Caracterização Estática.....	121
6.6.1.1. Ensaio Superelásticos Isotérmicos (ISO)	121
6.6.1.2. Ensaio de Geração de Pré-carga em Função da Temperatura	123
6.6.2.Caracterização Dinâmica dos Parafusos de LMF: Ensaio de CTC	128
6.6.2.1.Varredura de Parâmetros: Pré-carga Inicial (P_i), Amplitude (A) e Frequência (f).....	128
6.6.2.2. Ensaio de CTC em parafusos de LMF NiTi: AT e SE	133
6.6.1.2.1. Análise de Variância (ANOVA)	140
6.7.Caracterização Morfológica: MEV	145
6.7.1.Superfícies de Fratura.....	145
6.7.2.Danos Causados por Ensaio CTC.....	150
7.CONCLUSÕES	154
8.CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS.....	159
9.SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	161
10.REFERÊNCIAS.....	162
11.ANEXOS	174

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Exemplos de Ligas com Memória de Forma.	18
Tabela 2. Propriedades gerais das LMF.	19
Tabela 3. Propriedades físicas e mecânicas de ligas NiTi.	21
Tabela 4. Séries de roscas com padrão UNS.	46
Tabela 5. Classe das roscas com padrões UNS e ISO.	46
Tabela 6. Designação qualitativa do nível de travamento para fixadores submetidos a ensaios de CTC de acordo com a norma DIN 65151.	71
Tabela 7. Coeficientes para ANOVA.	75
Tabela 8. Composição química em peso das duas barras de NiTi.	77
Tabela 9. Dimensões dos parafusos de LMF fabricados.	78
Tabela 10. Parâmetros de corte para barras de NiTi.	80
Tabela 11. Diâmetros de corte e suas respectivas velocidades.	81
Tabela 12. Variáveis de entrada e níveis para ensaios de geração de pré-carga em função da temperatura (GPT) em parafusos NiTi AT.	92
Tabela 13. Valores de Pi determinados com base na tensão limite de elasticidade dos parafusos.	96
Tabela 14. Variáveis de entrada e seus respectivos níveis para ensaios de CTC em três tipos distintos de parafusos: atuador (AT), superelástico (SE) e de aço.	96
Tabela 15. Temperaturas de transformação de fase das barras circulares de NiTi usadas para a usinagem dos parafusos AT (Barra 1, 55,16Ni-Ti) e SE (Barra 2, 55,91Ni-Ti).	101
Tabela 16. Propriedades térmicas de transformação (DSC e RET) de cavacos de LMF 55,16Ni-Ti usinados em diferentes velocidades de corte.	107
Tabela 17. Rigidez de cavacos de LMF 55,16Ni-Ti ensaiados a 80°C.	111
Tabela 18. Média e desvio-padrão amostral para microdureza em cavacos de LMF 55,16Ni-Ti.	112
Tabela 19. Temperaturas de transformação obtidas via RET de CPs de NiTi analisados em duas regiões.	114
Tabela 20. Temperaturas de transformação obtidas via RET de CPs tratados termicamente a 450°C durante 30 min, com posterior resfriamento em água (~27°C).	115

Tabela 21. Temperaturas de transformação obtidas via RET de CPs tratados termicamente a 350°C durante 30 min, com posterior resfriamento em água (~27°C).	116
Tabela 22. Temperaturas de transformação obtidas via RET de parafusos de LMF NiTi, antes e após o tratamento térmico proposto (350 °C/30 min).	117
Tabela 23. Deformações plásticas acumuladas durante os ensaios de estabilização mecânica.	120
Tabela 24. Coeficientes de equações lineares estabelecidas para a relação entre variação de resistência elétrica e deformação para um parafuso SE.	123
Tabela 25. Variáveis de entrada e de resposta usadas nos ensaios de GPT com os parafusos AT (LMF 55,91Ni-Ti).	125
Tabela 26. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta.	125
Tabela 27. Análise de variância (ANOVA) para a resposta ΔP_{EMF}	126
Tabela 28. Variáveis de entrada e de resposta usadas nos ensaios de CTC.	129
Tabela 29. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta	130
Tabela 30. Variáveis de entrada e de resposta para os ensaios de CTC em parafusos M6 de aço.	130
Tabela 31. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta.	131
Tabela 32. Análise de variância (ANOVA) para os fatores de influência na resposta P_f	132
Tabela 33. Variáveis de entrada e de resposta usadas nos ensaios de CTC realizados em componentes especiais de travamento e em parafusos de LMF (SE e AT).	137
Tabela 34. Variáveis de entrada e de resposta para os ensaios de CTC em parafusos AT.	141
Tabela 35. Variáveis de entrada e de resposta para os ensaios de CTC em parafusos SE.	141
Tabela 36. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta.	142
Tabela 37. Análise de variância (ANOVA) para os fatores de influência na resposta P_f em parafusos AT submetidos a CTC.	143

Tabela 38. Análise de variância (ANOVA) para os fatores de influência na resposta P_f em parafusos SE submetidos a CTC.	143
Tabela 39. Detalhamento das falhas ocorridas nos diversos parafusos NiTi.	146
Tabela 40. Categorias métricas de propriedades mecânicas para parafusos de aço (de porca) e parafusos prisioneiros.	177
Tabela 41. Fatores de área para cisalhamento por corte de roscas.	179

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração do comportamento idealizado de uma união com parafusos superelásticos.	8
Figura 2. Comportamento termomecânico de uma arruela Belleville de LMF. (a) Força gerada por EMF após deformação pseudo plástica compressiva e aquecimento. (b) Superelasticidade em compressão.	9
Figura 3. Representação esquemática da transformação de fase em Ligas com Memória de Forma.	11
Figura 4. Ilustração das temperaturas de transformação de fase de LMF.	12
Figura 5. Esquema ilustrativo do comportamento termomecânico de um parafuso com EMF.	14
Figura 6. Comportamento termomecânico de um parafuso com EMF.	15
Figura 7. Esquema ilustrativo do comportamento termomecânico de um parafuso SE.	16
Figura 8. Comportamento tensão - deformação de um parafuso SE.	17
Figura 9. Transformação de fase numa liga binária NiTi.	21
Figura 10. Esquema ilustrando o efeito da adição de Ni (% at) na temperatura A_f de LMF NiTi binárias.	22
Figura 11. Dependência da temperatura de transformação martensítica (M_s) em função do percentual de Ni (% at) de uma LMF de NiTi binária.	23
Figura 12. Exemplo de resultado típico de um ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para uma LMF de NiTi.	26
Figura 13. Resistência Elétrica adimensional em função da Temperatura (RET) para uma amostra de NiTi.	26
Figura 14. Resposta superelástica de um fio de LMF NiTi submetido a 20 ciclos de carregamento/descarregamento.	28
Figura 15. Geração de força através da ativação do EMF em uma arruela lisa de LMF (NiTi). (a) Sem pré-carga. (b) Dois níveis de pré-carga diferentes.	29
Figura 16. Aplicações de LMF na Odontologia: (a) e (b) Arco ortodôntico; (c) Arco de palato e	31

Figura 17. Aplicações de LMF na Medicina: (a) Grampo de LMF; (b) Fixação de fratura do complexo zigomático; (c) Espaçador vertebral e (d) Placa de NiTi para fratura de mandibular.....	31
Figura 18. (a) Esquema de ganhos SE simétricos para desenvolvimento de um novo sistema de fixação. (b) Força x comprimento do gancho em diferentes condições: recozidas a 350 e 450°C	32
Figura 19. (a) Dispositivo utilizando mola helicoidal de LMF NiTi. (b) Comportamento mecânico.....	33
Figura 20. (a) Dispositivo utilizando arruelas Belleville de LMF NiTi. (b) Comportamento mecânico.	33
Figura 21. Junta em T com fixadores de aço e LMF NiTi. (a) Corpos-de-prova de NiTi utilizados na junta. (b) Montagem experimental. (c) Comportamento mecânico da junta.	34
Figura 22. Comparação entre comportamentos histeréticos de corpos-de-prova padrões de LMF NiTi SE. (a) Diâmetro de 13 mm. (b) Diâmetro de 12,4mm.....	35
Figura 23. Comparação entre atuadores convencionais e atuadores de LMF. (a) Fios de NiTi SmartFlex®. (b) Dispositivo utilizado para abertura do tanque de combustível.	36
Figura 24. Robô voador BionicOpter® com 13 graus de liberdade usando fios de LMF como atuadores.....	36
Figura 25. Áreas de aplicações de atuadores térmicos de LMF em automóveis: (1) Radiador; (2) Embreagem; (3) Gestão de combustível; (4) Controle de temperatura; (5) Controle do motor; (6) Refrigeração do freio; (7) Controle de transmissão e (8) Ajuste da suspensão	37
Figura 26. Exemplos de atuadores térmicos de LMF. (a) Válvulas de segurança anti-incêndio Memrysafe® e Firechek®, respectivamente. (b) Motor de NiTiNOL.....	37
Figura 27. Exemplos de aplicações de recuperação livre de LMF. (a) Armações de óculos no estado martensítico. (b) Filtro de Simon.	38
Figura 28. Exemplos de conectores/acoplamentos de LMF. (a) Primeira aplicação comercial de LMF: o CryoFit®. (b) Anéis de LMF para união de tubos. (c) Conectores Tinel Lock®.	40

Figura 29. Curvas Tensão - Temperatura para um fio de LMF deformado e fixado. (a) Deformação de 10%. (b) Deformação de 14% em relação ao comprimento útil do fio.	41
Figura 30. SMARt Lockwire. (a) Montagem experimental para ensaio de geração de força; (b) Força gerada durante o aquecimento em função do tempo e (c) Evolução da temperatura com o tempo.	42
Figura 31. Ensaio de geração de força em arruelas Belleville de LMF NiTi. (a) Arranjo experimental. (b) Força gerada para deformações de 10, 15 e 20 %.	43
Figura 32. Esquema demonstrativo da atuação de um parafuso atuador de LMF numa junta.	43
Figura 33. Esquema demonstrativo da classificação dos métodos de união, com destaque para fixadores roscados e parafusos.	44
Figura 34. Forma padrão de rosca UNS e ISO.	45
Figura 35. Esquema ilustrativo do fluxo de forças de um parafuso sob tração.	47
Figura 36. Esquema das forças agindo na interface porca-parafuso.	48
Figura 37. Processo de laminação de roscas de parafuso.	51
Figura 38. Estruturas de grãos de roscas. (a) Cortadas. (b) Laminadas.	52
Figura 39. Ilustração do processo de forjamento da cabeça de parafusos.	52
Figura 40. Esquemática dos processos de perda de pré-carga em parafusos. (a) Perda não-rotacional. (b) Perda rotacional.	53
Figura 41. DCL para uma porca sendo apertada num parafuso.	54
Figura 42. Bloco em plano inclinado. (a) Em repouso. (b) Sob ação de vibração transversal.	56
Figura 43. Junta aparafusada submetida a cisalhamento transversal cíclico.	57
Figura 44. Torque de afrouxamento gerado pelo movimento da rosca do parafuso.	57
Figura 45. Esquema para análise do requisito para deslizamento.	58
Figura 46. Torque de afrouxamento sem aplicação de cisalhamento cíclico. (a) Torque oriundo da componente de reação à pré-carga aplicada. (b) Torque oriundo da energia de torção armazenada durante o aperto.	59
Figura 47. Ilustração de um parafuso submetido a uma força transversal externa F_s . (a) Deslizamento da cabeça do parafuso devido a uma força de cisalhamento. (b) Forças nas roscas em um parafuso submetido a uma força de cisalhamento.	60

Figura 48. Ilustração da flexão de um parafuso e deslizamento das roscas associado a uma força de cisalhamento F_s .	61
Figura 49. Deslizamento devido a deformação elástica. (a) Cabeça. (b) Roscas do parafuso.	62
Figura 50. Sumário dos requisitos obrigatórios para ocorrência do afrouxamento de parafusos.	63
Figura 51. Acúmulo de deslizamento localizado durante um ciclo de CTC.	64
Figura 52. Exemplo do processo de afrouxamento de um parafuso caracterizado por deslizamento completo da cabeça e da rosca. (a) Curva de histerese. (b) Regiões de contato.	65
Figura 53. Deslizamento linear numa rosca quadrada.	67
Figura 54. Máquina de ensaios proposta por JUNKER, (1969).	69
Figura 55. Comportamento típico de um parafuso sob CTC.	70
Figura 56. Classificação dos métodos de prevenção contra afrouxamento de parafusos.	71
Figura 57. Parafuso Step Lock projetado para resistir ao afrouxamento.	72
Figura 58. Distribuição de F.	75
Figura 59. Fluxograma da metodologia utilizada.	76
Figura 60. Parafuso padrão ISO e suas dimensões.	78
Figura 61. Fabricação de pinos de LMF NiTi através da usinagem de barras em torno mecânico.	79
Figura 62. Amostras de cavacos de NiTi retiradas em três (3) diâmetros de corte diferentes.	80
Figura 63. Desenho técnico da fresa H5150106-M10X1 para usinagem das roscas externas dos parafusos de LMF NiTi.	81
Figura 64. Desenhos esquemáticos das trajetórias para usinagem das roscas de parafusos de LMF	82
Figura 65. Dispositivo para a fixação dos pinos de NiTi na fresadora.	83
Figura 66. Usinagem das roscas nos pinos NiTi com 6 mm de diâmetro. (a) Ponteira de centralização dos pinos. (b) Detalhe do pino montado na placa de três castanhas.	84
Figura 67. Calorímetro DSC modelo Q20 da TA Instruments, com detalhe do interior.	85

Figura 68. Banho termo regulável Hubber CC902.	86
Figura 69. Esquema da montagem dos corpos de prova no interior do banho termo regulável.....	87
Figura 70. Representação esquemática da montagem do parafuso de LMF NiTi na máquina de ensaios MTS 810.....	88
Figura 71. Arranjo experimental esquemático para ensaios isotérmicos (ISO) com medição simultânea de variação de resistência elétrica.	90
Figura 72. Arranjo experimental esquemático para ensaios de GPT em parafusos AT.	91
Figura 73. Garras projetadas para realização de ensaios de CTC em máquina de ensaios MTS.	94
Figura 74. Esquema representativo dos ensaios de CTC em máquina de ensaios MTS.	95
Figura 75. Analisador Dinâmico Mecânico (DMA) Q800 da TA Instruments utilizado como mini máquina de ensaios termomecânicos.....	97
Figura 76. Microscópio eletrônico de varredura, Shimadzu SSX-550.....	98
Figura 77. Microdurômetro Future-Tech, modelo FM-700.....	99
Figura 78. Termogramas DSC antes e após o tratamento térmico das barras NiTi. (a) 1, 55,16Ni-Ti. (b) 2, 55,91Ni-Ti.....	100
Figura 79. Parafuso de LMF NiTi fabricado por usinagem.....	103
Figura 80. Análise do perfil de rosca do parafuso 1 (CP1) em quatro angulações diferentes:.....	103
Figura 81. Análise do perfil de rosca do parafuso 2 (CP2) em quatro angulações diferentes:.....	104
Figura 82. Análise do perfil de rosca do parafuso (CP3) em quatro angulações diferentes:.....	104
Figura 83. Curvas de transformação obtidas via DSC para cavacos de LMF 55,16Ni-Ti coletados em diferentes velocidades de corte.....	106
Figura 84. Curvas de transformação obtidas via RET para cavacos de LMF 55,16Ni-Ti coletados em diferentes velocidades de corte.....	106
Figura 85. Curvas de transformação de fase obtidas por DSC para uma LMF de NiTi submetida a tratamentos térmicos de recozimento em várias temperaturas.	108

Figura 86. Temperaturas de transformação de fase obtidas via DSC e RET em função da velocidade de corte para os cavacos da LMF 55,16Ni-Ti.....	108
Figura 87. Estabilização cíclica do comportamento mecânico a 80°C dos cavacos de LMF 55,16Ni-Ti.....	110
Figura 88. Comportamento mecânico dos cavacos de LMF 55,16Ni-Ti para cálculo da rigidez.....	110
Figura 89. Microdureza Vickers de cavacos de LMF 55,16Ni-Ti. (a) Box-plot. (b) Posições de indentação.	112
Figura 90. Curvas de transformação RET para a os parafusos de LMF. (a) CP AT - 1 fabricado a partir de barra 1. (b) CP SE - 1 fabricado a partir da barra 2.....	113
Figura 91. Curvas de transformação RET para os parafusos de LMF NiTi antes e após o tratamento térmico (450 °C/30 min).....	115
Figura 92. Curvas de transformação RET para a os parafusos de LMF NiTi antes e após o tratamento térmico (350 °C/30 min).....	116
Figura 93. Estabilização mecânica dos parafusos AT a temperatura ambiente.....	118
Figura 94. Estabilização mecânica dos CPs SE a temperatura ambiente.....	119
Figura 95. Teste de superelasticidade em um parafuso de LMF 55,91NiTi. (a) Pré-carga versus deformação. (b) Pré-carga versus deformação em função da temperatura. (c) Rigidez em função da Temperatura.....	121
Figura 96. Variação de resistência elétrica em função da deformação CP SE – 8 para cada temperatura de teste.....	122
Figura 97. Pré-carga gerada por um parafuso AT (a, b, c) e por um parafuso de aço (d) em função tempo.	124
Figura 98. Influência de d e T_f sobre a pré-carga gerada por um parafuso AT de LMF 55,91Ni-Ti. (a) Superfície de resposta. (b) Curva de contorno.....	127
Figura 99. Comportamento típico da evolução de pré-carga de um parafuso M6 em aço submetido a CTC.....	128
Figura 100. Influência de A e P_i sobre a pré-carga final de um parafuso M6 de aço submetido a CTC.	132
Figura 101. Comportamento da pré-carga de parafusos AT submetidos a CTC. ...	133
Figura 102. Comportamento da pré-carga de parafusos SE submetidos a CTC. ...	134
Figura 103. Comportamento da pré-carga de vários dispositivos de travamento submetidos a CTC.....	135

Figura 104. Comparativo do percentual da pré-carga final remanescente (P_f/P_i) para todos os ensaios de CTC realizados.....	136
Figura 105. Comparativo do percentual da pré-carga final (P_f/P_i) para ensaios de CTC em componentes especiais de travamento.....	138
Figura 106. Contato lateral durante CTC. (a) Material com módulo de elasticidade elevado: contato lateral por deslizamento. (b) Material com módulo de elasticidade baixo: contato lateral por flexão.....	140
Figura 107. Influência de A e P_i sobre a pré-carga final de um parafuso AT submetido a CTC.....	144
Figura 108. Influência de A e P_i sobre a pré-carga final de um parafuso SE submetido a CTC.....	144
Figura 109. Parafusos de LMF NiTi fraturados durante a caracterização termomecânica.....	146
Figura 110. Imagens em MEV das superfícies de fratura dos CPs AT.	147
Figura 111. Imagens em MEV das superfícies de fratura dos CPs SE.	148
Figura 112. Superfícies de fratura de corpos-de-padrão de NiTi submetidos a ensaios de tração:	149
Figura 113. Superfície do parafuso M6 de aço como recebido.	150
Figura 114. Superfície do parafuso M6 de aço depois de 2500 ciclos de CTC.....	151
Figura 115. Superfície das roscas do parafuso de LMF NiTi CP AT 3 submetido a 7500 ciclos de CTC.....	152
Figura 116. Superfície das roscas do parafuso de LMF NiTi CP SE 5.....	152
Figura 117. Classificação de parafusos de fixação.	174
Figura 118. Exemplos de vários parafusos de cabeça com encaixe.....	175
Figura 119. Diversos exemplos de (a) Porcas e (b) Arruelas.....	176
Figura 120. Esquema de um diagrama tensão - deformação típico para parafusos.	176
Figura 121. Pontos críticos e componentes de tensão em elementos de fixação roscados.....	181
Figura 122. Diagramas de corpos livres do parafuso e dos componentes fixados..	182
Figura 123. Efeitos causados pela pré-carga sobre o parafuso e material. (a) Pré-carga e deflexões iniciais. (b) Junta sob ação de uma carga P e forças resultantes.	184
Figura 124. Modelo de molas em paralelo para a união aparafusada.....	184

ABREVIações E SÍMBOLOS

ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Atuador
CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CEFCON	Centro de Estudos em Fabricação e Comando Numérico
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo-de-prova
CP AT	Corpo-de-prova fabricado da barra com EMF
CP SE	Corpo-de-prova fabricado da barra com SE
CT	Centro de Tecnologia da UFRJ
CTC	Cisalhamento Transversal Cíclico
DCL	Diagrama de Corpo Livre
DIN	Deutsches Institut für Normung
DP	Desvio-padrão amostral
DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura
EMF	Efeito Memória de Forma Simples
EMFD	Efeito memória de forma Duplo
GPT	Geração de Pré-carga em função da Temperatura
ISO	Isotérmico
LaMMEA	Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas
LMF	Ligas com Memória de Forma
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NASM	National Aerospace Standards
NiTi	Níquel-Titânio
NOL	Naval Ordnance Laboratory
PE	Planejamento Experimental
PF	Planejamento Fatorial
PSPP	Plasma Skull Push-Pull

PPGEM	Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RET	Resistência Elétrica em função da Temperatura
SE	Superelasticidade/Superelástico
SMA	Shape Memory Alloys
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UNC	Série de rosca grossa
UNF	Série de rosca fina
UNEF	Série de rosca ultra fina
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da UFCG
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

Letras latinas

A	Austenita / Amplitude
at	Atômico
Au	Ouro
A_f	Temperatura final de transformação austenítica
Al	Alumínio
A_p	Temperatura pico de transformação austenítica
A_s	Temperatura inicial de transformação austenítica
Be	Berílio
C	Carbono
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
d	Diâmetro externo
d_c	Diâmetro médio
d_p	Diâmetro primitivo
d_r	Diâmetro menor
D_c	Diametro de corte
$D_{externo}$	Diametro externo – Arruela lisa
$D_{interno}$	Diametro interno – Arruela lisa

E	Módulo de elasticidade
f	Frequência
Fe	Ferro
F	Força nas roscas/Variável do teste de hipótese
F_i	Pré-carga inicial
F_s	Força de cisalhamento transversal
Ga	Gálio
H_t	Histerese térmica
H_0	Hipótese nula
H_t	Hipótese alternativa
i	Corrente elétrica
In	índio
k	Número de variáveis
K_i	Fator de torque
L	Comprimento útil do parafuso
m	Número de experimentos únicos
M	Martensita
M_f	Temperatura de transformação martensita final
Mn	Manganês
M_p	Temperatura pico de transformação martensítica
M_s	Temperatura de transformação martensítica inicial
n	Número de experimentos / velocidade de rotação
N	Força Normal
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
ρ	Passo / número de coeficientes do modelo
P_f	Pré-carga final
P_i	Pré-carga inicial
Pd	Paládio
QM	Quadrado da média
Pt	Platina
R	Estrutura Romboédrica / Força de reação

R^2	Coeficiente de correlação
R_f	Temperatura de final da fase R / Raio da ferramenta
R_i	Resistência elétrica
R_t	Raio da trajetória
R_{Pn}	Forças de reação oriundas da pré-carga
R_{ref}	Resistência de referência
R_s	Temperatura de início da fase R
S	Momento de flexão / Diâmetro da cabeça
SQ	Soma dos quadrados
S_n	Força de cisalhamento atuando ao longo da rosca do parafuso
Si	Silício
S_p	Resistência de prova
S_{ul}	Resistência à ruptura
S_y	Resistência ao escoamento
$T1$	Trajetoária 1
$T2$	Trajetoária 2
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_f	Temperatura final de aquecimento
T_i	Torque inicial de aperto
T_L	Torque para folgar a porca
T_{TL}	Torque total agindo na direção de afrouxamento
T_p	Torque extra oriundo do elemento de fixação
T_{ps}	Torque extra oriundo do elemento de fixação em condições dinâmicas
T_R	Torque que resiste ao afrouxamento
T_{teste}	Temperatura de teste
Ti	Titânio
U	Passo do parafuso
V_c	Velocidade de corte
x	Coordenada
X_i	Efeito de cada variável
y	Coordenada
Y	Variável resposta

z	Coordenada
Zn	Zinco

Letras gregas

α	Ângulo de hélice da rosca dividido por 2 / nível de significância
β	Ângulo de hélice da rosca
β_i	Metade do efeito de cada variável
β_0	Média global
β_3	Efeito da interação
μ_t	Coeficiente de atrito entre o parafuso e a porca
μ_{ts}	Coeficiente de atrito entre o parafuso e a porca em condições dinâmicas
μ_n	Coeficiente de atrito entre a porca e a superfície
μ_{ns}	Coeficiente de atrito entre a porca e a superfície em condições dinâmicas
\emptyset	Diâmetro da cabeça do parafuso
ε	Deformação
ΔH	Entalpia de transformação de fase
ΔH_c	Entalpia de transformação de fase no resfriamento
ΔH_h	Entalpia de transformação de fase no aquecimento
ΔL	Deformação aplicada
ΔF_{EMF}	Pré-carga gerada por Efeito Memória de Forma
ΔP_{EMF}	Pré-carga gerada por Efeito Memória de Forma
ΔR	Variação de resistência elétrica
σ	Tensão
σ_{Af}	Tensão final de formação de austenita
σ_{As}	Tensão de início de formação de austenita
σ_{Mf}	Tensão final de formação de martensita
σ_{Ms}	Tensão de início de formação de martensita

1. INTRODUÇÃO

Fixadores roscados, incluindo todos os tipos de parafusos, possibilitam a existência da indústria de um modo geral, além de afetarem positivamente a nossa vida cotidiana, pois se tratam de elementos simples e econômicos para unir, de maneira não-permanente, uma variedade de pequenas peças, de maneira a viabilizar o surgimento de sistemas e estruturas de engenharia maiores, como automóveis, aviões, edifícios, teares e máquinas diversas (BICKFORD, 2007).

Em muitas situações, as “porcas e parafusos” de um determinado projeto mecânico são encarados como tendo importância secundária, quando na verdade têm aspectos fundamentais para seu funcionamento. O sucesso ou falha de um projeto está fortemente vinculado à seleção e ao uso apropriado de seus fixadores. Além disso, o projeto e a fabricação de fixadores movimentam uma grande parte da economia de um país. Literalmente, milhares de diferentes tipos de fixadores são oferecidos por diversos fabricantes ao redor do mundo, ao mesmo tempo que milhares ou até mesmo milhões de fixadores são usados numa única montagem, dependendo de sua complexidade. Por exemplo, o avião Boeing 747 usa aproximadamente 2,5 milhões de fixadores, alguns dos quais com custos bastante elevados (NORTON, 2006).

De maneira geral, o parafuso de rosca helicoidal é considerado a base para os fixadores roscados. Este componente clássico, a exemplo de outros fixadores, é largamente utilizado na indústria e em equipamentos diversos. No entanto, um grande inconveniente de sua utilização é o fato de que, para seu funcionamento correto, alguns fatores devem ser respeitados, como a sua utilização em aplicações que não imponham grandes variações de carga, e conseqüentemente de deformação, e o fato de que para sua instalação devem ser efetuados torques de aperto que gerem pré-cargas dentro dos valores especificados pelo fabricante (SHIGLEY et al, 2006). O não cumprimento de tais especificações pode levar esse componente à ruptura ou acúmulo de deformações plásticas, tendo em vista que os parafusos são fabricados a partir de materiais metálicos convencionais, com limite de deformação elástica muito limitado ($\sim 0,2\%$) (CALLISTER, 2008). A repetição de operações de montagem e desmontagem acarreta também um acúmulo de deformações permanentes, o que pode levar a uma ruptura prematura dos parafusos (SHIGLEY et al, 2006).

Nessa ótica, além da ruptura por excesso de carregamento, há duas causas principais de falhas das uniões aparafusadas: afrouxamento espontâneo de parafusos e desaperto. Tradicionalmente, o projeto da aplicação envolve a tentativa de descobrir qual das duas causas terá o maior efeito sobre a união e a escolha de uma solução que permita lidar com esse problema (BICKFORD, 2007; SHIGLEY et al, 2006; NORDLOCK, 2014).

O afrouxamento espontâneo de um parafuso está associado à vibração da junta (cargas dinâmicas) e/ou à imposição de Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC) (JUNKER, 1969; ECCLES et al, 2009). De acordo com ECCLES et al, (2009), embora existam porcas especiais que previnam o afrouxamento espontâneo, esses elementos podem não ser eficientes, dependendo das condições de operação da junta parafusada. No caso do desaperto, tem-se um problema que está associado ao assentamento e relaxamento dos parafusos, causados graças as irregularidades das superfícies unidas e submetidas à pré-carga, que tendem a se acomodar, favorecendo à diminuição da força de aperto com o decorrer do tempo (NORDLOCK, 2014).

Se os parafusos falharem por qualquer uma das razões supracitadas ou se a pré-carga da união diminuir a níveis críticos, em decorrência de problemas de montagem ou de condições de serviço, como por exemplo variações bruscas de temperatura, pode haver uma falha catastrófica da união aparafusada. Dependendo da aplicação, este tipo de falha pode ter graves consequências financeiras e até mesmo risco à vida (SKF, 2001; BICKFORD, 2008).

Além desses inconvenientes, também existe uma preocupação com a manutenção de juntas aparafusadas, pois para minimizar os inconvenientes destes métodos de fixação são exigidos esforços de manutenção para aumentar a vida útil da estrutura. Os principais problemas de manutenção relacionados com estas uniões são relacionados ao grande número de junções a serem inspecionados e a acessibilidade de algumas delas, resultando em indisponibilidade e elevando os custos (BICKFORD, 2008).

Visando solucionar ou minimizar os inconvenientes associados aos elementos de união não-permanente, projetistas têm estudado novos fixadores para aumentar a confiabilidade dos projetos de engenharia (SHIGLEY et al, 2006). Além disso, há também a necessidade de melhorar os fixadores já existentes, seja através da

mudança de geometria ou até mesmo pela fabricação desses fixadores utilizando-se novos materiais (SHIGLEY et al, 2006; JANI et al, 2014).

No universo dos chamados “novos materiais” mais estudados da atualidade, estão os materiais ativos, muitas vezes denominados também de materiais inteligentes. Estes materiais apresentam a característica funcional de reagirem a impulsos do ambiente externo, tais como temperatura, luz, carregamento mecânico, tensão e/ou corrente elétrica, entre outros parâmetros (CULSHAW, 1996). Dentre estes materiais estão as Ligas com Memória de Forma (LMF), que são materiais metálicos que possuem a surpreendente capacidade de recuperar uma deformação “aparentemente plástica”, por intermédio de um aquecimento subsequente acima de uma temperatura crítica, através de transformações de fase induzidas no material (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Em virtude não apenas da capacidade de recuperação de forma das LMF, como também da Superelasticidade (SE) e da capacidade que essas ligas apresentam de variar suas propriedades físicas e mecânicas (módulo de Young, amortecimento, resistência elétrica, condutividade térmica, etc) em função da temperatura, a aplicação desses materiais vêm crescendo em diversos setores como, por exemplo, o automotivo (GM, 2013), o de compósitos (RAGHAVAN et al, 2010), o aeroespacial (LAGOUDAS, 2008), o de mini-atuadores (FUJITA & TOSHIYOSHI, 1998) e o biomédico (PETRINI & MIGLIAVACCA, 2011). A maioria das aplicações comerciais têm como base as LMF do sistema Níquel-Titânio (NiTi) (comercialmente chamadas de NiTiNOL) devido a algumas importantes propriedades como, por exemplo, a biocompatibilidade (OTSUKA & WAYMAN, 1998). O sistema de LMF NiTi é baseado na composição equiatômica (equivalente a 55Ni-45Ti em % de peso), dando origem às ligas NiTiX, onde X é um terceiro elemento (Nb, Cu, Hf, etc).

Nesse contexto, uma possível alternativa para minimizar ou até mesmo eliminar os inconvenientes associados ao uso de parafusos convencionais (excesso de deformações plásticas, relaxamento da carga, afrouxamento espontâneo, etc.) seria a fabricação desses componentes mecânicos a partir de LMF, que permitem sua utilização mesmo em grandes faixas de deformação “aparentemente plástica”, que seria recuperada com posterior aquecimento. No caso específico do afrouxamento espontâneo causado por CTC, os parafusos de LMF poderiam funcionar como elementos de amortecimento passivo. Esse fato pode ser explicado pela elevada capacidade de amortecimento passivo da fase martensita termoelástica, devido à

mobilidade das variantes de martensita ou das diferentes interfaces martensita/austenita durante a transformação de fase (VAN HUMBEECK, 2003). Além disso, existe também a possibilidade de utilização do efeito superelástico do material, quando o parafuso estiver operando a uma temperatura de trabalho acima da temperatura crítica de projeto da LMF. Nesse regime, o parafuso poderia trabalhar sujeito à uma deformação recuperável de até 5% (em tração uniaxial), sendo que o mesmo recuperaria sua forma após cessado o carregamento mecânico. Existe ainda uma outra forma de explorar as propriedades de um parafuso de LMF, que seria através da sua utilização como sensor, já que a resistência elétrica do material varia com a temperatura e a deformação superelástica. Ou seja, em teoria poderia ser possível saber o nível de carregamento/deformação do elemento de fixação monitorando-se apenas a resistência elétrica do mesmo. Isso seria de extrema importância para o acompanhamento da tensão/deformação do parafuso, ou até mesmo da junta, em aplicações que exigissem alta confiabilidade e cujo acesso fosse difícil, isto é, em aplicações com uma alta relação custo-benefício. Esse tipo de situação é bastante comum, por exemplo, no setor de Petróleo & Gás (SINTEF, 2000).

Atualmente, no contexto de fixadores/conectores de LMF, existem inúmeros registros de patentes que usam ou o Efeito Memória de Forma (EMF) ou a SE como princípios de funcionamento. Nesse sentido, destacam-se os conectores FrangiBolt® (JOHNSON, 1992), CryoFit®, Cryocon®, UniLok®, CryOlive®, CryoFlare®, CryoTact®, Permacouple®, Tinel Lock® e BetaFlex®, citados por DUERIG, (1990) e STÖCKEL, (1995). Já dentre os trabalhos científicos desenvolvidos no tema, são encontrados poucos registros na literatura. Destacam-se as conexões em luvas para uniões de tubos e dispositivos de pré-carga (arruelas) em uniões flangeadas propostas por ANDERSEN et al, (1997) e ANDERSEN et al, (1999); as porcas de LMF estudadas por ZHANG et al, (2000); as arruelas cilíndricas propostas por HESSE et al, (2004); as juntas com fixadores SE estudadas por ABOLMAALI et al, (2006); os ganchos de LMF estudados por VOKOUN et al, (2008); os dispositivos para centragem de edifícios de SPEICHER et al., (2010); os parafusos superelásticos propostos por TRAVASSOS, (2010); o *SMart Lockwire* proposto por DE OLIVEIRA et al, (2012); as arruelas Belleville (cônicas) estudadas por SIMÕES, (2012) e PEREIRA et al, (2013). Apesar do grande potencial aplicativo e do caráter inovador, o estudo de fixadores de LMF no mundo ainda é pouco explorado, sendo o trabalho proposto por

ZHANG et al, (2000), o único registro encontrado sobre o estudo dinâmico de um prendedor de LMF, que, no caso em questão, se tratava de uma porca sextavada. Mesmo assim, há poucas informações disponíveis sobre a metodologia utilizada para o desenvolvimento do estudo.

Nesse contexto generalizado, o objetivo do presente trabalho foi fabricar, através de uma combinação de processos de usinagem, e caracterizar termomecanicamente dois tipos distintos de parafusos de NiTi: o primeiro apresentando Efeito Memória de Forma (EMF) e o segundo apresentando Superelasticidade (SE), ambas as condições com carregamento em temperatura ambiente. A caracterização foi dividida em três fases: física, estática e dinâmica. Para analisar os efeitos das diversas variáveis envolvidas na caracterização dos parafusos, alguns dos testes foram conduzidos de acordo com uma metodologia de planejamento experimental (PE). Com base nos resultados obtidos é possível afirmar que os parafusos de LMF NiTi possuem um grande potencial aplicativo e, dessa forma, foi possível atestar o caráter inovador deste trabalho, que servirá de base para futuros estudos na área de fixadores de LMF.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é fabricar e avaliar o comportamento estático e dinâmico de 2 (tipos) distintos de parafusos de LMF do sistema NiTi: Superelásticos (SE) e Atuadores (AT).

2.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, derivados do objetivo geral, têm-se:

- Selecionar e adquirir 2 (dois) tipos distintos de barras de NiTi comerciais, passíveis de serem utilizadas na fabricação dos parafusos de LMF. Na temperatura ambiente ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), uma das barras deve apresentar características de superelasticidade e a outra deve apresentar características de efeito memória de forma, para ser usada na fabricação dos parafusos atuadores;
- Desenvolver a fabricação dos parafusos de LMF através da combinação de processos de usinagem;
- Analisar a transformação de fase dos cavacos obtidos da fabricação dos parafusos de LMF;
- Analisar o comportamento térmico dos parafusos fabricados usando Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e ensaios de Resistência Elétrica em função da Temperatura (RET);
- Aplicar uma metodologia de Planejamento Experimental (PE) para avaliar o efeito das diversas variáveis de entrada e de resposta em todos os testes passíveis da aplicação de tal metodologia;

- Realizar ensaios Superelásticos Isotérmicos (ISO) com medição de resistência elétrica para avaliar os níveis de deformação e a variação de rigidez dos parafusos SE;
- Projetar e realizar ensaios de Geração de Pré-carga em função da Temperatura (GPT) em parafusos AT;
- Projetar e realizar ensaios de Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC) nos parafusos de LMF e em fixadores convencionais usados na indústria, com o objetivo de comparar os resultados obtidos.

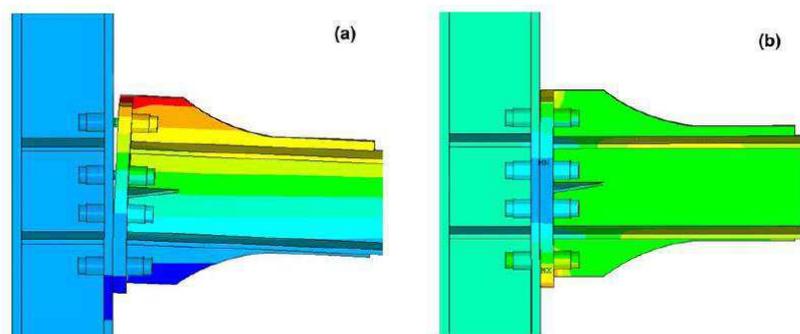
3. JUSTIFICATIVA

Uma possível aplicação para as LMF pode ser a sua utilização, na forma de parafuso ou outro tipo de componente de fixação, para a união de componentes ou partes de sistemas mecânicos submetidos (ou não) a aquecimento, a exemplos de tubulações em geral. Considerando que a estrutura pode ser submetida a cargas de natureza cíclica, pode-se ocasionar a falha de um parafuso tradicional por excesso de deformação plástica irreversível, uma vez que seu limite elástico pode ser ultrapassado repetidas vezes. Assim, a fabricação desse componente usando uma LMF pode representar um importante avanço no projeto de estruturas aparafusadas. Outra justificativa para esta aplicação está associada ao fato de que um parafuso de LMF também pode funcionar como um absorvedor passivo de cargas dinâmicas que por ventura sejam aplicadas à estrutura, graças à capacidade que estas ligas apresentam de recuperar altos níveis de deformação de maneira histerética. A Figura 1 ilustra a atuação esperada para um parafuso de LMF.

Este tipo de comportamento não pode ser proporcionado por um parafuso comum, pois este funciona como uma união de elevada rigidez (MA et al, 2007).

Figura 1. Ilustração do comportamento idealizado de uma união com parafusos superelásticos.

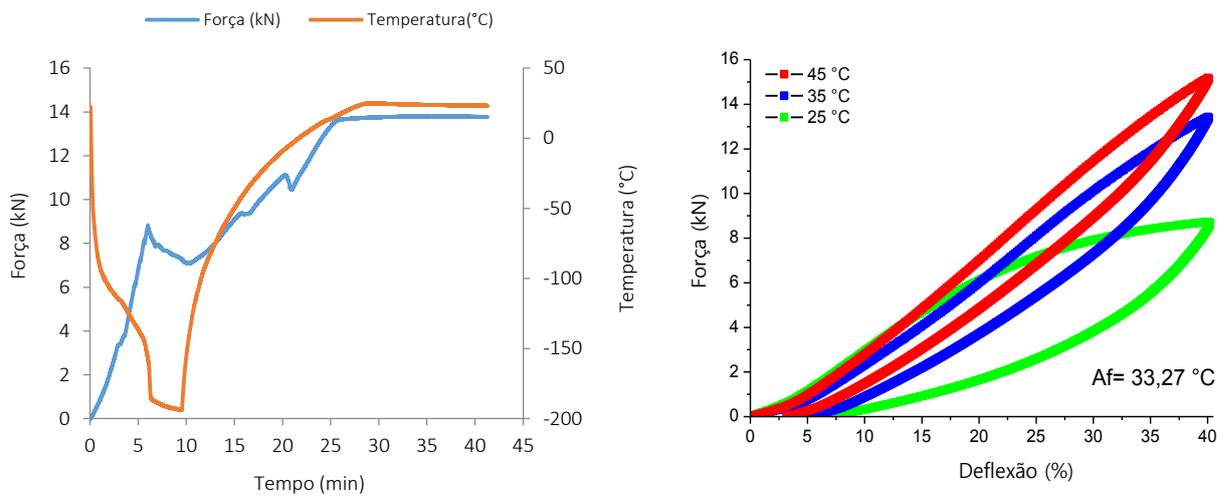
(a) Durante o carregamento e (b) Após o descarregamento.



Fonte: MA et al, 2007.

Além do comportamento superelástico (SE) das LMF e de sua capacidade de dissipação de energia, o Efeito Memória de Forma (EMF) também merece ser mais bem estudado para aplicações em elementos fixadores, como parafusos e outros. SIMÕES et al, (2012) e PEREIRA et al, (2012) avaliaram o comportamento de uma arruela cônica (Belleville) de LMF que foi testada experimentalmente em ambos os aspectos, EMF e SE, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2. Comportamento termomecânico de uma arruela Belleville de LMF. (a) Força gerada por EMF após deformação pseudo plástica compressiva e aquecimento. (b) Superelasticidade em compressão.



Fonte: (a) PEREIRA et al., (2011) e (b) SIMÕES et al., (2012).

No caso das arruelas Belleville de LMF, os testes de geração de força em função da temperatura (Figura 2a) revelaram resultados promissores, com picos de força da ordem de 6 kN (13 kN – 7 kN), assegurando o potencial deste tipo de elemento para uso como dispositivo de pré-carga. Da mesma forma, o comportamento superelástico desse atuador (Figura 2b) também revelou grande potencial, tendo-se em vista que o mesmo foi capaz de recuperar deflexões compressivas da ordem de 40% em relação à sua altura. De forma análoga, tal comportamento bifuncional (geração de força e superelasticidade) pode ser utilizado para o conceito de parafusos de LMF.

Além das várias justificativas tecnológicas e científicas, a ausência de literatura no âmbito da fabricação e da caracterização de parafusos de LMF também fomentou a realização deste trabalho. Outrossim, o comportamento de componentes de LMF submetidos a Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC) é, até então, desconhecido. Esse tipo de carregamento pode fazer com que um parafuso perca toda a sua pré-carga rapidamente, dependendo da frequência e da amplitude de vibração imposta à junta aparafusada. Atualmente, existem alguns fixadores que podem prevenir a perda de pré-carga por CTC, porém alguns estudos comprovam que esses dispositivos podem ser superados em determinadas condições de ensaio (ECCLES et al, 2009). Portanto, a realização deste trabalho de dissertação foi amparada nesse arcabouço de justificativas supracitadas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Ligas com Memória de Forma (LMF)

4.1.1. Breve Histórico

As Ligas com Memória de Forma (LMF ou, do inglês, *SMA*, *Shape Memory Alloys*) foram inicialmente descobertas por Arne Olander em 1932, porém o termo “memória de forma” foi primeiramente utilizado por Vernon em 1941, que por sua vez aplicou essa denominação a um material polimérico. No entanto, as pesquisas mais avançadas dessas ligas só apareceram com mais intensidade mais de uma década depois (JANI et al, 2014).

Em 1962, Buehler e colaboradores do *Naval Ordnance Laboratory (NOL)*, nos Estados Unidos, descobriram o Efeito Memória de Forma (EMF) numa liga de Níquel-Titânio (NiTi), que ficou conhecida como NiTiNOL, como uma referência às iniciais do laboratório (CASTILHO & SILVA, 2011).

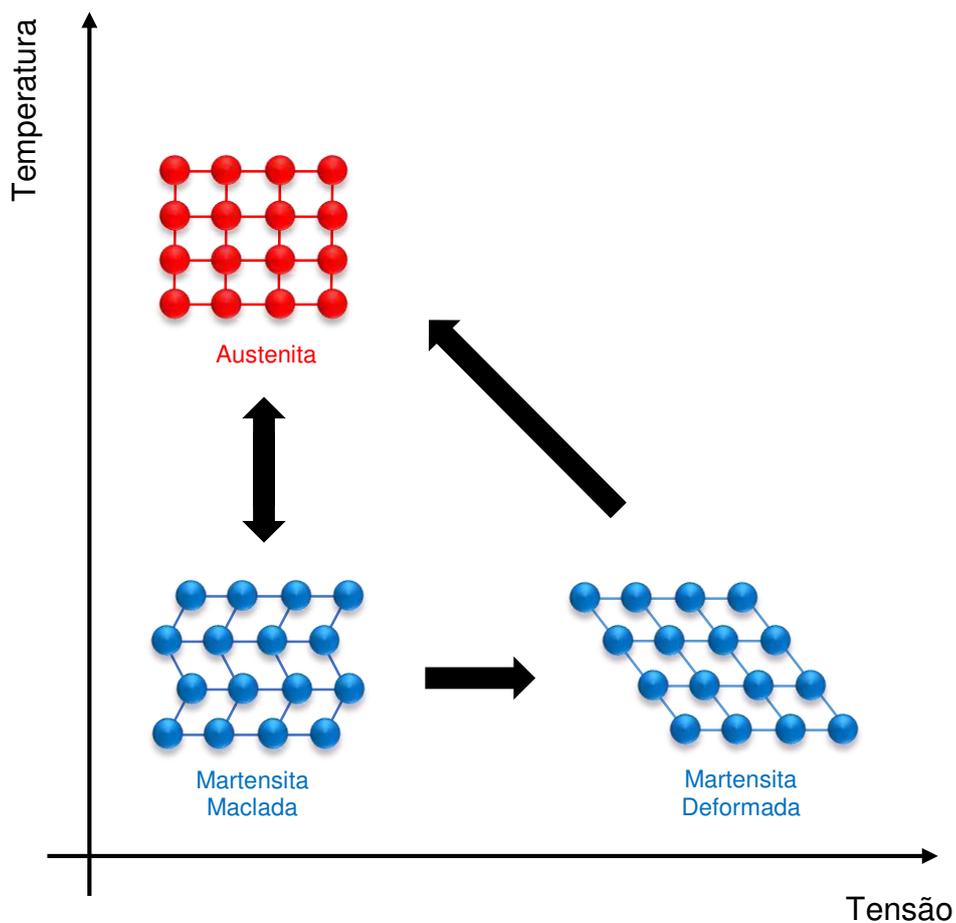
A primeira aplicação comercial bem-sucedida das LMF aconteceu em 1969, quando uma luva tubular de NiTiFe, denominada CryoFit®, foi utilizada em acoplamentos hidráulicos em caças Grummam F-14 da Marinha dos Estados Unidos (DUERIG, 1990).

Com o crescimento das indústrias japonesas no início dos anos 80, começaram a surgir aplicações comerciais em sistemas de condicionamento de ar e outras aplicações de pequeno porte. Foi nessa década também que surgiram as aplicações relacionadas à Superelasticidade (SE) das LMF. No início, as aplicações relacionadas à SE foram de caráter odontológico (arcos ortodônticos, limas endodônticas e outros acessórios) e, pouco depois, surgiram aplicações no campo da medicina (filtros, stents e outros). Essas e outras aplicações começaram a se difundir devido à boa combinação entre às necessidades do mercado e as características funcionais de recuperação de forma oferecidas pelas LMF (STÖCKEL, 1995).

4.1.2. Definição e Comportamento Termomecânico

As LMF poder ser definidas como um grupo de ligas metálicas especiais que apresentam a capacidade de retornar à sua forma (ou tamanho) original quando submetidas a uma deformação pseudoplástica e variação de temperatura. O princípio de funcionamento básico desse material consiste em deformá-lo, através da aplicação de uma força externa que, quando cessada, deixa uma deformação residual. O material deformado irá recuperar sua forma original quando aquecido acima de uma temperatura crítica. Atualmente, existem LMF magnéticas que permitem recuperar essa deformação residual não por aquecimento, mas pela aplicação de um campo magnético (JANI et al, 2014).

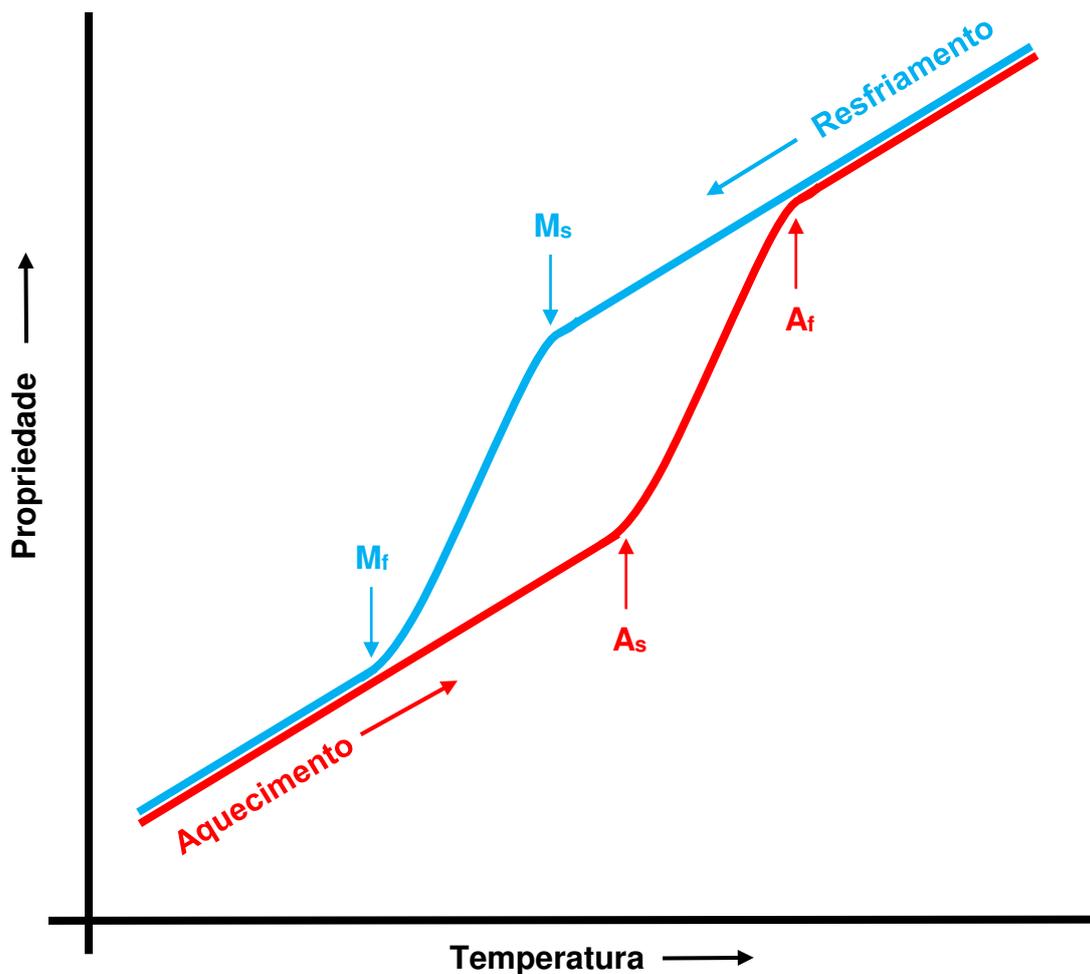
Figura 3. Representação esquemática da transformação de fase em Ligas com Memória de Forma.



Fonte: Autoria própria.

As propriedades das LMF estão associadas às transformações que ocorrem em nível de sua estrutura cristalina. Durante estas transformações, que ocorrem sem difusão de átomos, mas por cisalhamento da rede cristalinas, as fases envolvidas são também denominadas de austenita e martensita, por analogia com a transformação martensítica que ocorre nos aços. A fase austenítica (A) possui uma única variante, com estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), e tem como característica alta simetria e elevado módulo de elasticidade, comparativamente a estrutura martensítica. A fase martensítica (M), ao contrário, é facilmente deformada e possui estrutura cristalina dependente do tipo de LMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998). A Figura 3 ilustra, de maneira simplificada, o processo de transformação de fase de uma LMF típica. A Figura 4 exemplifica o processo de transformação para uma propriedade ou parâmetro qualquer do material.

Figura 4. Ilustração das temperaturas de transformação de fase de LMF.



Fonte: Autoria própria.

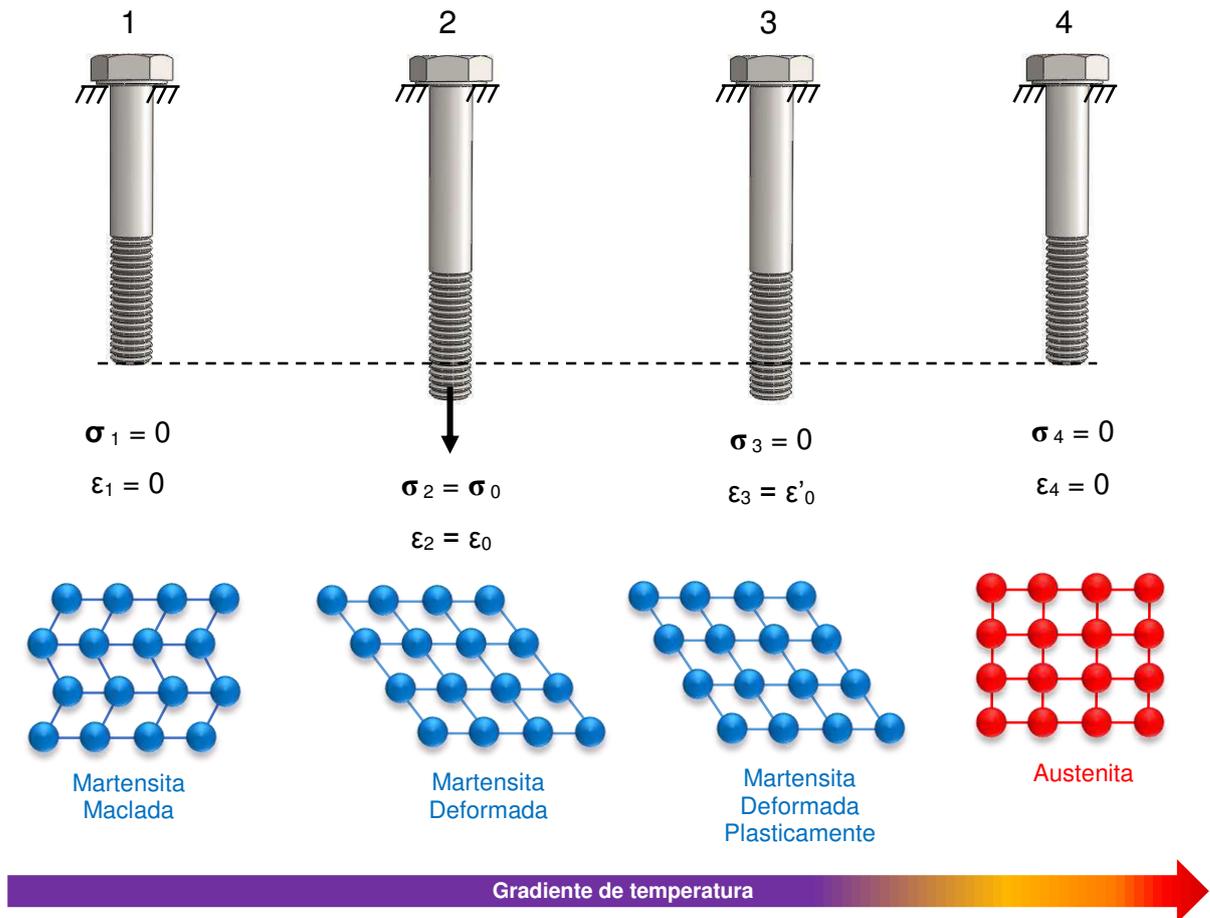
As mudanças na estrutura cristalina das LMF no estado livre de tensões são marcadas pelas temperaturas em que as transformações de fase se iniciam e terminam. Durante o resfriamento a partir de uma temperatura mais alta, uma LMF previamente austenítica começa a converter-se em martensita à temperatura M_s e termina este processo à temperatura M_f . No procedimento reverso, ao ser aquecida, a LMF, agora martensítica, inicia o retorno para a fase austenita à temperatura A_s e se torna 100% austenítica quando a temperatura atinge A_f .

O comportamento termomecânico associado à transformação termoelástica das LMF envolve os seguintes fenômenos macromecânicos: o Efeito Memória de Forma Simples (EMF), o Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD) e a superelasticidade (SE) (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

4.1.2.1. Efeito Memória de Forma Simples (EMF)

O EMF é baseado na retenção do estado de deformação do material após a remoção do carregamento, com posterior recuperação da sua forma original mediante aquecimento. Uma esquematização do EMF em um parafuso pode ser visualizada na Figura 5. Conforme ilustrado, o EMF está associado à transformação da fase martensítica termoelástica de mais baixa temperatura (em azul) em uma fase austenítica de mais alta temperatura (em vermelho). A deformação ϵ_0 é induzida na fase martensítica (item 2), abaixo da temperatura final de transformação de austenita em martensita (M_f), na qual a LMF é extremamente maleável. Com a retirada da tensão aplicada, o material acumula uma deformação permanente (ϵ'_0) (item 3), iniciando sua recuperação quando o mesmo é submetido a um aquecimento (item 4) acima da temperatura inicial de transformação de martensita em austenita (A_s), provocando a mudança da microestrutura da LMF para a fase austenita, que é mais rígida. A transformação é totalmente concretizada quando a LMF atinge a temperatura final de transformação de martensita em austenita (A_f).

Figura 5. Esquema ilustrativo do comportamento termomecânico de um parafuso com EMF.

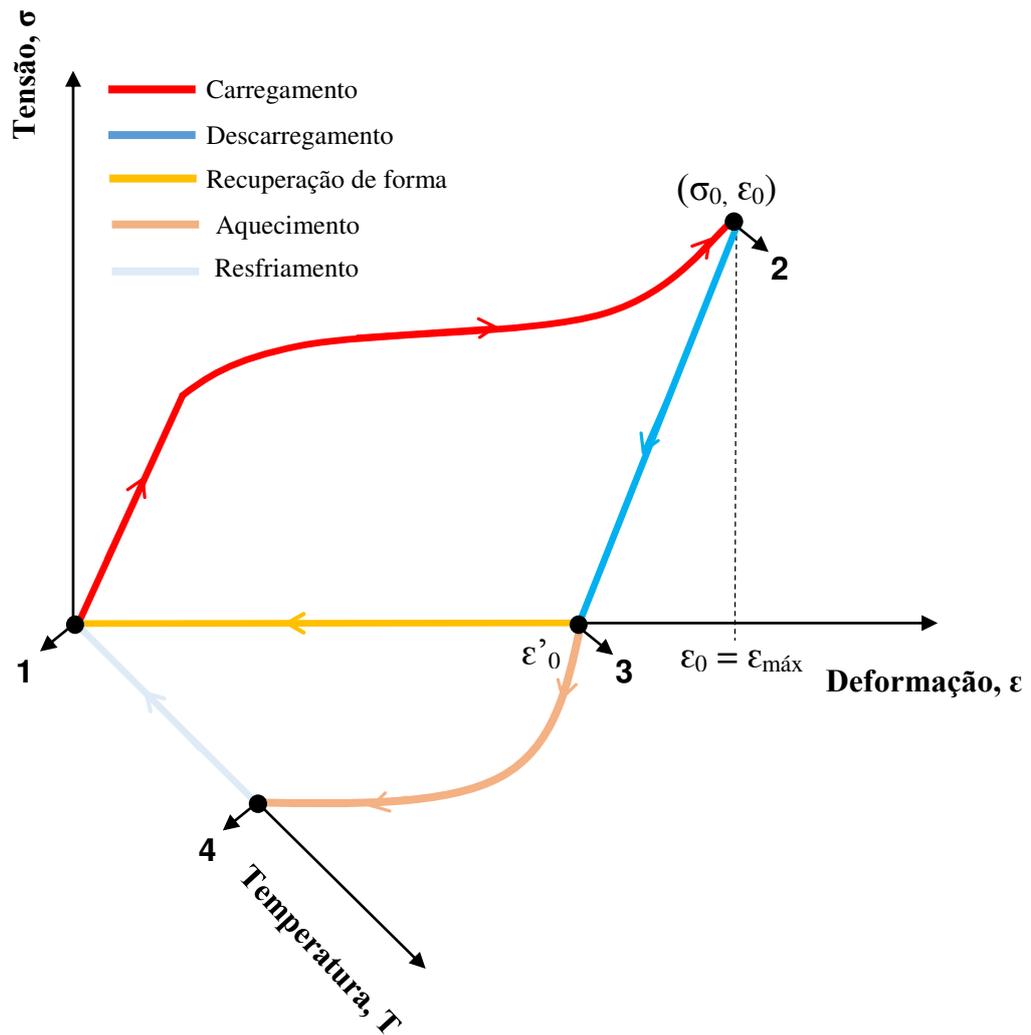


Fonte: Autoria própria.

Obviamente existe um limite de deformação para o qual essas LMF conseguem sua recuperação plena (cerca de 5% em tração uniaxial) (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Porém, esse limite é bem superior aquele apresentado por metais convencionais, como os aços, por exemplo, que é de cerca de 0,2% em tração uniaxial (CALLISTER, 2008).

Fazendo um comparativo com a Figura 5, o esquema da Figura 6 ilustra o comportamento mecânico de um parafuso com EMF do ponto de vista de Tensão (σ) - Deformação (ϵ), com um terceiro eixo para representar a Temperatura (T).

Figura 6. Comportamento termomecânico de um parafuso com EMF.



Fonte: Autoria própria.

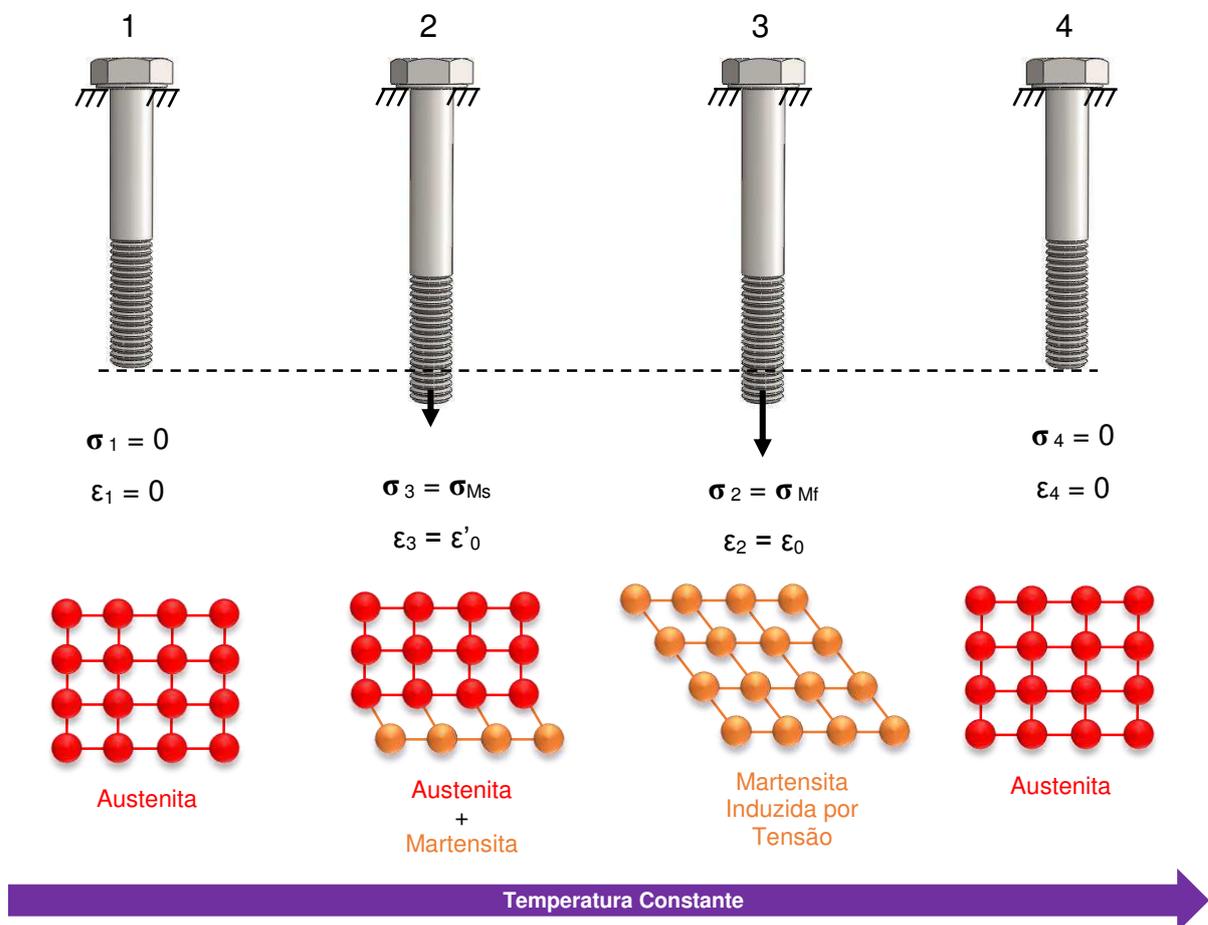
4.1.2.2. Superelasticidade (SE) ou Pseudoelasticidade

A superelasticidade, também conhecida como pseudoelasticidade, é um fenômeno observável em LMF submetidas a carregamento mecânico em temperaturas superiores a A_f . Para melhor compreensão desse fenômeno, a Figura 7 ilustra um parafuso de LMF em regime de SE.

Nesta situação, caso seja aplicada uma tensão de tração sobre o elemento de LMF no estado austenítico (Item 1), este se comporta elasticamente até que uma tensão, considerada crítica (σ_{Ms}), seja atingida. A partir deste ponto, a fase austenítica não é mais estável, mesmo em altas temperaturas, e se inicia o processo de

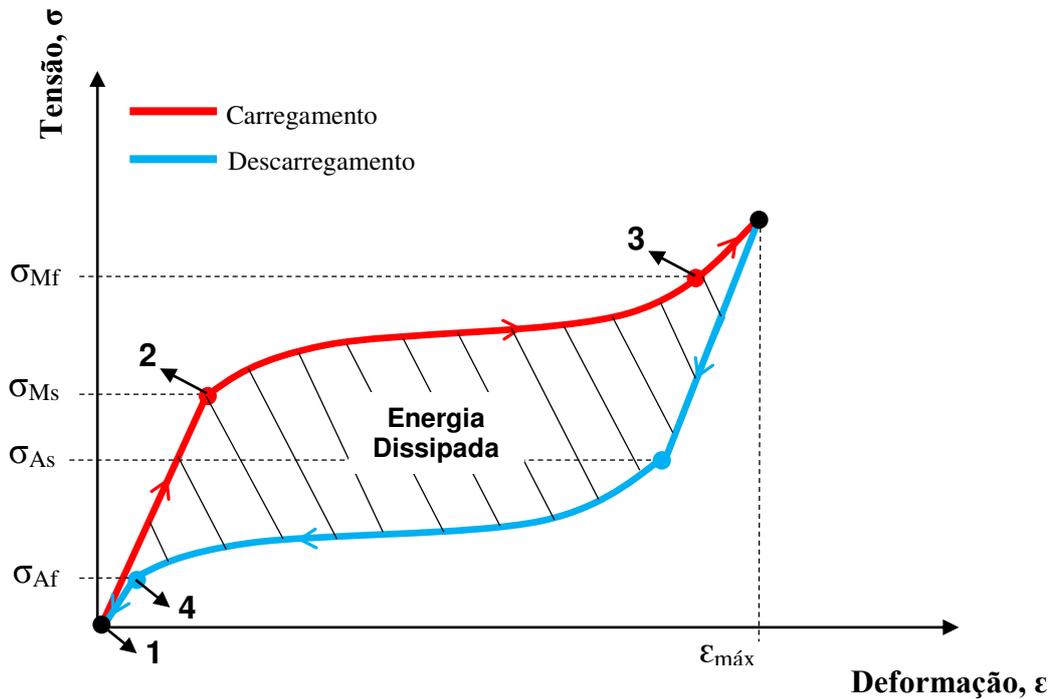
conversão da austenita em martensita induzida por tensão (Item 2). Ao se atingir a tensão final de transformação (σ_{Mf}), uma estrutura completamente martensítica (Item 3) é obtida. Ao se retirar a carga, a transformação inversa ocorre, e a martensita induzida por tensão se transforma na fase austenítica original (Item 4). Fazendo um comparativo com a Figura 7, a Figura 8 ilustra o comportamento mecânico de um parafuso SE do ponto de vista de Tensão (σ) - Deformação (ϵ), para uma temperatura constante e acima de A_f .

Figura 7. Esquema ilustrativo do comportamento termomecânico de um parafuso SE.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8. Comportamento tensão - deformação de um parafuso SE.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2.3. Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD)

Basicamente, o EMFD, ou EMF reversível, é a capacidade que uma LMF tem de “memorizar” uma forma definida tanto na fase de alta temperatura (austenita) quanto na fase de baixa (martensita). O EMFD é menos utilizado comercialmente porque exige que a LMF seja submetida a um processo de “treinamento” para memorização da forma em ambas as fases. Além disso, a recuperação de forma produzida por uma LMF com EMFD é cerca de metade da recuperação produzida por EMF simples, para o mesmo material. Esse efeito duplo também provoca uma rápida deteriorização ao longo de sua utilização cíclica, especialmente em altas temperaturas (JANI et al, 2014).

4.1.3. Panorama Geral sobre as LMF

São inúmeras as combinações de elementos químicos que podem originar LMF. Algumas famílias de LMF são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Exemplos de Ligas com Memória de Forma.

Liga	Composição	Temperaturas de transformação, A_s (°C)	Histerese (°C)
AgCd	44 ~ 49 %Cd (at)	-190 ~ 50	~ 15
AuCd	46,5 ~ 50 %Cd (at)	30 ~ 100	~ 15
CuAlNi	14 ~ 14,5 %Al (peso) 3 ~ 3,5 %Ni (peso)	-140 ~ 100	~ 35
CuSn	~15 %X (at)	-120 ~ 30	---
CuZn	38,5 ~ 41,5 %Zn (peso)	-180 ~ -10	~ 10
CuZnX (X=Si, Sn, Al)	Baixa %X (peso)	-180 ~ 200	~ 10
InTl	18 ~ 23	60 ~ 100	~ 4
NiAl	36 ~ 38	-180 ~ 100	~ 10
TiNi	46,2 ~ 51	-50 ~ 110	~ 30
TiNiX (X=Si, Sn, Al)	50 %Ni (at)+X 5 ~ 50 %X (at)	-200 ~ 700	~ 100
TiNiCu	~ 15 %Cu (at)	-150 ~ 100	~ 50
TiNiNb	~ 15 %Nb (at)	-200 ~ 50	~ 125
TiNiAu	50 %Ni+Au (at)	20 ~ 610	---
TiPdX (X=Cr, Fe)	50 %Pd+X (at) ~ 15 %X (at)	0 ~ 600	~ 50
MnCu	5 ~ 35 %Cu (at)	-250 ~ 180	~ 25
FeMnSi	32 %Mn, 6 %Si (peso)	-200 ~ 150	~ 100
FePt	~ 25 %Pt (at)	~ -130	~ 4
FePd	~ 30 %Pd (at)	~ 50	---
FeNi X	Baixa %X (peso)	---	---

Fonte: Adaptado de HUANG, (1998).

As LMF podem ser classificadas de acordo com os seguintes aspectos: elementos primários da liga, modo de atuação (magnético, térmico), temperatura de operação, ou comportamento termomecânico. As principais LMF classificadas

segundo os elementos primários são: NiTi, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni e Fe-Mn-Si (LAGOUDAS, 2008). Dessas LMF, no passado apenas dois (2) sistemas, Cu-Zn-Al e NiTi, e suas combinações (com ligeiras diferenças entre seus elementos) apresentavam importância comercial (HUANG, 1998). Hoje em dia, além destas, as LMF térmicas Cu-Al-Ni e Cu-Al-Be, e a o sistema de LMF magnéticas Ni-Mn-Ga, estão também disponíveis no mercado. No entanto, o maior volume de ligas e produtos comerciais está associado ao sistema NiTi e suas variações com um terceiro elemento.

Do ponto de vista do desenvolvimento de projetos, se procura fazer uso dos efeitos termomecânicos associados às LMF para dimensioná-las de acordo com a aplicação. Geralmente o EMF é empregado para a fabricação de atuadores e a SE para isolamento de vibração e amortecimento (JANI et al, 2014). Um sumário das propriedades das LMF e seus respectivos efeitos é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades gerais das LMF.

Efeitos	Consequências
EMF	Atuação e geração de força
SE	Amplas faixas de deformações recuperáveis; Isolamento de vibrações e amortecimento.
Histerese	Permite a dissipação de energia
Elevadas tensões de atuação (400 – 700 MPa)	Geração de força considerável por elementos de pequena área de seção transversal
Elevadas deformações de atuação (até 8%)	Componentes com pequenos comprimentos podem gerar grandes deslocamentos.
Baixa relação peso/potência	Redução de peso para sistemas com necessidade de um elemento de atuação

Fonte: Adaptado de JANI et al, (2014).

As propriedades das LMF são muito sensíveis a variação de composição química e ao processamento termomecânico. Por essa razão, para atingir faixas de temperaturas de trabalho mais amplas e uma maior estabilidade desse material, além de melhorar sua resposta mecânica, é preciso, antes de mais nada, desenvolver

novas técnicas de fabricação com controle preciso dos elementos químicos envolvidos (CHOON et al, 2007 e WANG et al, 2004).

Mesmo com os vários desafios existentes para a utilização das LMF, até o presente momento, mais de 10.000 patentes sobre aplicações destes materiais foram emitidas nos Estados Unidos. No contexto mundial, esse número chega a 20.000. Embora esses números sejam consideráveis, a transformação de toda esta propriedade intelectual em produtos viáveis tem sido bastante inferior as expectativas. A explicação para isso ainda reside na falta de compreensão das limitações técnicas das LMF e também dos métodos para aplicá-las de forma contundente, de maneira a atender às exigências técnicas de vida útil e estabilidade (JOHNSON, 1998 e WELP & BREIDERT, 2004).

Num contexto generalizado, as LMF de NiTi são mais amplamente utilizadas nas diversas áreas do conhecimento, apresentando propriedades singulares para a fabricação de atuadores. Por isso, optou-se por um enfoque maior dessas LMF neste trabalho.

4.1.4. Ligas NiTi

As LMF NiTi geralmente são selecionadas para fabricação de atuadores e componentes superelásticos tanto por promover grandes deslocamentos (cerca de 4% em relação ao comprimento do atuador), quanto pela capacidade de geração de força por EMF. Ademais, diferentemente da maioria das outras LMF, essas ligas também apresentam excelente biocompatibilidade, o que as habilita para aplicações biomédicas e odontológicas (WANG, 2002). Algumas propriedades físicas e mecânicas das LMF NiTi são mostradas na Tabela 3.

Conforme mostrado, há uma diferença considerável entre as propriedades das duas fases distintas. A estrutura austenítica apresenta dureza mais elevada e maior módulo de Young, enquanto que a estrutura martensítica é relativamente maleável, ou seja, pode ser facilmente deformada pela aplicação de forças externas (JANI et al, 2014).

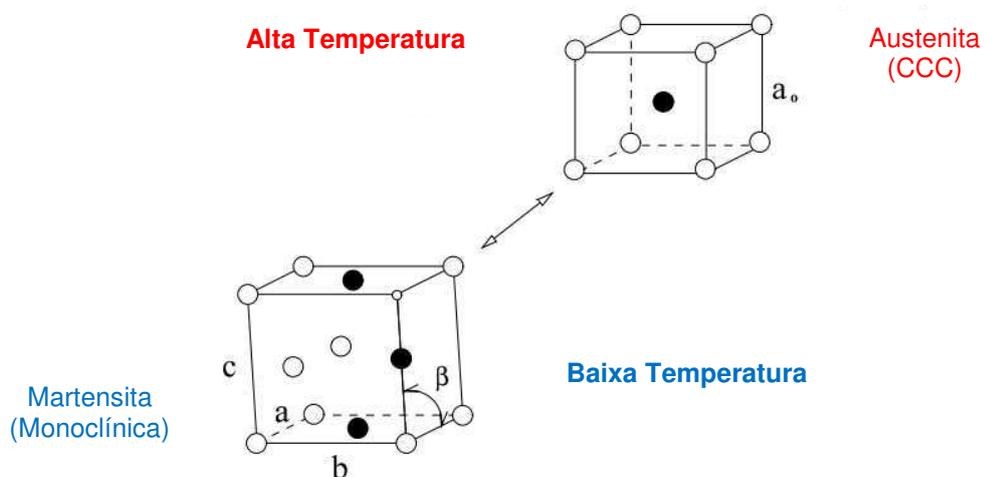
Tabela 3. Propriedades físicas e mecânicas de ligas NiTi.

Propriedade	Unidade	Valor	
		Martensita	Austenita
Densidade	Kg/m ³	6450-6500	
Resistividade	μΩ.cm	76-80	82-100
Capacidade calorífica	J/Kg.K	836,8	836,8
Condutividade térmica	W/m.K	8,6-10	18
Coeficiente de expansão térmica	m/m.K ⁻¹	6,6 x 10 ⁻⁶	11,0 x 10 ⁻⁶
Limite de resistência à tração	MPa	895 (Recozido) 1900 (Temperado)	
Módulo de Young	GPa	28-41	75-83
Limite de escoamento	MPa	70-140	195-690
Coeficiente de Poisson	---	0,33	
Susceptibilidade magnética	μemu.g	2,5	3,8

Fonte: Adaptado de WANG, (2002).

As ligas NiTi apresentam a austenita com uma estrutura CCC (B2) e a fase martensita geralmente com uma estrutura monoclinica (B19') (HUANG, 1998), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9. Transformação de fase numa liga binária NiTi.

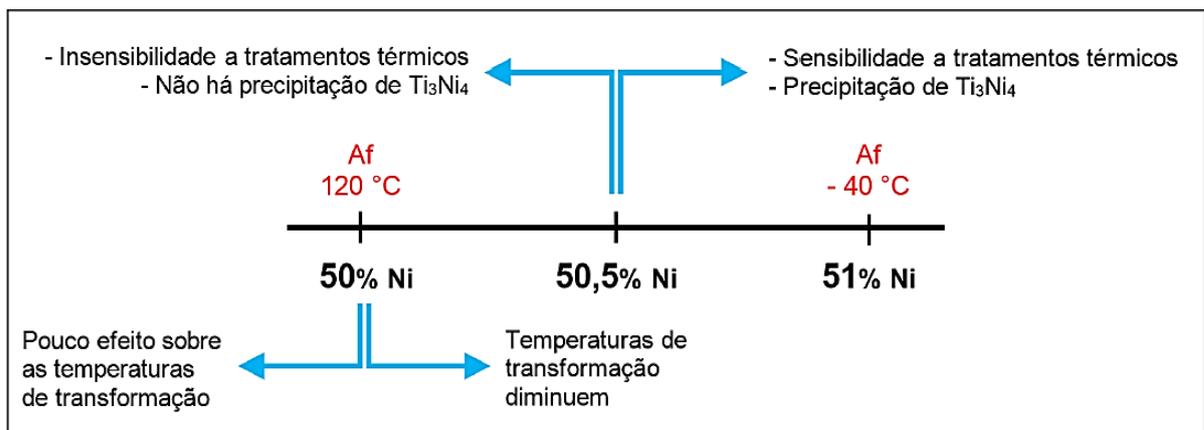


Fonte: Adaptado de HUANG, (1998).

Nessas ligas, geralmente se observa, durante a transformação de fase, a presença de uma fase intermediária, denominada de fase R, devido a sua estrutura romboédrica. Nas LMF a base de NiTi, a fase R é comum para composições próximas à equiatômica quando a liga é ciclada termica ou termomecanicamente. De acordo com LAGOUDAS, (2008), a formação de precipitados Ti_3Ni_4 favorece a presença da fase R devido ao campo de tensões internas provenientes destes precipitados, que ocorrem em ligas com teor de Ni maior que 50,5% (at), tratadas termicamente.

OTSUKA & WAYMAN, (1998) demonstraram que qualquer adição de Níquel (Ni) até o limite de 50% (em átomos) tem pouco efeito nas temperaturas de transformação. Por outro lado, pequenas adições de níquel acima deste percentual tendem a diminuir drasticamente estas temperaturas e, conseqüentemente, mudar as propriedades mecânicas da LMF NiTi. GRASSI, (2014) sumarizou os efeitos da adição de Ni e de tratamentos térmicos através do esquema mostrado na Figura 10.

Figura 10. Esquema ilustrando o efeito da adição de Ni (% at) na temperatura Af de LMF NiTi binárias.



Fonte: GRASSI, (2014).

Conforme a Figura 10, as temperaturas de transformação das LMF de NiTi são bastante sensíveis à quantidade de Ni. Por isso, fatores como tratamentos térmicos e termomecânicos e adição de elementos de liga, que afetam a estrutura cristalina, são importantes para o controle do comportamento dessas LMF.

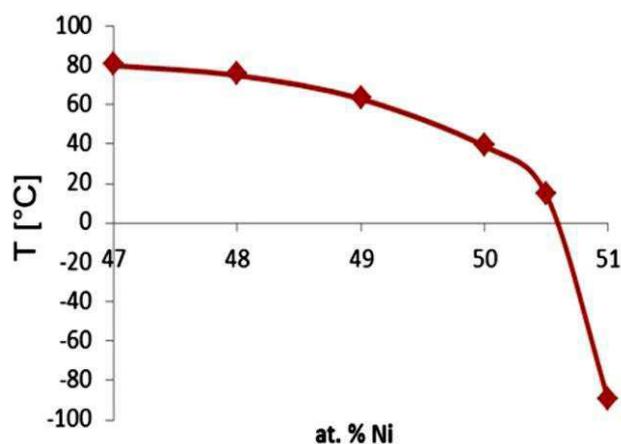
4.1.5. Fabricação de LMF e seus atuadores

A produção de LMF, especialmente as de NiTi, é feita principalmente por fusão por indução a vácuo (*Vacuum Induction Melting*, em Inglês). No entanto, existem vários outros procedimentos de fusão que são utilizados, a exemplo da fusão por feixe de elétrons (*Electron Beam Melting*), fusão a arco (*Arc Melting*) (MA & WU, 2000), fusão de alta frequência a vácuo (*High Frequency Vacuum Melting*) em cadinho de grafite (NOH, 2001), fusão a plasma (*Plasma Melting*) (DE ARAÚJO et al, 2009), etc.

Quando as LMF de NiTi são fundidas, pode haver o aparecimento de efeitos indesejáveis, especialmente em contato com gases como o nitrogênio ou o oxigênio. Outros problemas consistem nas condições adequadas para a cristalização e minimização de micro e macro-segregação ligadas ao processo. Além disso, a contaminação do material com inclusões não-metálicas tem de ser evitada. Devido à formação de carbonetos e óxido de titânio em ligas NiTi, há uma variação da concentração dos elementos da liga que, conseqüentemente, leva a uma mudança nas temperaturas de transformação (FERNANDES, 2013).

O requisito metalúrgico básico para a fabricação de uma LMF é o controle rigoroso da composição química da liga, que é a principal condição para a obtenção das temperaturas de transformação adequadas. Um exemplo disto pode ser visualizado na Figura 11.

Figura 11. Dependência da temperatura de transformação martensítica (M_s) em função do percentual de Ni (% at) de uma LMF de NiTi binária.



Fonte: FERNANDES, (2013).

Segundo OTSUKA & WAYMAN, (1998), um desvio de cerca de 0,1% (% at) da composição química pode alterar as temperaturas de transformação em cerca de 10 °C. Outra condição é a obtenção de uma homogeneidade microestrutural, o que também é uma condição para assegurar um comportamento termomecânico adequado.

Uma vez fabricadas LMF em formatos mais robustos (barras, lingotes, tarugos, etc.), é preciso utilizar outras técnicas de processamento para transformá-las em geometrias mais finas (fios, chapas, barras menores, etc) e, posteriormente, em atuadores. Uma dessas técnicas é o forjamento (FERNANDES, 2013).

Contrariando essa ótica, DE ARAÚJO et al, (2009), realizaram a fabricação de atuadores de pouca complexidade geométrica (luvas e pequenas barras de seção retangular) diretamente a partir de um processo específico de fusão a plasma e moldagem por injeção em molde metálico, denominado *Plasma Skull Push Pull* (PSPP). Posteriormente, PEREIRA et al, (2013) fabricaram arruelas Belleville (cônicas) de LMF através do mesmo processo. Porém, ensaios mecânicos revelaram que esses componentes falharam precocemente. Posterior análise das superfícies de fratura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) dos componentes revelou que os mesmos continham uma alta densidade de defeitos de processo, principalmente vazios. A presença de tais vazios foi associada ao gás inerte usado para formar uma atmosfera protetora e realizar a injeção do metal líquido durante o processo.

Outra técnica que pode ser usada para fabricar atuadores de LMF com precisão, a partir de formas mais robustas, é a usinagem. No entanto, existem poucas informações sobre os parâmetros de corte a serem utilizados para a usinagem de LMF. Ademais, as LMF de NiTi (mais usadas comercialmente) apresentam uma elevada dureza, que impossibilita a usinagem com o uso de ferramentas convencionais (PIQUARD et al, 2014). Por essas razões, alguns autores, a exemplo de LIN et al, (2000), REGO, (2013) e PIQUARD et al, (2014) realizaram estudos específicos sobre a usinagem desses materiais.

LIN et al, (2000) estudaram as características de corte de LMF NiTi submetidas a operações de corte e furação, com o objetivo de estabelecer parâmetros de corte para esses materiais. Ao final do trabalho, constatou-se que há um aumento da dureza do material no entorno do furo, devido à deformação plástica que ocorre durante a operação.

REGO, (2013) estudou a usinagem no processo de sangramento radial de uma LMF NiTi, com o objetivo viabilizar essa operação para a fabricação de peças com esse material, já que dependendo do comportamento da liga, pode ocorrer inúmeras situações que prejudicam o produto final, como uma transformação de fase ou uma variação dos esforços na ferramenta provocando avarias na mesma. Nesse estudo, foram comparadas as diferenças entre as fases presentes com o material original. Observou-se que, mesmo após a liga sofrer aquecimento e acúmulo de tensões internas provenientes da usinagem, não ocorreu nenhuma mudança de fase em todos os experimentos realizados.

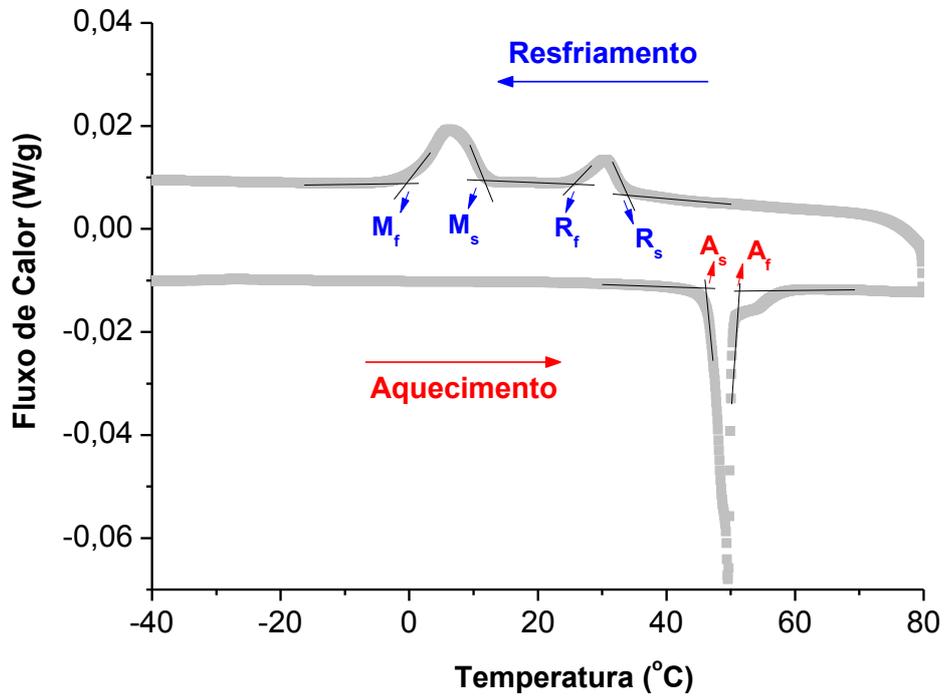
PIQUARD et al, (2014) estudaram o fresamento e a formação de rebarbas em LMF NiTi usadas para aplicações biomédicas. Os resultados das análises revelaram uma significativa formação de rebarbas, profundamente influenciada pelo avanço por dente e largura de corte. Um aumento do avanço por dente e uma diminuição da largura de corte tendem a diminuir a altura e largura da parte superior da rebarba. A minimização da formação de rebarbas tornaria mais fácil a rebarbação. Desta forma, uma otimização dos valores dos parâmetros de corte seria a melhor forma para minimizar as dimensões da rebarba, melhorando o acabamento do produto.

De acordo com os trabalhos avaliados, é necessário realizar uma combinação de processos quando se trata da fabricação de atuadores de LMF. Todavia, é necessário conhecer os parâmetros do processo a ser utilizado com o objetivo de evitar etapas de fabricação desnecessárias, que promovem o encarecimento do produto final. Além disso, se faz necessário que as propriedades das LMF não sejam afetadas durante a fabricação e etapas posteriores.

4.1.6. Caracterização das LMF

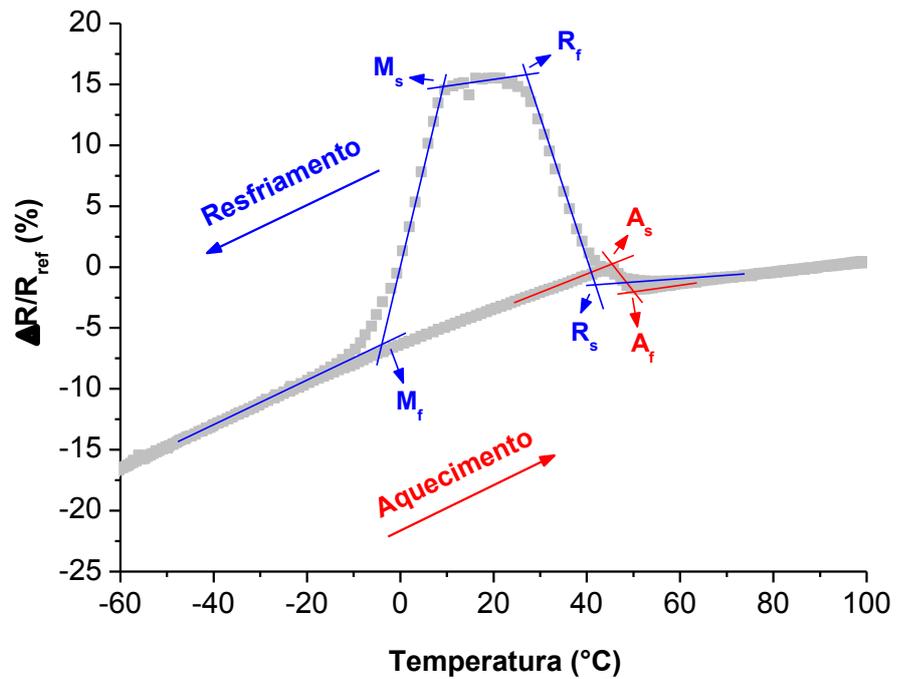
Em se tratando do estudo de LMF, a determinação das temperaturas de transformação de fase é fundamental para o projeto de dispositivos e elementos utilizando esse tipo de material. Dentro desse contexto, duas técnicas se destacam (OTSUKA & WAYMAN, 1998): a Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) (Figura 12) e a medição de Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET) (Figura 13).

Figura 12. Exemplo de resultado típico de um ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) para uma LMF de NiTi.



Fonte: Autoria própria.

Figura 13. Resistência Elétrica adimensional em função da Temperatura (RET) para uma amostra de NiTi.



Fonte: Autoria própria.

No caso do DSC, o calorímetro realiza a medição do fluxo de calor fornecido à uma amostra de LMF que, por sua vez, é aquecida e resfriada com uma taxa constante de variação de temperatura. Os picos observados na Figura 12 caracterizam a presença da transformação da austenita em fase-R e depois na martensita, no resfriamento, e da reversão martensita em austenita durante aquecimento. Essas temperaturas são determinadas pelo método das tangentes aplicadas aos picos de transformação, conforme definido pelas normas internacionais ASTM F2004, F2005 (ASTM, 2005) e F2082 (ASTM, 2006). A diferença entre as temperaturas de pico representa o que se denomina de histerese térmica (H_t) da transformação.

É importante salientar que a área interna de cada pico representa a quantidade de energia desprendida ou consumida para que ocorra a transformação de fase, correspondendo a entalpia de transformação de fase (ΔH) (LAGOUDAS, 2008).

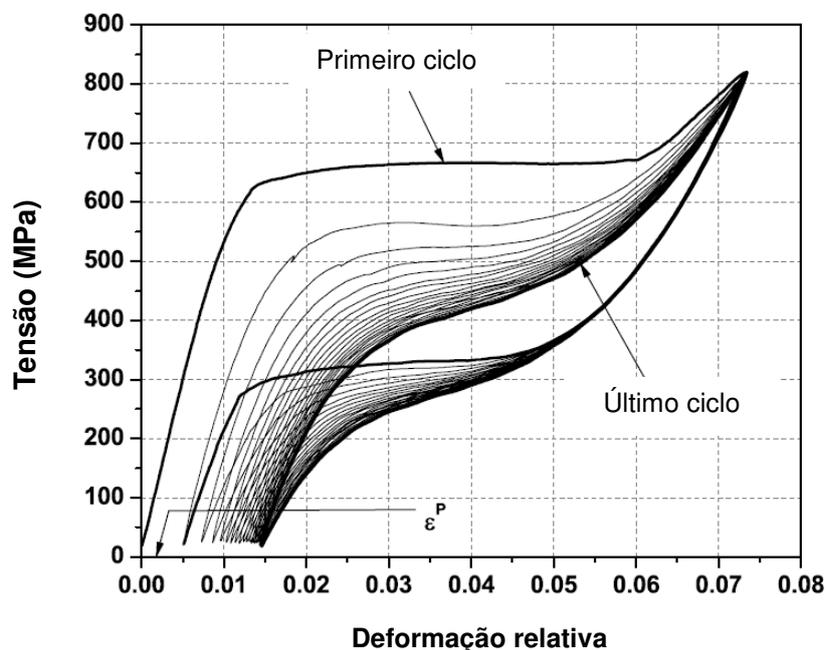
Outra técnica de caracterização térmica para LMF é a medição da resistência elétrica em função da temperatura (RET). O princípio básico desta técnica consiste em promover a passagem de uma corrente contínua e constante pela amostra de LMF, com o intuito de medir a queda de tensão elétrica (ddp) que ocorre durante as transformações de fase nos ciclos de aquecimento e resfriamento (OTSUKA E WAYMAN, 1998). Uma vez que a resistência elétrica das LMF varia com a temperatura, ocorre o aparecimento de inflexões nas curvas RET, como pode ser percebido na Figura 13. Quando se usa a RET, a variação de temperatura é normalmente feita por convecção forçada, por meio de um banho termoregulável, ou por condução usando pastilhas termoelétricas (REIS, 2010). Nesse ensaio, a LMF funciona como um resistor linear até que a temperatura de início de transformação seja atingida. A partir desse ponto ocorre uma inflexão na curva RET. Terminada a transformação, a LMF volta a se comportar como um resistor linear. Mais uma vez, as temperaturas de transformação de fase são determinadas pelo método das tangentes.

Do ponto de vista termomecânico, também há interesse de se determinar as tensões de transformação das LMF em regime superelástico. Essas tensões já foram mencionadas e estão esquematizadas no diagrama Tensão (σ) - Deformação (ϵ) da Figura 8. Essas tensões são determinadas através de testes de tração/compressão realizados em máquinas universais de ensaios em temperaturas constantes e

superiores a A_f , em que a LMF é completamente austenítica e a martensita pode ser induzida por tensão mecânica. Existe uma relação entre temperatura de teste e tensões de transformação. Estas duas propriedades se relacionam através da uma Lei de Clausius Clapeyron específica para LMF. Uma relação linear entre estas grandezas é observada, ou seja, as temperaturas de transformação aumentam linearmente com a tensão aplicada a uma LMF (EMF sob carga), assim como as tensões de transformação aumentam linearmente com a temperatura (no caso da SE) (OTSUKA e WAYMAN, 1998).

Um efeito interessante da repetição de ciclos $\sigma - \epsilon$ é a estabilização do comportamento mecânico das LMF. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 14 para a SE. Para esse teste, a temperatura foi mantida constante em 70 °C e utilizou-se um fio de LMF NiTi com $A_f = 65$ °C. Ou seja, o fio estava no estado austenítico, passível de apresentar superelasticidade ($T_{teste} > A_f$).

Figura 14. Resposta superelástica de um fio de LMF NiTi submetido a 20 ciclos de carregamento/descarregamento.



Fonte: Adaptado de LAGOUDAS, (2008).

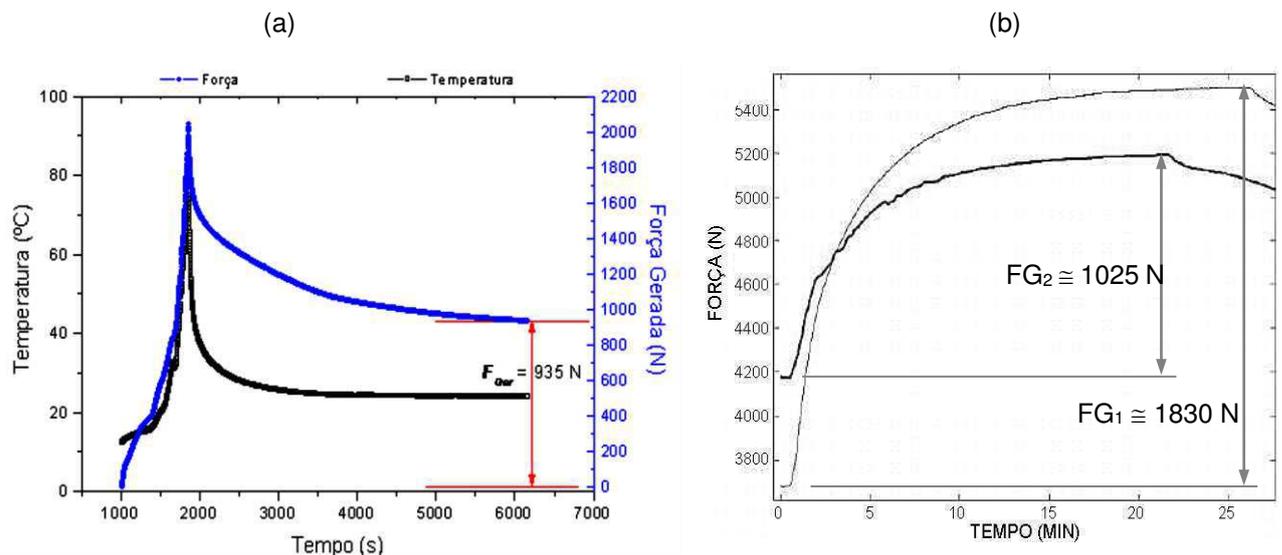
Segundo LAGOUDAS, (2008), os ciclos mecânicos estabilizam o comportamento da SE devido à saturação de deformações plásticas no material.

Durante o primeiro ciclo, há a recuperação da deformação inicial, porém não de forma completa, sendo que uma pequena parcela fica sob a forma de deformação permanente. A cada ciclo, uma pequena parcela de deformação plástica decrescente vai se acumulando no material até aproximadamente o 20º (vigésimo) ciclo. A partir daí, a resposta superelástica será praticamente constante.

No contexto de fixadores de LMF, é de suma importância avaliar a força que o componente gera através da restrição e ativação do EMF. Para isso, é necessário deformar o componente em tração ou compressão e, em seguida, aquecê-lo para temperaturas superiores a A_f . Assim, por EMF, o componente tenderá retornar à sua forma não-deformada original. Porém, para obter um efeito de travamento, é necessário restringir o retorno desse componente, para que haja um efeito de geração de força.

SILVA et al, (2008) e HESSE et al, (2004) avaliaram a força gerada por uma arruela lisa de LMF sob compressão. Os resultados podem ser visualizados na Figura 15.

Figura 15. Geração de força através da ativação do EMF em uma arruela lisa de LMF (NiTi). (a) Sem pré-carga. (b) Dois níveis de pré-carga diferentes.



Fonte: (a) SILVA et al, (2008) e (b) HESSE et al, (2004).

Observa-se na Figura 15(a) que o atuador de LMF do tipo arruela cilíndrica proposto por SILVA et al, (2008) tem decréscimo exponencial da força que

acompanhou um decréscimo exponencial da temperatura até 297 K (24 °C), após cessar o aquecimento. Essa força é estabilizada em um valor residual (F_{RES}) de aproximadamente 935 N.

HESSE et al, (2004) revelaram por meio da Figura 15(b) uma geração de força semelhante àquela verificada por SILVA et al, (2008), mas a parte de estabilização da força na temperatura ambiente não foi mostrada. Todavia, estes autores consideraram a força gerada por EMF como a diferença entre a pré-carga inicial e a força máxima estabilizada na temperatura final de aquecimento. Esse efeito pode ser desejável, para o caso de aplicações em que fixadores de LMF trabalhem em condições em que a temperatura de operação se mantenha constante e superior a A_f .

4.1.7. Aplicações das LMF

O comportamento único das LMF tem feito com que aplicações de caráter inovador tenham surgido nos setores aeroespacial, automotivo, de automação e controle, de odontologia e medicina, de energia, de processamento químico, aquecimento e ventilação, de segurança, eletrônico, entre outros (JANI et al, 2014).

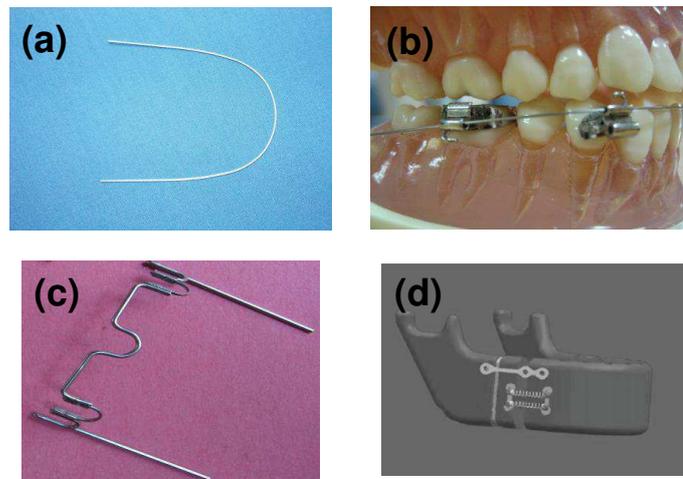
Em geral, as aplicações de LMF podem ser divididas em quatro (4) categorias, de acordo com o princípio de funcionamento do elemento de LMF envolvido. Essas categorias são: superelasticidade, atuador (realização de trabalho mecânico ou aplicação de força), recuperação livre e recuperação restrita (DUERIG, 1990). Cada uma dessas categorias será abordada nos tópicos posteriores. No entanto, sendo esse trabalho sobre parafusos de LMF, que por sua vez estão enquadrados na categoria recuperação restrita, a mesma ganhará uma abordagem com maior riqueza de detalhes.

4.1.7.1. Categoria Superelasticidade

Aplicações de LMF no estado SE (ou pseudoelástico) geralmente têm natureza isotérmica e, em regime dinâmico, envolvem a dissipação de energia por histerese mecânica. Os parâmetros-chave para essa categoria de aplicações são:

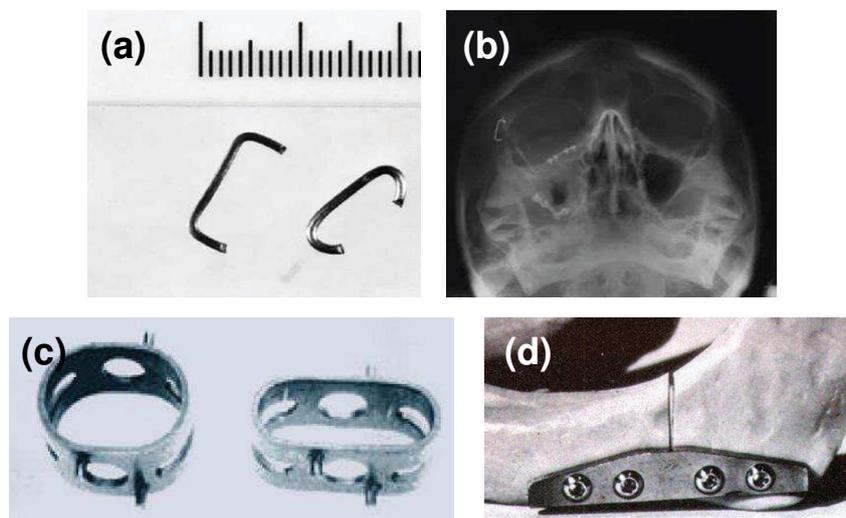
taxa de carregamento, vida em fadiga e faixa efetiva de imposição de temperatura. As melhores aplicações dessa categoria foram aquelas de regime estático nas quais a temperatura é controlada e, nesse sentido, a maioria delas se deu no setor médico-odontológico (PETRINI & MIGLIAVACCA, 2011). Alguns exemplos de aplicações SE de LMF na odontologia e na medicina são visualizados, respectivamente, nas Figuras 16 e 17.

Figura 16. Aplicações de LMF na Odontologia: (a) e (b) Arco ortodôntico; (c) Arco de palato e



Fonte: Adaptado de PETRINI & MIGLIAVACCA, (2011).

Figura 17. Aplicações de LMF na Medicina: (a) Grampo de LMF; (b) Fixação de fratura do complexo zigomático; (c) Espaçador vertebral e (d) Placa de NiTi para fratura de mandibular.



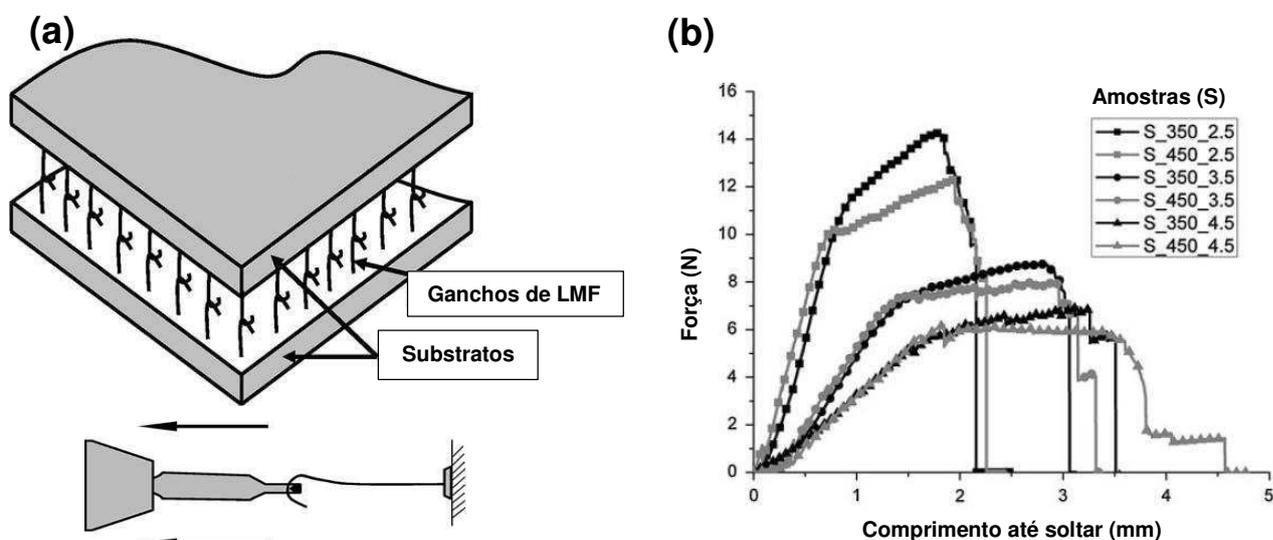
Fonte: Adaptado de PETRINI & MIGLIAVACCA, (2011).

Existem algumas aplicações da SE que também podem funcionar como fixadores. Por exemplo, VOKOUN et al, (2008) apresentou um conceito de ganchos SE simétricos como fixadores removíveis, fabricados a partir de fios de NiTi (diâmetro 150 μm) e visualizados na Figura 18.

A Figura 18(a) ilustra o feixe de ganchos, que é constituído por duas partes idênticas, cada uma contendo um conjunto de ganchos feitos de fios de LMF apresentando comportamento pseudoelástico à temperatura ambiente. Se os substratos apresentados forem flexíveis, esses fixadores de LMF podem trabalhar como uma espécie de Velcro[®].

A função de fixação do dispositivo foi avaliada através de ensaios de tração realizado num único gancho, variando-se as condições de recozimento e de diâmetro de curvatura dos ganchos. Os resultados podem ser visualizados na Figura 18(b). Esses resultados demonstraram que o aumento da força nos ganchos não depende da temperatura de recozimento, mas sim do diâmetro de curvatura com os quais os ganchos foram fabricados. Testes com substratos compostos por vários ganchos também foram realizados. Os mesmos demonstraram que a eficiência de fixação do conjunto depende tanto da densidade de ganchos no substrato quanto do diâmetro de curvatura dos ganchos.

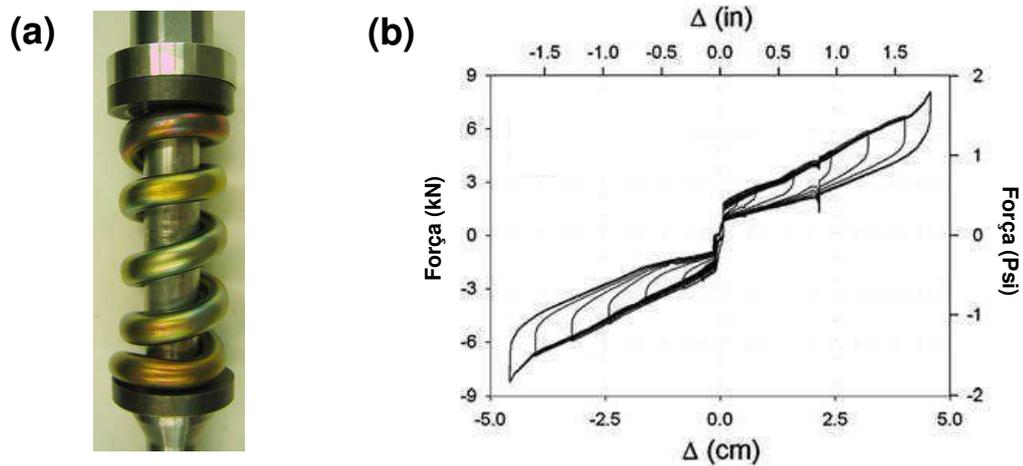
Figura 18. (a) Esquema de ganchos SE simétricos para desenvolvimento de um novo sistema de fixação. (b) Força x comprimento do gancho em diferentes condições: recozidas a 350 e 450°C e com diâmetros de curvatura de 2,5 e 3,5 mm.



Fonte: Adaptado de VOKOUN et al, (2008).

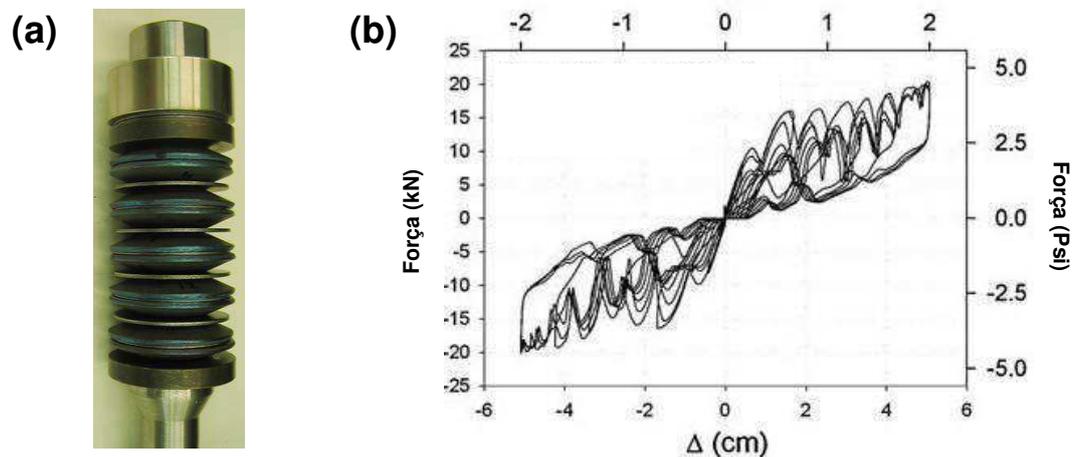
SPEICHER et al, (2010) também desenvolveram dispositivos de LMF baseados na SE para promover a centragem de edifícios. Estes dispositivos são mostrados nas Figuras 19 e 20.

Figura 19. (a) Dispositivo utilizando mola helicoidal de LMF NiTi. (b) Comportamento mecânico.



Fonte: Adaptado de SPEICHER et al, (2010).

Figura 20. (a) Dispositivo utilizando arruelas Belleville de LMF NiTi. (b) Comportamento mecânico.



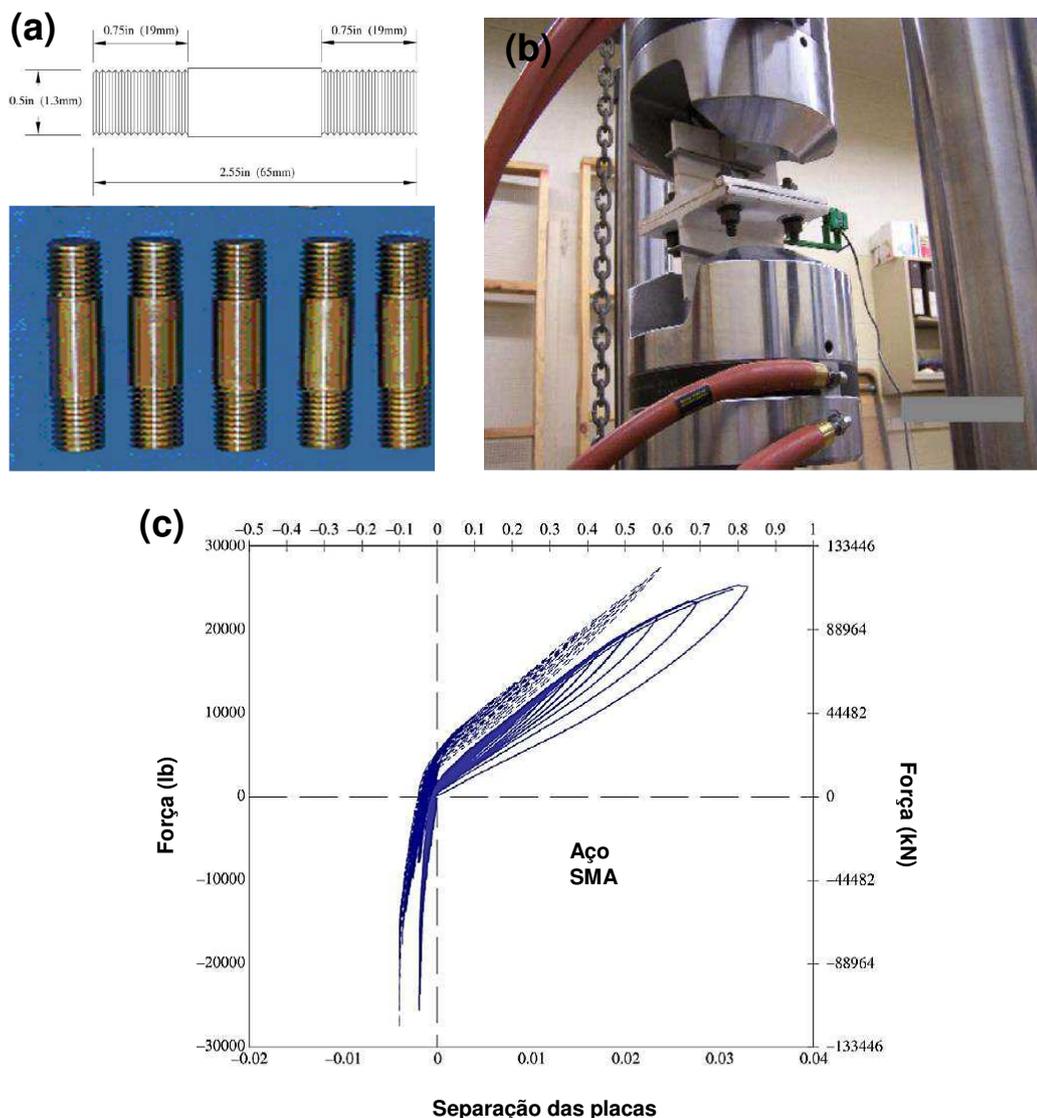
Fonte: Adaptado de SPEICHER et al, (2010).

Esses dispositivos, compostos por uma mola helicoidal (Figura 19a) ou por diferentes combinações de arruelas Belleville (Figura 20a), tem como princípio básico de funcionamento a capacidade de dissipar energia através do efeito superelástico das LMF, como pode ser visualizado nos gráficos que mostram o comportamento

mecânico de ambos, nas Figuras 19(b) e 20(b). Em particular, a resposta SE da configuração com mola helicoidal apresentou resultados promissores, devido à boa SE, amortecimento e repetibilidade. As configurações com arruelas Belleville apresentaram resultados que precisam de uma maior investigação.

Ainda utilizando o fenômeno da SE, ABOLMAALI *et al*, (2006) desenvolveram um estudo que compara características de dissipação de energia de juntas aparafusadas tipo T utilizando corpos-de-prova de aço e de uma LMF de NiTi. Os corpos-de-prova, bem como a montagem do experimento realizado e o comportamento mecânico das juntas estudadas são mostrados na Figura 21.

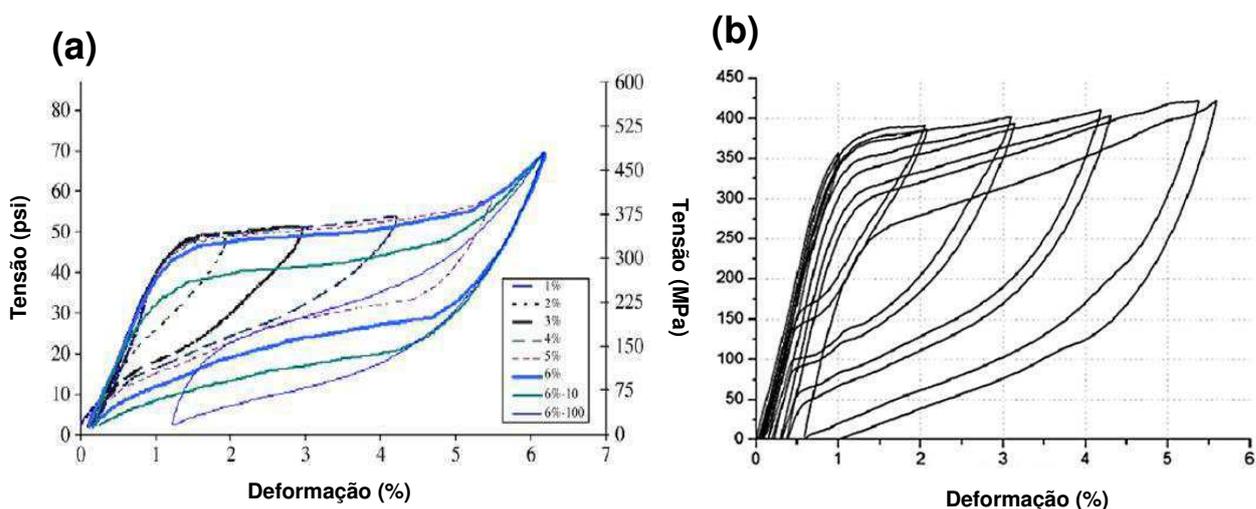
Figura 21. Junta em T com fixadores de aço e LMF NiTi. (a) Corpos-de-prova de NiTi utilizados na junta. (b) Montagem experimental. (c) Comportamento mecânico da junta.



Fonte: Adaptado de ABOLMAALI *et al*, (2006).

Os testes foram realizados em níveis de deformação de 1, 2, 3, 4, 5 e 6% em relação ao comprimento útil dos fixadores. De acordo com o comparativo do comportamento mecânico mostrado na Figura 21(c), é possível verificar que a dissipação de energia da junta com fixadores de LMF é maior do que àquela observada para uma junta com fixadores de aço. Isso acontece graças ao comportamento histerético das LMF no estado SE. Esse comportamento também é observado em corpos-de-prova de LMF individuais, como mostrado nos gráficos $\sigma - \varepsilon$ da Figura 22.

Figura 22. Comparação entre comportamentos histeréticos de corpos-de-prova padrões de LMF NiTi SE. (a) Diâmetro de 13 mm. (b) Diâmetro de 12,4mm.



Fonte: (a) Adaptado de ABOLMAALI et al, (2006) e (b) FANG et al., (2014).

Embora os corpos-de-prova apresentem uma pequena diferença no diâmetro, não apenas os níveis de tensão estão bastante próximos para os mesmos níveis de deformação, como também o comportamento histerético qualitativo é bastante similar. Isso é esperado, pois ambos os trabalhos utilizaram a mesma LMF NiTi.

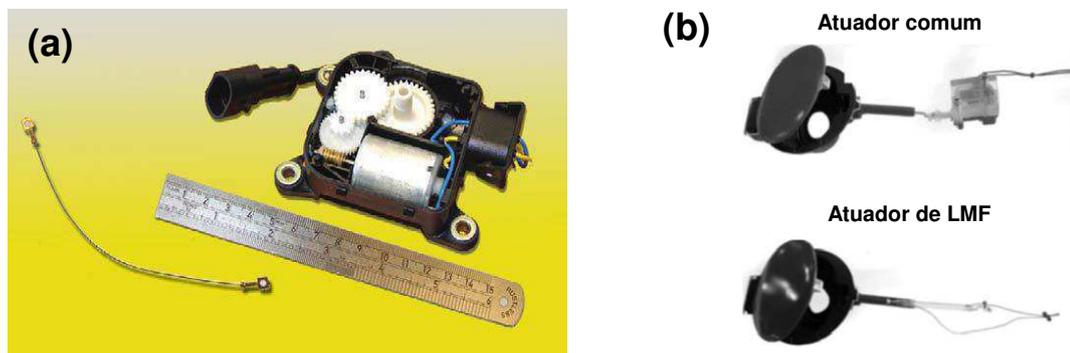
4.1.7.2. Categoria Atuador

Essa categoria envolve a realização de trabalho mecânico pelo elemento de LMF. Acredita-se que os dispositivos atuadores sejam as aplicações com o maior

potencial no universo das LMF. Geralmente costuma-se dividir os atuadores em dois (2) tipos: os ativados por corrente elétrica, chamados de atuadores elétricos, e os controlados por convecção ou condução térmica, chamados de atuadores térmicos (DUERIG, 1990).

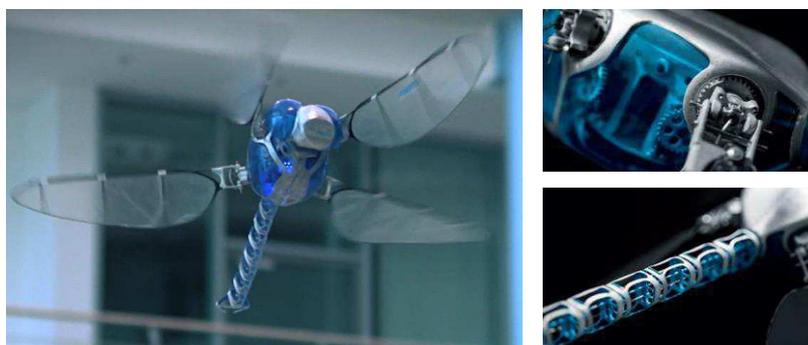
Na atualidade, os atuadores elétricos competem contra os servo-motores, solenoides e outros convencionais. Alguns exemplos desses atuadores de LMF estão presentes na indústria automobilística e também na robótica, conforme exemplos mostrados nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

Figura 23. Comparação entre atuadores convencionais e atuadores de LMF. (a) Fios de NiTi SmartFlex®. (b) Dispositivo utilizado para abertura do tanque de combustível.



Fonte: Adaptado de FUMAGALLI et al, (2009).

Figura 24. Robô voador BionicOpter® com 13 graus de liberdade usando fios de LMF como atuadores.

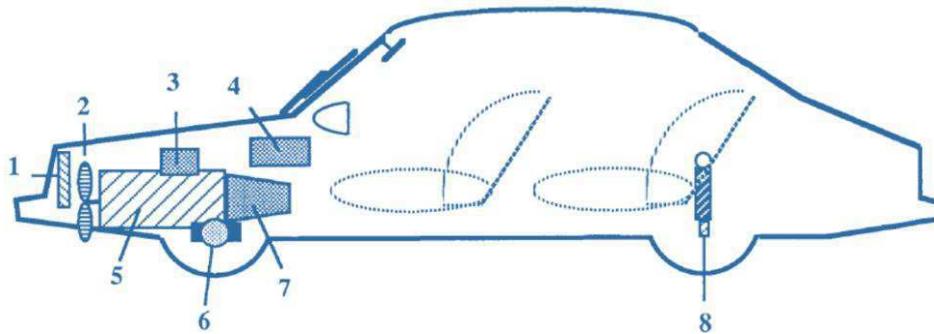


Fonte: Adaptado de FESTO, (2013).

Os atuadores térmicos são mais usados do que os elétricos. Por exemplo, a indústria automobilística tem demonstrado interesse em substituir alguns

componentes clássicos por soluções usando LMF. Algumas áreas de aplicações reais e potenciais de LMF em veículos são mostradas na Figura 25.

Figura 25. Áreas de aplicações de atuadores térmicos de LMF em automóveis: (1) Radiador; (2) Embreagem; (3) Gestão de combustível; (4) Controle de temperatura; (5) Controle do motor; (6) Refrigeração do freio; (7) Controle de transmissão e (8) Ajuste da suspensão



Fonte: Adaptado de STOECKEL, (1990).

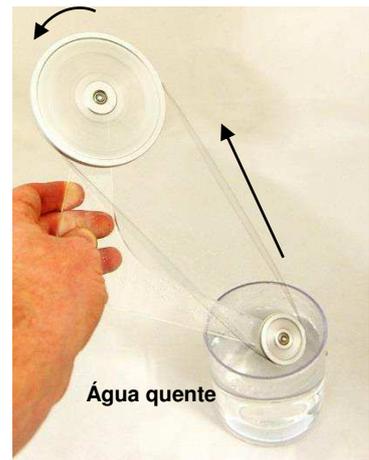
São inúmeros os atuadores térmicos, a exemplo de válvulas de segurança anti-incêndio e do motor de NiTiNOL, ambos mostrados na Figura 26.

Figura 26. Exemplos de atuadores térmicos de LMF. (a) Válvulas de segurança anti-incêndio Memrysaf® e Firechek®, respectivamente. (b) Motor de NiTiNOL.

(a)



(b)



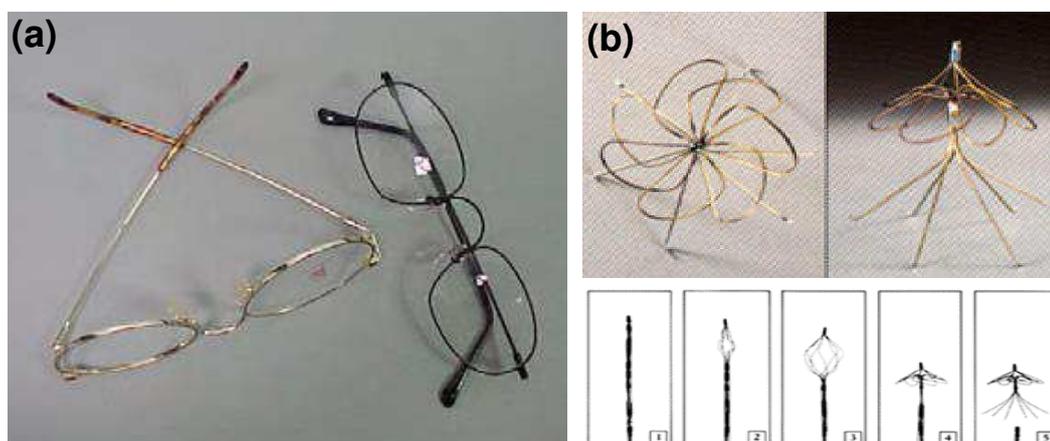
Fonte: (a) Adaptado de WU & SCHETKY, (2000) e (b) SCI-SUPPLY, (2014).

4.1.7.3. Categoria Recuperação Livre

Nesse caso, a função básica do elemento de LMF nas aplicações é causar movimento ou deformação. O princípio básico consiste em deformar tal elemento, sob aplicação de carga, e em seguida aquecê-lo acima da temperatura A_i , para que o mesmo possa voltar à sua forma original sem que haja restrição física para que isso aconteça. Dessa forma, não ocorrerá nem geração de força e nem realização de trabalho mecânico (DUERIG, 1990). Essa categoria é mais rara do que as demais e por isso existem poucos exemplos de aplicações envolvendo recuperação livre.

Alguns exemplos de aplicações de LMF nessa categoria podem ser visualizados na Figura 27. As armações de óculos de LMF (Figura 27a) são fabricadas de maneira a permanecerem no estado martensítico a temperatura ambiente. Dessa forma, são mais “macias” e podem se ajustar melhor ao rosto das pessoas. Se, por algum motivo, a mesma for deformada, basta lavá-la em água quente para que o material retorne à forma inicial.

Figura 27. Exemplos de aplicações de recuperação livre de LMF. (a) Armações de óculos no estado martensítico. (b) Filtro de Simon.



Fonte: (a) Adaptado de WU & SCHETKY, (2000) e (b) DUERIG et al., (1999).

No caso do filtro de Simon (Figura 27b), o mesmo tem como função filtrar os coágulos que percorrem a corrente sanguínea. Os coágulos são aprisionados no filtro, sendo dissolvidos com o passar do tempo (DUERIG et al., 1999). Para inserção do filtro na corrente sanguínea, ele é deformado, a partir de sua forma original no estado

martensítico, conforme a Figura 27(b), e colocado na ponta do cateter. Uma solução salina que flui através do cateter promove o resfriamento do filtro, enquanto ele é posicionado no interior do corpo humano. Quando o filtro é lançado do cateter, o fluxo da solução salina é interrompido e o aquecimento pela corrente sanguínea promove a recuperação de sua forma original. Este procedimento pode ser acompanhado pela Figura 27(b) (parte inferior) (DUEIRIG et al, 1999).

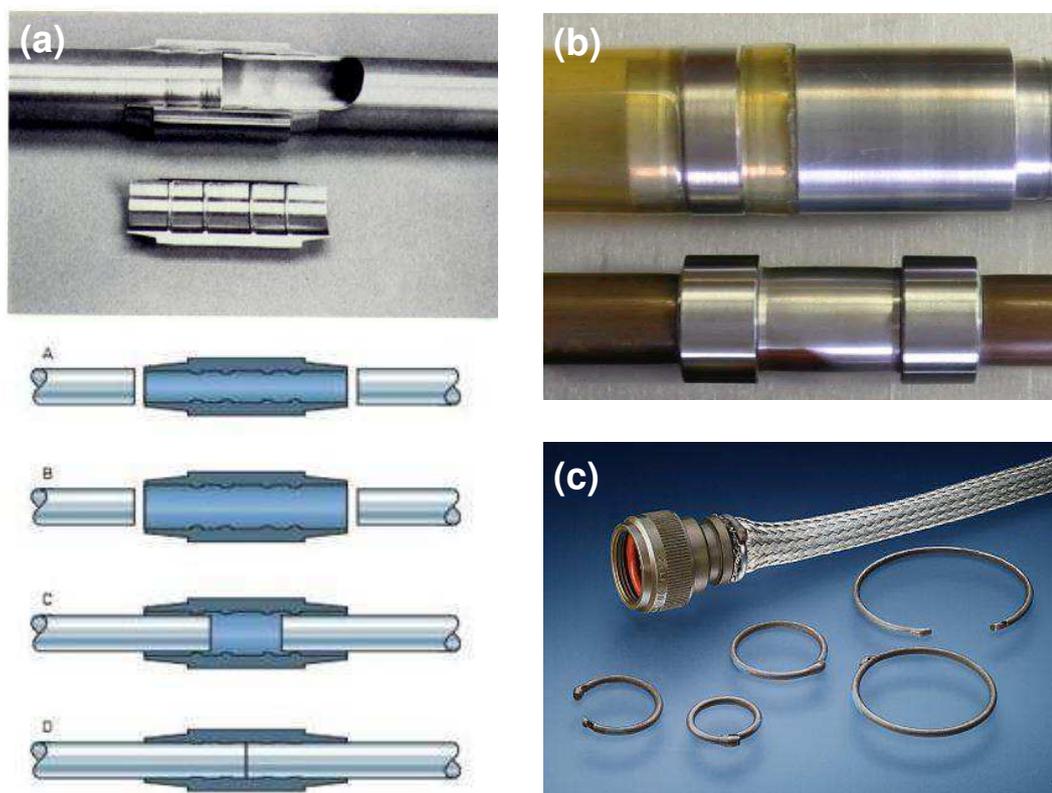
4.1.7.4. Categoria Recuperação Restrita

Essa categoria certamente corresponde a melhor opção para o uso das LMF, pois as aplicações tendem a ser mais simples, com um único ciclo e também com alta confiabilidade. É nessa categoria em que são enquadrados acoplamentos, fixadores e conectores.

O princípio de funcionamento básico dessa categoria consiste em deformar (geralmente ao longo do comprimento) o elemento de LMF no estado martensítico e aquecê-lo acima de sua temperatura A_r , restringindo/impedindo, através de uma barreira física, que o mesmo retorne à sua forma inicial. Dessa maneira, ocorrerá o que se denomina de geração de força, que é geralmente usada para fixação (DUEIRIG, 1990). Como já foi abordado numa seção anterior, a primeira aplicação comercial das LMF foi o acoplamento hidráulico denominado CryoFit®, que utilizava esse princípio. As vantagens desse acoplamento em relação as técnicas de união tradicionais são a alta confiabilidade, ausência de vazamentos e menores custos de instalação. Esse e outros dispositivos do tipo acoplamentos de LMF podem ser visualizados na Figura 28.

No início, os acoplamentos como o CryoFit® (Figura 28a) eram expandidos em temperaturas criogênicas, enviados para o local da aplicação, instalados e aquecidos pelo próprio ambiente. LMF desenvolvidas mais recentemente permitem a produção de acoplamentos que permanecem deformados à temperatura ambiente e, em seguida, retomam a forma original após aquecidas em altas temperaturas.

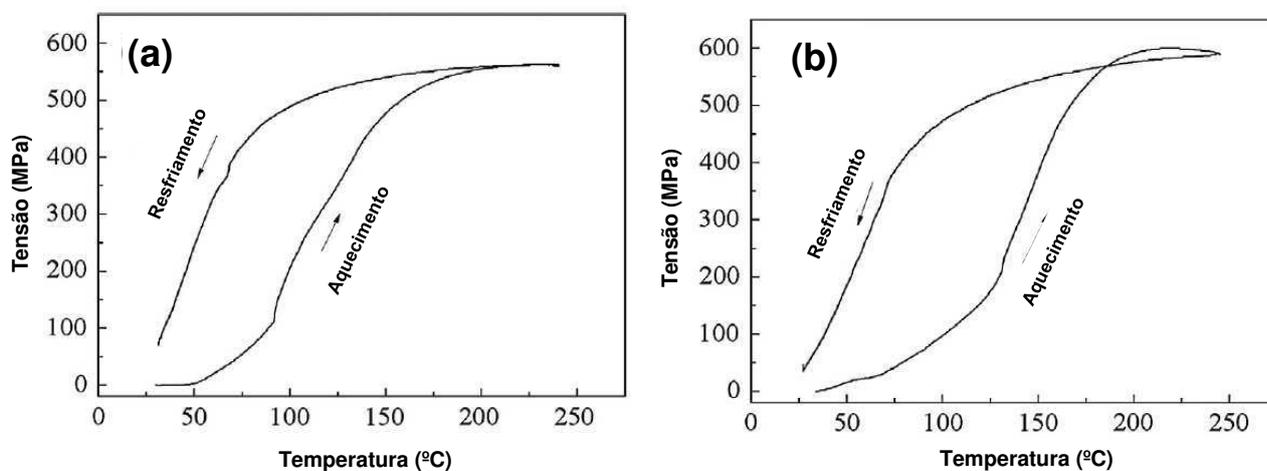
Figura 28. Exemplos de conectores/acoplamentos de LMF. (a) Primeira aplicação comercial de LMF: o CryoFit®. (b) Anéis de LMF para união de tubos. (c) Conectores Tinel Lock®.



Fonte: (a) e (c) Adaptado de DUERIG, (1990) e (b) Adaptado de BOGUE, (2009).

Alguns outros elementos de LMF também podem ser usados nessa categoria, tais como fios. LI et al, (2014) desenvolveram um trabalho sobre a avaliação da influência da deformação e da ciclagem térmica na tensão de recuperação e nas temperaturas de transformação de um fio de LMF com composição química de 50,2Ni-Ti (at %). Para esse trabalho foi montado um aparato experimental específico para medição da tensão mecânica de recuperação em função da temperatura. Os experimentos foram realizados aplicando-se um determinado nível de deformação no fio e, em seguida, relaxando-se a tensão até 5 MPa. Com isso, o fio acumula uma determinada “deformação plástica”. Na sequência, o fio foi aquecido até 240°C (valor acima de A_f) e resfriado até a temperatura ambiente. Como não pode recuperar sua forma original por estar fixado, o fio gera um aumento de tensão devido a ativação do EMF. Esse efeito pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 29. Curvas Tensão - Temperatura para um fio de LMF deformado e fixado. (a) Deformação de 10%. (b) Deformação de 14% em relação ao comprimento útil do fio.

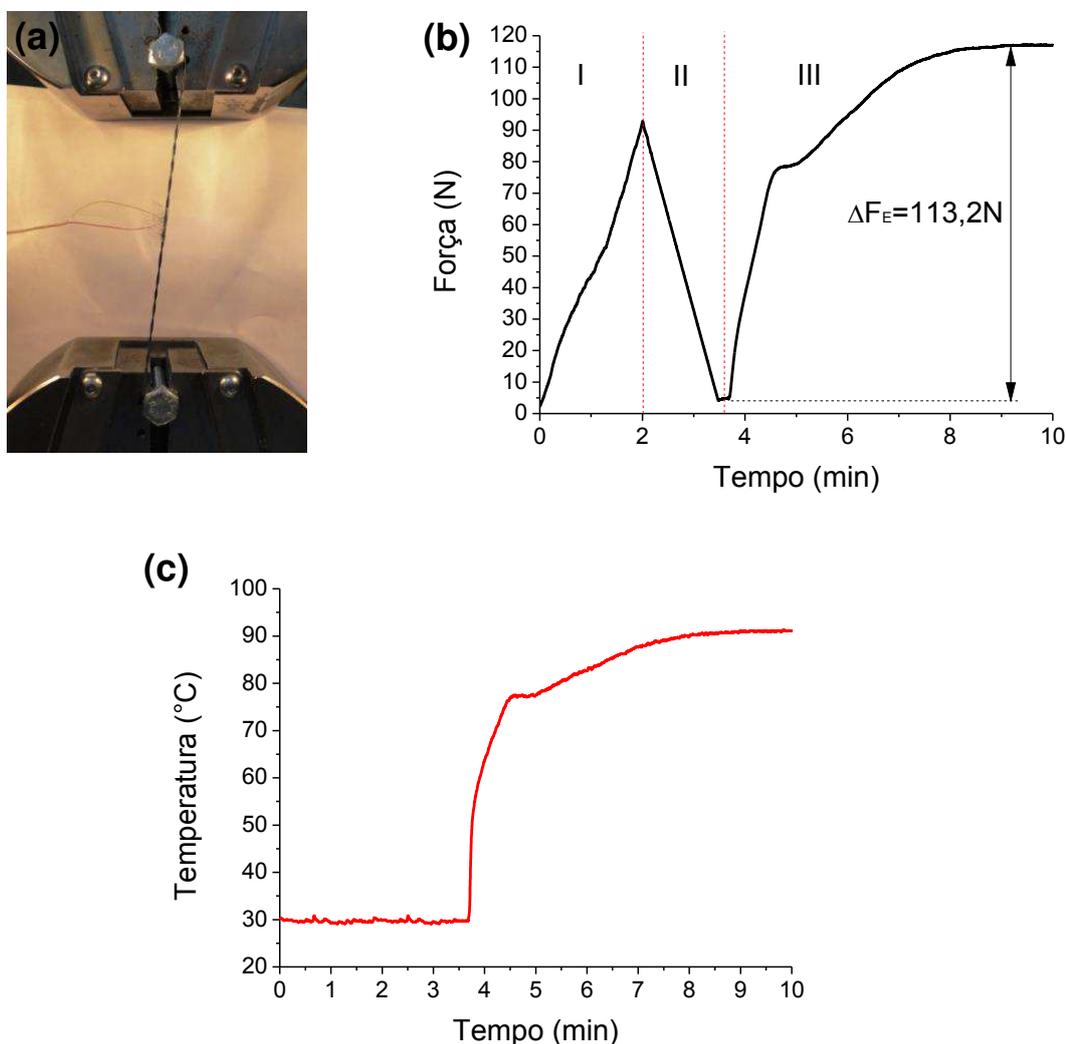


Fonte: Adaptado de LI et al, (2014).

A partir de fios de LMF é possível fabricar outros tipos de fixadores, a exemplo do *SMARt Lockwire* proposto por OLIVEIRA et al, (2012). O princípio de funcionamento de um *lockwire* convencional é de fixar, através de um fio de metal comum, um ou mais parafusos que não utilizam porcas travantes. O *SMARt Lockwire* é constituído por fios de LMF NiTi e o seu princípio de funcionamento tem por base o *lockwire* convencional, no que diz respeito principalmente a sua instalação. Porém, a grande vantagem é que o novo conceito atua de forma ativa sobre os elementos de fixação, gerando forças estáticas capazes de, não apenas impedir o desrosqueamento dos parafusos, mas também gerar um torque adicional sobre os mesmos quando submetido a um pequeno aumento de temperatura. O esquema de ensaio utilizado no *SMARt Lockwire* pode ser visualizado na Figura 30.

O resultado do ensaio de geração de força do *SMARt Lockwire* pode ser visualizado na Figura 30(b). A força ΔF_E medida no ensaio em função do tempo foi dividida em três regiões. A região I denota a deformação de 5% imposta ao fio NiTi na temperatura ambiente de 30 °C. Em seguida, como mostrado na região II, a carga foi aliviada até uma pré-carga de 5 N. Após o descarregamento, foi dado início ao aquecimento utilizando a câmara térmica até a temperatura de 90 °C, acima da temperatura A_f do material. A carga gerada a partir da restrição da recuperação de 5% foi de aproximadamente 113,2 N.

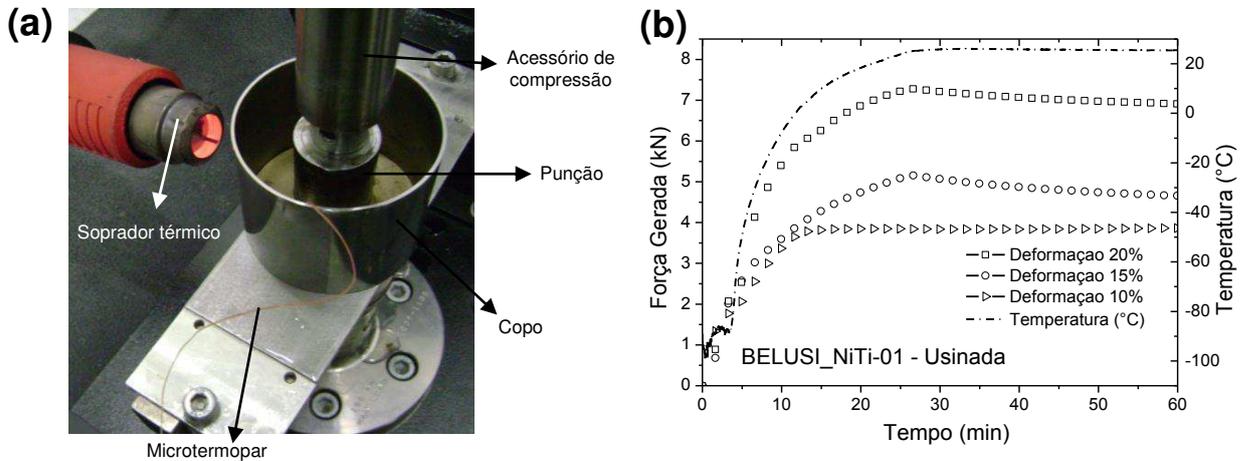
Figura 30. SMARt Lockwire. (a) Montagem experimental para ensaio de geração de força; (b) Força gerada durante o aquecimento em função do tempo e (c) Evolução da temperatura com o tempo.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA et al, (2012).

Ainda na questão da geração de força por um elemento de LMF, SIMÕES, (2012) fabricou e testou arruelas Belleville de NiTi para geração de pré-carga em parafusos através da ativação do EMF, semelhantemente ao caso do *SMARt Lockwire*. Os ensaios termomecânicos desses fixadores foram realizados através do arranjo experimental mostrado na Figura 31. De acordo com os resultados apresentados por SIMÕES, (2012), é possível afirmar que o nível de força gerada aumenta com o aumento da deformação imposta ao atuador Belleville de LMF NiTi. Dessa forma, é possível aplicar essas arruelas para gerar pré-cargas em juntas aparafusadas que operem em temperaturas superiores a A_f .

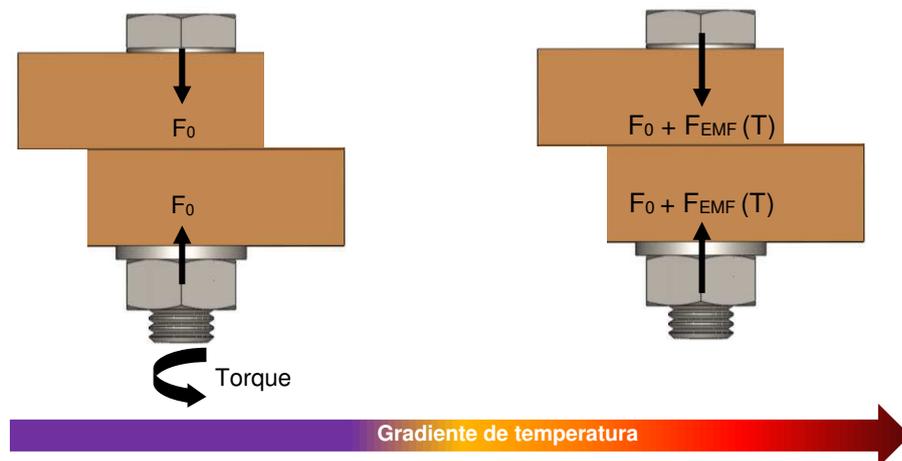
Figura 31. Ensaios de geração de força em arruelas Belleville de LMF NiTi. (a) Arranjo experimental. (b) Força gerada para deformações de 10, 15 e 20 %.



Fonte: Adaptado de SIMÕES et al, (2012).

No contexto de aplicações dessa categoria, pode-se pensar também num conceito de parafuso atuador baseado no EMF, mostrado na Figura 32.

Figura 32. Esquema demonstrativo da atuação de um parafuso atuador de LMF numa junta.



Fonte: Autoria própria.

Nesse caso, o parafuso atuador de LMF sofreu a ação de uma pré carga F_0 oriunda de um torque que, conseqüentemente, causa uma deformação no parafuso. Após submeter essa junta à um aumento de temperatura, o parafuso atuador de LMF tende a se contrair para retornar à sua forma inicial indeformada. Entretanto, estando restrito, o parafuso gera uma carga que é função da temperatura (F_{EMF}), graças ao

fenômeno EMF. Deste modo, espera-se que ocorra uma melhoria do desempenho da junta por meio de um auto-aperto do parafuso, graças ao comportamento termomecânico especial das LMF.

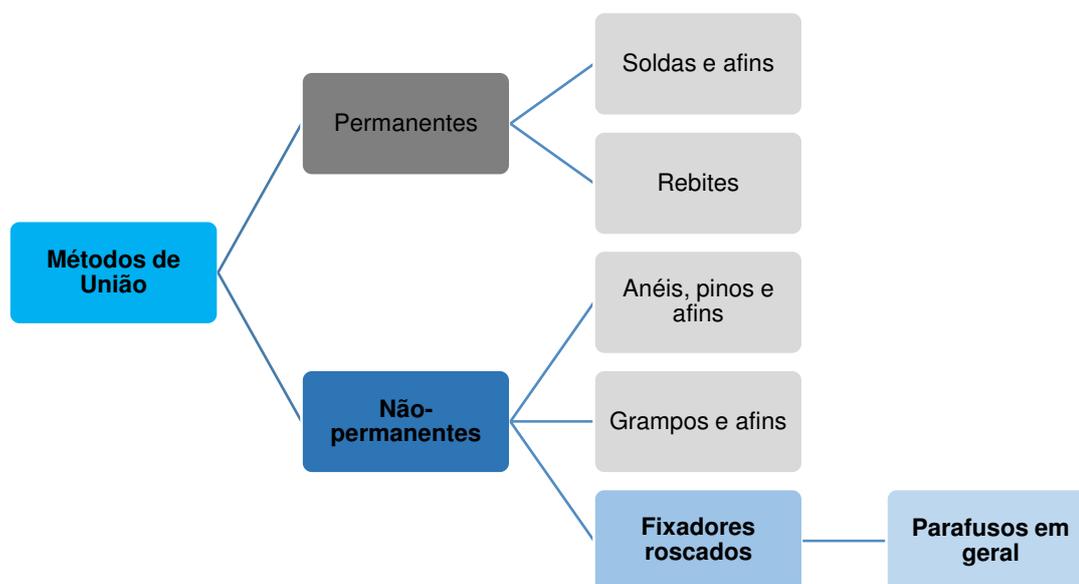
4.2. Parafusos

4.2.1. Definição e Classificação

Virtualmente, todas as máquinas e estruturas, tanto grande porte como de pequenas dimensões, são formadas por uma montagem de partes individuais, fabricadas separadamente, e unidas de forma permanente ou não, para produzir o sistema completo (COLLINS, 2006).

Atualmente, os métodos de fixação disponíveis incluem ajustes por interferência, fixadores roscados, soldagem, adesão (brasagem, solda fraca, união por adesivo), dobramento conjugado, escoramento, travamento, uso de pinos, anéis de retenção, grampos, ou outros fixadores especiais (COLLINS, 2006). Dentre todos estes, os fixadores roscados são os mais usados na indústria metal-mecânica. A classificação de alguns dos métodos de fixação pode ser visualizada na Figura 33.

Figura 33. Esquema demonstrativo da classificação dos métodos de união, com destaque para fixadores roscados e parafusos.



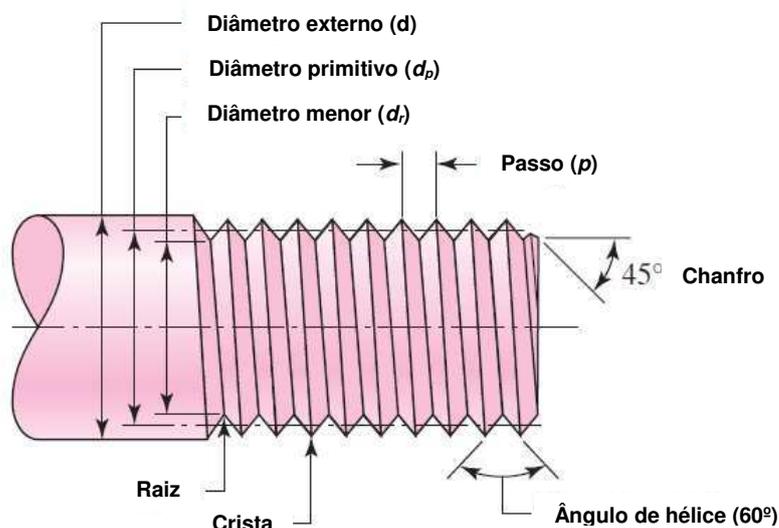
Fonte: Autoria própria.

Nesse contexto, é possível definir parafusos como elementos de fixação roscados empregados na união não-permanente de partes, isto é, as partes podem ser montadas ou desmontadas bastando apertar e desapertar os parafusos que as mantêm unidas, sem que a integridade da união seja afetada (SHIGLEY et al, 2006).

4.2.2. Padrões de Roscas

A rosca é o único elemento comum a todos fixadores roscados. Em termos gerais a rosca é uma hélice que faz com que o parafuso avance sobre o material ou porca quando submetido a um torque. As roscas podem ser externas ou internas. Após a Segunda Guerra Mundial, as roscas foram padronizadas na Inglaterra, no Canadá e nos Estados Unidos, no que atualmente se conhece como *Unified National Standard* (UNS), como mostrado na Figura 34.

Figura 34. Forma padrão de rosca UNS e ISO.



Fonte: Adaptado de NORTON, (2006).

O padrão europeu é definido pela *International Organization for Standardization* (ISO) e tem essencialmente a mesma forma de seção transversal de rosca, usando, porém, dimensões métricas e, portanto, não é intercambiável com as roscas UNS. Ambos os sistemas utilizam um ângulo de hélice de 60° e definem o tamanho de rosca pelo diâmetro nominal externo (d) da rosca externa. O passo de

rosca (p) é a distância entre as roscas adjacentes. A crista e a raiz da rosca são tomadas como planas para reduzir a concentração de tensões que ocorre em cantos vivos. O diâmetro primitivo (d_p) e o diâmetro de raiz (d_r) são definidos em termos do passo de rosca com razões ligeiramente diferentes encontradas nas roscas UNS e ISO. Os três (3) padrões de famílias de diâmetro primitivo definidos para roscas UNS são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Séries de roscas com padrão UNS.

Padrão	UNC (Série grossa)	UNF (Série fina)	UNEF (Série ultra fina)
Descrição	Usadas em aplicações comuns, onde há a necessidade de repetidas inserções.	Usadas em aplicações onde pode ocorrer afrouxamento devido à vibração.	São utilizadas onde a espessura da parede é limitada e suas roscas pequenas são uma vantagem.

Fonte: Adaptado de NORTON, (2006).

Segundo NORTON, (2006), os padrões UNS e ISO definem intervalos de tolerância para roscas externas (A) e internas (B), de maneira a controlar o seu ajuste. As classes de tolerância para os dois (2) padrões podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5. Classe das roscas com padrões UNS e ISO.

Classe	1	2	3
Descrição	Possui as tolerâncias mais largas e utiliza fixadores de qualidade comercial (pouco custoso).	Define tolerâncias mais estreitas para uma melhor qualidade de encaixe. Ideal uso geral em projetos de máquinas.	Apresenta maior precisão do que as demais e pode ser especificada quando ajustes mais precisos são requeridos.

Fonte: Adaptado de NORTON, (2006).

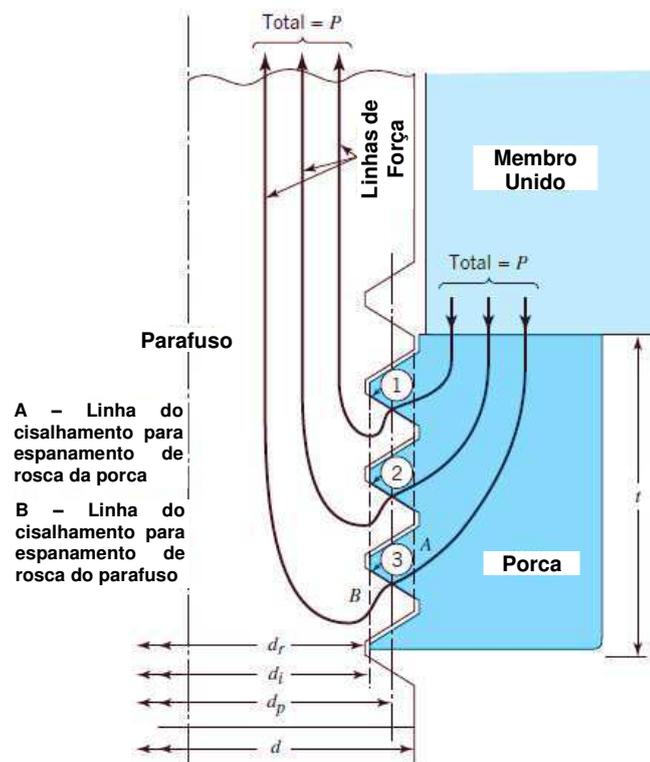
As roscas são especificadas a partir de um código que define sua série, diâmetro, passo e classe de ajuste. O passo de roscas UNS é definido reciprocamente

como o número de roscas por polegada, enquanto na rosca métrica, o passo de rosca é especificado pela dimensão do passo em milímetros. Uma revisão mais aprofundada sobre os tipos de parafusos de fixação, porcas e arruelas pode ser encontrada no Anexo A.

4.2.3. Tensões em Roscas

Quando uma porca se acopla a um parafuso, teoricamente todos os filetes de rosca devem receber a mesma carga. No entanto, sabe-se que as porcas frequentemente são fabricadas de material maleável e, portanto, normalmente mais dúctil do que aquele do parafuso. Isso causa escoamento local dos filetes de rosca da porca quando o parafuso é apertado, o que pode melhorar o ajuste de rosca e fazer com que todos os filetes de rosca compartilhem a carga (JUVINALL & MARSHEK, 2012). Assumindo-se o pressuposto, é possível visualizar na Figura 35 a distribuição de tensões entre um parafuso, uma porca e um membro unido por ambos.

Figura 35. Esquema ilustrativo do fluxo de forças de um parafuso sob tração.



Fonte: Adaptado de JUVINALL & MARSHEK, (2012).

Uma revisão completa sobre cálculo das tensões em pontos críticos do parafuso e da porca pode ser encontrada no Anexo B.

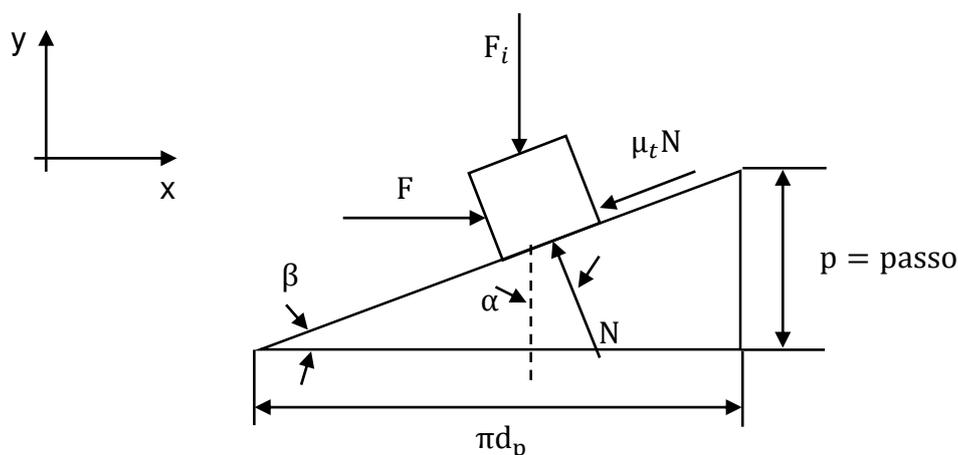
4.2.4. Torque de Aperto

Para obter os máximos benefícios do pré-carregamento, é essencial que a pré-carga inicial especificada no projeto realmente seja induzida no parafuso através do processo de aperto. O método mais exato para quantificar a pré-carga induzida seria medir a deformação elástica induzida pela força no parafuso, porém, em muitas isso não é possível (COLLINS, 2006).

Um método mais conveniente, porém menos preciso, seria medir o torque aplicado à porca ou à cabeça do parafuso, através, por exemplo, de um torquímetro. Todavia, torquímetros podem apresentar erros de até $\pm 30\%$ na pré-carga inicial (NORTON, 2006).

De acordo com NORTON, (2006), uma das maneiras para calcular o torque necessário para desenvolver uma determinada pré-carga inicial é usar uma equação baseada no balanço de forças esquematizado na Figura 36.

Figura 36. Esquema das forças agindo na interface porca-parafuso.



Fonte: Autoria própria.

Nesse esquema, F é a força nas roscas do parafuso, F_i é a pré-carga inicial, N é a força normal, μ_t é o coeficiente de atrito entre o parafuso e a porca, β é o ângulo

de hélice da rosca e α é a metade do ângulo entre os flancos da rosca. Do balanço de força em x e y , obtém-se que:

$$F = F_i \left(\frac{\mu_t \cos \beta + \sin \beta}{\cos \beta - \mu_t \sin \beta} \right) \quad (1)$$

$$\tan \beta = \frac{p}{\pi d_p} \quad (2)$$

Logo, o torque necessário para vencer o atrito parafuso-porca será:

$$T_t = F \frac{d_p}{2} = F_i \frac{d_p}{2} \left(\frac{\mu_t \cos \beta + \sin \beta}{\cos \beta - \mu_t \sin \beta} \right) \quad (3)$$

É necessário considerar, também, o torque de atrito entre a porca e a superfície a ser unida. Esse torque é dado por:

$$T_n = \mu_n F_i \frac{d_c}{2} \quad (4)$$

para a qual μ_n é o coeficiente de atrito entre a porca e a superfície e d_c é o seu diâmetro médio.

Portanto, o torque de aperto do parafuso, em função de α , é dado por:

$$T = T_t + T_n = F \frac{d_p}{2} = F_i \frac{d_p}{2} \left(\frac{\mu_t \pi d_p + p \cos \alpha}{\pi d_p \cos \alpha - \mu_t p} \right) + \mu_n F_i \frac{d_c}{2} \quad (5)$$

O diâmetro primitivo (d_p) pode ser aproximado de forma grosseira pelo diâmetro do parafuso (d), e o d_c pode ser aproximado pela média entre o diâmetro do parafuso e o tamanho padrão de cabeça ou de porca de $1,5d$:

$$T_i \approx F_i \frac{d}{2} \left(\frac{\mu_t \pi d + p \cos \alpha}{\pi d \cos \alpha - \mu_t p} \right) + F_i \frac{(1 + 1,5)d}{2} \mu_n \quad (6)$$

A fatorização da força e do diâmetro do parafuso produz:

$$T_i \approx K_i F_i d \quad (7)$$

em que,

$$K_i \approx 0,5 \left(\frac{\mu_t \pi d + p \cos \alpha}{\pi d \cos \alpha - \mu_t p} \right) + 0,625 \mu_n \quad (8)$$

para a qual K_i é denominado de fator de torque.

A Equação (6) pode ser reescrita para o padrão métrico, em que α é 30° . Fazendo as substituições e simplificações pertinentes, ter-se-á que:

$$T_i = T = F_i \left[\frac{p}{2\pi} + \frac{d}{2} \frac{\mu_t}{\cos \alpha} + \frac{d_c}{2} \mu_n \right] = F_i \left[0,159p + 0,578 \mu_t d + \frac{d_c}{2} \mu_n \right] \quad (9)$$

Usualmente assume-se um coeficiente de atrito de rosca (μ_t) e o coeficiente de atrito da porca com a superfície (μ_n), para uma aplicação média, são ambos nominalmente iguais a 0,15. Para essa suposição, tem-se um coeficiente de torque igual a 0,2, para todos os tamanhos e padrões de parafusos. Todavia, o valor de K_i pode variar de 0,07 a 0,3, dependendo das condições de acabamento e lubrificação (COLLINS, 2006).

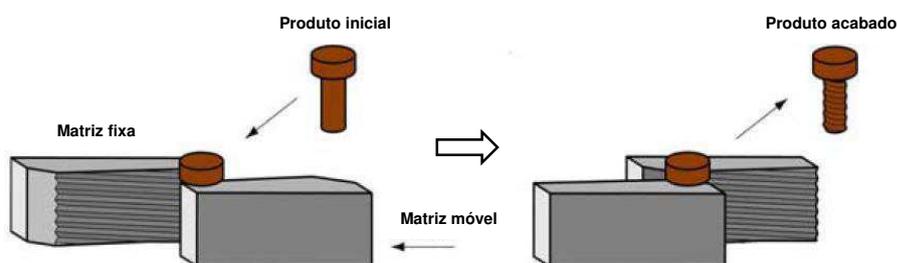
4.2.5. Fabricação Convencional de Parafusos

A fabricação de parafusos é geralmente dividida em duas (2) etapas: fabricação das roscas externas e da cabeça.

As roscas externas podem ser cortadas com uma ferramenta de ponto único usando um torno mecânico ou alternativamente numa matriz que possui rosqueamento externo. A barra a ser rosqueada tem o mesmo diâmetro da rosca que se pretende fazer. Máquinas especializadas, conhecidas como máquinas de fazer roscas, são utilizadas para produzir parafusos de porcas em grande quantidade e com baixo custo (NORTON, 2006).

Um outro método, mais utilizado na indústria, para fabricar roscas externas é a laminação, também conhecido como conformação de roscas. Esse processo é ilustrado na Figura 37.

Figura 37. Processo de laminação de roscas de parafuso.



Fonte: Autoria própria.

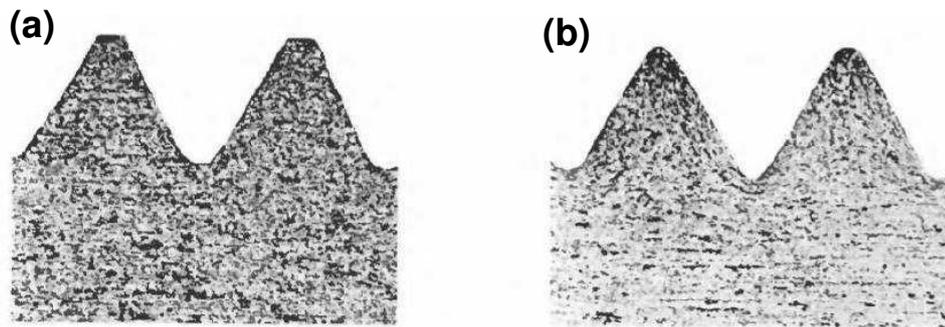
Nesse processo, matrizes de aço endurecido na forma de roscas são forçadas contra a superfície da barra em que se pretende fabricar as roscas. As matrizes provocam uma conformação a frio do material da barra para adquirir a forma de roscas. O diâmetro final externo da rosca é maior que o diâmetro inicial da barra porque o material é forçado para fora das raízes e para dentro das cristas das roscas (NORTON, 2006).

O processo de laminação apresenta várias vantagens sobre o processo de corte de roscas. A conformação a frio encrua o material e aumenta a resistência mecânica do mesmo, cria raios de raiz e crista e introduz tensões residuais de compressão nas raízes das roscas. A alteração de forma do material na conformação para roscas causa uma reorientação dos grãos. Todos esses fatores contribuem para o aumento significativo da resistência de roscas laminadas quando comparadas àquelas de roscas cortadas.

A Figura 38 ilustra os perfis e a estrutura de grãos de roscas cortadas e laminadas. Em qualquer aplicação em que a carga nos fixadores seja alta e onde as cargas que causam fadiga estiverem presentes, roscas laminadas devem ser sempre utilizadas. Em aplicações não-críticas ou onde a carga seja baixa, as roscas cortadas, mais fracas e mais baratas, podem ser utilizadas.

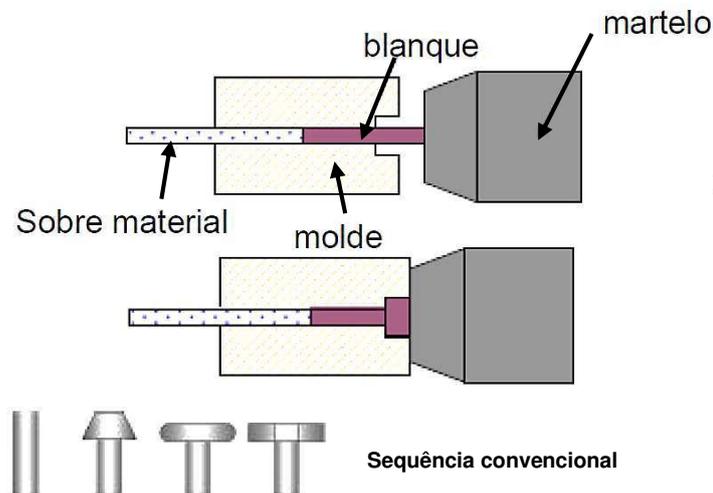
As cabeças dos parafusos de porca são geralmente fabricadas por conformação a frio (ou a quente) em um procedimento chamado de recalque. Esse procedimento pode ser visualizado no esquema da Figura 39.

Figura 38. Estruturas de grãos de roscas. (a) Cortadas. (b) Laminadas.



Fonte: NORTON, (2006).

Figura 39. Ilustração do processo de forjamento da cabeça de parafusos.



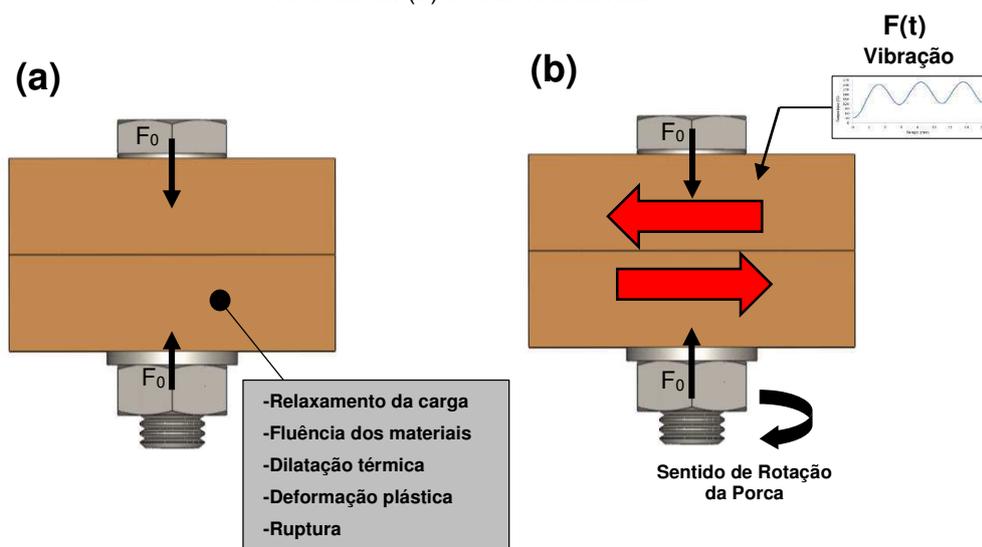
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 39, uma barra com tamanho adequado é colocada num molde contendo a forma da cabeça desejada. Em seguida, um martelo comprime o material de maneira que o mesmo flui e adquire a forma do molde. Melhorias similares na orientação de grãos na cabeça são obtidas como descrito para o processo de laminação. Recortes hexagonais ou fendas Phillips são produzidos por conformação (a frio ou a quente). Superfícies hexagonais ou fendas de parafusos são usinadas em etapas posteriores (NORTON, 2006).

4.2.6. Perda de Pré-carga em Parafusos

A perda de pré-carga de fixadores pode ocorrer de duas (2) formas: pela rotação ou pela não-rotação do fixador. A perda de pré-carga por rotação do fixador (perda rotacional) é denominada de afrouxamento espontâneo (do Inglês, *Self-loosening*) e ocorre quando o fixador rotaciona pela ação de uma carga externa. Já a redução de pré-carga pela não rotação do fixador (perda não-rotacional) ocorre quando não há nenhum movimento relativo entre as roscas externa e interna do fixador (ECCLES, 2010). Esses dois (2) tipos de processos de perda de pré-carga são ilustrados na Figura 40.

Figura 40. Esquematização dos processos de perda de pré-carga em parafusos. (a) Perda não-rotacional. (b) Perda rotacional.

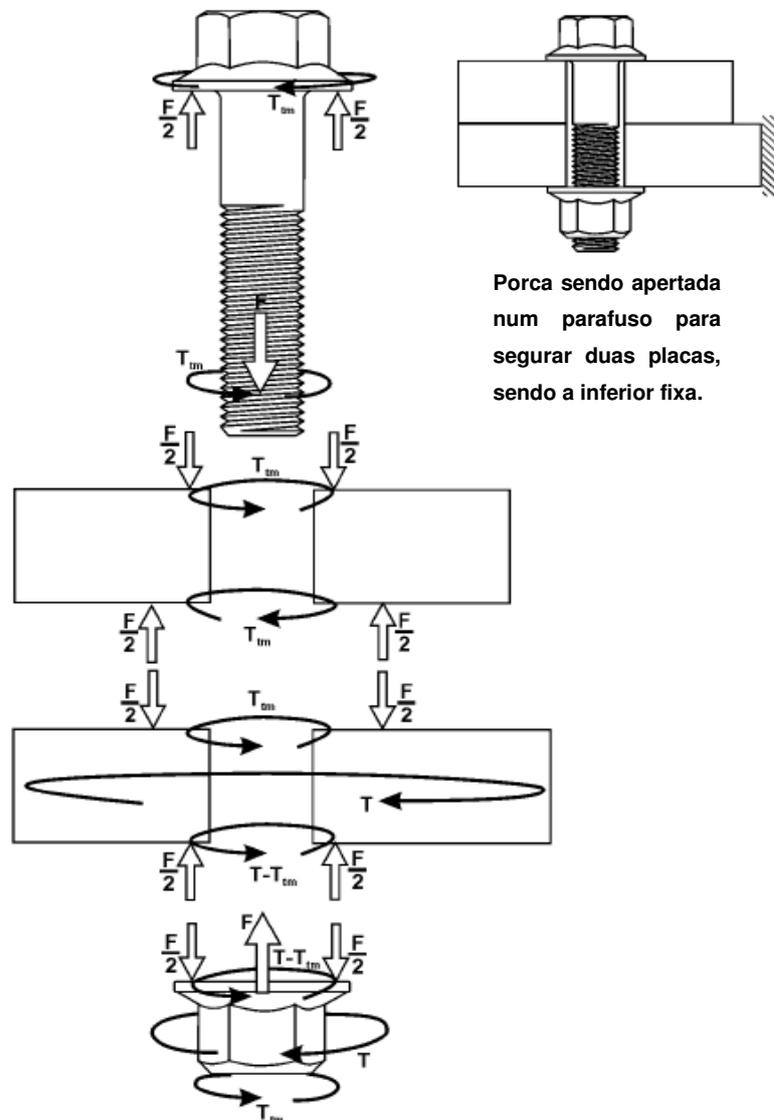


Fonte: Autoria própria.

A perda não rotacional pode ocorrer oriunda de uma deformação do parafuso em si, ou mesmo da junta. A alongação do parafuso durante o aperto da porca, mostrado no DCL da Figura 41, e a compressão da junta, podem levar a uma diminuição da pré-carga. Essas alterações de comprimento podem ser reversíveis, como resultado da diferença de dilatação térmica entre os componentes da junta e o parafuso, ou permanentes, como resultado de deformações plásticas, ruptura do parafuso por excesso de carga, fluência dos materiais ou relaxamento da carga (ECCLES, 2010).

Sendo o afrouxamento espontâneo em parafusos de LMF um dos focos deste trabalho, os mecanismos da perda rotacional serão discutidos numa seção a parte.

Figura 41. DCL para uma porca sendo apertada num parafuso.



Fonte: Adaptado de ECCLES, (2010).

No diagrama acima, presume-se que a porca é apertada através de um torque puro. Quando uma porca é apertada com uma chave inglesa, haverá também uma força de cisalhamento adicional que atua sobre a porca, igual e em direção oposta à força aplicada para a chave. O diagrama também assume que o torque na rosca (T_{tm}) é menor do que o torque de atrito na cabeça do parafuso, caso contrário haveria a necessidade de uma ferramenta para evitar sua rotação.

4.2.7. Afrouxamento Espontâneo (*Self-Loosening*)

4.2.7.1. O Trabalho de Junker

Afrouxamento espontâneo foi inicialmente observado em meados do século 19, porém não estava claro qual era o processo que o causava. Pesquisadores estudaram cargas axiais e impacto, no entanto, foi Gerhard H. Junker (JUNKER, 1969) quem descobriu que o movimento transversal da junta poderia causar a total perda de pré-carga de fixadores e, a partir daí, mudou-se completamente o foco de investigação desse fenômeno (ECCLES, 2010).

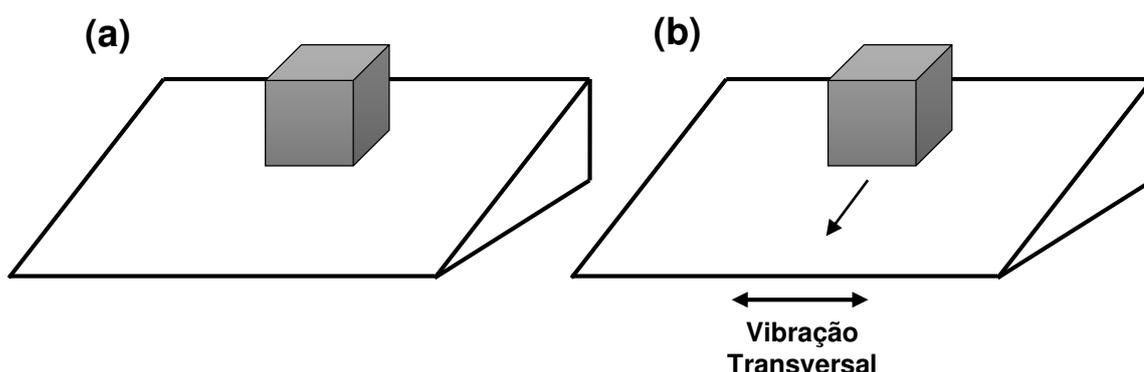
JUNKER, (1969) desenvolveu uma teoria para prever o afrouxamento espontâneo de fixadores submetidos a carregamentos transversais cíclicos. Este autor descobriu que este tipo de carregamento gera a condição mais severa quando se trata de perda de pré-carga de um fixador. Por essa razão, há um interesse especial, por parte desta pesquisa, em investigar a influência dessa causa de afrouxamento em parafusos de LMF.

Em linha gerais, JUNKER, (1969) mostrou que parafusos pré-carregados sofrem afrouxamento espontâneo quando o movimento relativo ocorre entre os flancos de rosca e superfície de apoio do fixador. Tal movimento ocorre quando a força transversal atuando sobre a junta é maior do que a força de atrito gerada pela pré-carga do parafuso. Uma vez que as folgas são movimentadas, o parafuso estará sujeito a forças de flexão, e havendo uma condição de deslizamento transversal também haverá o deslizamento da superfície da cabeça do parafuso. Uma vez que o deslizamento é iniciado, as roscas e a cabeça do parafuso ficarão momentaneamente livres de atrito. O torque interno de remoção, resultante da pré-carga que atua sobre o ângulo de hélice da rosca, gera uma rotação entre a porca e o parafuso. Sob movimentos transversais repetidos por muitos ciclos, este mecanismo pode folgar completamente o fixador, ou seja, a uma dita condição de pré-carga zero (JUNKER, 1969).

4.2.7.2. Deslizamento (*Slippage*) e Mecanismos de Afrouxamento

O fundamento básico do deslizamento nas superfícies de contato de um parafuso submetido a uma carga transversal cíclica pode ser explicado com base na ilustração da Figura 42.

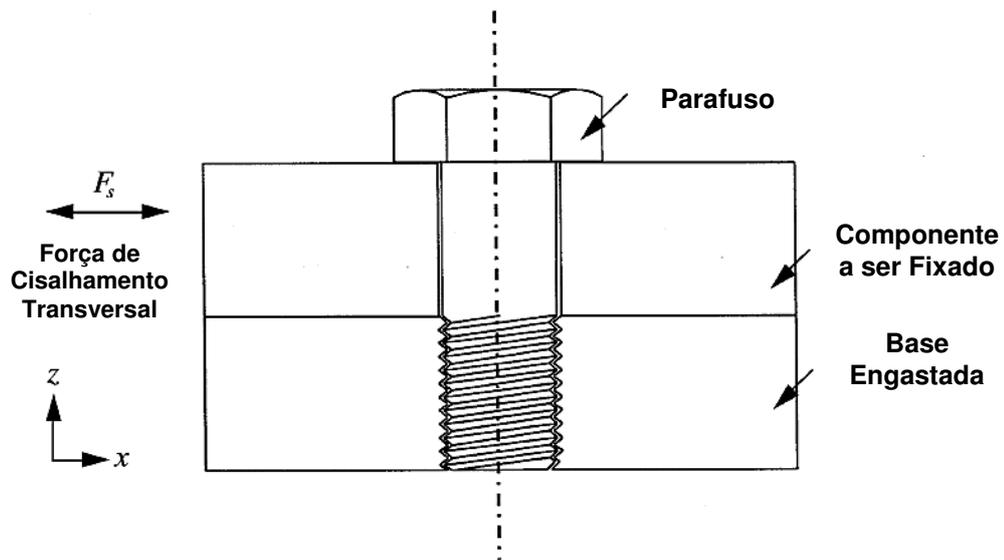
Figura 42. Bloco em plano inclinado. (a) Em repouso. (b) Sob ação de vibração transversal.



Fonte: Autoria própria.

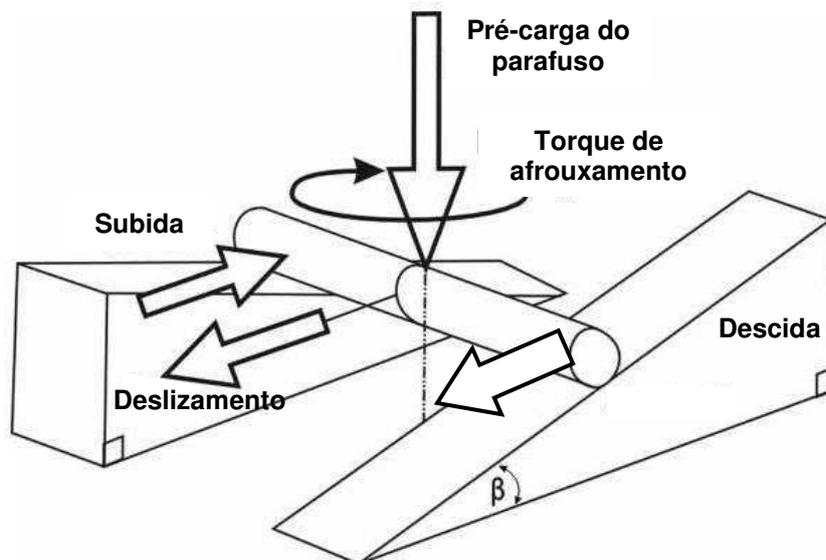
Na Figura 42(a), a força de atrito entre o bloco e o plano inclinado é suficiente para evitar que o bloco desça plano abaixo com a ausência de cargas externas. Quando o plano inclinado é submetido a uma carga transversal cíclica suficiente para vencer a força de atrito entre o bloco e o plano inclinado, o bloco não apenas desliza na direção transversal como também desce plano abaixo, conforme Figura 42(b). De acordo com JUNKER, (1969) isso ocorre porque quando a força de atrito é superada na direção transversal devido à vibração, a junta se torna “livre de atrito” em outras direções. Aplicando-se o mesmo raciocínio a um sistema fixado por um parafuso, a exemplo do mostrado na Figura 43, pode-se estabelecer que quando o cisalhamento transversal cíclico superar a força de atrito na direção transversal, a junta em questão se tornará livre de atrito circunferencial, e o torque de afrouxamento gerado pela componente da pré-carga ao redor da hélice de rosca fará com que o parafuso folgue, conforme mostrado na Figura 44.

Figura 43. Junta aparafusada submetida a cisalhamento transversal cíclico.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

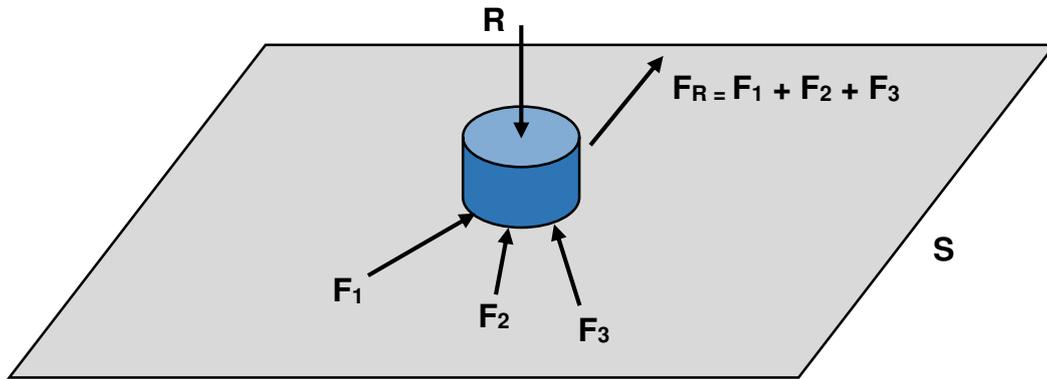
Figura 44. Torque de afrouxamento gerado pelo movimento da rosca do parafuso.



Fonte: Adaptado de ECCLES et al, (2009).

Afrouxamento, por definição, requer deslizamento entre superfícies do fixador, mais especificamente, requer deslizamento na direção circunferencial. Para que o deslizamento ocorra, a força de atrito entre duas superfícies de contato deve ser superada pela resultante das forças tangenciais atuantes na interface. Esse efeito pode ser melhor explicado através da ilustração da Figura 45.

Figura 45. Esquema para análise do requisito para deslizamento.



Fonte: Autoria própria.

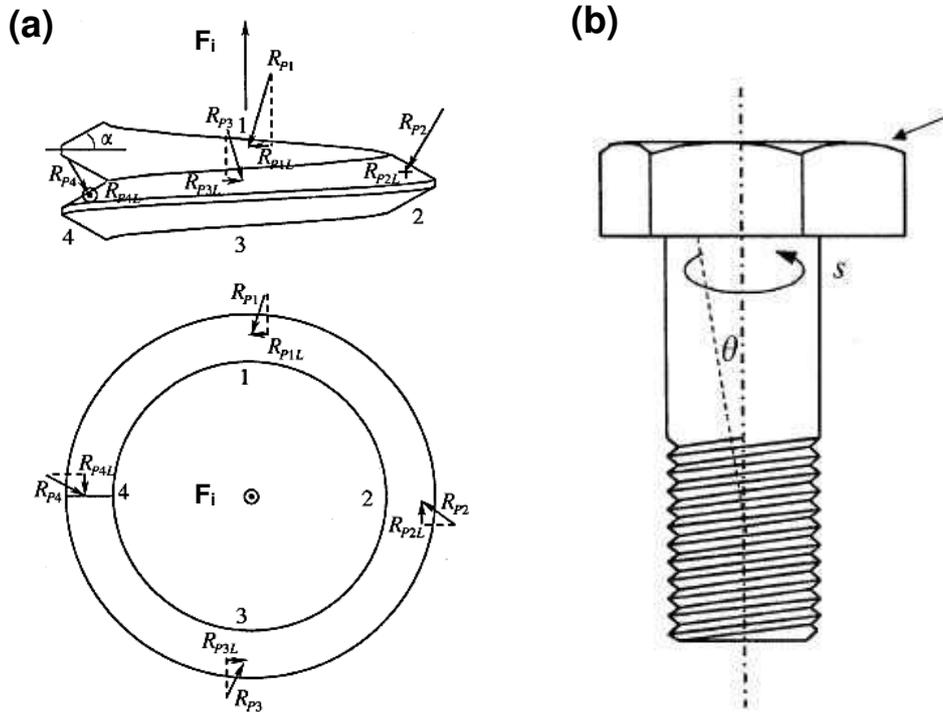
Nessa figura, ilustra-se um cilindro apoiado na superfície **S**. A força de atrito que se opõe ao movimento entre o cilindro e a superfície tem valor máximo dado por μR , onde R é a força normal à **S** e μ é o coeficiente de atrito. Para que o deslizamento ocorra entre o cilindro e **S**, a resultante das forças tangenciais atuando no cilindro deve ser maior do que a força de atrito ($F_R > \mu R$). É importante salientar que a direção de deslizamento é a mesma da resultante das forças tangenciais (F_R).

Segundo PAI & HESS, (2002), e a partir da condição geral para deslizamento descrita acima, o afrouxamento de fixadores roscados ocorrerá quando duas (2) condições forem satisfeitas em suas superfícies de contato:

1. pelo menos uma das forças atuando nas superfícies de contato atuar na direção de afrouxamento, ou seja, há a presença de um torque de afrouxamento atuando no fixador;
2. a resultante de todas as forças tangenciais atuando na superfície de contato superar a força de atrito.

Considerando-se a força de cisalhamento atuando na junta mostrada na Figura 46, há um parafuso pré-carregado que fixa a parte móvel na base engastada. O componente a ser fixado é submetido a uma força de cisalhamento cíclico (F_s). No entanto, mesmo na ausência de F_s , o primeiro requisito de afrouxamento é satisfeito devido a geometria helicoidal da rosca, a qual produz o momento de afrouxamento oriundo das componentes de forças circunferenciais ao redor da roscas. Esse comportamento é ilustrado na Figura 46.

Figura 46. Torque de afrouxamento sem aplicação de cisalhamento cíclico. (a) Torque oriundo da componente de reação à pré-carga aplicada. (b) Torque oriundo da energia de torção armazenada durante o aperto.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

A partir da análise da Figura 46(a), é possível identificar as forças de reação oriundas da pré-carga aplicada ao parafuso (F_i), R_{Pn} , $n=1, \dots, 4$, em quatro pontos ao redor do filete de rosca. Componentes de reação da força tangencial na hélice da rosca, R_{PnL} , $n=1, \dots, 4$, contribuem para o torque de afrouxamento no eixo do fixador. Isso é comumente ilustrado através da Equação (9), que foi modificada abaixo para representar a condição para manter a pré-carga na ausência de forças externas:

$$F_i \frac{p}{2\pi} < F_i \frac{d}{2} \frac{\mu_t}{\cos \alpha} + F_i \frac{d_c}{2} \mu_n \quad (10)$$

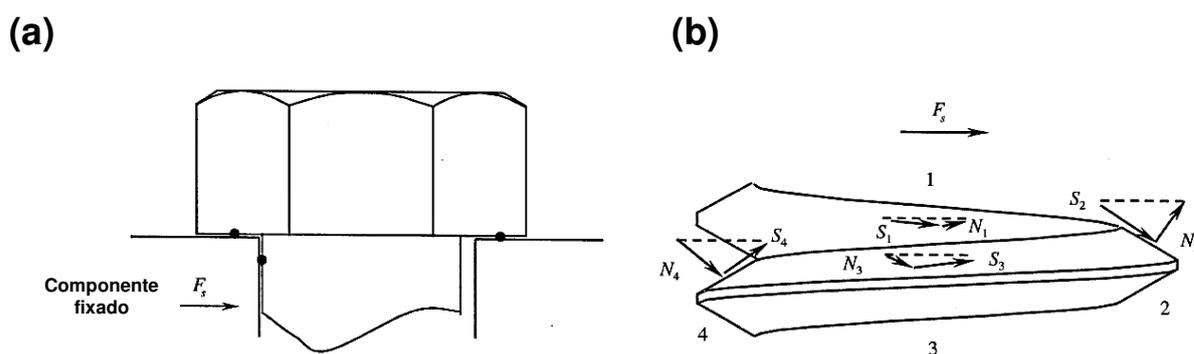
O termo no lado esquerdo da equação é o torque de afrouxamento desenvolvido pela pré-carga no entorno da hélice de rosca. Os termos do lado direito são os torques de atrito da rosca e da cabeça do parafuso, respectivamente.

Em muitas aplicações, a pré-carga é fornecida aplicando-se um torque na cabeça dos parafusos. Uma porção desse torque é retida pelo parafuso na forma de energia de torção, devido ao atrito na cabeça e nas superfícies das roscas, conforme mostrado na Figura 46(b).

Na ausência de cargas externas, a segunda condição de afrouxamento geralmente não é satisfeita, uma vez que a magnitude do momento de afrouxamento oriundo da pré-carga do fixador e da torção armazenada está em equilíbrio com os momentos de atrito. Portanto, para que o segundo requisito de afrouxamento seja satisfeito, cargas externas atuando sobre o fixador devem contribuir para superar as forças de atrito (PAI & HESS, 2002).

Muitos fatores são responsáveis para que o segundo requisito de afrouxamento seja satisfeito. Segundo JUNKER, (1969), o mais efetivo deles é o Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC). Usando a Figura 46 como referência, o cisalhamento é transferido da placa fixada para o fixador através do atrito entre o mesmo e a superfície da cabeça do parafuso, e, possivelmente, devido ao contato entre o elemento de fixação e a superfície do furo do componente apertado, conforme mostrado na Figura 47(a).

Figura 47. Ilustração de um parafuso submetido a uma força transversal externa F_s . (a) Deslizamento da cabeça do parafuso devido a uma força de cisalhamento. (b) Forças nas roscas em um parafuso submetido a uma força de cisalhamento.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

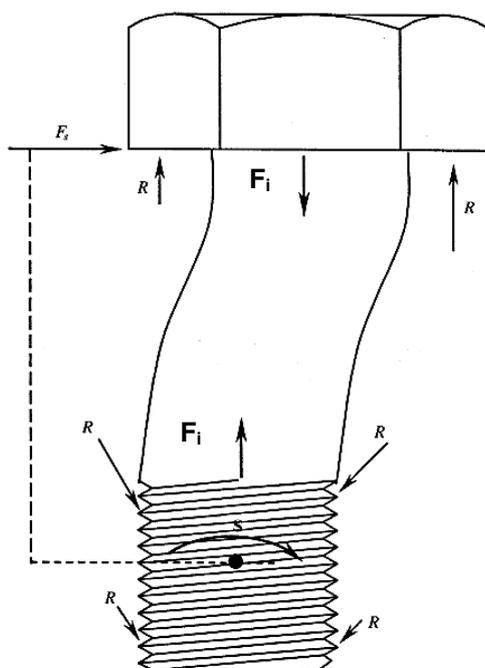
As componentes da força de cisalhamento atuando ao longo da rosca do parafuso ($S_{n,n=1,\dots,4}$), visualizadas na Figura 47(b), contribuem para o deslizamento. As componentes normais à superfície de rosca ($N_{n,n=1,\dots,4}$), alteram a força normal de

contato entre as roscas internas e externas. As componentes N_1 e N_2 aumentam a força normal de contato, enquanto N_3 e N_4 reduzem qualquer força normal de contato.

Nos casos em que há aumento líquido na força de contato normal devido uma força de cisalhamento, o aumento da força de reação resultante na rosca contribui para o aumento do torque de afrouxamento, devido ao componente circunferencial da reação.

O cisalhamento atuante na cabeça do fixador provoca o surgimento de um momento de flexão, conforme visualizado na Figura 48.

Figura 48. Ilustração da flexão de um parafuso e deslizamento das roscas associado a uma força de cisalhamento F_s .



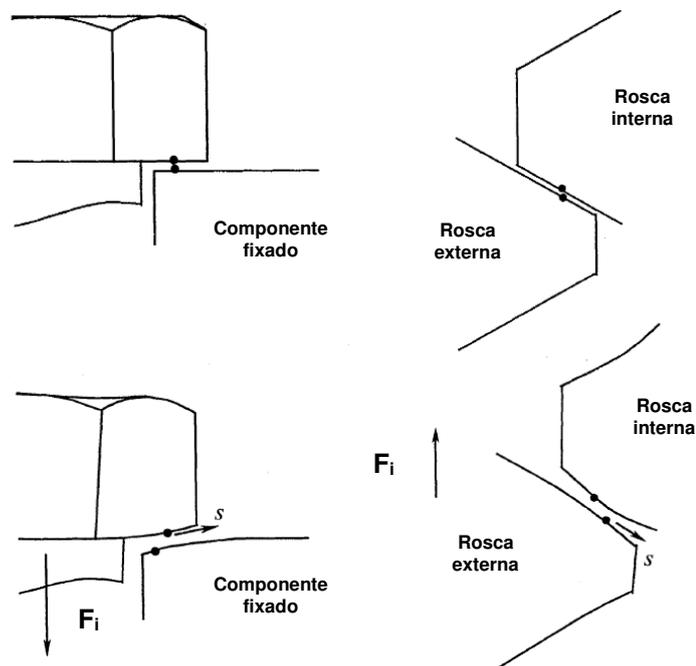
Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

O momento de flexão faz com que as superfícies de rosca girem em torno do eixo de flexão (linha imaginária normal a folha). A rosca desliza devido ao momento de flexão (S). É possível identificar, também, que o momento de flexão causa uma alteração na reação normal (R), tanto na cabeça quanto nas roscas do fixador. Se esse momento for suficientemente elevado, o mesmo pode causar perda de contato de certas regiões da cabeça. Além disso, um aumento nas forças de reação das

rosas podem contribuir substancialmente para aumentar o torque de afrouxamento na direção circunferencial.

O último fator que contribui para a superação da força de atrito é a deformação elástica nas superfícies de contato. Esse fenômeno é ilustrado na Figura 49, que mostra o estado da cabeça do parafuso e da rosca antes e depois da aplicação de uma carga, F .

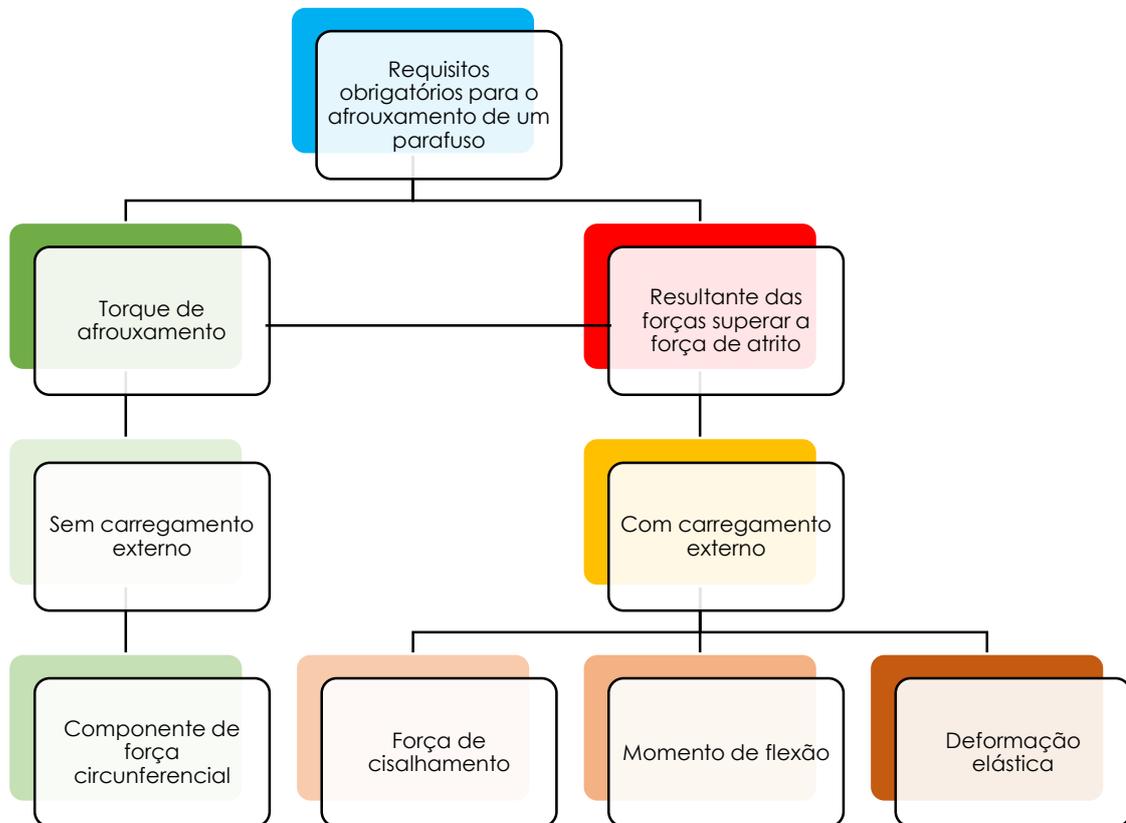
Figura 49. Deslizamento devido a deformação elástica. (a) Cabeça. (b) Roscas do parafuso.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

Como resultado da carga (F), a cabeça do parafuso sofre flexão, e a deformação elástica resultante nas superfícies de contato, existe uma tendência a induzir o deslizamento. Deformação elástica também pode ocorrer na superfície de contato devido a cargas axiais governadas pelo coeficiente de Poisson do material. É importante salientar que qualquer mudança na carga (aumento ou diminuição) altera a deformação elástica dos componentes, contribuindo, assim, para o deslizamento. Sob condições de cisalhamento, as cargas nas regiões de contato sofrem alterações devido à carga cisalhante (Figura 47) e ao momento de flexão (Figura 48). Dessa forma, pode-se resumir os fatores que contribuem para o afrouxamento de acordo com o esquema da Figura 50.

Figura 50. Sumário dos requisitos obrigatórios para ocorrência do afrouxamento de parafusos.



Fonte: Autoria própria.

4.2.7.3. Mecanismos de Afrouxamento por CTC

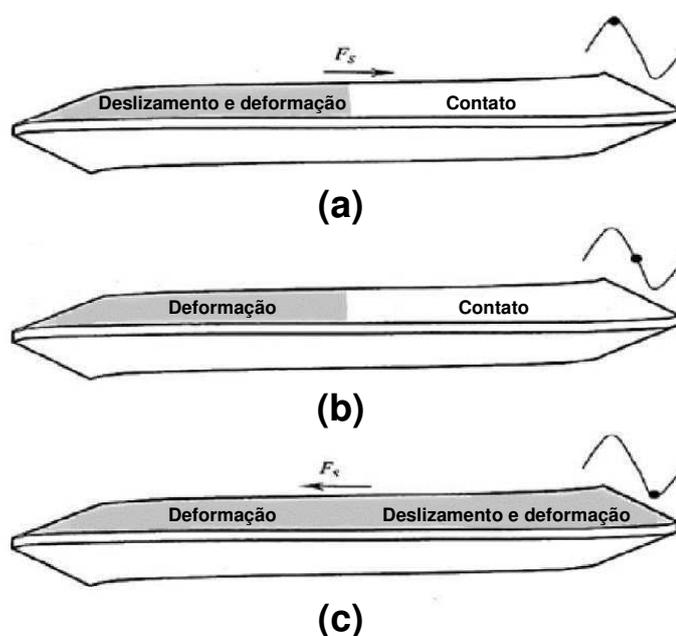
A seção anterior enfatizou as causas de deslizamento devido a uma força de cisalhamento. Conforme demonstrado, essa força altera a distribuição da força de reação, conforme ilustrado nas Figuras 47(b) e 48. Uma vez que a força de atrito é função da força normal, pode-se afirmar que a força de atrito nas regiões de contato é diretamente influenciada pelas mudanças da força de reação.

Além disso, uma vez que as diferentes causas de deslizamento foram descritas principalmente em função da força de cisalhamento aplicada, a força de deslizamento é não diretamente relacionada com a força normal. De acordo com PAI & HESS, (2002), como resultado disso, a condição para o deslizamento pode ser satisfeita em determinadas regiões de contato, enquanto em outras não. Esse deslizamento localizado geralmente ocorre em regiões onde a força de reação normal

é relativamente baixa e, conseqüentemente, com baixa resistência ao atrito correspondente.

Usando-se a junta da Figura 43 como exemplo, o parafuso mostrado sofrerá um afrouxamento significativo apenas se as regiões de contato da cabeça e da rosca forem submetidas a um deslizamento no sentido de afrouxamento. Quando essa junta é submetida a um cisalhamento transversal cíclico (CTC), haverá deslizamento localizado ocorrendo nas superfícies de contato, que pode se acumular ao longo dos ciclos de carga e causar afrouxamento por deslizamento (JUNKER, 1969). Esse processo é qualitativamente ilustrado na Figura 51, que mostra um filete de rosca em três momentos diferentes durante o CTC.

Figura 51. Acúmulo de deslizamento localizado durante um ciclo de CTC.



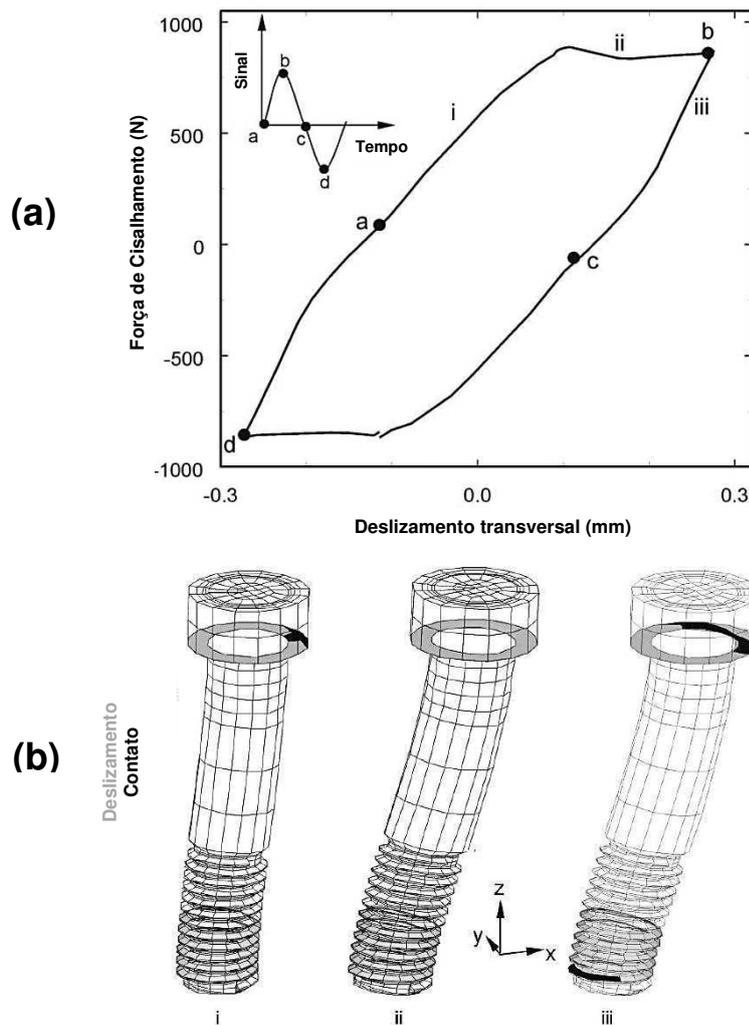
Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

No momento em que a carga de cisalhamento (F_s) atua na direita, a região esquerda da rosca sofre deslizamento devido às várias causas discutidas anteriormente. Uma vez que o deslizamento é localizado, as roscas sofrem deformação elástica local, a qual inclui um componente na direção circunferencial devido ao torque de afrouxamento. À medida que a carga de cisalhamento é reduzida, parte da deformação é retida como energia de deformação por atrito (Figura 51b). Quando a direção da força de cisalhamento muda de sentido (Figura 51c), o lado

direito da rosca passa a sofrer deslizamento; conseqüentemente, há deslizamento ao longo de todo o filete de contato, durante um ciclo de carga, que é armazenado como deformação (Figura 51c). O resultado desse processo é uma tensão de torção sobre toda a superfície da rosca.

O processo de deslizamento localizado pode ser inicialmente restrito a poucos filetes de rosca, e, subseqüentemente, progredir para todos os demais. O torque de afrouxamento devido à torção nas roscas atua sobre a cabeça do parafuso, e faz com que a cabeça do mesmo para gire graças ao mesmo processo de deslizamento localizado. O afrouxamento de um parafuso causado por deslizamento completo da cabeça e da rosca pode ser visto na Figura 52.

Figura 52. Exemplo do processo de afrouxamento de um parafuso caracterizado por deslizamento completo da cabeça e da rosca. (a) Curva de histerese. (b) Regiões de contato.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2001).

A curva de histerese mostrada na Figura 52, indica as regiões com três inclinações distintas. A região *i* é referente ao carregamento, onde ocorre o deslizamento completo da rosca e deslizamento localizado da cabeça (Figura 52b-i). Na região *ii*, há o deslizamento completo da cabeça e da rosca, como mostrado na Figura 52(b-ii). A fase inicial do ciclo de descarregamento é vista como tendo uma inclinação maior do que o carregamento, devido aos pontos de contato (destacados em preto) localizados na cabeça e na rosca (Figura 52b-iii). Essas curvas foram obtidas por PAI & HESS, (2001), que usaram um modelo baseado nos métodos de elementos finitos (MEF) para estudar afrouxamento de parafusos, causado por deslizamento localizado ou completo da cabeça e da rosca do fixador.

4.2.7.4. Modelo Analítico

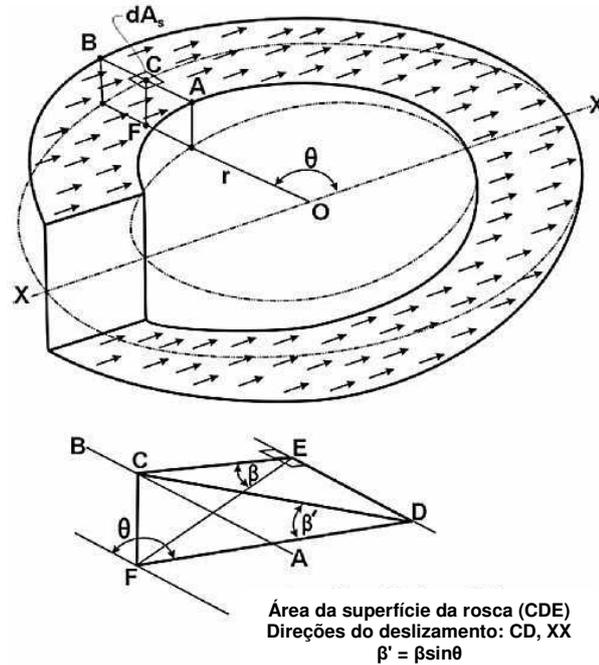
A fim de se estabelecer um modelo analítico do processo de afrouxamento, as forças de resistência ao afrouxamento, assim como aquelas que promovem o mesmo, devem ser estabelecidas. A relação entre torque aplicado a uma porca e a pré-carga gerada pelo parafuso, já foi previamente estabelecida na Equação (9).

$$T_i = T = F_i \left[\frac{p}{2\pi} + \frac{d}{2} \frac{\mu_t}{\cos \alpha} + \frac{d_c}{2} \mu_n \right] \quad (9)$$

O primeiro termo entre colchetes da equação acima é o torque para tracionar o parafuso. Esse torque atua na direção do afrouxamento e sua magnitude independe do atrito. O segundo e terceiro termos entre colchetes representam o torque necessário para superar o atrito da rosca e da interface da porca-junta, respectivamente. Quando ocorre deslocamento transversal da junta, a porca desliza sobre a junta e, conseqüentemente, o processo de deslizamento simultâneo entre porca e parafuso começa a ocorrer. Sob tais condições, a resistência à rotação é significativamente reduzida (ECCLES et al, 2009).

Nesse contexto, um trabalho desenvolvido por SAKAI, (1978), mostrou o deslizamento linear que acontece numa rosca quadrada, conforme ilustração na Figura 53.

Figura 53. Deslizamento linear numa rosca quadrada.



Fonte: Adaptado de SAKAI, (1978).

O atrito atua na área dA_s da superfície da rosca e as diferenças entre as forças resultantes, quando ocorre deslizamento, resultam num torque de afrouxamento (T_{ss}). Esse torque foi demonstrado por SAKAI, (1978) como sendo:

$$T_{ss} = F_i \frac{p}{4\pi} \quad (11)$$

Da Equação (9), considerando a direção de afrouxamento e adicionando o torque adicional (T_p) oriundo de porcas auto-travantes, por exemplo, que também resistem ao afrouxamento, ter-se-á o torque necessário para folgar a porca (T_L):

$$T_L = F_i \left[-\frac{p}{2\pi} + \frac{d}{2} \frac{\mu_t}{\cos \alpha} + \frac{d_c}{2} \mu_n \right] + T_p \quad (12)$$

A equação acima é usada em situações estáticas. Em virtude do termo negativo, o torque de folga é geralmente de 15 a 20 % menor do que o torque de aperto. Quando há a presença de deslocamento transversal na junta, o torque agindo na direção de afrouxamento será o torque dado na Equação (11) combinado com o

primeiro termo da Equação (12). Logo, o torque total agindo na direção de afrouxamento (T_{TL}) em condições de CTC será:

$$T_{TL} = F_i \frac{p}{4\pi} + F_i \frac{p}{2\pi} = F_i \frac{3p}{4\pi} \quad (13)$$

Para diferenciar os coeficientes de atrito nas roscas e na cabeça do parafuso sob condições estáticas dos valores dos coeficientes sob deslizamento transversal, os termos μ_{ts} e μ_{ns} serão usados para os coeficientes de atrito nas roscas e na face da porca, respectivamente, na direção rotacional. Da mesma forma, T_{ps} será usado para denotar o torque de prevenção sob condições de CTC. O torque T_R que resiste ao afrouxamento sob condições de CTC será dado por:

$$T_R = F_i \left[\frac{d}{2} \frac{\mu_{ts}}{\cos \alpha} + \frac{d_c}{2} \mu_{ns} \right] + T_{ps} \quad (14)$$

Para que a rotação da porca ocorra na direção do afrouxamento, o torque agindo na direção de afrouxamento (T_{TL}) deve ser maior do que o torque de resistência (T_R). Portanto, a condição para que o afrouxamento ocorra, será:

$$T_{TL} > T_R \quad (15)$$

$$F_i \frac{3p}{4\pi} > F_i \left[\frac{d}{2} \frac{\mu_{ts}}{\cos \alpha} + \frac{d_c}{2} \mu_{ns} \right] + T_{ps} \quad (16)$$

Segundo SAKAI, (1978), os coeficientes de atrito μ_{ts} e μ_{ns} são próximos de zero sob condições de CTC e, assim, a Equação (16) se transformará em:

$$F_i \frac{3p}{4\pi} > T_{ps} \quad (17)$$

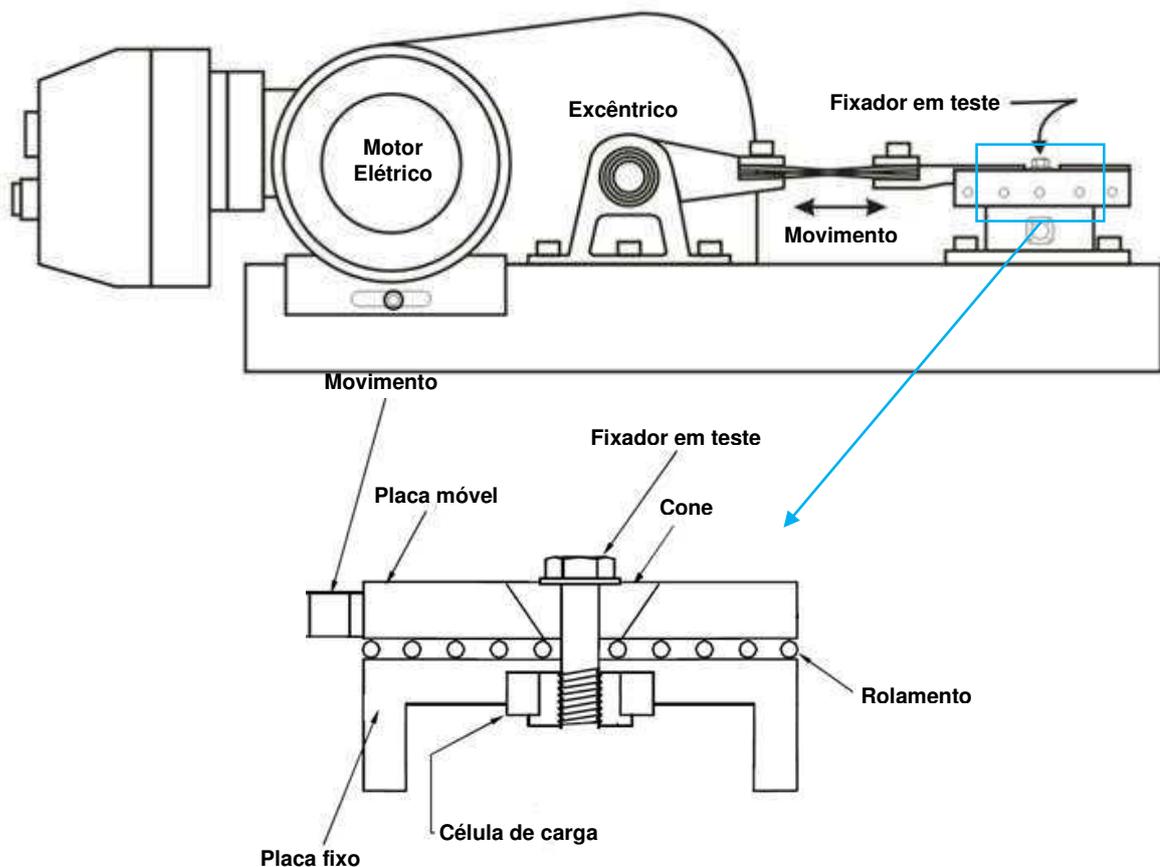
Sendo assim, a Equação (17) denota a condição para que haja afrouxamento espontâneo, em condições de CTC, de um fixador montado com uma porca auto-travante.

4.2.7.5. Ensaio de CTC

O desempenho de diferentes tipos de métodos de fixação pode ser avaliado através dos testes de CTC propostos pela norma NASM1312-7 (NATIONAL AEROSPACE STANDARD, 1997) ou pela norma DIN 65151 (DEUTSCHE NORM, 1994).

O ensaio proposto pela norma NASM1312-7 submete o fixador a cargas de impacto que não representam a realidade das cargas destes componentes em condições de trabalho. Além disso, não há como medir o valor da pré-carga ou de qualquer outra variável durante esses ensaios. Dessa forma, o resultado deste ensaio atesta apenas se o componente em teste folga ou quebra depois de um determinado número de ciclos. O teste da norma DIN 65151 utiliza uma máquina de testes proposta por JUNKER, (1969), ilustrada na Figura 54.

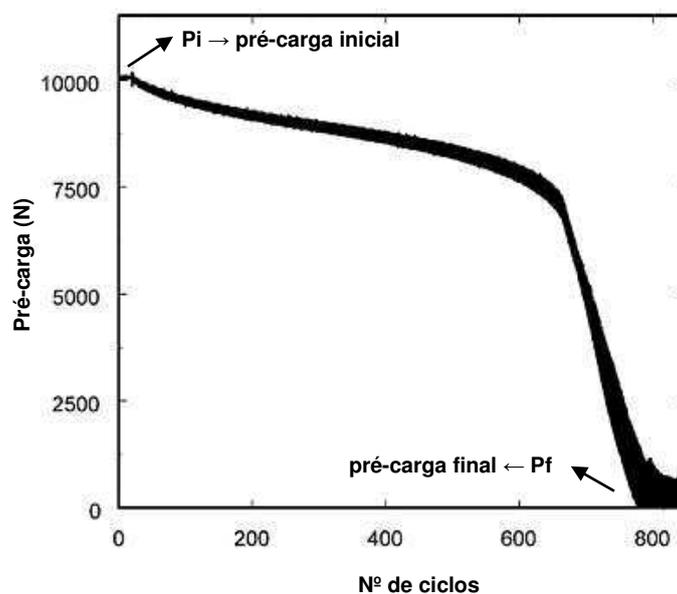
Figura 54. Máquina de ensaios proposta por JUNKER, (1969).



Fonte: Adaptado de ECCLES, (2010).

Nessa máquina, o movimento transversal é gerado por um excêntrico conectado a um motor elétrico. Esse movimento é transmitido ao fixador em teste através de uma placa móvel que desliza sob uma placa fixa. Uma célula de carga acompanha a pré-carga do parafuso durante os ensaios de CTC. A força transversal aplicada ao conjunto também é medida. As variáveis de entrada para esse ensaio são pré-carga inicial, frequência de excitação e deslocamento transversal. Os resultados deste teste são geralmente apresentados na forma de gráficos de pré-carga em função do número de ciclos, após um determinado número de ciclos, conforme mostrado na Figura 55.

Figura 55. Comportamento típico de um parafuso sob CTC.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2001).

A eficiência de um ensaio de CTC está diretamente associada à perda de pré-carga inicial (P_i). Dessa forma, de acordo com a norma DIN 65151, um fixador ideal seria aquele cujo valor de pré-carga inicial fosse mantido constante durante a realização dos ciclos de cisalhamento. A designação da qualificação dos fixadores quanto ao nível de pré-carga final (P_f) dos ensaios de CTC é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6. Designação qualitativa do nível de travamento para fixadores submetidos a ensaios de CTC de acordo com a norma DIN 65151.

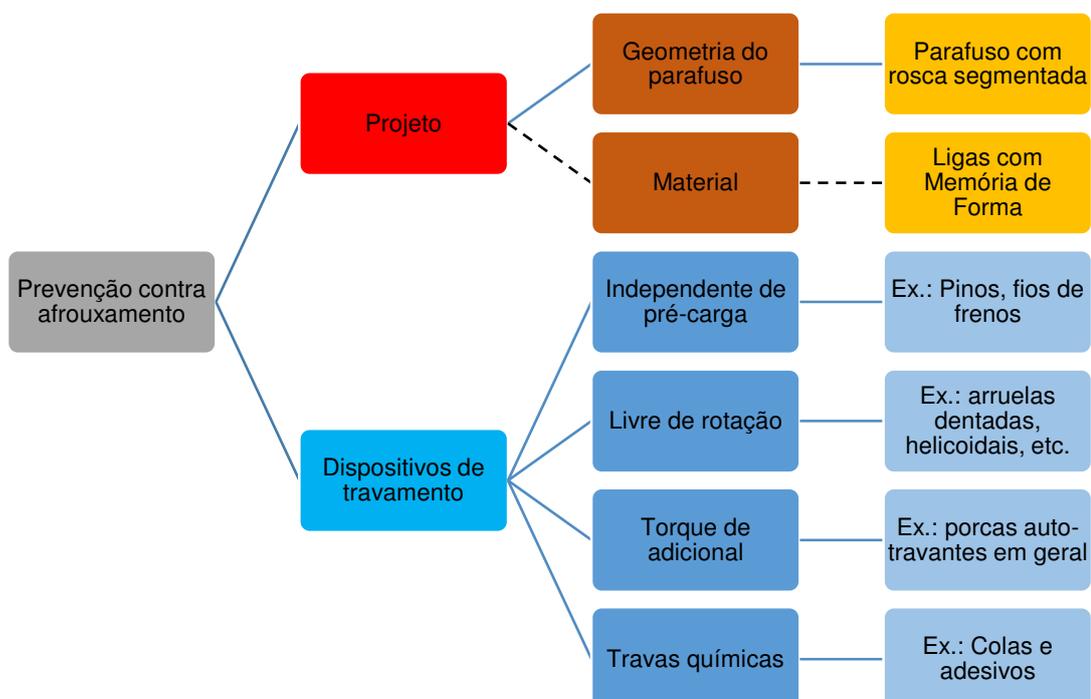
% Pré-carga final (em relação à inicial)	100 – 85 %	100 – 40 %	0 %
Designação	Excelente nível de travamento	Nível de travamento aceitável	Perda total da capacidade de travamento

Fonte: Adaptado de DEUTSCHE NORM, (1994) - DIN 65151.

4.2.7.6. Tipos e classificação dos Métodos de Prevenção contra Afrouxamento

De maneira geral, os métodos de travamento de prevenção contra a perda de pré-carga devido ao afrouxamento cíclico são mostrados na Figura 56.

Figura 56. Classificação dos métodos de prevenção contra afrouxamento de parafusos.

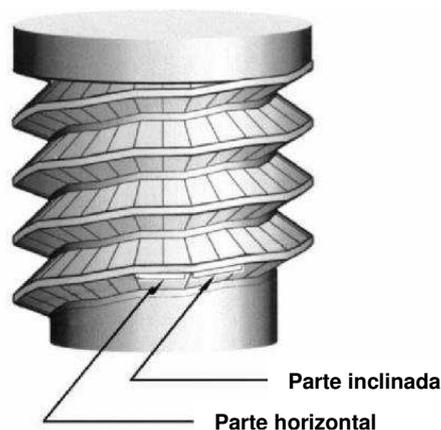


Fonte: Autoria própria.

Os métodos de prevenção com uso de dispositivos de travamento são mundialmente conhecidos e vários deles estão disponíveis no mercado. Todavia, segundo estudos desenvolvidos por ECCLES, (2010), alguns desses métodos podem ser superados em determinadas condições de CTC.

Em relação a modificação da geometria do parafuso, de maneira a evitar o afrouxamento, SASE & NISHIOKA, (1998) e SASE & FUJII, (2001) completaram uma série de estudos em parafusos de roscas modificadas, chamados de *Step Lock*, mostrado na Figura 57.

Figura 57. Parafuso Step Lock projetado para resistir ao afrouxamento.



Fonte: Adaptado de SASE & FUJII, (2001).

A rosca desse parafuso foi projetada para ter degraus que resistam ao afrouxamento. A base do conceito desse parafuso é que qualquer torção, que por ventura induza afrouxamento espontâneo, será suprimida, uma vez que a força de aperto será suportada pelas partes inclinadas das roscas.

No contexto de utilização de materiais especiais, como por exemplo as LMF, para melhorar a performance do parafuso em relação ao afrouxamento espontâneo, há apenas um registro de trabalho encontrado na literatura. ZHANG et al, (2000) estudaram a eficácia da utilização de LMF para melhorar a resistência ao afrouxamento de porcas sextavadas. A LMF usada no referido trabalho foi a NiTi. Nesse caso, foram realizados testes de acordo com a NASM1312-7, e os resultados demonstraram que a porca de LMF não apresentou qualquer indicação de

afrouxamento. Isso indica que ainda existem muitas possibilidades de utilização de LMF nesse campo.

4.3. Planejamento de Experimentos

4.3.1. Introdução

De acordo com CALADO & MONTGOMERY, (2003), o Planejamento Experimental (PE) é uma técnica estatística que vem sendo utilizada em larga escala ultimamente. Através dela, é possível determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, apresentando como resultado:

- Redução da variação do processo e melhor concordância entre os valores nominais;
- Redução do tempo do processo;
- Redução do custo operacional;
- Melhoria no rendimento do processo;

Algumas aplicações típicas de PE são:

- Avaliação e comparação de configurações básicas de projetos;
- Avaliação de diferentes materiais;
- Seleção de parâmetros de projeto;
- Determinação de parâmetros de projeto que melhorem o desempenho de produtos;
- Otimização do tempo de fabricação, desempenho e confiabilidade de produtos e/ou processos.

4.3.2. Planejamento Fatorial 2^k

Planejamento fatorial é uma técnica bastante utilizada quando se tem duas ou mais variáveis independentes. Através dela, é possível obter uma combinação de

todas as variáveis em todos os níveis obtendo-se, assim, uma análise de uma variável, sujeita a todas as combinações das demais (CALADO & MONTGOMERY, 2003).

A representação de um planejamento fatorial em dois níveis é 2^k , onde 2 é o número de níveis e k é o número de variáveis. Além dos 2^k ensaios realizados, é interessante e recomendado realizar ensaios no ponto central. Os pontos centrais equivalem à média aritmética dos níveis de cada fator e sua representação é feita com um 0 (zero) na matriz de planejamento. A realização de ensaios neste ponto permite o cálculo de resíduos e de erro padrão, além de evidenciar a qualidade da repetibilidade do fenômeno. O número mínimo recomendado de ensaios no ponto central é de 3 (RODRIGUES & IEMMA, 2009).

O modelo linear estatístico para esse tipo de planejamento é dado por:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \text{Erro} \quad (18)$$

em que Y é a variável de resposta, X_i ($i=1$ e 2) é o efeito de cada variável, e $X_1 X_2$ é o efeito da interação, β_0 é a média global, β_i ($i=1$ e 2) é a metade do efeito de cada variável e β_3 é a metade do efeito da interação.

4.3.3. Análise de Variância (ANOVA)

Análise de variância (ANOVA) é a técnica estatística que permite avaliar informações médias de populações. A análise visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente (MILONE, 2009). Assim, é possível comparar vários grupos diferentes ao mesmo tempo.

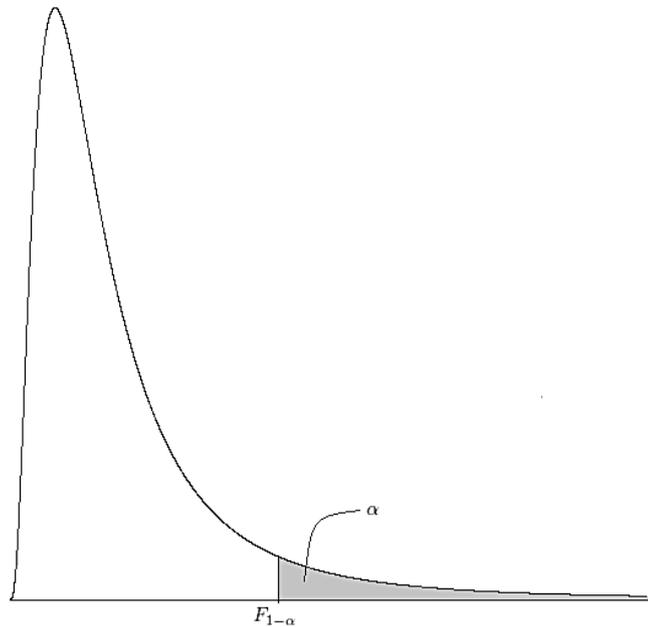
As hipóteses nulas e alternativa da análise a serem testadas na ANOVA são:

- Hipótese nula (H_0): as médias populacionais são iguais;
- Hipótese alternativa (H_1): as médias populacionais são diferentes, ou seja, pelo menos uma das médias é diferente das demais.

O teste de hipótese F é feito com o objetivo de provar que a hipótese nula está errada. Portanto, rejeita-se H_0 se $F_{calculado} > F_{tabelado} (F_{1-\alpha})$, em que α é a significância (geralmente tomada como 5%). A distribuição de F pode ser vista na Figura 58.

Na Tabela 7 são apresentadas as expressões dos coeficientes a serem calculados para a ANOVA.

Figura 58. Distribuição de F.



Fonte: PORTAL ACTION / ANOVA, (2014).

Tabela 7. Coeficientes para ANOVA.

FONTE DE VARIACÃO	Soma dos Quadrados (S.Q)	Graus de Liberdade (G.L)	Quadrado da Média (Q.M)	Teste F
Regressão	$S.Q_R$	$(p-1)$	$Q.M_R/(p-1)$	$Q.M_R/ Q.M_{Res}$
Resíduos	$S.Q_{Res}$	$(n-p)$	$Q.M_{Res}/(n-p)$	1
Total	$S.Q_{Total}$	$(n-1)$	-	-
R^2 (Coeficiente de Correlação)	$R^2 = \left(\frac{S.Q_{TOTAL} - S.Q_{Res}}{S.Q_{TOTAL}} \right) \times 100$		-	-

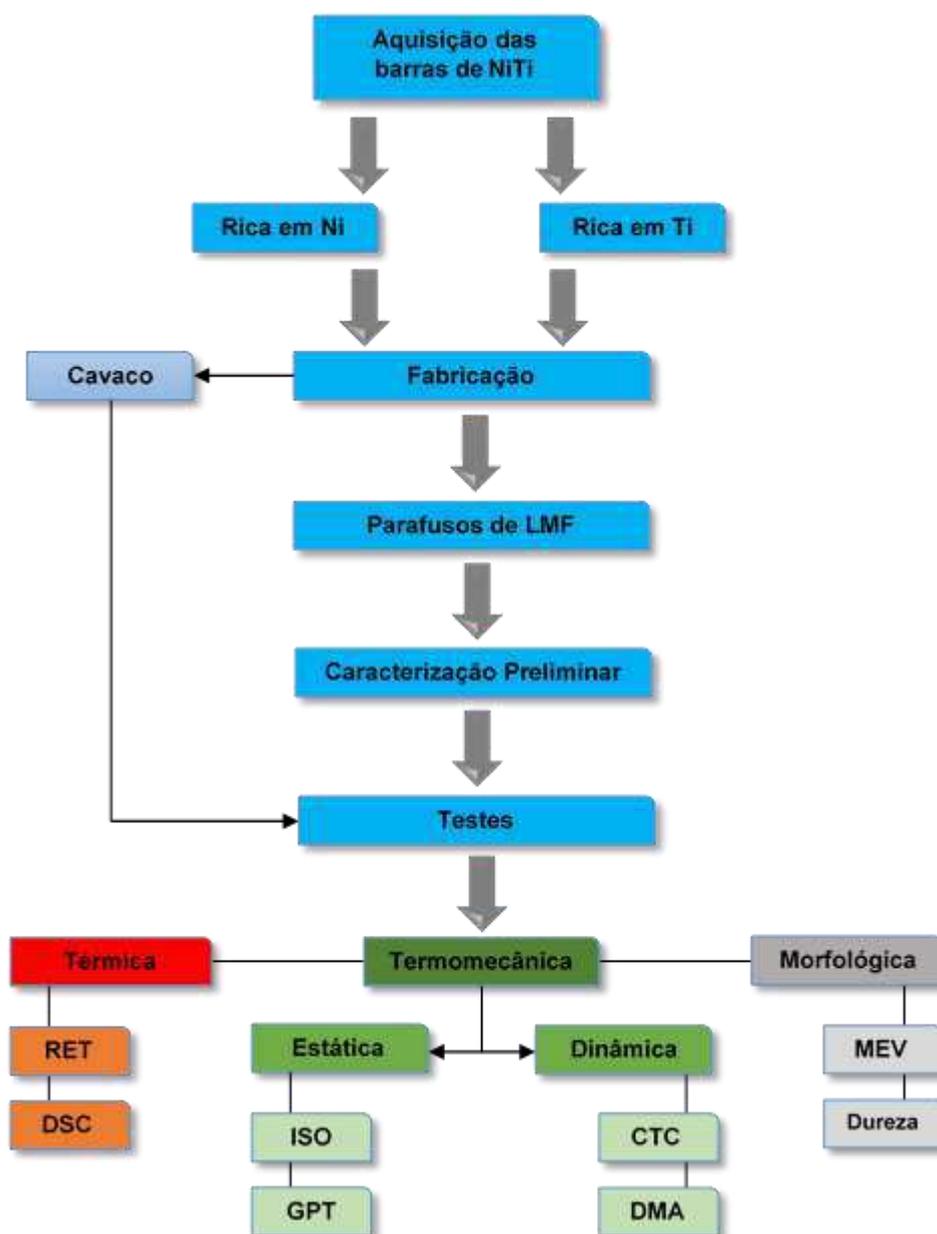
Fonte: RODRIGUES & IEMMA, (2009).

em que p é o número de coeficientes do modelo, n é o número de experimentos e m é número de experimentos únicos.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas nesse trabalho podem ser classificadas em duas etapas: fabricação dos parafusos de LMF e testes dos mesmos. A metodologia utilizada pode ser resumida com o fluxograma da Figura 59.

Figura 59. Fluxograma da metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria.

A etapa de fabricação foi realizada no Centro de Estudos em Fabricação e Comando Numérico (CEFCON), localizado no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Essa etapa ainda teve o apoio do SENAI Niterói, RJ.

A etapa de caracterização e testes dos parafusos foi completamente realizada no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

5.1. Seleção da LMF

Para o projeto e fabricação dos parafusos, foram selecionadas duas LMF distintas de NiTi: uma apresentando temperatura de ativação final (A_f) acima da temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$) e outra apresentando A_f próxima da temperatura ambiente. Dessa forma, foram obtidos dois parafusos de LMF com características completamente diferentes. Assim, selecionou-se uma LMF NiTi mais rica em Ni, de composição 55,91Ni-Ti (% em peso), que apresenta superelasticidade na temperatura ambiente, e uma segunda LMF NiTi mais rica em Ti, de composição 55,16Ni-Ti (% em peso), com características de efeito de memória de forma acima da temperatura ambiente (atuador).

Após a seleção dessas LMF, adquiriu-se comercialmente barras de NiTi (diâmetro de 12,7 mm e comprimento de 500 mm) com as propriedades desejadas. As composições químicas dessas barras podem ser encontradas na Tabela 8.

Tabela 8. Composição química em peso das duas barras de NiTi.

		Ti	Fe	C	O	N	H	Co	Cu	Cr	Nb	Ni
Barra 1	Padrão	Balanço	<0,05	<0,05	<0,05	<0,005	<0,05	<0,01	<0,01	<0,025	55,0 - 55,3	
	Teste	Balanço	0,08	0,045	0,026	0,001	0,001	0,006	0,004	<0,003	55,16	
Barra 2	Padrão	Balanço	<0,05	<0,05	<0,05	<0,005	<0,05	<0,01	<0,01	<0,025	55,7 - 56,0	
	Teste	Balanço	0,012	0,03	0,02	0,002	0,003	0,007	0,006	<0,002	55,91	

Fonte: SUNRISE TITANIUM TECHNOLOGY, (2014).

5.2. Fabricação dos Parafusos de LMF

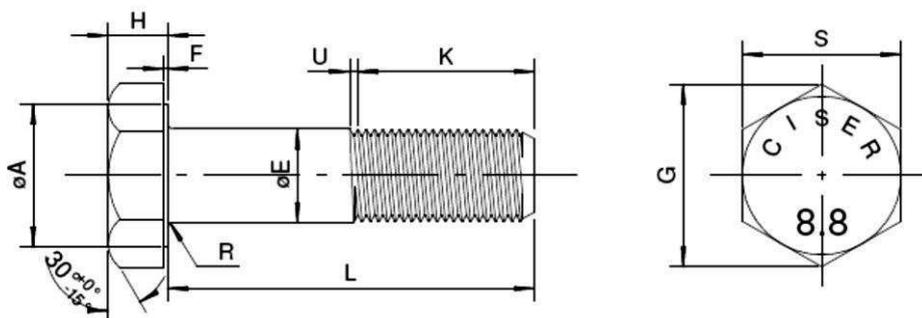
As dimensões dos parafusos fabricados nesse trabalho podem ser visualizadas na Tabela 9. São parafusos M6, cuja representação esquemática com dimensões é mostrada na Figura 60.

Tabela 9. Dimensões dos parafusos de LMF fabricados.

	Diâmetro do corpo mm, (\emptyset)	Diâmetro da cabeça mm, S	Comprimento mm, L	Comprimento roscado mm, L	Passo mm, U
Dimensões	6	10	45	16	1

Fonte: Autoria própria.

Figura 60. Parafuso padrão ISO e suas dimensões.



Fonte: CATÁLOGOS DE PRODUTOS CISER, (2014).

Para fins experimentais e com o objetivo de diminuir etapas de usinagem, os parafusos de LMF foram fabricados com a cabeça em forma cilíndrica. A fabricação desses fixadores envolveu duas etapas distintas: usinagem da cabeça e do corpo cilíndrico em torno mecânico e fresamento das roscas.

5.2.1. Fabricação dos pinos: Etapa 1

A primeira etapa de fabricação consistiu na usinagem das barras de NiTi, com o intuito de obter pinos com as dimensões de diâmetro da cabeça (\emptyset) e diâmetro do corpo (s) já nas dimensões finais do parafuso. Para isso, utilizou um torno mecânico

Nardini 300 III. A barra de NiTi fixada no torno mecânico para a fabricação dos pinos de LMF, pode ser visualizada na Figura 61.

Figura 61. Fabricação de pinos de LMF NiTi através da usinagem de barras em torno mecânico.



Fonte: Autoria própria.

As ferramentas utilizadas nessa etapa de fabricação foram as pastilhas metálicas CoroTurn® 107, fabricadas pela Sandvik. Para cortar Ti e suas ligas, geralmente se utiliza as pastilhas metálicas do grupo S, devido a sua elevada resistência ao calor (SANDVIK, 2014).

As condições de corte utilizadas para as barras de NiTi seguiram à indicação do fabricante. Entretanto, os processos de usinagem utilizando ferramentas com geometria definida, apresentam uma grande dificuldade devido as características da liga NiTi, de alta dureza e elevada resistência mecânica. Estes fatores, em combinação com o alto grau de abrasividade da superfície causado pelo óxido de titânio, determinam um acentuado desgaste das ferramentas de corte. Outro fator determinante na piora da usinabilidade do Nitinol é o coeficiente de expansão térmica muito baixo que dificulta a dissipação do calor gerado durante a usinagem pelo cavaco (STANFORD, 2012). Portanto, tendo em vista o panorama descrito acima, alguns dos parâmetros de corte tiveram que ser ajustados para a usinagem da liga NiTi. Esses parâmetros podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros de corte para barras de NiTi.

Parâmetros	Rotação (Rpm)	Velocidade de avanço (m/min)	Passo (mm)
Valores	1250	0,31	1,0

Fonte: Autoria própria.

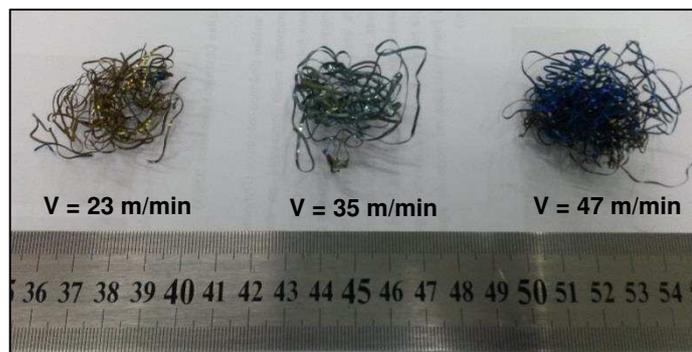
A velocidade de corte (V_c) é calculada a partir da Equação (19).

$$V_c = \frac{\pi D_c n}{1000} \quad (19)$$

para a qual D_c é o diâmetro de corte e n é a velocidade de rotação do torno.

Na etapa de torneamento foram obtidas amostras de cavaco, mostradas na Figura 62, para avaliar a influência da velocidade de corte nas propriedades da LMF em diferentes D_c .

Figura 62. Amostras de cavacos de NiTi retiradas em três (3) diâmetros de corte diferentes.



Fonte: Autoria própria.

Os diâmetros aproximados escolhidos foram: o inicial, o intermediário e o final do parafuso M6. As velocidades de corte, calculadas com os D_c escolhidos, podem ser visualizadas na Tabela 11.

Tabela 11. Diâmetros de corte e suas respectivas velocidades.

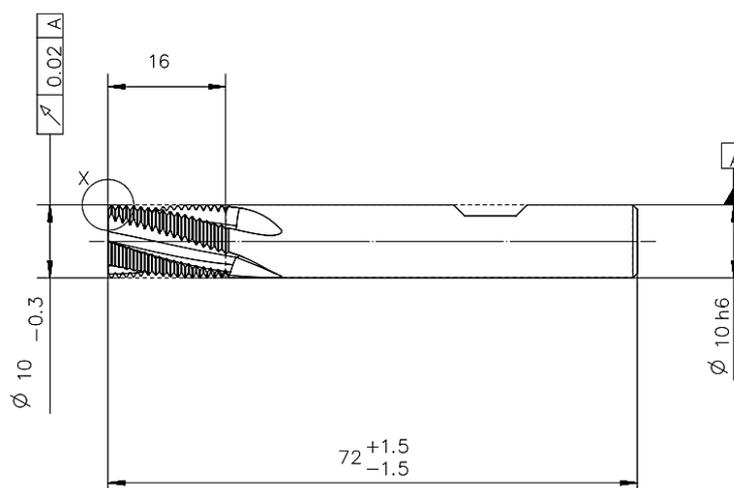
Diâmetro de corte (mm)	12	9	6
Velocidades de corte (m/min)	23	35	47

Fonte: Autoria própria.

5.3. Usinagem das roscas: Etapa 2

A segunda etapa de fabricação dos parafusos de LMF consistiu na usinagem das roscas, através de uma fresadora CNC, nos pinos de LMF obtidos na etapa 1. A ferramenta utilizada para essa usinagem foi a fresa de rosca modelo H5150106-M10X1, mostrada na Figura 63, adquirida do fabricante Walter Tools.

Figura 63. Desenho técnico da fresa H5150106-M10X1 para usinagem das roscas externas dos parafusos de LMF NiTi.



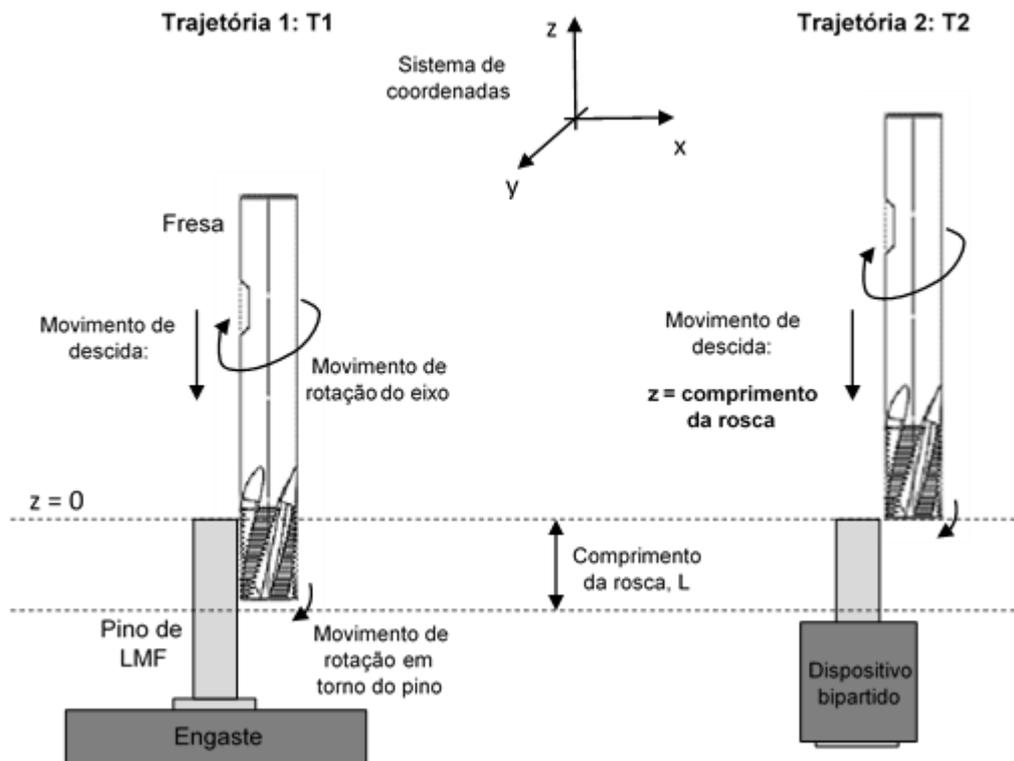
Fonte: WALTER TOOLS, (2014).

Os parâmetros de corte utilizados foram: velocidade de avanço de 40 mm/min e rotação de 1275 rpm.

O comando do centro de usinagem CNC não dispõe de movimento de interpolação helicoidal, necessário para descrever a trajetória da ferramenta, se realizada por uma única função. Como alternativa, utilizou-se uma interpolação linear.

A trajetória da ferramenta em usinagem, independentemente da programação utilizando interpolação helicoidal ou linear, foi realizada de duas formas. A primeira trajetória (nomeada T1) tratava-se de uma aproximação por pontos de uma hélice com apenas um passo, onde todo o corpo da ferramenta usinava, em apenas uma volta, todo o comprimento da rosca. A segunda trajetória (T2) também foi feita por uma aproximação por pontos de uma hélice, porém com 16 passos de 1 mm, descendo no comprimento do pino de LMF NiTi. Os desenhos esquemáticos para as duas trajetórias podem ser visualizados na Figura 64. Os programas concebidos para a realização de T1 e T2 podem ser encontrados no Anexo C.

Figura 64. Desenhos esquemáticos das trajetórias para usinagem das roscas de parafusos de LMF



Fonte: Autoria própria.

As equações para as coordenadas x , y e z são, respectivamente:

$$x = (R_t + R_f) \text{sen}(2\pi p) \quad (20)$$

$$y = (R_t + R_f) \text{cos}(2\pi p) \quad (21)$$

$$z = -p \quad (22)$$

onde R_t é o raio da trajetória, R_f é o raio da ferramenta e p é o passo da rosca.

O primeiro corpo-de-prova de NiTi foi usinado seguindo a trajetória T1 e foi fixado diretamente na placa de três castanhas. Isso gerou uma vibração considerável, devido ao longo comprimento do CP. Associado a isto, a força de flexão provocada pela usinagem segundo a trajetória T1 foi relativamente elevada, o que ocasionou um deslocamento do centro da peça em relação à posição da ferramenta. O resultado disso foi um perfil de rosca cônico.

Como solução para minimizar os inconvenientes descritos, a profundidade de corte foi reduzida. Isto resolveu parcialmente o problema da vibração, porém a fixação ainda originou um perfil de rosca cônico. Para resolver este problema, fabricou-se um dispositivo com um furo de 6 mm e com o comprimento do pino para realizar uma fixação adicional, diminuindo, assim, os efeitos da vibração. Utilizou-se essa mesma peça de fixação na usinagem do terceiro CP, porém esse dispositivo apresentou alguns inconvenientes no momento da retirada do parafuso. Então, o dispositivo de fixação foi bipartido para facilitar a desmontagem do parafuso fabricado. Esse dispositivo de fixação pode ser visualizado na Figura 65.

Figura 65. Dispositivo para a fixação dos pinos de NiTi na fresadora.



Fonte: Autoria própria.

A centralização dos CPs de NiTi foi realizada através de um relógio comparador, para verificar a inclinação, e um apalpador de contato. Para facilitar a

centralização foram feitos furos de centro em todos os pinos. No momento de centralizar os pinos na fresadora utilizou-se a ponteira mostrada na Figura 66(a). Durante todo o fresamento fez-se uso de fluido de corte. O pino de LMF montado na placa de três castanhas pode ser visualizado na Figura 66(b).

O programa usado foi testado com quatro diferentes profundidades radiais de entrada da fresa: 0,69, 0,89, 0,99 e 1,09 (mm). O primeiro CP foi feito com a profundidade de 0,69 mm, o segundo com 0,89 mm, o terceiro com 1,09 mm, e do quarto em diante escolheu-se a profundidade de 0,99 mm, por apresentar um resultado final mais próximo do diâmetro de uma rosca M6, o que garantiu o encaixe do parafuso com a porca.

Figura 66. Usinagem das roscas nos pinos NiTi com 6 mm de diâmetro. (a) Ponteira de centralização dos pinos. (b) Detalhe do pino montado na placa de três castanhas.



Fonte: Autoria própria.

Após as usinagens, foram feitas análises dos perfis de roscas usando um rugosímetro, para aferir os perfis obtidos pelo processo de usinagem.

5.4. Caracterização Térmica

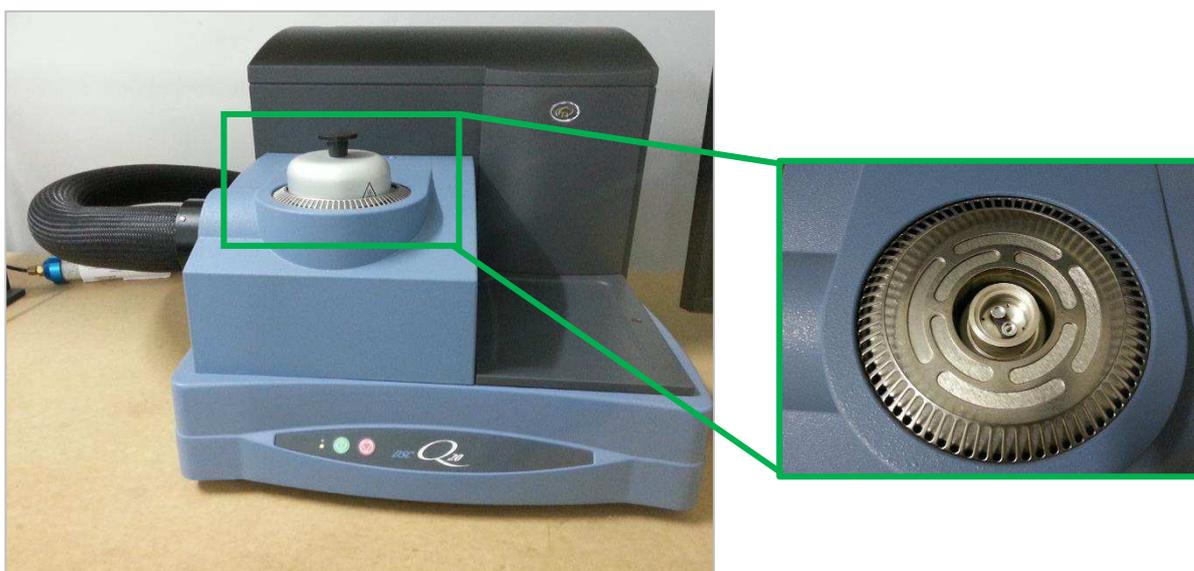
As temperaturas de transformação dos parafusos de LMF NiTi fabricados nesse trabalho foram determinadas por duas técnicas distintas: Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Resistência elétrica em Função da Temperatura (RET).

5.4.1. Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

A técnica de DSC foi realizada utilizando-se um calorímetro modelo Q20 da TA Instruments, mostrado na Figura 67.

Foram realizados ciclos térmicos para as barras de LMF NiTi conforme recebidas, antes e após tratamento térmico. Também foram realizados ensaios em cavacos usinados em diferentes velocidades de corte. A partir do gráfico do fluxo de calor em função da temperatura, mostrado na Figura 12, é possível determinar as energias de transformação, através da integração dos picos de transformação, e a histerese térmica, a partir das diferenças entre as temperaturas de pico.

Figura 67. Calorímetro DSC modelo Q20 da TA Instruments, com detalhe do interior.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram realizados na faixa de temperatura de 120 °C à -70 °C, com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5 °C/min.

5.4.2. Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET)

Os ensaios de RET foram realizados utilizando um banho termo regulável Hubber CC-902, mostrado na Figura 68.

Foram realizados ensaios RET em todos os parafusos de LMF NiTi fabricados, antes e após tratamento térmico. Também foram realizados ensaios em cavacos usinados em diferentes velocidades de corte.

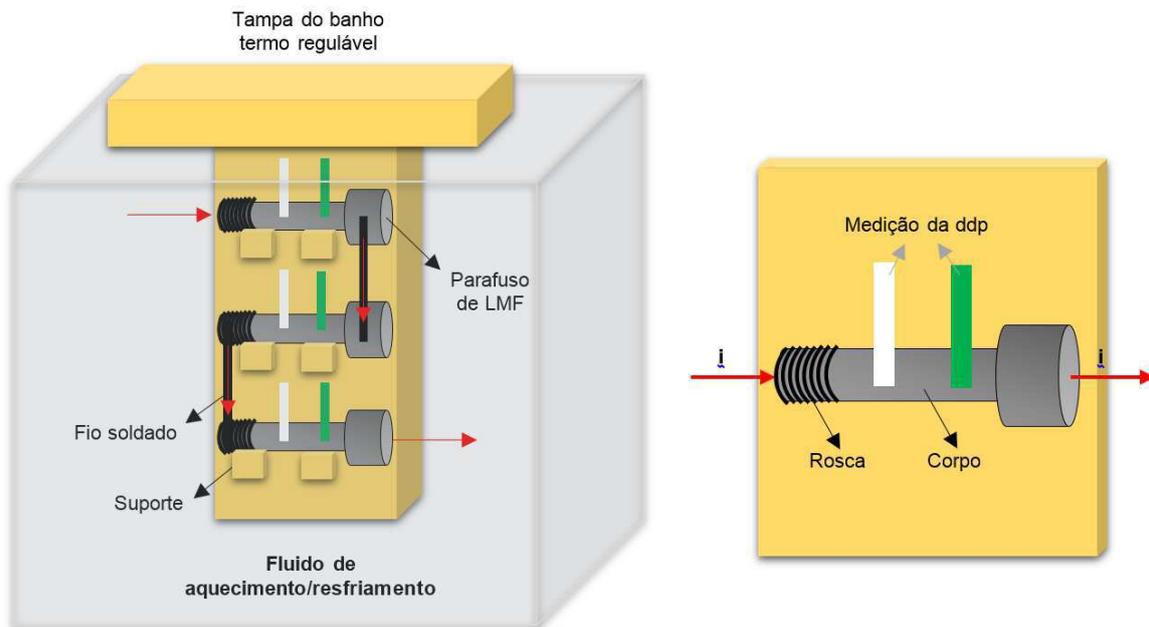
Figura 68. Banho termo regulável Hubber CC902.



Fonte: Autoria própria.

Um desenho esquemático do interior do banho termo regulável pode ser visualizado na Figura 69. Este ensaio consiste em submeter os parafusos e cavacos a ciclos de aquecimento e resfriamento, com a passagem de uma baixa corrente elétrica (i) usando uma fonte de corrente contínua Agilent E3633A. Dessa forma, ocorre uma queda de tensão elétrica (ddp) nos parafusos ou cavacos em função da temperatura, a qual é monitorada por um sistema de aquisição de dados Agilent 34970A. De posse da corrente e da ddp, é possível calcular a resistência elétrica da amostra através da lei de Ohm.

Figura 69. Esquema da montagem dos corpos de prova no interior do banho termo regulável.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios foram realizados na faixa de temperatura de 100 °C à -60 °C, com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5 °C/min. Os corpos de prova foram soldados em série, conforme mostrado no esquema da Figura 73. A corrente utilizada foi de 0,4 A.

5.5. Tratamento Térmico

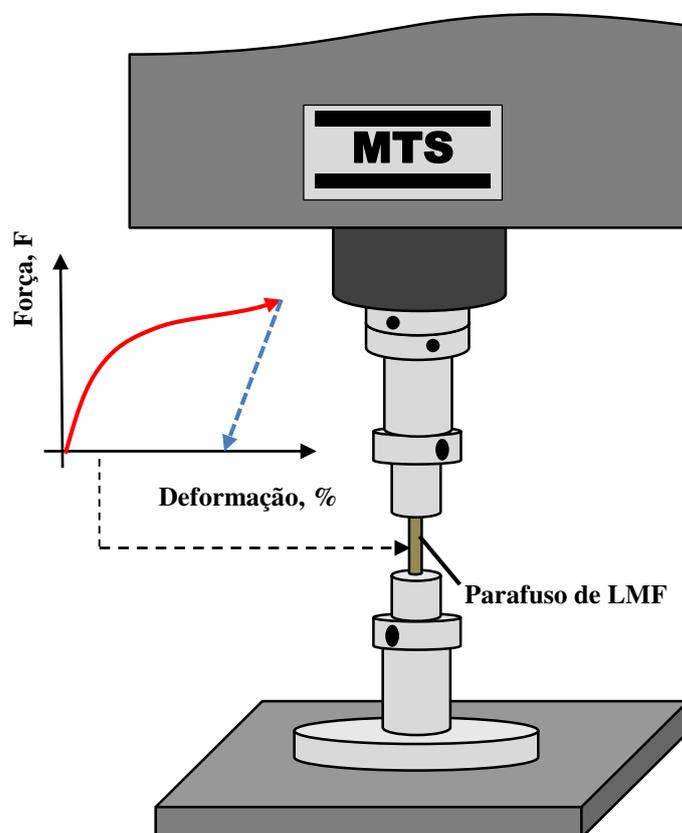
Após a usinagem dos parafusos é possível que sejam originadas tensões residuais de usinagem no material. Essas tensões pode provocar a falha prematura desses fixadores durante os testes mecânicos. Por essa razão, faz-se necessário a realização de um tratamento térmico apenas para alívio de tensões, levando em consideração a conservação das temperaturas de transformação.

Dessa forma, todos os parafusos fabricados foram submetidos a um tratamento térmico de alívio de tensões, a uma temperatura de 350°C durante 30 minutos, com subsequente resfriamento em água a temperatura ambiente (~27°C).

5.6. Caracterização Preliminar

Antes da realização dos ensaios termomecânicos, os parafusos de LMF NiTi foram submetidos inicialmente a uma estabilização mecânica do comportamento. Esta estabilização foi realizada usando a máquina de ensaios servo hidráulica MTS 810. O arranjo esquemático para realização desse experimento pode ser visualizado na Figura 70.

Figura 70. Representação esquemática da montagem do parafuso de LMF NiTi na máquina de ensaios MTS 810.



Fonte: Autoria própria.

Essa estabilização consiste na realização de 50 ciclos de carregamento até uma força de 5 kN (~56 MPa) e descarregamento até 0,1 kN, ambos a uma taxa de 1 kN/min, através do controle de força da máquina. Esse ensaio foi realizado a temperatura ambiente (~27 °C).

Ressalta-se que nesta temperatura a estrutura dos parafusos SE é totalmente austenítica, enquanto que a dos parafusos AT é martensítica. No primeiro caso, os parafusos não acumularão grandes valores de deformação plástica. Em relação aos parafusos AT, haverá um acúmulo de praticamente toda a deformação imposta. No entanto, essa deformação é recuperada através do aquecimento desses parafusos acima da temperatura A_f .

5.7. Caracterização Termomecânica

5.7.1. Caracterização Estática

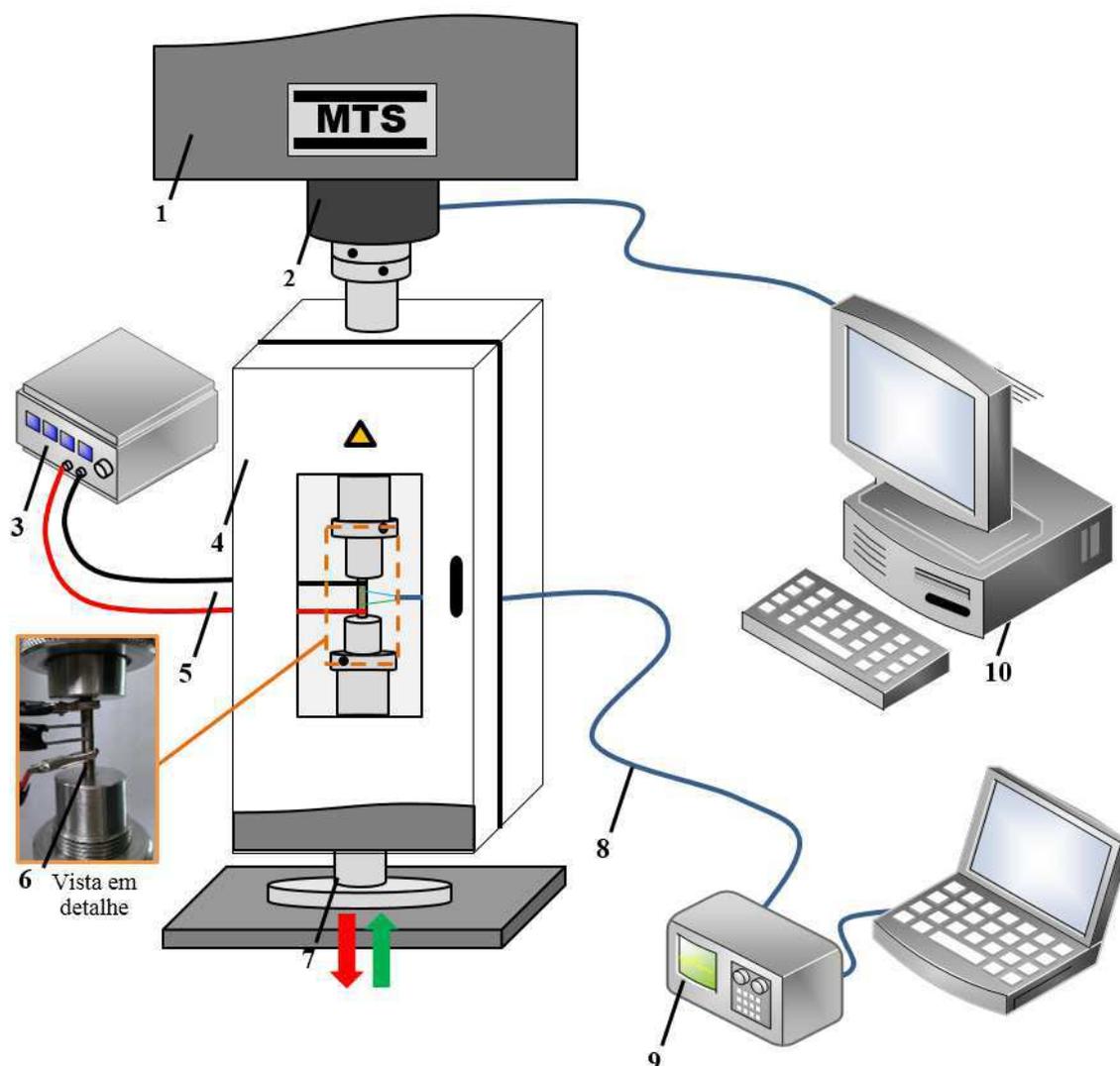
5.7.1.1. Ensaios Mecânicos Isotérmicos (ISO) em Parafusos SE

Para realização dos ensaios ISO nos parafusos SE, utilizou-se uma máquina universal de ensaios MTS 810, equipada com uma câmara de aquecimento controlado. O desenho esquemático para a realização desse ensaio pode ser visualizado na Figura 71.

Durante os ciclos de carregamento/descarregamento a resistência elétrica dos parafusos também foi monitorada, através do arranjo experimental visualizado no item (6) da Figura 71. Para isso, uma fonte de corrente contínua (Item 3) foi usada para manter uma corrente elétrica da ordem de 0,4 A no parafuso SE, ao passo que eletrodos (Item 8) foram usados para medir a queda de tensão através de um sistema de aquisição de dados (Item 9). Após os testes, a resistência elétrica foi calculada e traçada juntamente com os dados de deformação dos parafusos, oriundos da máquina de ensaios (Item 1), com o intuito de se estabelecer uma relação entre essas duas variáveis.

Os ensaios consistiram em deformar, até um determinado nível, o parafuso de LMF no estado SE, ou seja, a temperatura do teste foi superior a temperatura final de ativação do parafuso (A_f). Os ensaios isotérmicos foram realizados a 25 (Ambiente), 35 e 45 °C. Em cada um dos ensaios, os parafusos de LMF (Item 6) foram submetidos a níveis de deformação de 1, 3 e 5 % em relação ao seu comprimento útil, a uma taxa de carregamento/descarregamento de 1%/min.

Figura 71. Arranjo experimental esquemático para ensaios isotérmicos (ISO) com medição simultânea de variação de resistência elétrica.



LEGENDA:

1 – Máquina de ensaios – MTS; 2 – Célula de carga; 3 – Fonte de corrente contínua; 4 – Câmara de aquecimento; 5 – Cabos para passagem de corrente; 6 – Parafuso de LMF; 7 – Pistão móvel; 8 – Fio para medição da ddp; 9 – Sistema de aquisição de dados; 10 – Controle da máquina de ensaios

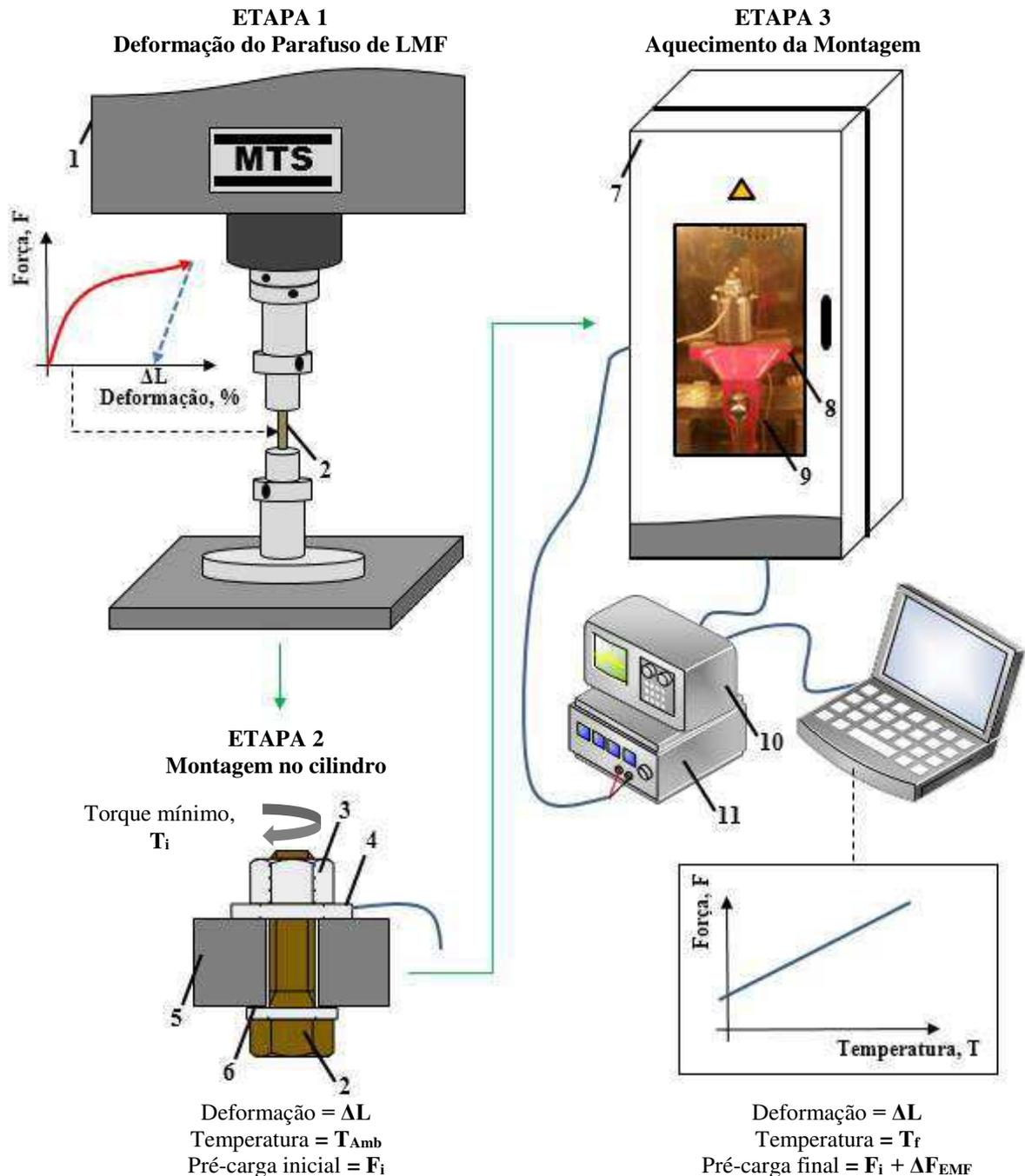
Fonte: Autoria própria.

5.7.1.2. Ensaios de Geração de Pré-carga em Função da Temperatura (GPT) em Parafusos AT

Esses testes foram realizados de acordo com o esquema da Figura 72. Os ensaios consistiram em deformar o parafuso de LMF NiTi (Item 2) no estado

martesítico (AT), ou seja, a temperatura do teste é inferior a temperatura de início de ativação do material (A_s).

Figura 72. Arranjo experimental esquemático para ensaios de GPT em parafusos AT.



LEGENDA:

1 – Máquina de ensaios – MTS; 2 – Parafuso em teste; 3 – Porca; 4 – Sensor de parafuso; 5 – Cilindro de aço inoxidável; 6 – Arruela lisa; 7 – Câmara de aquecimento; 8 – Morsa; 9 – Termopar; 10 – Sistema de aquisição de dados; 11 – Fonte de corrente contínua.

Fonte: Autoria própria.

A etapa 1 do ensaio consistiu em deformar plasticamente (1%/min) o parafuso na máquina de ensaios (Item 1), até um limite ΔL (%), previamente estabelecido. Na etapa 2, o parafuso deformado (Item 2) foi montado num conjunto com um cilindro de aço inoxidável de elevada rigidez (Item 5) ($L = 40$ mm, $D_{externo} = 40$ mm e $d_{interno} = 6,5$ mm), uma arruela lisa de aço (Item 6) ($D_{externo} = 13$ mm e $d_{interno} = 6,5$ mm), uma porca de aço M6x1 (Item 3) e uma célula de carga para parafuso (Item 4), com capacidade de carga de 20 kN ($L = 4,75$ mm, $D_{externo} = 25,4$ mm e $d_{interno} = 6,76$ mm). Após a montagem do conjunto, aplicou-se um torque inicial (T_i) de 11 lb.in (1,24 N.m), com o objetivo de eliminar eventuais folgas entre os componentes. Consequentemente, esse torque inicial gerou uma pré-carga inicial (P_i) que, por sua vez, não foi considerada para contabilizar a pré-carga gerada pela atuação dos parafusos via EMF (ΔF_{EMF}). Isto é, essa pré carga foi subtraída ao final do experimento.

Uma vez montado, o conjunto foi submetido ao procedimento da etapa 3, que consistiu no seu aquecimento através de uma câmara de controle de temperatura (Item 7), a partir da temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$) até uma determinada temperatura (T_f), previamente estabelecida, e monitorada por um termopar tipo K (Item 9) conectado a um sistema de aquisição de dados (Item 10). Esse aquecimento, acima da temperatura A_f , faz com que o parafuso tenda a retornar ao seu comprimento inicial, graças ao EMF. Todavia, uma vez restrito pela montagem, o parafuso não consegue retomar sua forma inicial, gerando assim uma pré-carga adicional (ΔP_{EMF}).

As variáveis de entrada do experimento, que nesse caso foram a deformação percentual do parafuso ($\Delta L\%$) e a temperatura final de aquecimento (T_f), estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12. Variáveis de entrada e níveis para ensaios de geração de pré-carga em função da temperatura (GPT) em parafusos NiTi AT.

Níveis	Deformação, ΔL (%)	Temperatura final, T_f ($^\circ\text{C}$)
+1	5	90
0	3,5	80
-1	2	70

Fonte: Autoria própria.

A temperatura máxima de ensaio (90°C) foi escolhida com base na temperatura máxima informada pelo fabricante da célula de carga de parafuso, que é de 92°C. A temperatura inferior (70°C) foi escolhida por ser superior a temperatura A_r , que para os parafusos AT varia entre 60 e 70°C. O nível de deformação máximo foi escolhido com base na deformação máxima recuperada por LMF de NiTi que, segundo OTSUKA, & WAYMAN, (1998), é de aproximadamente 5 % em tração uniaxial. O nível mínimo de deformação (2 %) foi escolhido para que o parafuso fosse capaz de gerar valores de pré-carga capazes de serem medidos pela célula de carga de parafuso.

A variável de resposta avaliada nesse teste foi a pré-carga gerada por EMF (ΔF_{EMF}). De acordo com uma metodologia de planejamento fatorial (PF), foram realizados 2² ensaios, para o qual a base representa os níveis utilizados para cada variável (+, -) e o expoente representa o número de variáveis de entrada do experimento. O nível zero (0) representa o ponto central das variáveis de entrada, onde foram realizados mais 3 (três) experimentos, totalizando 7 (sete) ao final de todos os ensaios.

5.7.2. Caracterização Dinâmica

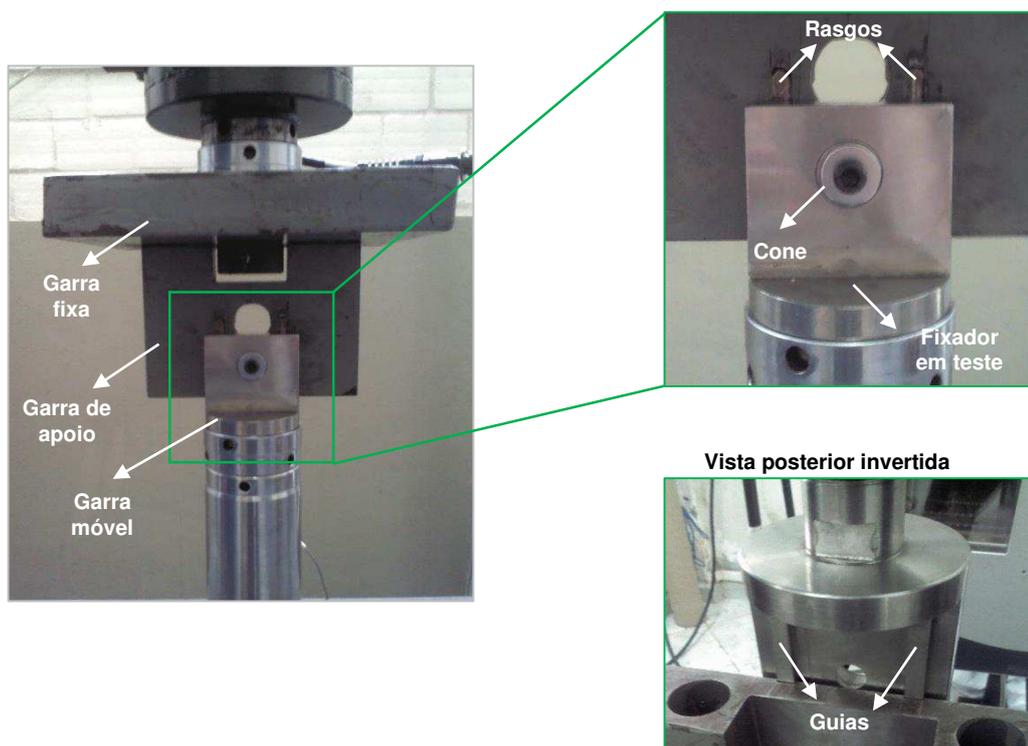
5.7.2.1. Ensaios de Cisalhamento Transversal Cíclico (CTC)

Para realização dos ensaios de CTC utilizou a máquina de ensaios MTS 810 como excitador, a exemplo do motor elétrico da máquina criada por JUNKER, (1969). Para isso, foram projetadas garras de ensaio apropriadas que permitissem a realização de tal ensaio, mostradas na Figura 73. Esse projeto foi realizado com base na norma DIN 65151 e visou reproduzir, ao máximo, as condições propostas pelo criador do ensaio.

Esses ensaios foram realizados de acordo com o arranjo experimental esquematizado na Figura 74. Nesses testes, tanto os parafusos de LMF NiTi quanto parafusos de aço convencional foram avaliados de acordo com a capacidade de suportar cisalhamento transversal cíclico sem reduzir o valor inicial de pré-carga. Para tal, a máquina de ensaios MTS (Item 1) excita a garra móvel (item 8) que desliza sob

as guias (Item 5) da garra de apoio (Item 3). Assim, o fixador a ser testado foi montado nas garras da máquina, juntamente com uma arruela lisa de aço (Item 4), uma célula de carga de parafuso (Item 6) e uma porca de aço M6x1 (Item 4), de acordo com a vista lateral esquemática da Figura 74. Então, aplicou-se um torque capaz de gerar um determinado valor de pré-carga inicial (P_i), através de um torquímetro digital.

Figura 73. Garras projetadas para realização de ensaios de CTC em máquina de ensaios MTS.

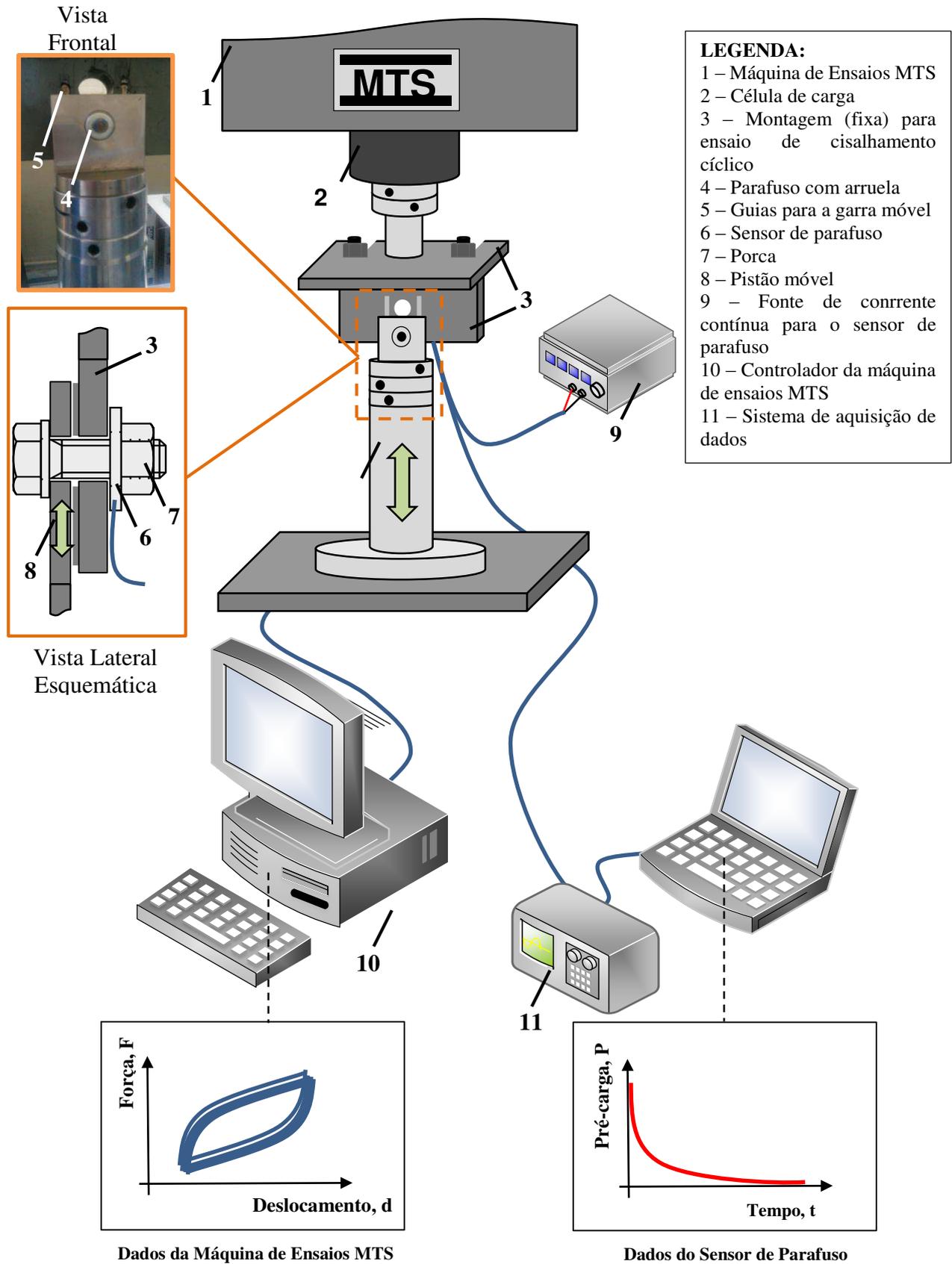


Fonte: Autoria própria.

Na sequência, a máquina de ensaios foi acionada de maneira a provocar o deslizamento da garra móvel sob a garra de apoio, de acordo com uma função senoidal, alimentada com determinados valores de amplitude (A) e frequência (f).

Os parafusos a serem submetidos a esse teste possuem propriedades mecânicas diferentes. Sendo assim, não é possível utilizar o mesmo valor de P_i para todos os fixadores. Então, definiu-se o valor máximo de P_i como sendo o valor de pré-carga capaz de gerar a tensão limite de elasticidade (S_y) no material do parafuso. Esse critério foi utilizado para preservar os parafusos, pois alguns deles seriam reutilizados em outros ensaios. Dessa forma, foram realizados ensaios de tração nos parafusos para determinar os valores de S_y e, conseqüentemente, os valores máximos de P_i .

Figura 74. Esquema representativo dos ensaios de CTC em máquina de ensaios MTS.



Fonte: Autoria própria.

Com base nos critérios estabelecidos, os resultado para os valores máximos de P_i podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13. Valores de P_i determinados com base na tensão limite de elasticidade dos parafusos.

Materiais dos Parafusos	Valor máximo de P_i (kN)
Aço	15
NiTi Superelástico	6
NiTi Martensítico	4,5

Fonte: Autoria própria.

A norma DIN 65151 estabelece que dispositivos de fixação devem ser ensaiados sob um deslocamento transversal de 0,8 mm, a uma frequência de 12,5 Hz e submetidos a uma P_i de 20, 40 e 100 % da pré-carga máxima estabelecida. O valor de deslocamento transversal estabelecido pela norma foi tomado como máximo. Já o valor de frequência de 12,5 Hz foi tomado como ponto central, uma vez que foram encontrados registros na literatura de ensaios de CTC realizados a uma frequência de 15 Hz (CHEATHAM et al, 2009). Com relação à P_i , para realizar um PF com pontos centrais, utilizou-se P_i centrais equivalentes a 60 % do valor máximo de P_i .

As variáveis de entrada do experimento, que nesse caso foram a pré-carga inicial (P_i) e a amplitude do movimento (A), bem como seus respectivos níveis estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Variáveis de entrada e seus respectivos níveis para ensaios de CTC em três tipos distintos de parafusos: atuador (AT), superelástico (SE) e de aço.

Níveis	Pré-carga inicial, P_i (kN)			Amplitude, A (mm)	Frequência, f (Hz)
	Parafuso AT	Parafuso SE	Parafuso de aço		
+1	4,5	6,0	15	0,8	10,0
0	2,7	3,6	9	0,5	12,5
-1	0,9	1,2	3	0,2	15,0

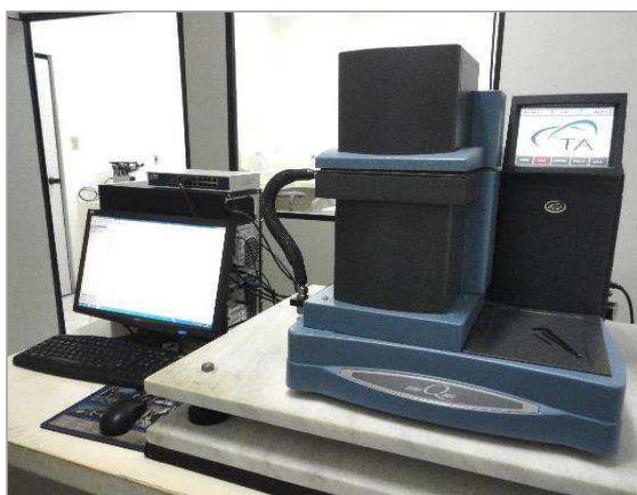
Fonte: Autoria própria.

A variável de resposta avaliada nesse teste foi a pré-carga final (P_f), após realizados 2500 ciclos de cisalhamento. O PF utilizado para caso foi um 2^3 ensaios com mais 3 (três) no ponto central, totalizando onze (11) ao final de todos os experimentos. Vale salientar que a base representa os níveis utilizados para cada variável (+, -) e o expoente representa o número de variáveis de entrada do experimento.

5.7.2.2. Ensaios Dinâmico-mecânicos (DMA)

Para caracterização mecânica dos cavacos originados da usinagem das barras de LMF NiTi, realizou-se ensaios de força - deflexão utilizando um analisador dinâmico-mecânico (DMA), cuja função essencial é analisar propriedades viscoelásticas com a variação da temperatura por meio de ensaios dinâmicos. No entanto, os ensaios realizados foram de caráter estático e isotérmico. O equipamento utilizado foi o Q800 da marca TA Instruments (Figura 75).

Figura 75. Analisador Dinâmico Mecânico (DMA) Q800 da TA Instruments utilizado como mini máquina de ensaios termomecânicos.



Fonte: Autoria própria.

A escolha da utilização do DMA para a medição de propriedades termomecânicas dos cavacos deveu-se à sua alta precisão e a disponibilidade de garras mecânicas miniaturizadas para fixar as amostras. Além disso, o equipamento

permite efetuar o controle da temperatura no ambiente de ensaio com precisão, através de um forno resistivo.

Os ensaios realizados nos cavacos se assemelham à caracterização preliminar realizada nos parafusos, ou seja, consistiu na realização de ciclos termomecânicos até que o comportamento da amostra se estabilize. Foram realizados 25 ciclos de carregamento/descarregamento, entre 0,1 e 15 N (carga máxima do equipamento), a uma taxa de 5 N/min, a uma temperatura constante de 80°C (superior a A_f dos cavacos).

Para essa análise, retirou-se amostras de cavaco em três diâmetros de corte diferentes, conforme já mostrado na Figura 62. O objetivo desses testes foi avaliar a influência da velocidade de corte no módulo de elasticidade da LMF.

5.7.3. Caracterização Morfológica

5.7.3.1. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com intuito de investigar as superfícies de fratura dos parafusos de LMF nos testes mecânicos e os danos causados pelos testes de CTC realizou-se uma caracterização morfológica utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Figura 76. Microscópio eletrônico de varredura, Shimadzu SSX-550.



Fonte: Autoria própria.

Essa caracterização foi realizada no Laboratório de Caracterização pertencente ao Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG. O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura, Shimadzu SSX-550 com resolução de 30 nm, mostrado na Figura 76.

5.7.3.2. Microdureza Vickers

Os ensaios de microdureza foram realizados nos cavacos obtidos em diferentes diâmetros de corte, mostrados na Figura 62, com o intuito de avaliar os efeitos da velocidade de corte sobre a microdureza da LMF estudada. O microdurômetro utilizado foi o Future-Tech, modelo FM-700, mostrado na Figura 77.

Os testes foram executados à temperatura ambiente sob as condições de carga de 100 gf e tempo de penetração de 15 segundos. Cada amostra sofreu 5 indentações no sentido do comprimento do cavaco, espaçadas de 0,5 mm entre si.

Figura 77. Microdurômetro Future-Tech, modelo FM-700.



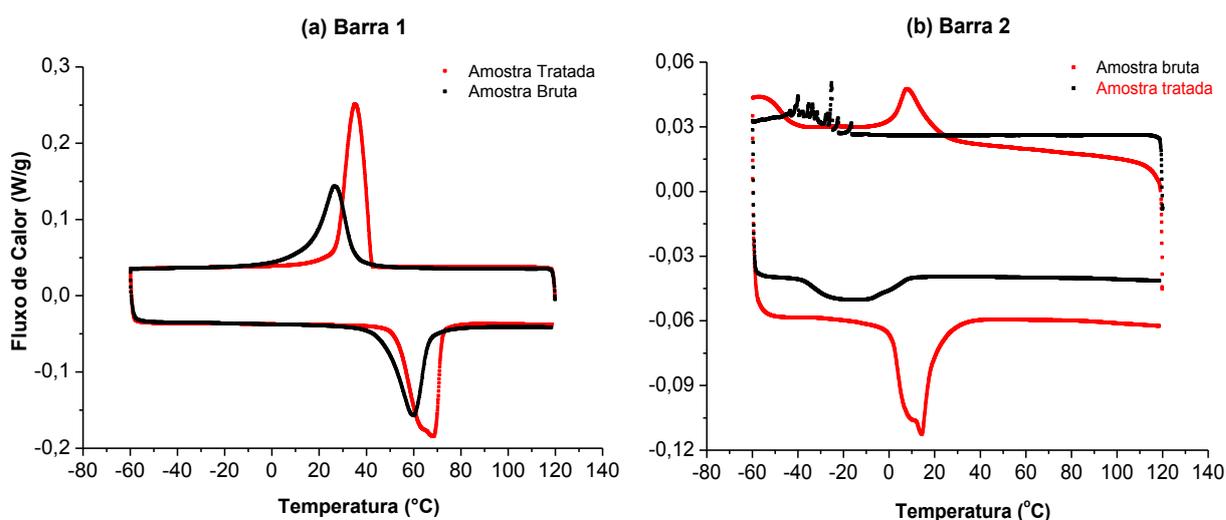
Fonte: Autoria própria.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Caracterização Térmica das Barras de LMF NiTi

As barras de seção circular das LMF NiTi adquiridas comercialmente foram caracterizadas termicamente via DSC antes de serem submetidas aos processos de usinagem. Os termogramas DSC para as barras 1 (55,16Ni-Ti) e 2 (55,91Ni-Ti) podem ser visualizados nas Figuras 78. A determinação das temperaturas de transformação através dos termogramas foi abordada na seção 4.1.6, conforme exemplo apresentado na Figura 12. As amostras retiradas das barras também foram submetidas a um tratamento térmico a 450°C durante 30 minutos, com resfriamento em água a temperatura ambiente (~ 27°C).

Figura 78. Termogramas DSC antes e após o tratamento térmico das barras NiTi. (a) 1, 55,16Ni-Ti. (b) 2, 55,91Ni-Ti.



Fonte: Autoria própria.

Verifica-se que ambas as barras NiTi, na condição como recebida, possuem transformação de fase. Porém, o aspecto qualitativo dos picos, que ficam mais definidos e aumentam as entalpias de transformação, o tratamento térmico a 450°C por 30 minutos melhora a transformação de fase, provavelmente pela redução do encruamento introduzido durante o processo de conformação das barras. No caso específico da barra 2, verifica-se que a temperatura limite do DSC no resfriamento (-60°C) não é suficiente para completar a transformação de fase do material, que ocorre

em duas etapas, envolvendo um primeiro pico de formação de uma primeira martensita, conhecida por fase R, seguido de um segundo pico da martensita propriamente dita, que não foi completado por falta de capacidade de resfriamento do calorímetro.

A partir dos termogramas mostrados, é possível resumir as principais propriedades térmicas das barras circulares de NiTi na Tabela 15.

Tabela 15. Temperaturas de transformação de fase das barras circulares de NiTi usadas para a usinagem dos parafusos AT (Barra 1, 55,16Ni-Ti) e SE (Barra 2, 55,91Ni-Ti).

Amostra	Condição	Resfriamento					Aquecimento			H_t ($A_p - M_p$) (°C)
		R_s (°C)	R_f (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	ΔH_c^* (J/g)	A_s (°C)	A_f (°C)	ΔH_h^* (J/g)	
Barra 1	Como recebida	---	---	35,2	16,0	20,2	47,0	66,7	19,5	60,1 - 26,4 = 33,7
	Tratada 450 °C/min	---	---	42,1	27,4	26,1	52,9	72,0	24,1	68,5 - 35,1 = 33,4
Barra 2	Como recebida	-12,8	---	---	---	---	-38,6	9,2	4,3	---
	Tratada 450 °C/min	21,5	1,25	-42,0	---	3,6	0,8	21,3	10,1	14,3 - 8,2 = 6,1

Fonte: Autoria própria.

A partir dessas informações, é possível verificar que, a barra 1 (mais rica em Ti) não sofreu aumento significativo nas suas temperaturas de transformação e nem na histerese térmica (ΔH) após o tratamento térmico. Já a barra 2 (mais rica em Ni) sofreu maiores variações em suas temperaturas de transformação (aquelas possíveis de serem medidas). A literatura reporta que em LMF de NiTi mais ricas em Ni, apenas tratamentos térmicos entre 400 °C e 450 °C favorecem fenômenos metalúrgicos tais como precipitação de fases metaestáveis (Ti_3Ni_4 e Ti_2Ni_3) (LAGOUDAS, 2008). Isso pode explicar o aumento significativo das temperaturas de transformação revelado na Figura 78(b).

A presença da fase-R em LMF de NiTi, conforme indicado pela presença dos dois picos DSC durante o resfriamento (Figura 78b), se torna mais evidente principalmente após tratamentos térmicos ou termomecânicos (LAGOUDAS, 2008;

OTSUKA & WAYMAN, 1998). À medida que a LMF NiTi mais rica em Ni (>55,0 % em peso) é tratada termicamente em temperaturas mais elevadas, as temperaturas M_s e M_f tendem a aumentar e R_s e R_f (temperaturas de início e de fim da transformação da austenita em fase R no resfriamento, respectivamente) tendem a diminuir (YOON & YEO, 2004). Conforme revela a Tabela 15, estas transformações austenita – fase R (primeiro pico DSC no resfriamento) são caracterizadas por baixos valores de entalpia de transformação (3,6 J/g) e histerese de térmica (6,1°C), conforme dados para a barra 2 tratada termicamente. A transformação da fase R libera pouca energia (cerca de 4,0 J/g) quando comparada com a transformação martensítica completa e sua inversão no aquecimento, que apresentam valores de entalpia típicos situados entre 10 e 32 J/g (OTSUKA & WAYMAN, 1998).

Adicionalmente, processamentos mecânicos das LMF NiTi sem posterior tratamentos térmicos para alívio de tensões provocam o efeito inverso, afastando os picos de transformação no resfriamento (M_p e R_p). É possível que as barras de NiTi tenham sofrido deformação plásticas severas durante sua fabricação e o nível de tensões residuais levou a transformação martensítica para faixas de temperaturas bastante baixas, fora da faixa atingida pelo equipamento DSC usado neste trabalho (abaixo de - 60°C). Por isso não foi possível visualizar todas as temperaturas de transformação no termograma da LMF NiTi mais rica em Ni, mostrado na Figura 78(b).

6.2. Fabricação dos Parafusos de LMF

Os dois primeiros parafusos fabricados não atenderam à necessidade do aperto da porca, pois a mesma não passou pela rosca usinada, devido as vibrações e à baixa profundidade de entrada da ferramenta, imposta pelo programa com a trajetória 1 (T1). Os demais parafusos, usinados com o programa com a trajetória 2 (T2), foram fabricados dentro dos parâmetros estabelecidos. Um exemplo de um dos parafusos fabricados pode ser visualizado na Figura 79.

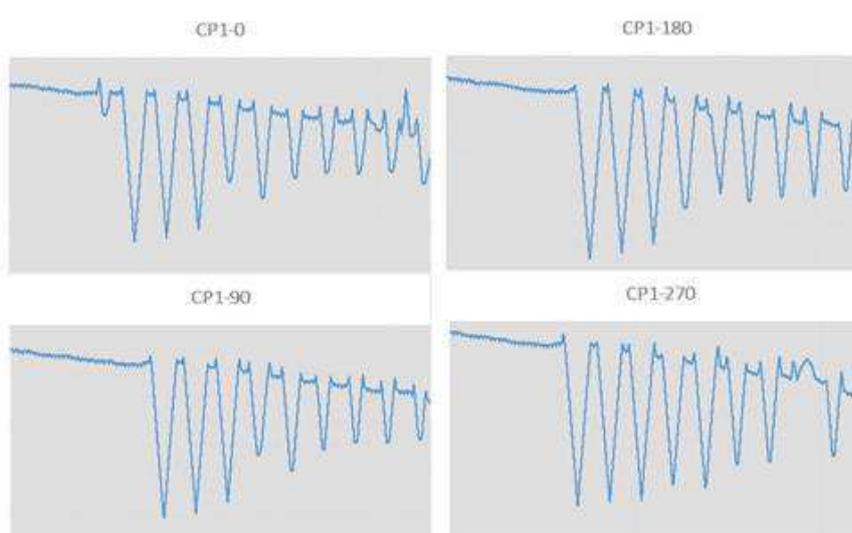
Figura 79. Parafuso de LMF NiTi fabricado por usinagem.



Fonte: Autoria própria.

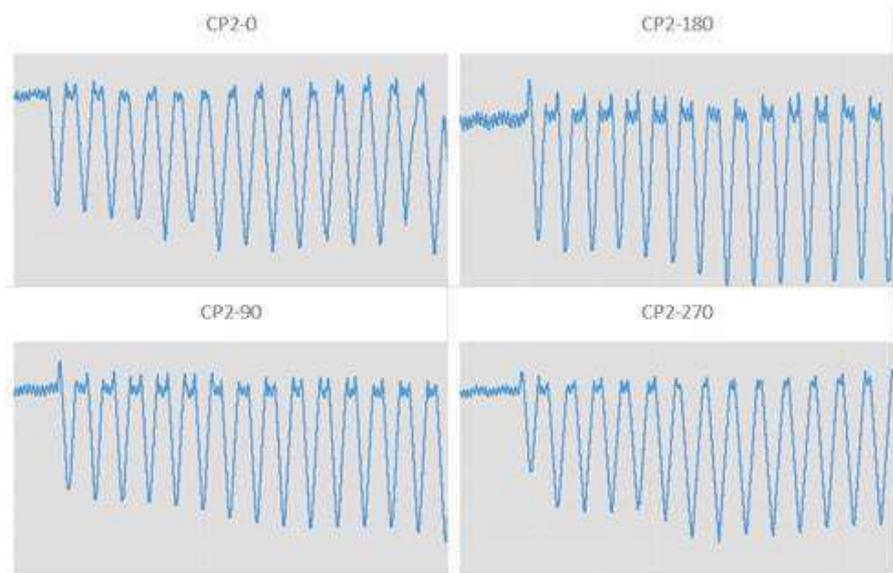
Os perfis de rosca dos três primeiros parafusos (CPs) fabricados foram analisados no rugosímetro, cada um em quatro angulações (0° , 90° , 180° e 270°). Os resultados dessas análises são mostrados nas Figuras 80, 81 e 82.

Figura 80. Análise do perfil de rosca do parafuso 1 (CP1) em quatro angulações diferentes: 0° , 90° , 180° e 270° .



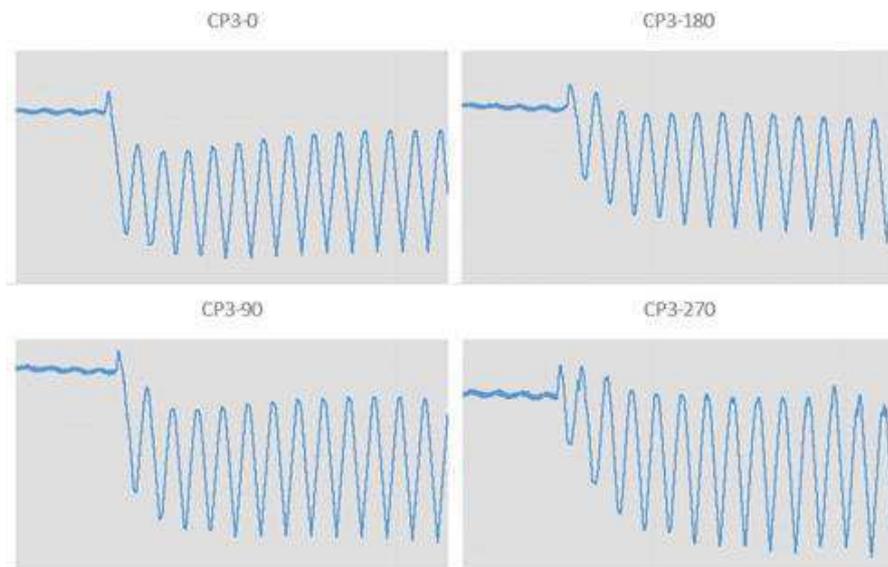
Fonte: Autoria própria.

Figura 81. Análise do perfil de rosca do parafuso 2 (CP2) em quatro angulações diferentes: 0, 90, 180 e 270°.



Fonte: Autoria própria.

Figura 82. Análise do perfil de rosca do parafuso (CP3) em quatro angulações diferentes: 0, 90, 180 e 270°.



Fonte: Autoria própria.

As roscas do primeiro parafuso (CP1) foram usinadas sem o acessório de fixação, a partir de T1, usando uma profundidade de 0,69 mm. As roscas do segundo parafuso (CP2) também foram usinadas sem o acessório de fixação, a partir de T2,

com profundidade de 0,89 mm. As roscas do último parafuso fabricado (CP3) foram usinadas com a peça de fixação bipartida, a partir de T2, com o furo de centro e com profundidade de 0,99 mm.

A partir da observação dos perfis de rosca, percebe-se claramente a conicidade mencionada anteriormente no CP1, devido aos efeitos da vibração ocasionada pela T1 (usinagem em apenas um passo) aliada à fixação feita apenas pela cabeça do CP. No CP2, o formato afunilado foi notavelmente reduzido graças à T2, porém a profundidade da fresa não foi suficiente para usinar a altura da rosca, necessária para a penetração da porca. Analisando os perfis de CP3, a vibração é menor do que em CP2, graças a peça de fixação, e a altura de rosca suficiente para a penetração da porca foi usinada com sucesso. A partir desse ponto, todos os parafusos de LMF NiTi foram fabricados pelas condições utilizadas no CP3.

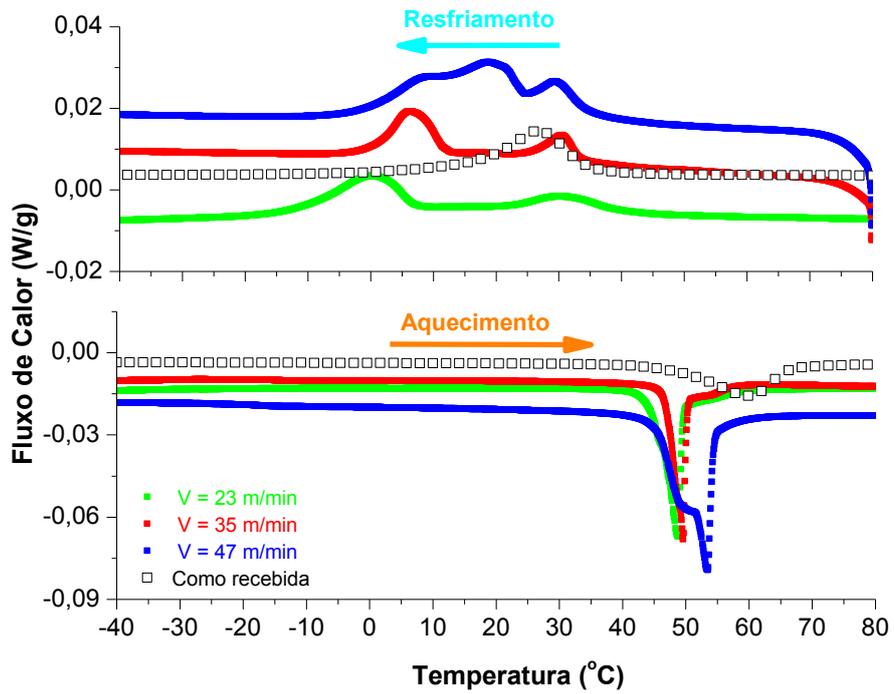
6.3. Caracterização dos Cavacos de Usinagem

Essa etapa do trabalho foi realizada com a barra 1, da LMF NiTi mais rica em Ti (55,16%Ni-Ti) e portanto com temperaturas de transformação mais altas.

6.3.1. Caracterização Térmica: DSC e RET

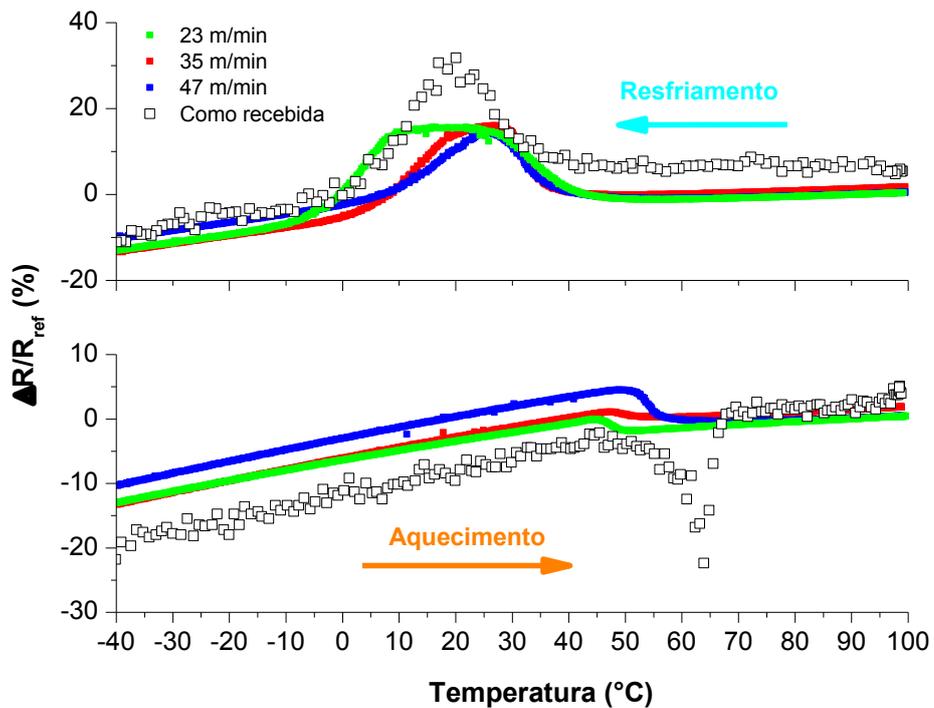
Após a usinagem, os cavacos coletados em diferentes velocidades de corte (Figura 70) também foram submetidos a análises térmicas via DSC e RET. As curvas características de transformação de fase durante a transformação direta (resfriamento), bem como aquelas referentes à transformação inversa (aquecimento) para todos os cavacos e também para a barra de LMF como recebida podem ser visualizadas na Figura 83 (DSC) e 84 (RET). A vantagem da técnica RET em comparação com a DSC reside no fato de que a primeira permite utilizar o cavaco ou parafuso inteiro, enquanto a segunda utiliza apenas uma pequena massa (cerca de 50 mg). A técnica utilizada para a determinação das temperaturas de transformação de fase a partir de termogramas DSC já foi abordada na seção 4.1.6, conforme exemplo mostrado na Figura 12.

Figura 83. Curvas de transformação obtidas via DSC para cavacos de LMF 55,16Ni-Ti coletados em diferentes velocidades de corte.



Fonte: Autoria própria.

Figura 84. Curvas de transformação obtidas via RET para cavacos de LMF 55,16Ni-Ti coletados em diferentes velocidades de corte.



Fonte: Autoria própria.

Para as medições de RET, ΔR é dado $R_i - R_{ref}$, sendo R_i a resistência elétrica instantânea e R_{ref} a resistência elétrica na temperatura de referência, medida a 100 °C durante o aquecimento. A técnica utilizada para a determinação das temperaturas de transformação de fase a partir de curvas RET já foi abordada na seção 4.1.6, conforme exemplo mostrado na Figura 13.

Portanto, a partir dos termogramas da Figura 83 e das curvas RET a partir da Figura 84, foi possível construir a Tabela 16.

Tabela 16. Propriedades térmicas de transformação (DSC e RET) de cavacos de LMF 55,16Ni-Ti usinados em diferentes velocidades de corte.

Amostra	Velocidade de corte (m/min)	Técnica	Resfriamento					Aquecimento		
			R_s (°C)	R_f (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	ΔH_c^* (J/g)	A_s (°C)	A_f (°C)	ΔH_h^* (J/g)
Como recebida	--	DSC	--	--	35,2	15,2	19,1	44,3	67,4	17,1
		RET	35,3	23,2	17,0	3,8	--	54,8	66,7	--
1	23	DSC	41,0	22,6	6,9	-11,6	22,6	45,7	49,8	21,9
		RET	42,2	27,5	8,5	4,0	--	46,0	49,2	--
2	35	DSC	33,8	25,8	11,9	0,7	21,4	46,8	50,2	18,7
		RET	35,7	30,3	20,2	4,4	--	47,2	52,8	--
3	47	DSC	35,2	25,9	20,8	-1,1	22,2	45,2	54,5	18,1
		RET	38,1	27,9	24,7	8,6	--	51,1	56,4	--

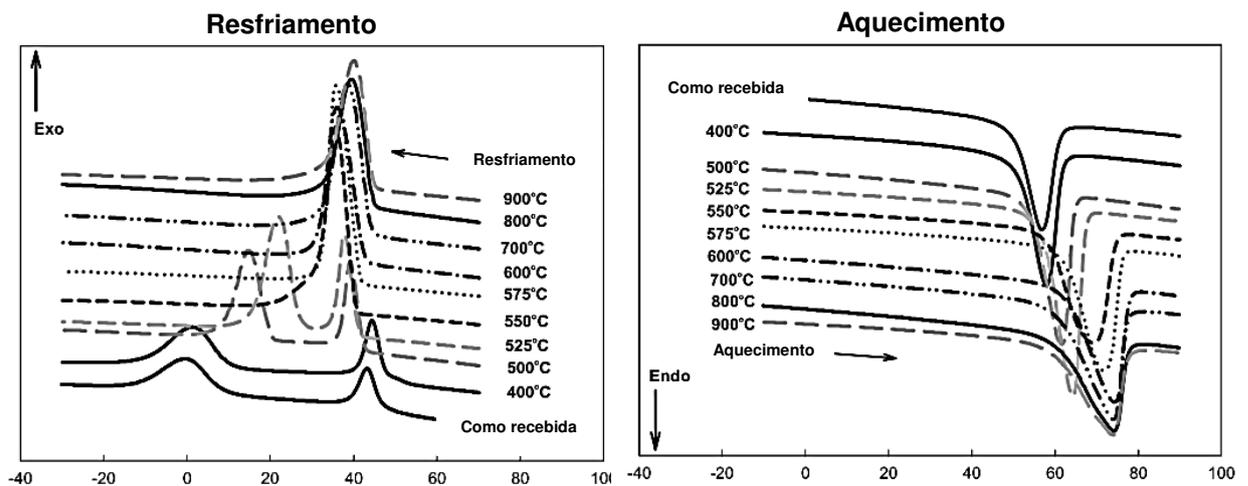
Fonte: Autoria própria.

Através da análise dos termogramas DSC (Figura 87 e Tabela 17) é possível notar que o processo de usinagem funcionou como um tratamento térmico que favoreceu o aparecimento da fase R a partir da austenita, durante o resfriamento.

YOON & YEO, (2004) encontraram resultados semelhantes para diferentes condições de tratamento térmico de recozimento numa LMF NiTi. Esses autores mostraram que, para amostras tratadas termicamente com temperaturas menores que 400 °C, as temperaturas de transformação de fase não sofrem alterações importantes em relação as temperaturas das amostras como recebidas. Para as amostras tratadas termicamente acima de 400 °C e abaixo de 600 °C, as temperaturas de transformação de fase de A_s , A_f , M_s e M_f tendem a aumentar de forma linear, enquanto que R_s e R_f

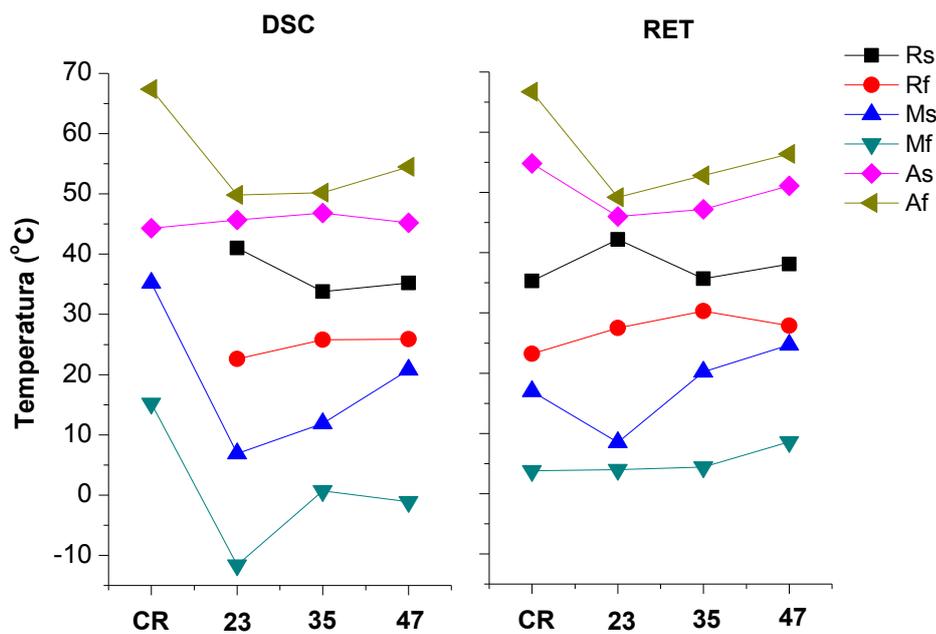
tendem a diminuir de forma linear com o aumento da temperatura de tratamento térmico. Os efeitos demonstrados por YOON & YEO, (2004) podem ser visualizados na Figura 85. Esses efeitos também foram observados para os cavacos de LMF estudados nesse trabalho, de acordo com a Figura 86.

Figura 85. Curvas de transformação de fase obtidas por DSC para uma LMF de NiTi submetida a tratamentos térmicos de recozimento em várias temperaturas.



Fonte: Adaptado de YOON & YEO, (2004).

Figura 86. Temperaturas de transformação de fase obtidas via DSC e RET em função da velocidade de corte para os cavacos da LMF 55,16Ni-Ti.



Fonte: Autoria própria.

Uma comparação entre as Figuras 83 e 85, tendo por base a aproximação entre os picos da fase R e da martensita durante o resfriamento, permite afirmar que, quanto maior a velocidade de corte, maior a temperatura atingida pelo material durante a usinagem dos parafusos.

Um outro fato importante a ser salientado é que as temperaturas de transformação de fase obtidas pelas técnicas propostas apresentam valores bem próximos entre si.

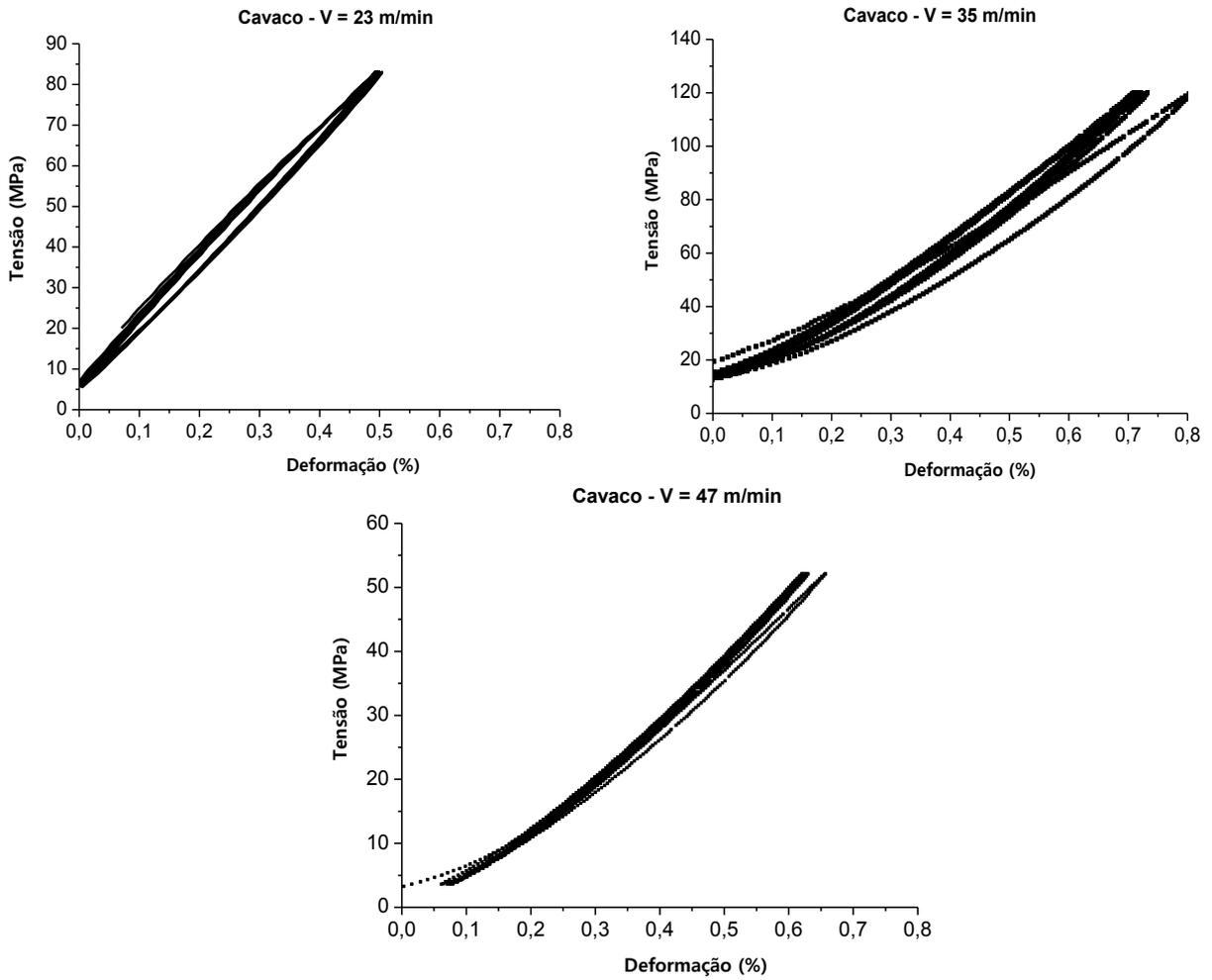
6.3.2. Caracterização Mecânica via DMA

Os cavacos da LMF 55,16Ni-Ti, usinados em diferentes velocidades de corte, foram submetidos à estabilização do comportamento mecânico usando o DMA como mini máquina de ensaios. Os testes foram realizados a 80°C, enquanto que a temperatura A_f dos cavacos são, de acordo com os testes RET, 49,2 (V = 23 m/min), 52,2 (V = 35 m/min) e 56,4°C (V = 47 m/min). Isso garantiu com que todos os cavacos estivessem completamente no regime superelástico durante os ensaios. Após 25 ciclos, as curvas tensão - deformação foram obtidas e são mostradas na Figura 87.

De acordo com a figura anterior, o efeito de repetição dos ciclos gera a estabilização do comportamento mecânico dos cavacos. Segundo LAGOUDAS, (2008), os ciclos mecânicos estabilizam o comportamento SE devido à saturação de deformações plásticas no material. Durante o primeiro ciclo, há a recuperação da deformação inicial, porém não de forma completa, restando uma pequena de deformação residual permanente. A cada ciclo, uma pequena parcela de deformação plástica decrescente vai se acumulando no material até aproximadamente o 20º (vigésimo) ciclo. A partir daí, a resposta superelástica se torna praticamente constante.

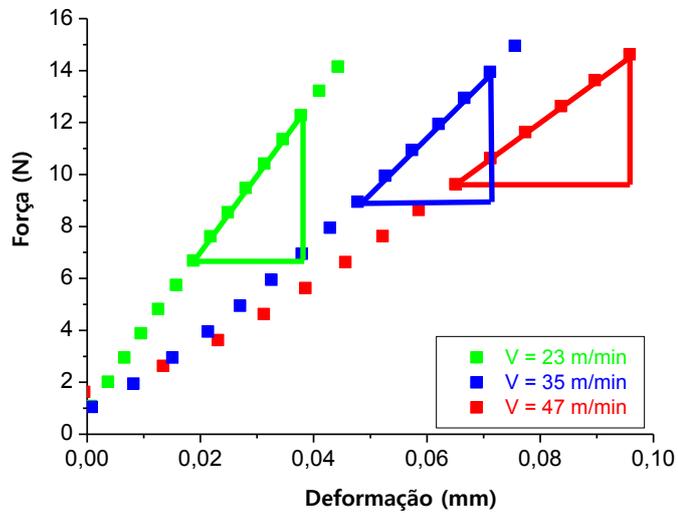
A partir do comportamento força - deformação, mostrado na Figura 88, é possível calcular a rigidez dos cavacos para as diferentes condições de velocidade, simplesmente fazendo a relação entre a variação de força (em N) pela variação de comprimento (em mm). Esses gráficos foram gerados a partir da parte de carregamento, no 25º ciclo do ensaio.

Figura 87. Estabilização cíclica do comportamento mecânico a 80°C dos cavacos de LMF 55,16Ni-Ti



Fonte: Autoria própria.

Figura 88. Comportamento mecânico dos cavacos de LMF 55,16Ni-Ti para cálculo da rigidez.



Fonte: Autoria própria.

Os triângulos delimitados na Figura 88 denotam a região do carregamento utilizada para efetuar o cálculo da rigidez. Os valores calculados podem ser visualizados na Tabela 17.

Tabela 17. Rigidez de cavacos de LMF 55,16Ni-Ti ensaiados a 80°C.

Amostra	Velocidade de corte (m/min)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Rigidez (N/mm)
1	23	0,72	9,29	287,6
2	35	0,78	13,79	214,8
3	47	0,99	12,44	157,8

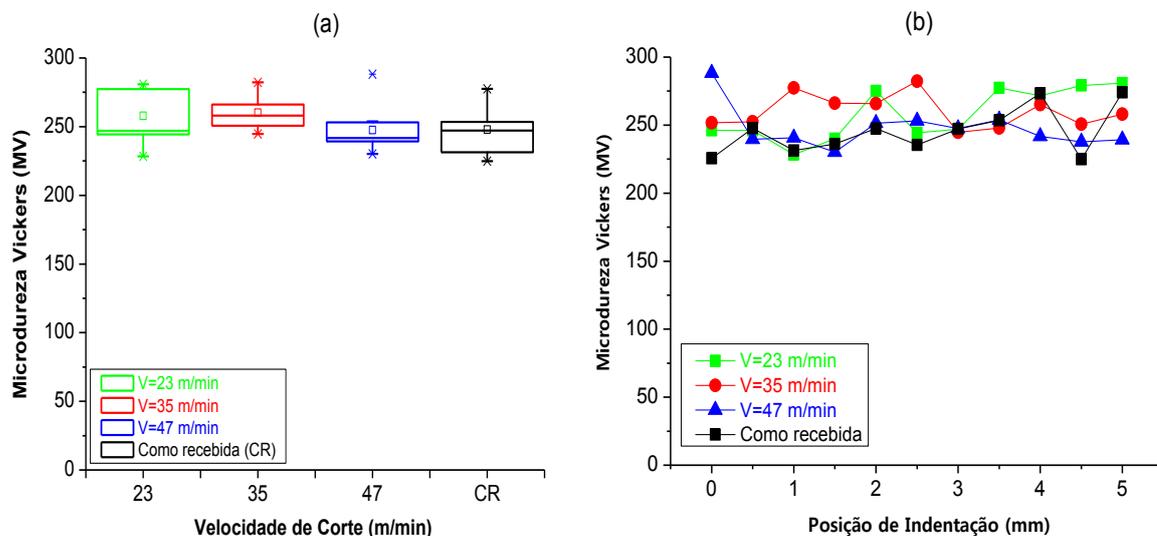
Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que há uma redução da rigidez à medida que a velocidade de corte aumenta. Esta diminuição pode estar associada ao processo de usinagem que, conforme já mostrado, funciona como um tratamento térmico recozimento no material. Portanto, o aumento da velocidade de corte propicia um alívio de tensões no material que, provavelmente, encontrava-se encruado devido ao processo de fabricação original da barra de LMF 55,16Ni-Ti.

6.3.3. Microdureza Vickers

Os resultados para a microdureza dos cavacos de LMF 55,16Ni-Ti estão mostrados na Figura 89. Do ponto de vista estatístico, os valores da média e do desvio padrão amostral para os cavacos são mostrados na Tabela 18.

Figura 89. Microdureza Vickers de cavacos de LMF 55,16Ni-Ti. (a) Box-plot. (b) Posições de indentação.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 18. Média e desvio-padrão amostral para microdureza em cavacos de LMF 55,16Ni-Ti.

Amostra	Velocidade de corte (m/min)	Média (HV)	Desvio-padrão (DP) amostral
Como recebida	---	247,8	18,7
1	23	257,8	19,0
2	35	260,2	12,2
3	47	247,5	15,3

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 93 e com a Tabela 19, é possível afirmar que os valores de microdureza Vickers para os 3 (três) tipos de cavacos e para o material como recebido apresentam pouca variação entre si, levando-se em consideração que os valores tanto das médias quanto dos DPs estão bastante próximos.

Esses valores de microdureza estão compatíveis com os valores apresentados no trabalho realizado por PAULA et al, (2006), que estudaram uma LMF de NiTi com A_f superior a 80°C e encontraram valores variando entre 235 e 295 HV, medidos a temperatura ambiente (~25°C).

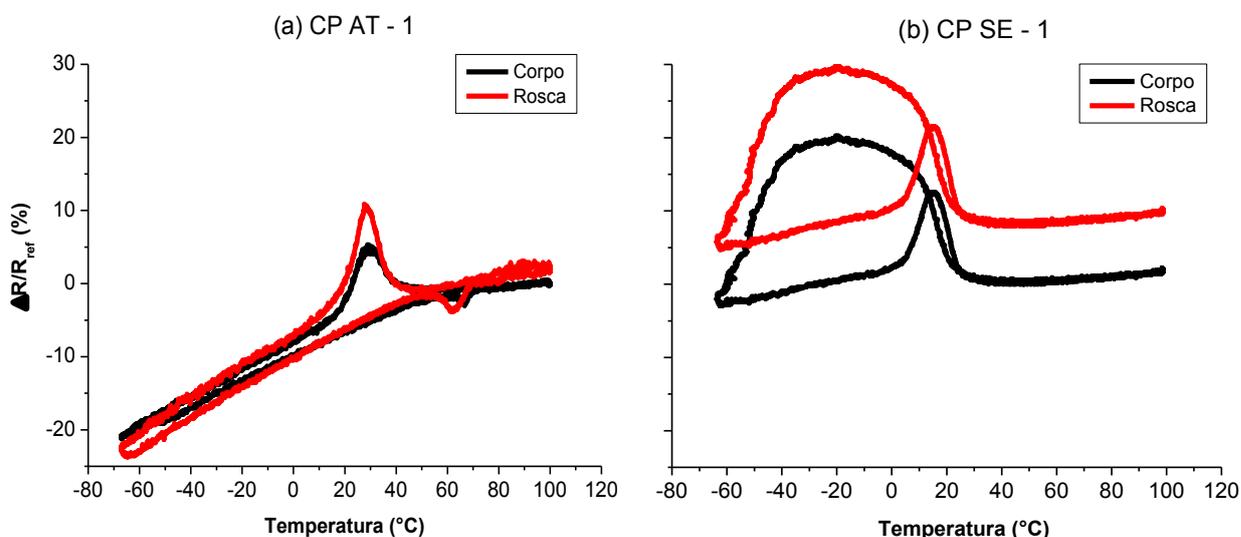
6.4. Caracterização Térmica dos Parafusos de LMF NiTi

Nessa etapa, com os parafusos já fabricados, realizou-se uma série de ensaios térmicos aplicando a técnica RET. Essa técnica foi escolhida por ser a única capaz de avaliar as temperaturas de transformação dos parafusos inteiros, de maneira não-destrutiva e sem aplicação de carregamento mecânico. Dessa forma, é possível determinar as temperaturas dos parafusos de LMF de uma maneira global.

A partir desse ponto, os parafusos fabricados a partir da barra 1 (55,16Ni-Ti), que apresenta EMF (temperaturas de transformação superiores a temperatura ambiente) serão denominados de AT (Atuadores), enquanto que aqueles fabricados a partir da barra 2 (55,91Ni-Ti), que apresenta o efeito superelástico a temperatura ambiente, serão denominados de SE (superelásticos). Portanto, a nomenclatura dos parafusos (CPs) será apresentada da seguinte maneira: CP AT - N e CP SE - N, em que N é o número de ordem de fabricação do CP.

Inicialmente, realizou-se a caracterização da transformação de fase na região das roscas via RET objetivando avaliar a influência de corte das roscas nas temperaturas de transformação dos parafusos em comparação com aquelas avaliadas na região sem rosca. Para isso foram testados 2 parafusos, cada um fabricado de uma barra diferente. Os resultados desses ensaios são mostrados na Figura 90.

Figura 90. Curvas de transformação RET para a os parafusos de LMF. (a) CP AT - 1 fabricado a partir de barra 1. (b) CP SE - 1 fabricado a partir da barra 2.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise das curvas características da Figura 90 é possível verificar que a variação de resistência elétrica medida nas roscas (curva vermelha) apresenta um deslocamento superior em relação àquela medida no corpo (região não-roscada) em ambos os parafusos (ambas as regiões são mostradas em detalhes na Figura 69). Isso ocorre devido às tensões residuais de corte nas raízes das roscas, oriundas do processo de fabricação. Uma vez tensionada a região da raiz, a corrente elétrica encontra mais dificuldade para percorrer a periferia do parafuso e, por isso, a resistência elétrica é mais alta na região com rosca. Dessa forma, é necessário um tratamento térmico para alívio das tensões pós-usinagem antes da realização dos testes mecânicos.

No que diz respeito as temperaturas de transformação do material, as mesmas não sofrem variações relevantes entre as regiões do parafuso onde são avaliadas (ver Tabela 19).

Tabela 19. Temperaturas de transformação obtidas via RET de CPs de NiTi analisados em duas regiões.

Corpo-de-prova	Região	R_s	R_f	M_s	M_f	A_s	A_f
CP AT - 1	Rosca	38,6	30,5	26,6	17,8	55,8	67,6
	Corpo	39,8	31,9	26,6	18,1	60,4	69,2
CP SE - 1	Rosca	23,1	9,3	-40,0	---	5,2	24,5
	Corpo	23,1	10,0	-40,9	---	5,2	25,5

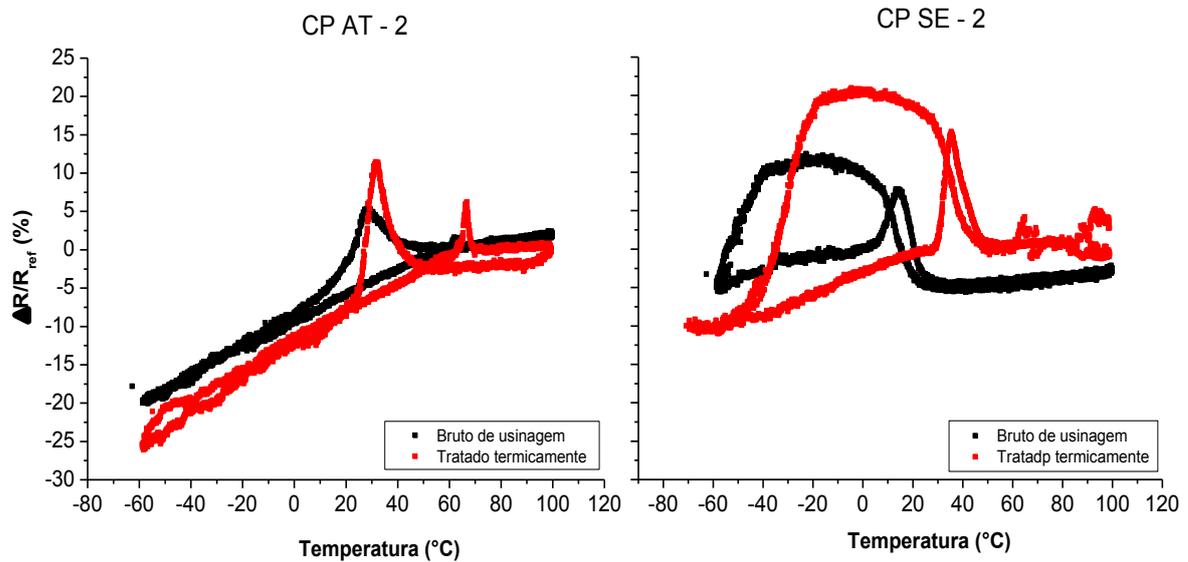
Fonte: Autoria própria.

Uma vez que as temperaturas de transformação na região da rosca dos parafusos não divergem substancialmente daquelas medidas na região sem rosca, optou-se por fazer os ensaios RET apenas nas regiões sem rosca (corpo). Foram realizados ensaios RET em todos 13 CPs restantes.

Após os ensaios RET nos CPs obtidos diretamente da fabricação, dois CPs (um de cada barra) foram tratados termicamente a 450°C durante 30 minutos, com resfriamento em água a 27°C e, novamente, foram ensaiados via RET. Essa estratégia foi usada para avaliar o efeito do tratamento nas temperaturas de transformação de

fase em poucos CPs, antes de realizar o mesmo tratamento nos demais. Os resultados desses testes podem ser visualizados na Figura 91.

Figura 91. Curvas de transformação RET para os parafusos de LMF NiTi antes e após o tratamento térmico (450 °C/30 min).



Fonte: Autoria própria.

Analisando-se as curvas características de RET anteriores, é possível perceber que o tratamento térmico provocou aumentos consideráveis tanto na intensidade dos picos de RET, quanto nas temperaturas de transformação de fase dos CPs, especialmente no CP SE, fabricado com a LMF NiTi mais rica em Ni. As temperaturas de transformação dos CPs, antes e após o tratamento térmico, podem ser visualizadas na Tabela 20.

Tabela 20. Temperaturas de transformação obtidas via RET de CPs tratados termicamente a 450°C durante 30 min, com posterior resfriamento em água (~27°C).

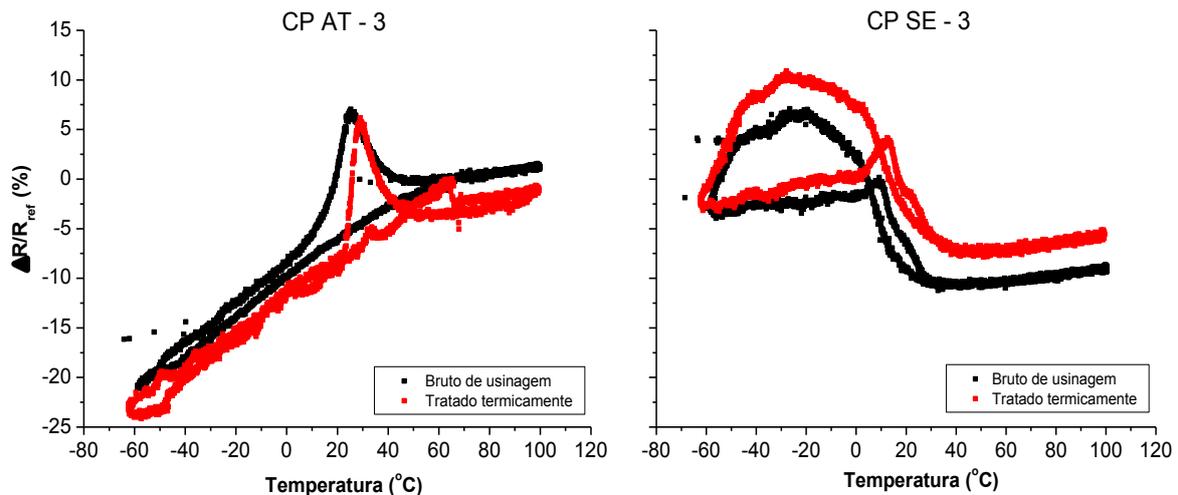
Corpo-de-prova	Estado	R_s	R_f	M_s	M_f	A_s	A_f
CP AT - 2	Bruto	41,5	31,4	26,6	20,9	58,3	64,8
	Tratado	41,2	32,7	30,5	24,9	64,6	69,0
CP SE - 2	Bruto	19,1	7,1	-41,2	---	5,6	24,0
	Tratado	40,9	28,3	-21,6	-41,4	29,7	47,4

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a tabela anterior, as diferenças entre as temperaturas de transformação do CP SE chegam a ser da ordem 20°C após o tratamento térmico. Conforme discutido na seção de caracterização das barras, esse aumento está muito provavelmente ligado à precipitação de fases metaestáveis (Ti_3Ni_4 e Ti_2Ni_3), que aparecem em LMF de NiTi mais ricas em Ni. Essas fases tendem a aparecer após o tratamento térmico dessas LMF entre 400°C e 450°C (LAGOUDAS, 2008).

Sendo assim, tentando não gerar um aumento importante da temperatura A_f nos parafusos superelásticos, optou-se por selecionar e testar um novo tratamento térmico para alívio das tensões de usinagem. Dessa forma, os CPs foram submetidos a um tratamento térmico a 350°C durante 30 minutos. Os resultados para os ensaios RET dos novos CPs tratados são mostrados na Figura 92.

Figura 92. Curvas de transformação RET para a os parafusos de LMF NiTi antes e após o tratamento térmico (350 °C/30 min).



Fonte: Autoria própria.

Tabela 21. Temperaturas de transformação obtidas via RET de CPs tratados termicamente a 350°C durante 30 min, com posterior resfriamento em água (~27°C).

Corpo-de-prova	Estado	R_s	R_f	M_s	M_f	A_s	A_f
CP AT - 3	Bruto	42,0	27,2	23,4	13,4	64,2	73,1
	Tratado	43,4	30,2	27,9	23,1	64,0	66,5
CP SE - 3	Bruto	18,1	0,1	-46,9	--	2,0	29,0
	Tratado	23,6	3,8	-45,0	--	0,0	32,3

Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados da Tabela 21, o novo tratamento térmico não aumenta significativamente as temperaturas de transformação do material. Sendo assim, esse novo tratamento foi utilizado nos demais CPs. Novos ensaios RET foram realizados nos parafusos depois do tratamento térmico. Os resultados desses ensaios foram sumarizados na Tabela 22.

Tabela 22. Temperaturas de transformação obtidas via RET de parafusos de LMF NiTi, antes e após o tratamento térmico proposto (350 °C/30 min).

Corpo-de-prova	Estado	R_s	R_f	M_s	M_f	A_s	A_f
CP AT – 2	Bruto	41,5	31,4	26,6	20,9	58,3	64,8
	Tratado	41,2	32,7	30,5	24,9	64,6	69,0
CP SE – 2	Bruto	19,1	7,1	-41,2	---	5,6	24,0
	Tratado	40,9	28,3	-21,6	-41,4	29,7	47,4
CP AT – 3	Bruto	42,0	27,2	23,4	13,4	64,2	73,1
	Tratado	43,4	30,2	27,9	23,1	64,0	66,5
CP SE – 3	Bruto	18,1	0,1	-46,9	--	2,0	29,0
	Tratado	23,6	3,8	-45,0	--	0,0	32,3
CP AT – 4	Bruto	34,6	27,2	24,2	16,7	47,1	67,7
	Tratado	41,7	31,6	27,5	18,3	59,9	66,8
CP SE – 4	Bruto	28,2	-2,5	-47,4	--	2,5	28,2
	Tratado	29,4	7,5	-48,6	--	6,7	31,5
CP AT – 5	Bruto	38,9	25,9	22,4	13,0	50,9	66,4
	Tratado	40,9	29,0	25,3	18,2	51,9	69,1
CP SE – 5	Bruto	27,5	3,0	-38,4	--	3,4	29,3
	Tratado	26,5	3,8	-41,8	--	7,4	31,1
CP AT – 6	Bruto	38,6	28,7	25,5	17,3	52,8	66,9
	Tratado	42,2	32,5	29,3	20,5	54,6	69,8
CP SE – 6	Bruto	23,4	4,4	-41,7	--	1,8	24,6
	Tratado	30,4	7,4	-43,3	--	10,4	32,8
CP AT – 7	Bruto	37,9	26,7	23,1	17,1	59,7	67,4
	Tratado	44,8	34,6	28,9	23,2	63,4	69,4
CP SE – 7	Bruto	29,3	3,7	-38,7	--	2,4	30,7
	Tratado	21,2	-1,4	-48,9	--	0,5	27,0
CP SE – 8	Bruto	30,2	7,3	-39,6	--	9,0	32,6
	Tratado	28,9	9,3	-37,2	--	8,9	30,5

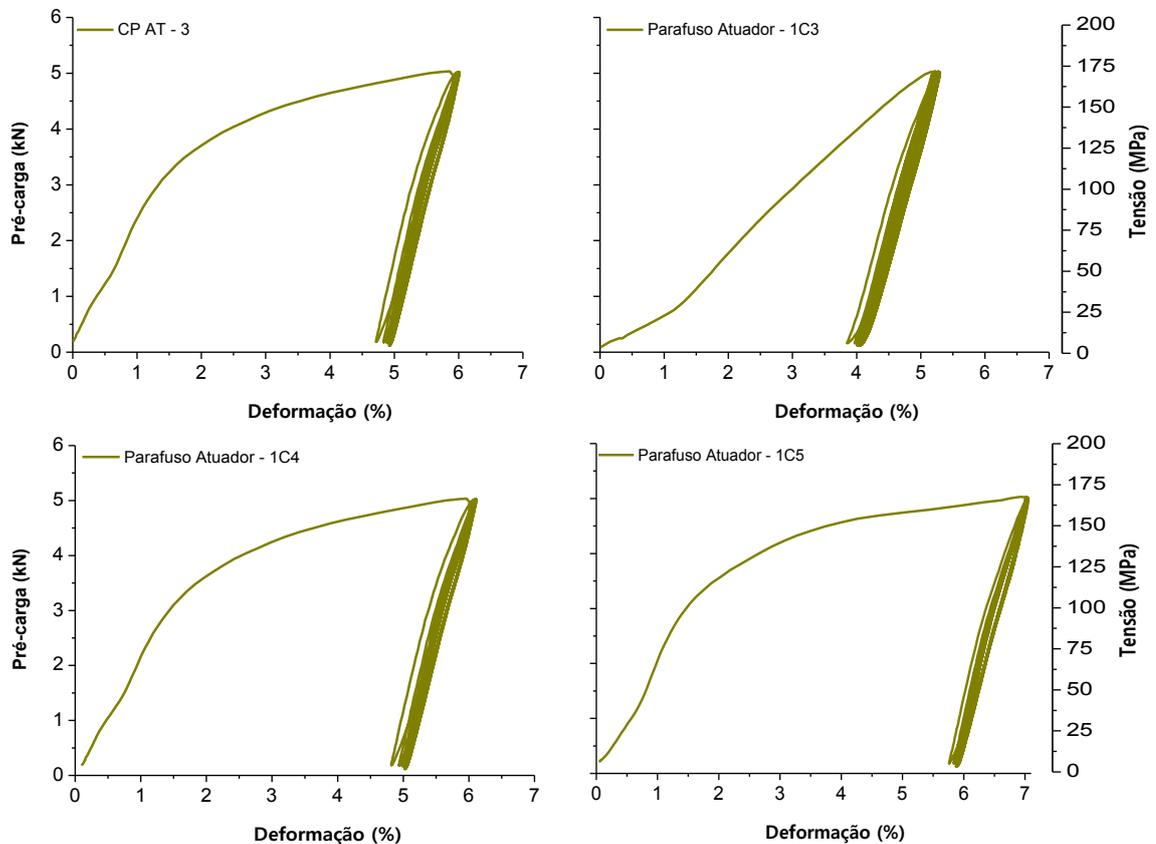
Fonte: Autoria própria.

A Tabela 22 revela que todos os CPs apresentaram temperaturas de transformação próximas, quando comparados os estados de antes e após o tratamento térmico para cada tipo de parafuso (AT ou SE) individualmente. As variações máxima e mínima encontradas entre as temperaturas de transformação, dadas às condições bruta e tratada foram, respectivamente, de 10°C e de 0°C. Isso comprova que o novo tratamento térmico selecionado para alívio de tensões de usinagem não compromete as temperaturas de transformação dos parafusos.

6.5. Caracterização Preliminar dos Parafusos de LMF NiTi

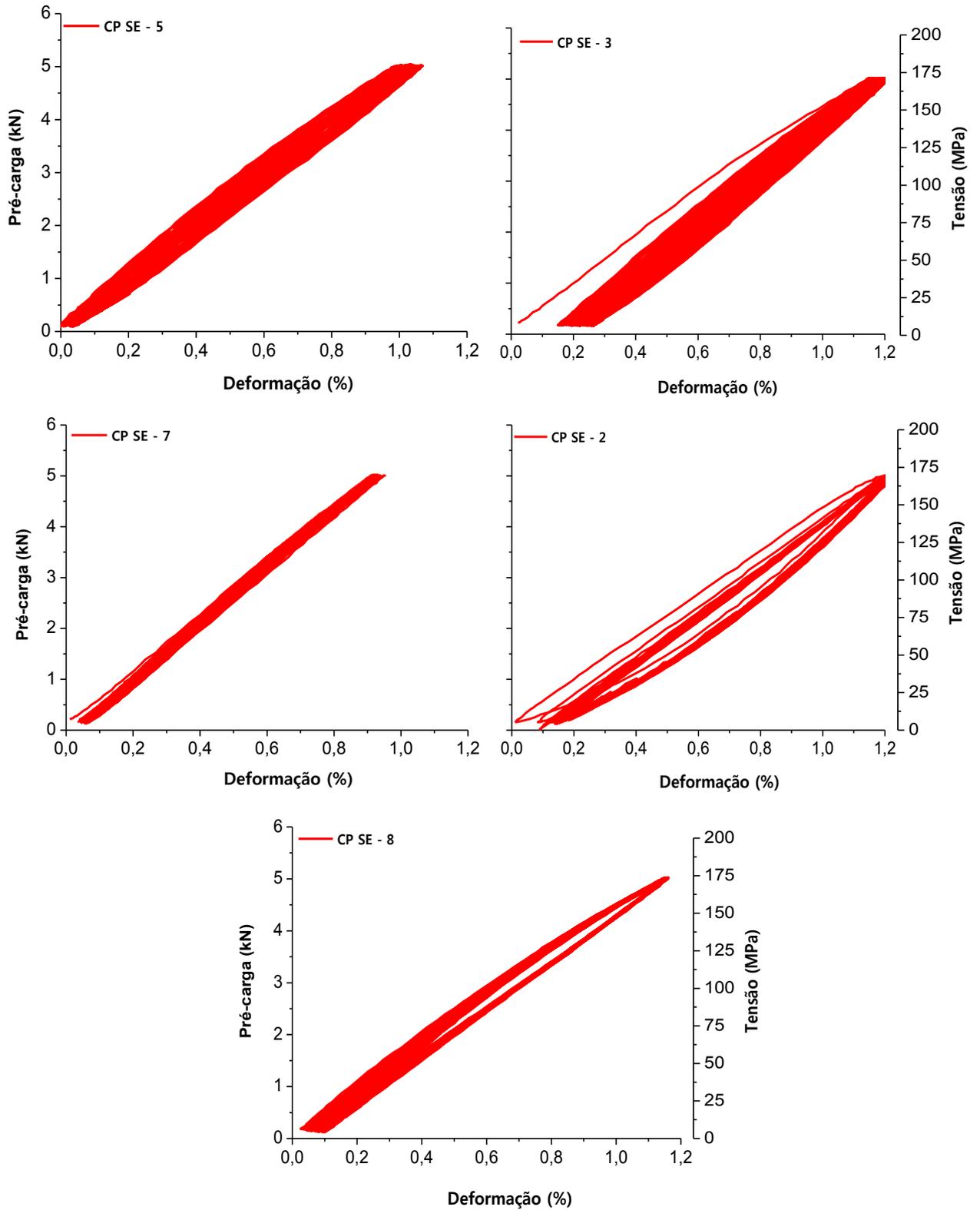
Antes da realização dos testes termomecânicos propostos nesse trabalho, os CPs foram submetidos a uma estabilização do comportamento mecânico. As curvas características de pré-carga – deformação, resultantes dessa estabilização cíclica realizada nos parafusos podem ser visualizadas nas Figuras 93 e 94.

Figura 93. Estabilização mecânica dos parafusos AT a temperatura ambiente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 94. Estabilização mecânica dos CPs SE a temperatura ambiente.



Fonte: Autoria própria.

As informações sobre deformações plásticas dos CPs estão sumarizadas na Tabela 25. Os CPs AT, que estão no estado martensítico a temperatura ambiente ($A_f > T_{ambiente}$) acumularam altos níveis de deformação plástica (>4%). Essas deformações foram recuperadas por EMF quando os CPs foram aquecidos acima de A_f , logo após a ciclagem. Por outro lado, os CPs SE, por apresentar superelasticidade à temperatura ambiente ($A_f \sim T_{ambiente}$) apresentaram pequenos níveis de acumulação de deformação plástica residual, após o término dos ciclos mecânicos. Alguns dos CPs romperam prematuramente durante a realização destes ensaios e as causas destas falhas serão discutidas posteriormente. O acúmulo de deformações plásticas mostrado na Tabela 23 já era previsto.

Tabela 23. Deformações plásticas acumuladas durante os ensaios de estabilização mecânica.

Corpo-de-prova	Deformação plástica (%) - 1º Ciclo -	Deformação plástica (%) - 25º Ciclo -
CP AT – 3	4,7	5,0
CP AT – 7	3,8	4,1
CP AT – 4	4,8	5,0
CP AT – 5	5,8	5,9
CP SE – 5	0,010	0,040
CP SE – 3	0,150	0,300
CP SE – 7	0,036	0,060
CP SE – 2	0,017	0,150
CP SE – 8	0,027	0,100

Fonte: Autoria própria.

Os ciclos mecânicos estabilizam o comportamento da LMF devido à saturação de defeitos no material. Durante o primeiro ciclo, há a recuperação da deformação inicial, porém não de forma completa, sendo que uma parcela se transformou em deformação permanente. A cada ciclo, uma pequena parcela de deformação plástica decrescente vai se acumulando no material até aproximadamente o 20º (vigésimo) ciclo. A partir daí, a resposta superelástica ou de EMF será praticamente constante.

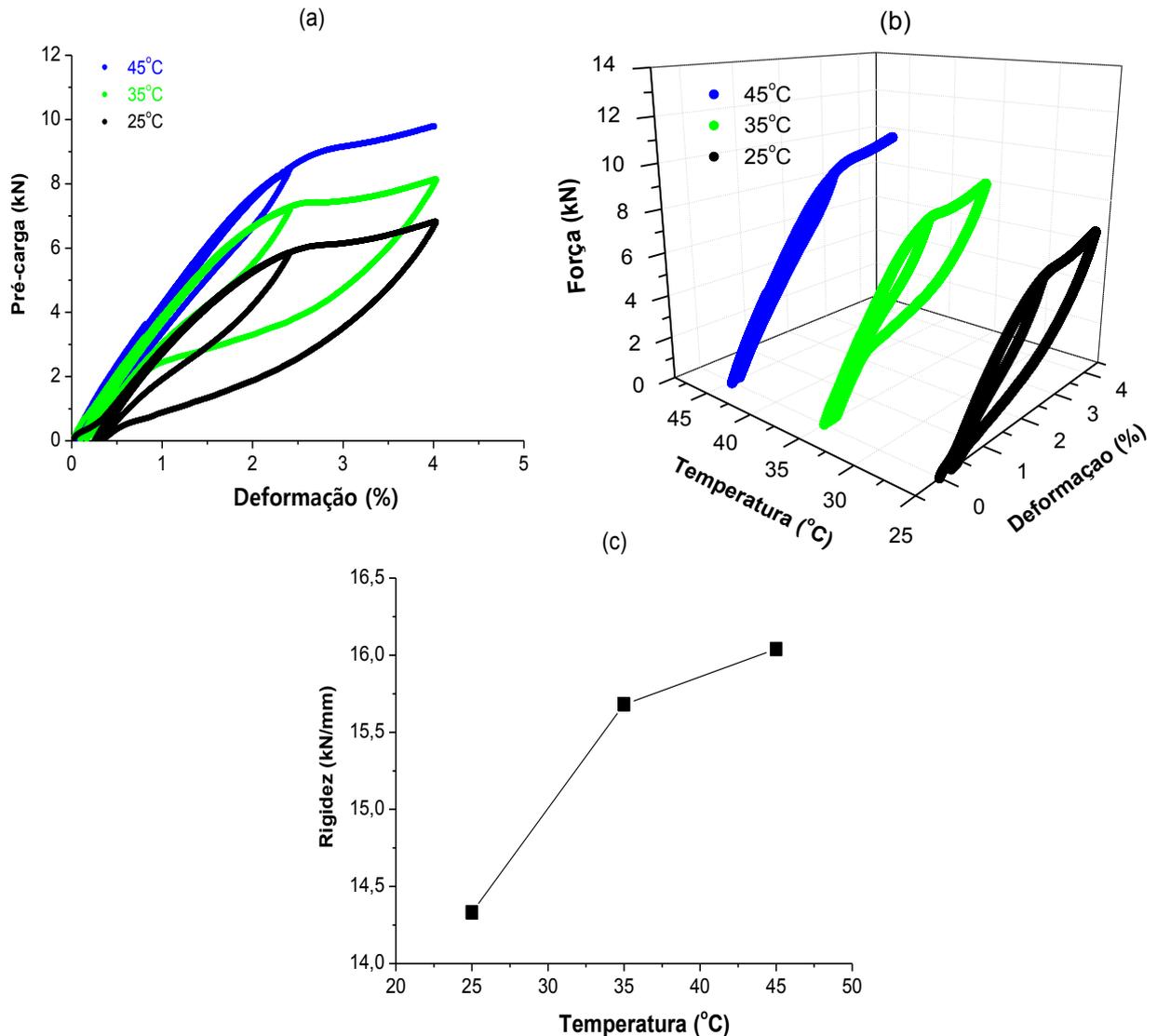
6.6. Caracterização Termomecânica dos Parafusos de LMF

6.6.1. Caracterização Estática

6.6.1.1. Ensaios Superelásticos Isotérmicos (ISO)

Os resultados para os ensaios ISO realizado no parafuso SE (CP SE - 8) são apresentados na Figura 95.

Figura 95. Teste de superelasticidade em um parafuso de LMF 55,91NiTi. (a) Pré-carga versus deformação. (b) Pré-carga versus deformação em função da temperatura. (c) Rigidez em função da Temperatura.

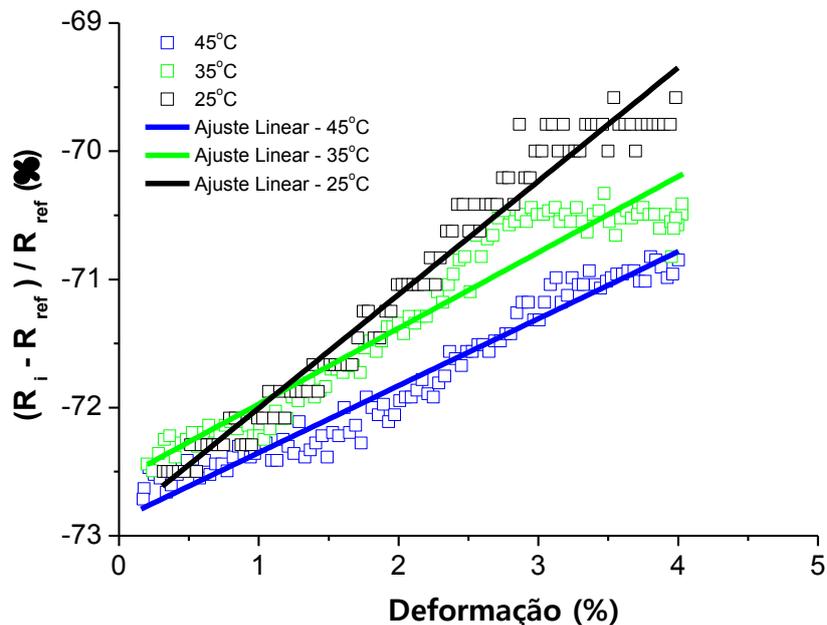


Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Tabela 22, é possível verificar que o CP SE - 8 utilizado nos ensaios ISO apresenta temperaturas de início (A_s) e final (A_f) de transformação martensita - austenita iguais a 8,9 e 30,5°C, respectivamente. Ou seja, a partir de uma temperatura ambiente de aproximadamente 27°C, o parafuso encontra-se quase que totalmente superelástico, sendo capaz de recuperar altos níveis de deformação (cerca de 4% em tração uniaxial), como pode ser visto nas Figuras 99(a) e 99(b). Além disso, as LMF tipicamente apresentam um aumento de rigidez quando aquecidas acima de A_f , como demonstrado na Figura 95(c).

Durante os ensaios ISO também monitorou-se a queda de tensão elétrica dos parafusos SE, para investigar se a variação da resistência elétrica apresenta alguma relação com a deformação do CP. O resultado dos valores adimensionais de resistência elétrica em função da deformação pode ser visualizado na Figura 96.

Figura 96. Variação de resistência elétrica em função da deformação CP SE – 8 para cada temperatura de teste.



Fonte: Autoria própria.

A variação percentual de resistência elétrica ($\% \Delta R = (R_i - R_{ref}) / R_{ref}$) apresentada na Figura 96 foi calculada com base na resistência de referência do material a 100 °C ($R_{ref} = 0,6 \Omega$), previamente determinada nos testes RET. A partir da análise desses resultados, é possível afirmar a variação de resistência elétrica do

parafuso aumenta linearmente com a deformação. Sendo assim, foi possível calcular os coeficientes para as respectivas retas em cada nível de temperatura. Os resultados desses cálculos são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24. Coeficientes de equações lineares estabelecidas para a relação entre variação de resistência elétrica e deformação para um parafuso SE.

Equação: $\Delta R = A \cdot d + B$			
em que, A é inclinação da reta, B é o ponto de interseção com o eixo ΔR e d é a deformação (%).			
Temperatura (°C)	A	B (% ΔR)	Coeficiente de Regressão (R^2)
25	0,88	-72,89	0,97
35	0,59	-72,56	0,91
45	0,52	-72,87	0,95

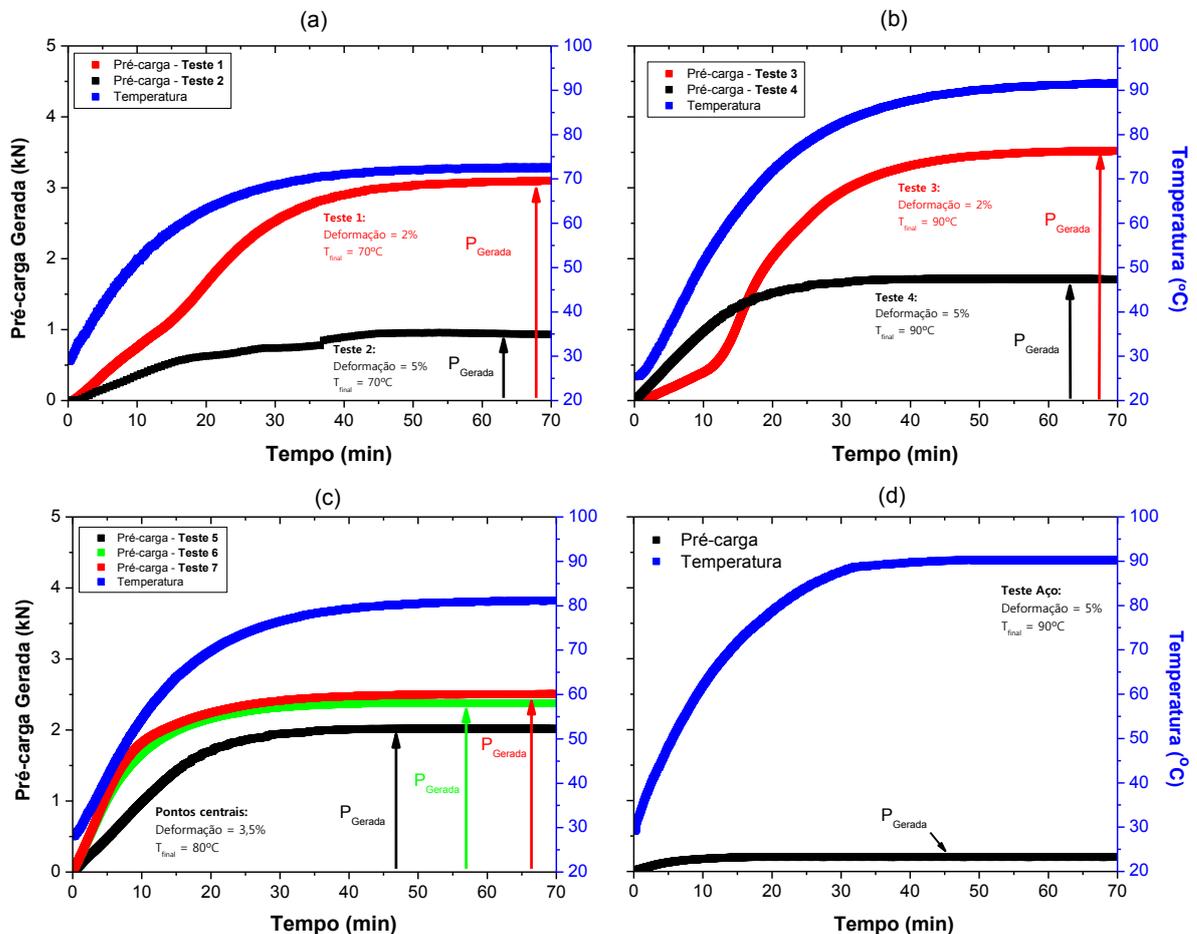
Fonte: Autoria própria.

6.6.1.2. Ensaio de Geração de Pré-carga em Função da Temperatura

Estes testes foram realizados de acordo com o planejamento experimental apresentado na seção 5.7.1.2, resumido na Tabela 12. Os resultados para os ensaios GPT realizados nos CPs AT podem ser visualizados na Figura 97. Consultando-se a Tabela 22 é possível perceber que todos os parafusos AT apresentaram A_f inferiores a 70°C, que foi o limite inferior da temperatura de aquecimento final utilizada nesse ensaio.

De acordo com a Figura 97(a, b, c), a pré-carga gerada por um parafuso AT apresenta uma forte dependência da temperatura e da deformação. Em relação ao parafuso de aço, este não apresentou valor significativo de pré-carga gerada em relação ao parafuso AT. O experimento realizado para um CP de aço (Figura 97d) mostrou que o mesmo gerou um baixo valor de pré-carga em função da temperatura (~0,2 kN), o que pode ser associado à dilatação térmica diferencial das partes do conjunto experimental.

Figura 97. Pré-carga gerada por um parafuso AT (a, b, c) e por um parafuso de aço (d) em função tempo.



Fonte: Autoria própria.

Os experimentos de GPT foram realizados de acordo com um PF, 2^2 com 3 experimentos no ponto central. A pré-carga gerada da tendência de contração do parafuso AT por EMF (ΔP_{EMF}), mostrada na Figura 97, foi calculada considerando-se a diferença entre a pré-carga final (P_f) e a pré-carga inicial (P_i). Os valores das variáveis de entrada e de resposta podem ser encontrados na Tabela 25. A partir desses valores, realizou-se uma análise estatística de variância e, com isso, calculou-se o nível de significância " α " dos fatores de controle sobre a pré-carga gerada (ΔP_{EMF}). Níveis de significância menores que 0,05, foram considerados estatisticamente significativos, de acordo com valores sublinhados e em negrito na Tabela 26. Dessa maneira, considerando os efeitos dos níveis em destaque, há uma probabilidade de acerto de 95 % em se admitir que este fator de controle esteja influenciando na variável de resposta analisada.

Tabela 25. Variáveis de entrada e de resposta usadas nos ensaios de GPT com os parafusos AT (LMF 55,91Ni-Ti).

Nº Teste / CP	Pré-carga inicial P_i (kN)	Variáveis de Entrada		Variáveis de Resposta	
		Deformação d , (%)	Temperatura final T_f (°C)	Pré-carga final P_f (kN)	Pré-carga gerada ΔP_{EMF} (kN)
1 CP AT 2	1,00	2 (- 1)	70 (- 1)	4,03	3,03
2 CP AT 3	0,41	5 (+ 1)	70 (- 1)	1,35	0,94
3 CP AT 2	0,62	2 (- 1)	90 (+ 1)	4,56	3,94
4 CP AT 3	0,77	5 (+ 1)	90 (+ 1)	2,47	1,70
5 CP AT 4	0,72	3,5 (0)	80 (0)	2,74	2,02
6 CP AT 4	0,95	3,5 (0)	80 (0)	3,35	2,40
7 CP AT 4	0,57	3,5 (0)	80 (0)	3,07	2,50
Aço	0,98	5 (+ 1)	90 (+ 1)	1,20	0,22

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta.

Fatores	Valores de α , Pré-carga gerada (ΔP_{EMF})
Média	<u>0,000095</u>
Deformação d , (%)	<u>0,002204</u>
Temperatura final T_f , (°C)	<u>0,031764</u>
Interação, $d \times T_f$	0,754694

Fonte: Autoria própria.

O modelo matemático empírico para a pré-carga gerada (ΔP_{EMF}), codificado com os seus respectivos parâmetros estatísticos, está apresentado na Equação 23.

$$\Delta P_{EMF} = 2,3600 - 1,0800d + 0,4175T_f \pm 0,1462 \quad (23)$$

O efeito da interação das variáveis apresentou nível de significância maior do que o estabelecido ($\alpha = 0,75469 > 0,05$) e, dessa forma, não foi considerado no

modelo. Níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para a pré-carga gerada (ΔP_{EMF}) estão resumidos na Tabela 27.

Tabela 27. Análise de variância (ANOVA) para a resposta ΔP_{EMF} .

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado da Média (QM = SQ/GL)	F _{Calculado} (QM/QM _{RES})	*F _{Tabelado}
Efeito de d	4,6872	1	4,6872	125,2641	7,71
Efeito de T _f	0,6972	1	0,6972	18,6330	7,71
Interação (d x T _f)	0,0056	1	0,0056	0,1503	7,71
Regressão	5,3901	2	2,6950	72,0237	6,94
Resíduo	0,1497	4	0,0374	1,0000	---
Falta de ajuste	0,1283	2	0,0641	1,7143	6,94
Erro Puro	0,0214	6	0,0036	0,0952	6,16
Total	10,9298	6	---	---	---
Coefficiente de correlação (R ²)	0,9863		---	---	---

p = Número de Coeficientes do Modelo = 3;
n = Número de Experimentos = 7;
m = Número de Experimentos únicos = 5.

*RODRIGUES & IEMMA, (2009).

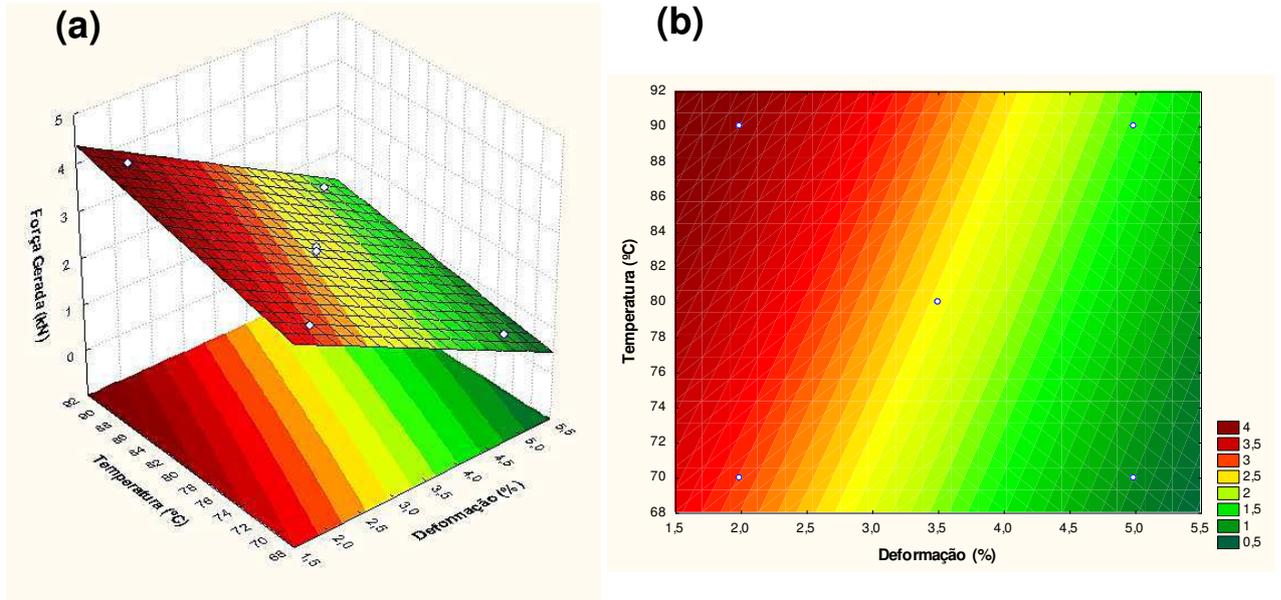
Fonte: Autoria própria.

Os valores de $F_{Calculado}$ mostraram que o modelo foi estatisticamente significativo, pois $F_{Calculado} > F_{Tabelado}$ para todos os fatores, exceto a interação ($d \times T_f$), que apresentou $\alpha > 0,05$. Conforme indica a ANOVA, a deformação (d) e a temperatura final (T_f) influenciaram significativamente nos valores da pré-carga gerada (ΔP_{EMF}). Essa influência pode ser visualizada na Figura 98.

Como as LMF apresentam suas propriedades com forte dependência da temperatura, é bastante razoável esperar que esse parâmetro exerça uma influência na pré-carga gerada pela tendência de contração por EMF. No entanto, a d demonstrou exercer uma maior influência nos valores de ΔP_{EMF} . Conforme a Figura 98, menores níveis de d combinados com os maiores níveis de temperatura geraram os maiores valores de pré-carga no parafuso AT. Isso pode significar que, em níveis

deformação muito elevados (~5 %), o parafuso de LMF não esteja conseguindo recuperar totalmente sua forma, por ter acumulado deformações permanentes.

Figura 98. Influência de d e T_f sobre a pré-carga gerada por um parafuso AT de LMF 55,91Ni-Ti. (a) Superfície de resposta. (b) Curva de contorno.



Fonte: Autoria própria.

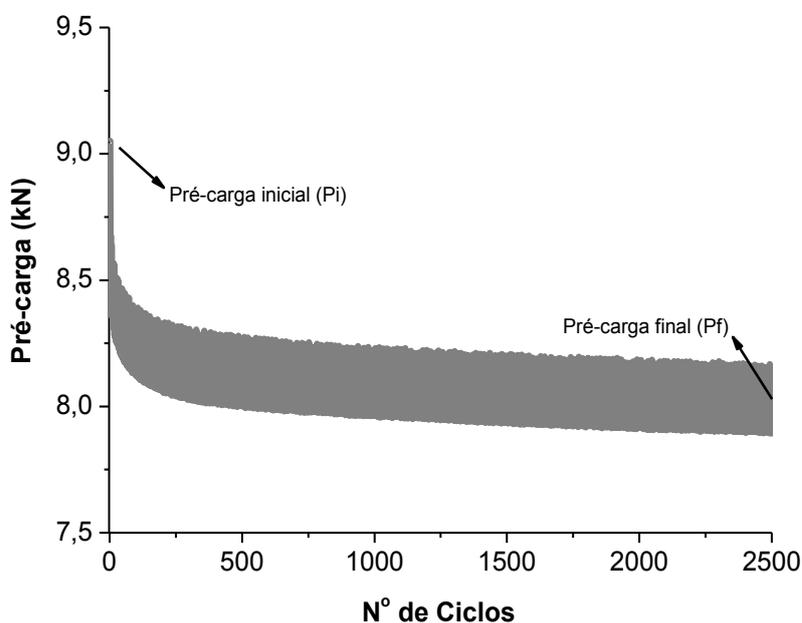
O fenômeno do aumento da pré-carga gerada com o aumento de T_f pode ser explicado também pelo aumento de rigidez do material. A faixa de T_f utilizada no ensaio foi de 70 a 90 °C e as temperaturas de ativação final (A_f) dos CPs testados foram 69 (CP AT 2), 66,5 (CP AT 3) e 66,8°C (CP AT 4) (ver Tabela 22), ou seja, as temperaturas de todos os testes estavam acima de A_f . Isso significa que os CPs estavam no estado superelástico ao final do aquecimento e, assim, o aumento da pré-carga está associado também e ao aumento de rigidez do material, quando o mesmo é aquecido acima de A_f , conforme demonstrado na Figura 91c.

6.6.2. Caracterização Dinâmica dos Parafusos de LMF: Ensaios de CTC

6.6.2.1. Varredura de Parâmetros: Pré-carga Inicial (P_i), Amplitude (A) e Frequência (f)

Com o objetivo de fazer uma varredura de parâmetros (P_i , A e f), os ensaios de CTC foram, inicialmente, realizados em parafusos de aço 12.9. Essa varredura seguiu uma metodologia de planejamento fatorial (PF) de 2^3 ensaios mais 3 (três) no ponto central, totalizando 11 testes. O objetivo dessa varredura foi averiguar os efeitos das variáveis de entrada sobre a pré-carga final (P_f) e, assim, tentar reduzir o número de experimentos com os parafusos de LMF, uma vez que a quantidade de CPs era reduzida. Um resultado padrão para testes de CTC de um parafuso de aço pode ser visualizado na Figura 99.

Figura 99. Comportamento típico da evolução de pré-carga de um parafuso M6 em aço submetido a CTC.



Fonte: Autoria própria.

A partir do comportamento de pré-carga em função do número de ciclos, é possível perceber que, imediatamente após o início do teste, a pré-carga produzida por um torque aplicado ao parafuso sofre um decaimento exponencial até atingir um determinado valor fixo ao entrar em regime permanente. Assim, foi possível obter os

valores de pré-carga final (P_f), após a realização de 2500 ciclos de cisalhamento. Todas as curvas de pré-carga versus números de ciclos para estes CPs de aço podem ser encontradas no Anexo C. Os valores de todas as variáveis de entrada e de P_f foram sumarizados na Tabela 28.

Tabela 28. Variáveis de entrada e de resposta usadas nos ensaios de CTC.

Ensaio	Variáveis de Entrada			Variável de Resposta
	Frequência f , (Hz)	Amplitude A , (mm)	Pré-carga inicial P_i , (kN)	Pré-carga final P_f , (kN)
1	10 (- 1)	0,2 (- 1)	3 (- 1)	2,6
2	15 (+ 1)	0,2 (- 1)	3 (- 1)	2,5
3	<u>10 (- 1)</u>	0,8 (+ 1)	3 (- 1)	<u>0,0</u>
4	<u>15 (+ 1)</u>	0,8 (+ 1)	3 (- 1)	<u>0,0</u>
5	<u>10 (- 1)</u>	0,2 (- 1)	15 (+ 1)	<u>14,6</u>
6	<u>15 (+ 1)</u>	0,2 (- 1)	15 (+ 1)	<u>14,6</u>
7	10 (- 1)	0,8 (+ 1)	15 (+ 1)	12,5
8	15 (+ 1)	0,8 (+ 1)	15 (+ 1)	12,0
9	12,5 (0)	0,5 (0)	9 (0)	8,8
10	12,5 (0)	0,5 (0)	9 (0)	8,5
11	12,5 (0)	0,5 (0)	9 (0)	8,6

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados da Tabela 28, realizou-se uma análise estatística de variância e, com isso, calculou-se o nível de significância " α " dos fatores de controle sobre a pré-carga final (P_f). Esses níveis podem ser visualizados na Tabela 29. Níveis de significância menores que 0,05, foram considerados estatisticamente significativos, de acordo com valores sublinhados e em negrito. De acordo com essas informações, a única variável de entrada do ensaio que possui $\alpha > 0,05$ é a frequência e, portanto, não tem significância estatística. Analisando-se os testes com mesmas condições de pré-carga inicial e amplitude e com frequências diferentes é possível notar que os valores de pré-carga final são bastante próximos, alcançando valores iguais nos testes 3,4 e 5,6, conforme valores sublinhados e em negrito.

Tabela 29. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta

Fatores	Valores de α , Pré-carga final (P_i)
Média	<u>0,000012</u>
Frequência (f)	0,843282
Amplitude (A)	<u>0,021318</u>
Pré-carga inicial (P_i)	<u>0,000056</u>
f x A	0,903218
f x P_i	0,875847
A x P_i	0,903218

Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, de agora em diante, a frequência será mantida constante e o seu valor será igual a 12,5 Hz, conforme sugerido pela norma DIN 65151. Portanto, o novo PF conterà 2² ensaios mais 3 (três) no ponto central. Realizando-se novos testes de CTC com o PF estabelecido, ter-se-á os resultados mostrados na Tabela 30. Os níveis de significância dos fatores são mostrados na Tabela 31.

Tabela 30. Variáveis de entrada e de resposta para os ensaios de CTC em parafusos M6 de aço.

Ensaio	Variáveis de Entrada		Variável de Resposta
	Pré-carga inicial (kN)	Amplitude (mm)	Pré-carga final (kN)
1	3 (- 1)	0,2 (- 1)	2,7
2	15 (+ 1)	0,2 (- 1)	14,8
3	3 (- 1)	0,8 (+ 1)	0,0
4	15 (+ 1)	0,8 (+ 1)	12,3
5	9 (0)	0,5 (0)	8,2
6	9 (0)	0,5 (0)	8,0
7	9 (0)	0,5 (0)	8,0

Fonte: Autoria própria.

Tabela 31. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta.

Fatores	Valores de α , Pré-carga final (P_f)
Média	<u>0,000027</u>
Amplitude, A	<u>0,000124</u>
Pré-carga inicial, P_i	<u>0,011500</u>
Interação, A x P_i	0,844483

Fonte: Autoria própria.

O modelo matemático empírico para a pré-carga final (P_f) desse parafuso, codificado com os seus respectivos parâmetros estatísticos, está apresentado na Equação 24.

$$P_f = 7,7100 + 6,1000A - 1,3000P_i \pm 0,3137 \quad (24)$$

Os efeitos da interação entre as variáveis não foram considerados neste modelo, uma vez que o nível de significância apresentou um valor maior do que o estabelecido ($\alpha = 0,844483 > 0,05$). Níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos. Os resultados da análise de variância (ANOVA) dos fatores de influência na pré-carga final (P_f) estão ilustrados na Tabela 32.

Os valores de $F_{Calculado}$ mostraram que o modelo foi estatisticamente significativo, pois $F_{Calculado} > F_{Tabelado}$ para todos os fatores, exceto a interação ($P_i \times A$), que apresentou $\alpha > 0,05$. Conforme indica a ANOVA, a pré-carga inicial (P_i) e a amplitude (A) influenciaram significativamente nos valores da pré-carga final (P_f). Essa influência pode ser visualizada na Figura 100.

Tabela 32. Análise de variância (ANOVA) para os fatores de influência na resposta P_f .

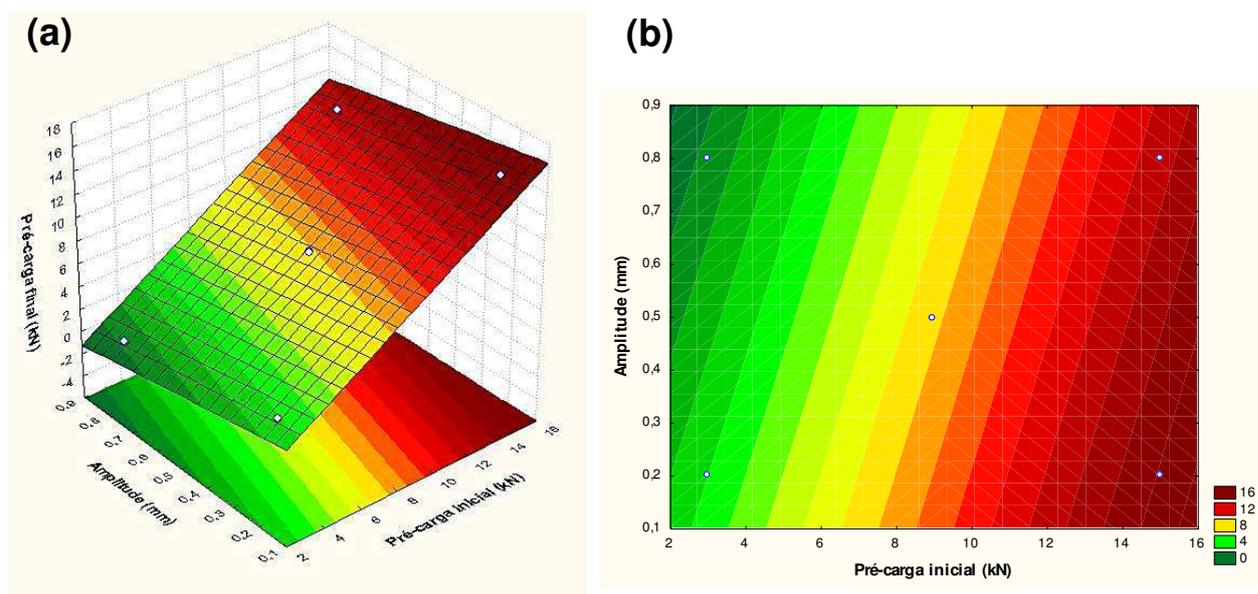
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado da Média (QM = SQ/GL)	F _{Calculado} (QM/QM _{RES})	*F _{Tabelado}
Efeito de d	148,8400	1	148,8400	864,4693	7,71
Efeito de T _f	6,7600	1	6,7600	39,2624	7,71
Interação (d x T _f)	0,0100	1	0,0100	0,0581	7,71
Regressão	155,6100	2	77,8050	451,8949	6,94
Resíduo	0,6887	4	0,1722	1,0000	---
Falta de ajuste	0,5903	2	0,2952	1,7143	6,94
Erro Puro	0,0984	6	0,0164	0,0952	6,16
Total	311,9087	6	---	---	
Coefficiente de correlação (R ²)	0,9978		---	---	

p = Número de Coeficientes do Modelo = 4;
n = Número de Experimentos = 7;
m = Número de Experimentos únicos = 5.

*RODRIGUES & IEMMA, (2009).

Fonte: Autoria própria.

Figura 100. Influência de A e P_i sobre a pré-carga final de um parafuso M6 de aço submetido a CTC.



Fonte: Autoria própria.

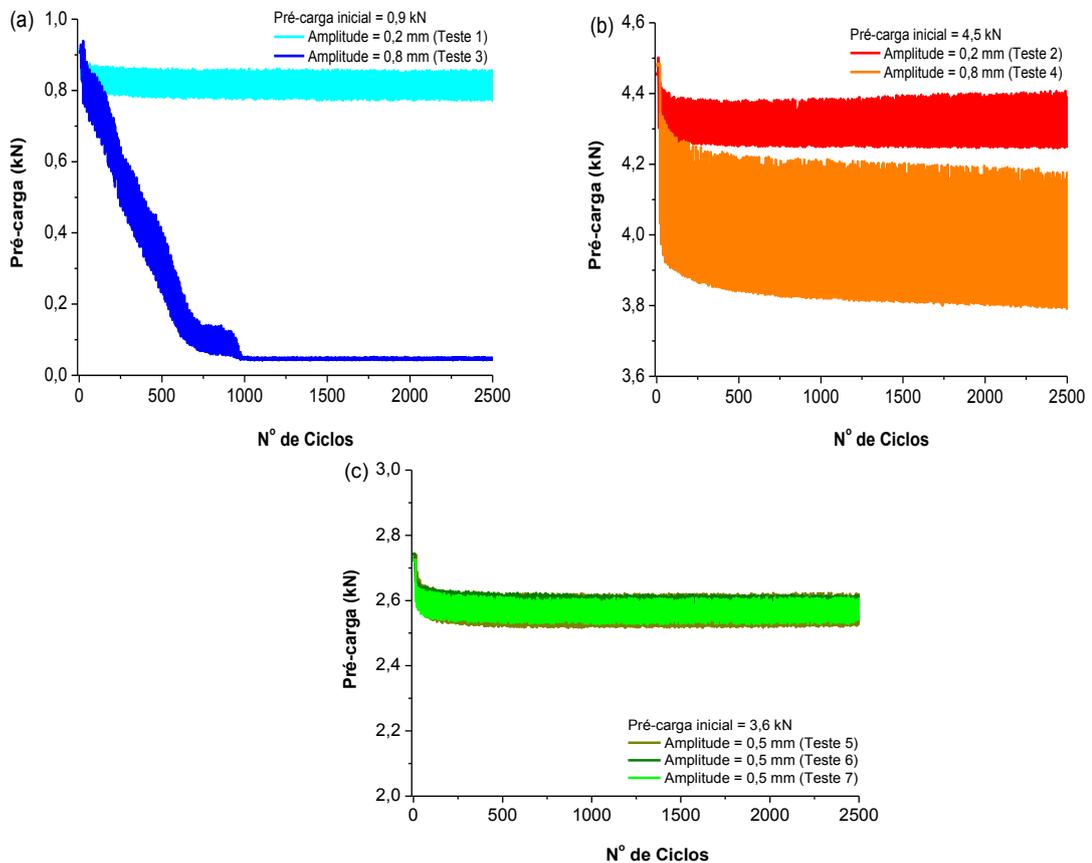
De acordo com a superfície de resposta, a pré-carga final retida ao término dos ciclos de cisalhamento aumenta com a pré-carga inicial e com menores valores de amplitude. Segundo PAI, (2002), um aumento na pré-carga inicial provoca um

aumento da força de atrito e, conseqüentemente, a força transversal necessária para superar o atrito também tem que ser maior. Portanto, há um na resistência ao afrouxamento espontâneo do fixador. Isso está em conformidade com os estudos realizados por HESS, (1998), que reportou que a melhoria na performance de fixadores submetidos a CTC está fortemente associada com o aumento da pré-carga, passos de roscas mais finos, aumento do atrito entre roscas, tolerâncias dimensionais mais finas e menores níveis de amplitude de excitação.

6.6.2.2. Ensaio de CTC em parafusos de LMF NiTi: AT e SE

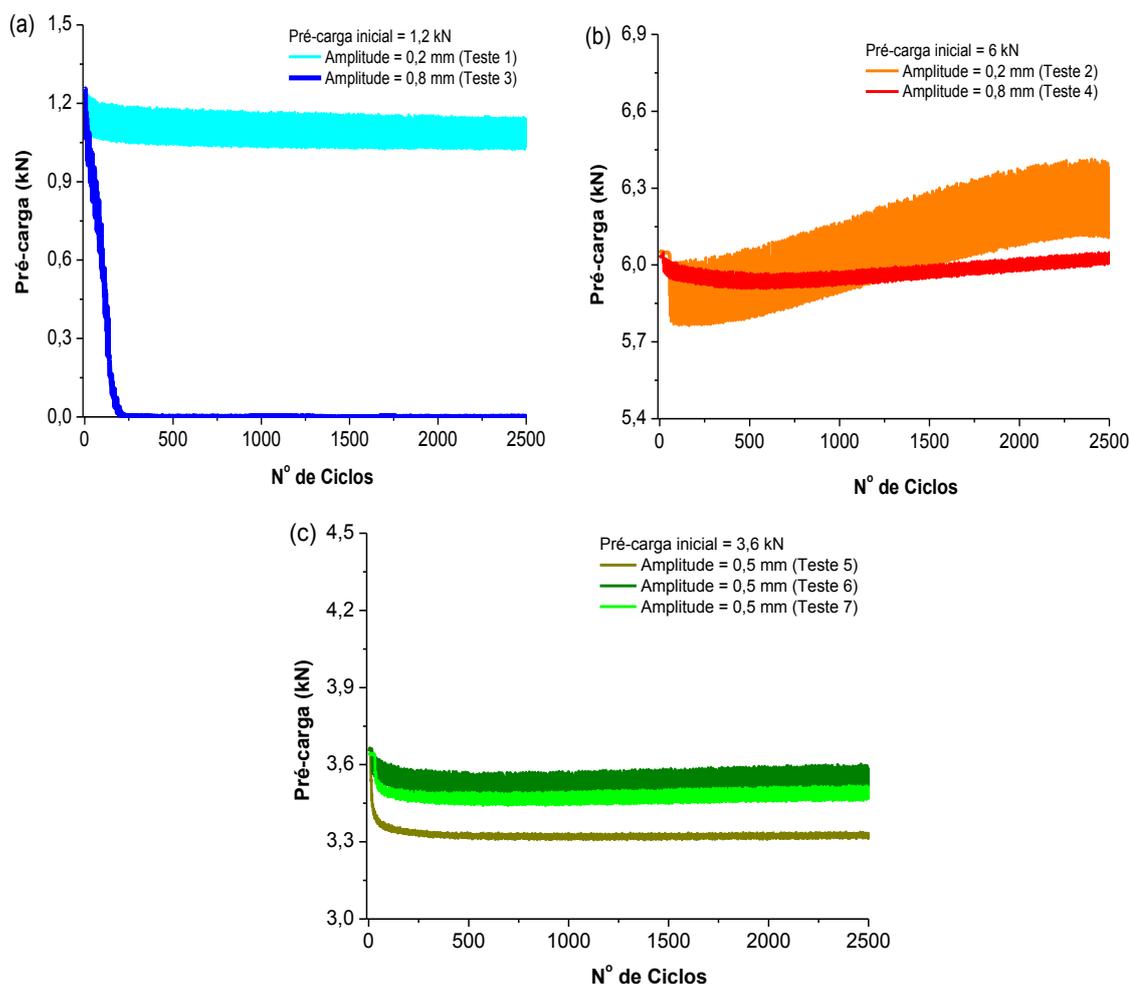
Os ensaios de CTC realizados em parafusos de LMF seguiram uma metodologia de PF de 2² testes mais 3 (três) no ponto central. Todas as curvas de pré-carga versus números de ciclos para os CPs AT e SE, podem ser encontradas nas Figuras 101 e 102, respectivamente.

Figura 101. Comportamento da pré-carga de parafusos AT submetidos a CTC.



Fonte: Autoria própria.

Figura 102. Comportamento da pré-carga de parafusos SE submetidos a CTC.



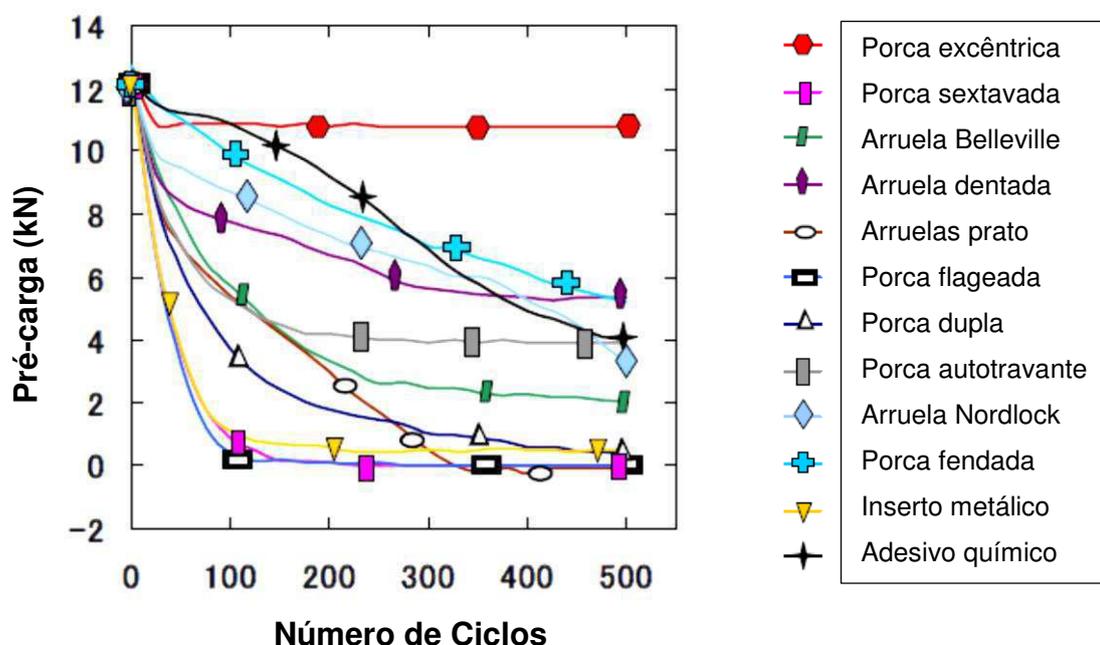
Fonte: Autoria própria.

Para efeito de comparação da evolução da pré-carga com o número de ciclos tem-se, na Figura 103, as curvas obtidas por SHOJI & SAWA, (2011) para vários dispositivos de travamento submetidos a CTC.

Comparando-se qualitativamente as curvas de pré-carga em função do número de ciclos obtidas para parafusos de LMF com aquelas obtidas por SHOJI & SAWA, (2011), pode-se afirmar que todas possuem o mesmo aspecto de decaimento da pré-carga. No entanto, os dispositivos de SHOJI & SAWA, (2011), ensaiados com amplitude de 0,35 mm e frequência de 30 Hz, apresentaram consideráveis perdas de pré-carga (com exceção da porca excêntrica) mesmo antes dos 500 ciclos de cisalhamento, alguns dos quais chegando a atingir a folga completa (pré-carga zero). No geral, os parafusos de LMF, alguns ensaiados com amplitudes de 0,5 e 0,8 mm,

apresentaram perdas de pré-carga apenas no início dos testes, entrando rapidamente em regime permanente.

Figura 103. Comportamento da pré-carga de vários dispositivos de travamento submetidos a CTC.

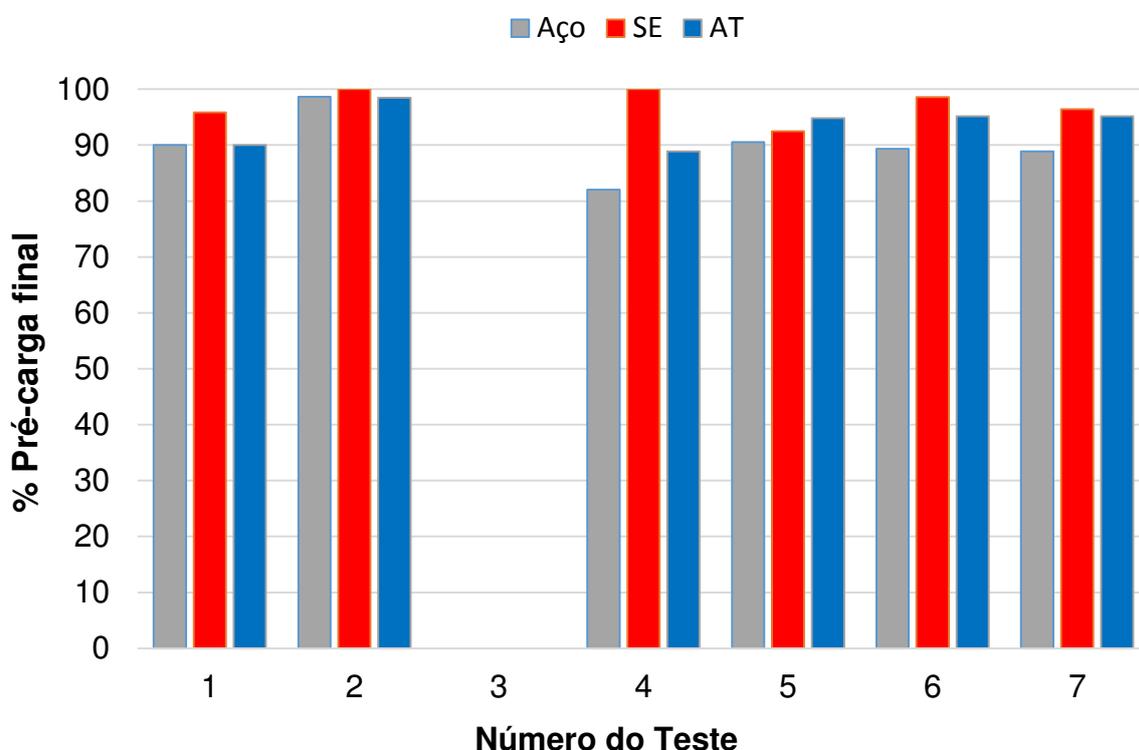


Fonte: Adaptado de SHOJI & SAWA, (2011).

Os resultados da Figura 102(b), sugerem que parafusos SE apresentaram uma tendência de aumento da pré-carga que, por sua vez, pode estar sendo provocado por um possível aumento da temperatura do conjunto durante os testes de CTC. Conforme discutido anteriormente, um aumento de temperatura acima de A_f provoca um aumento na rigidez do material, o que ocasiona num aumento na pré-carga do parafuso. Para efeito de comparação, os dados de pré-carga final de todos os testes de CTC realizados foram sumarizados nos gráficos mostrados na Figura 104.

Com a análise da Figura 104, percebe-se que, no teste 3 (três), todos os parafusos perderam completamente a pré-carga inicial após os 2500 ciclos de cisalhamento. Isso aconteceu porque as variáveis de entrada desse teste combinavam a menor pré-carga inicial (P_i) com a maior amplitude de vibração ($A = 0,8$ mm).

Figura 104. Comparativo do percentual da pré-carga final remanescente (P_f/P_i) para todos os ensaios de CTC realizados.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se afirmar que o parafuso SE (em vermelho) demonstrou o melhor desempenho do ponto de vista de resistência ao afrouxamento espontâneo dentre todos os parafusos, pois apresentou um percentual de pré-carga final maior do que 90 % para todos os testes realizados. O parafuso AT (em azul) apresentou valores de pré-carga final acima de 88 % para todos os testes. De modo geral, tanto os parafusos SE quanto os parafusos AT apresentaram melhores performances nos ensaios de CTC, quando comparados com os parafusos de aço.

Testes de CTC também foram realizados em parafusos de aço empregados com componentes especiais de travamento fornecidos pelas empresas *CISER* e pela *NordLock* (ver Tabela 33). Esses componentes especiais foram testados em parafusos de aço e comparados com os parafusos SE e AT. Os dados das variáveis utilizadas nesses ensaios são sumarizados na Tabela 33.

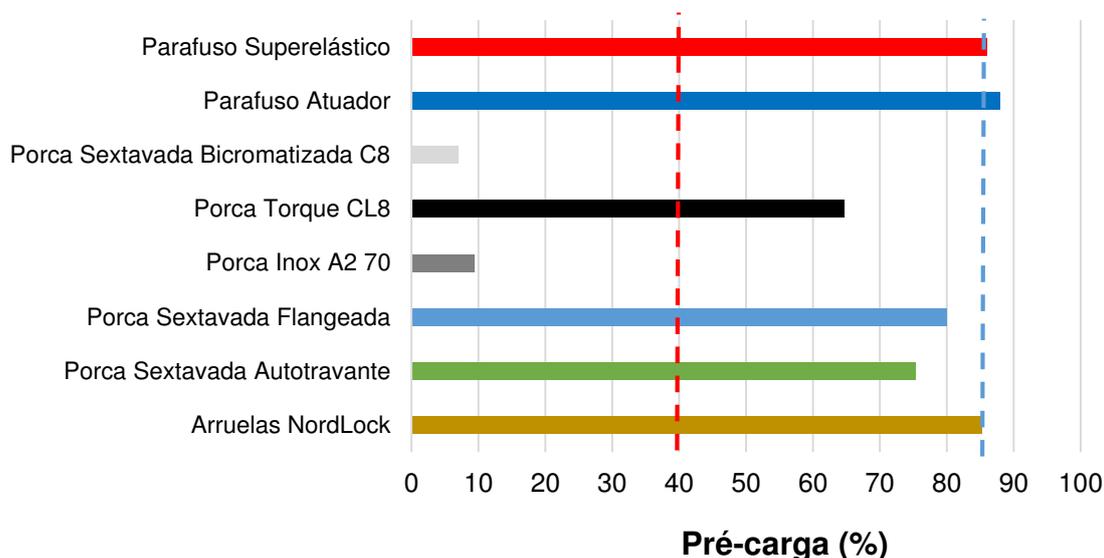
Tabela 33. Variáveis de entrada e de resposta usadas nos ensaios de CTC realizados em componentes especiais de travamento e em parafusos de LMF (SE e AT).

Componente testado	Variáveis de Entrada		Variável de Resposta
	Pré-carga inicial P_i , (kN)	Amplitude A , (mm)	Pré-carga final P_f , (kN)
Arruelas NordLock®	11,5	1,0	9,80
Porca Sextavada Autotravante	8,5	1,0	6,40
Porca Sextavada Flangeada	8,5	1,0	6,80
Porca Inox A2 70	8,5	1,0	0,80
Porca Torque CL8	8,5	1,0	5,50
Porca Sextavada Bicromatizada C8	8,5	1,0	0,59
Parafuso Atuador (AT)	5,0	1,0	4,40
Parafuso Superelástico (SE)	5,0	1,0	4,30

Fonte: Autoria própria.

Os valores de pré-carga inicial da Tabela 33 foram escolhidos com base na tensão limite de elasticidade do material. Em relação à amplitude de 1,0 mm, a mesma foi escolhida por estar ligeiramente acima da amplitude recomenda pela norma DIN 65151, que é de 0,8 mm, com o objetivo de submeter os fixadores à uma condição severa de vibração. A frequência utilizada foi a mesma dos ensaios de CTC anteriores (12,5 Hz). Um comparativo do percentual de pré-carga final dos componentes especiais de travamento testados, com os parafusos de LMF é mostrado na Figura 105. A linha tracejada azul delimita, de acordo com a norma DIN 65151, um nível de travamento excelente (pré-carga final acima de 85%). A linha tracejada vermelha delimita o nível mínimo de travamento aceitável (até 40 % de pré-carga final). Todos os valores para níveis de travamento de fixadores testados sob condições de CTC foram estabelecidos anteriormente, na Tabela 6.

Figura 105. Comparativo do percentual da pré-carga final (P_f/P_i) para ensaios de CTC em componentes especiais de travamento.



Fonte: Autoria própria.

Conforme indica a Figura 105, os parafusos de LMF NiTi (SE e AT) mais uma vez apresentaram rendimento, classificado pela norma DIN 65151, como excelente, mantendo mais de 85 % da pré-carga inicial após os 2500 ciclos de cisalhamento. De maneira geral, os parafusos de LMF, de acordo com o percentual de pré-carga remanescente, apresentaram o melhor rendimento dentre todos os componentes especiais de travamento. As porcas C8 e A2 70 foram reprovadas nos testes. Os demais fixadores apresentaram níveis de travamento aceitáveis, dadas as condições estabelecidas para os ensaios.

De acordo com ECCLES et al, (2009), embora existam porcas especiais que previnam o afrouxamento por CTC, esses elementos podem ser facilmente superados, dependendo das condições de operação da junta. Além disso, algumas dessas porcas, especialmente as que contém Nylon, apresentam uma perda de rendimento quanto ao cisalhamento cíclico à medida que vão sendo reutilizadas.

Do ponto de vista das propriedades das LMF de NiTi, as principais hipóteses para os parafusos de LMF apresentarem rendimento superior aos parafusos de aço e aos demais dispositivos de travamento são:

- No caso dos parafusos AT ($A_f > T_{ambiente}$), à elevada capacidade de amortecimento passivo da fase martensita termoelástica, devido à

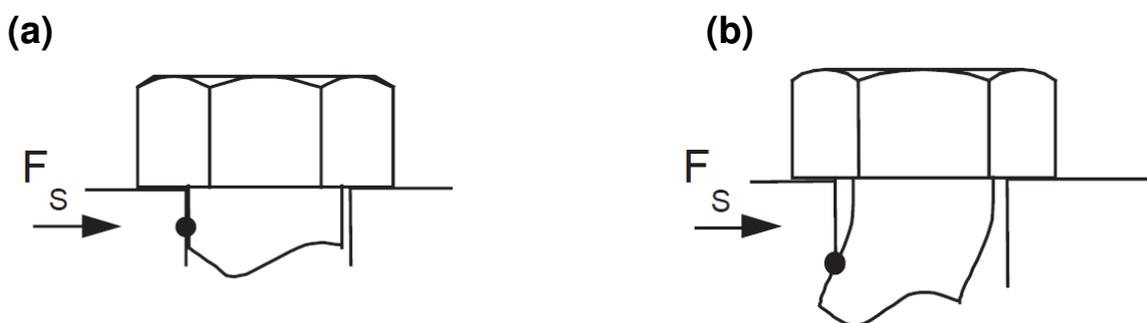
mobilidade das variantes de martensita ou das diferentes interfaces de fase (HUMBEECK, 2003) e aumento de rigidez em caso de autoaquecimento durante CTC;

- No caso dos parafusos SE ($A_f \sim T_{ambiente}$), à transformação de fase induzida por tensão, que ocorre gerando dissipação de energia (OTSUKA & WAYMAN, 1998) e também ao aumento de rigidez em caso de autoaquecimento durante CTC.

Do ponto de vista da dinâmica do CTC, o rendimento dos parafusos de LMF foi superior ao dos parafusos de aço e aos demais dispositivos de travamento devido:

- Ao baixo módulo de elasticidade das LMF NiTi, cerca de 30 a 75 GPa, comparado com o do aço, que é da ordem de 210 GPa (MATERIAL PROPERTY DATA, 2014). Segundo SANCLEMENTE & HESS, (2007), isso propicia uma melhoria na capacidade do fixador em resistir ao afrouxamento espontâneo, pois o mesmo está associado com o momento de flexão (S) nas roscas, (ver Figura 48). Quando submetidos a CTC, materiais com baixos módulos de elasticidade apresentam menores momentos de flexão nas roscas e, portanto, haverá uma diminuição do deslizamento localizado, o que propicia uma distribuição mais uniforme da força de reação nas roscas, durante os ciclos de carregamento (ver Figura 47). Além disso, fixadores fabricados com materiais com baixos módulos e submetidos a CTC sofrem contato lateral do eixo do fixador com a parede do furo (ver Figura 106) e, quando isso ocorre, a maior parcela da força transversal é transmitida através desse ponto de contato (ver Figura 47a). Sendo assim, haverá redução/eliminação do deslizamento na cabeça do parafuso, o que implica num aumento da capacidade de retenção da pré-carga aplicada. Esse efeito foi observado por HESS & PAI, (2002), SANCLEMENTE & HESS, (2007) e PAI, (2002).

Figura 106. Contato lateral durante CTC. (a) Material com módulo de elasticidade elevado: contato lateral por deslizamento. (b) Material com módulo de elasticidade baixo: contato lateral por flexão.



Fonte: Adaptado de PAI & HESS, (2002).

JUNKER, (1969) reportou que quando a força de atrito é superada na direção transversal devido à vibração, a junta se torna “livre de atrito” em outras direções. Conseqüentemente, se houver deslizamento da cabeça ou das roscas do parafuso, haverá redução dos coeficientes de atrito entre as roscas (μ_{ts}) e na interface da cabeça do parafuso (μ_{ns}). Dessa forma, o torque de resistência ao afrouxamento (T_R) será superado pelo torque agindo na direção do afrouxamento (T_{TL}), conforme estabelecido pelas Equações 15 e 16. Portanto, haverá afrouxamento espontâneo e perda de pré-carga do fixador. Por outro lado, se os parafusos apresentam resistência ao deslizamento, como no caso dos parafusos de LMF, os valores dos coeficientes de atrito são mantidos durante os ciclos de ensaio e, por conseguinte, o T_R será maior T_{TL} , e não ocorrerá afrouxamento.

No caso da flexão mostrada na Figura 106(b), os parafusos SE apresentam uma vantagem sobre os parafusos AT, pois os primeiros apresentam níveis de recuperação mais elevados (cerca de 5%) do que os parafusos no estado martensítico.

6.6.1.2.1. Análise de Variância (ANOVA)

Os resultados para os ensaios de CTC, mostrados nas Figuras 101 e 102, foram sumarizados nas Tabelas 34 e 35.

Tabela 34. Variáveis de entrada e de resposta para os ensaios de CTC em parafusos AT.

Ensaio/ CP	Variáveis de Entrada		Variável de Resposta
	Pré-carga inicial (kN)	Amplitude (mm)	Pré-carga final (kN)
1 CP AT 4	0,9 (- 1)	0,2 (- 1)	0,81
2 CP AT 4	4,5 (+ 1)	0,2 (- 1)	4,43
3 CP AT 5	0,9 (- 1)	0,8 (+ 1)	0,00
4 CP AT 5	4,5 (+ 1)	0,8 (+ 1)	4,00
5 CP AT 6	2,7 (0)	0,5 (0)	2,56
6 CP AT 6	2,7 (0)	0,5 (0)	2,57
7 CP AT 6	2,7 (0)	0,5 (0)	2,57

Fonte: Autoria própria.

Tabela 35. Variáveis de entrada e de resposta para os ensaios de CTC em parafusos SE.

Ensaio/ CP	Variáveis de Entrada		Variável de Resposta
	Pré-carga inicial (kN)	Amplitude (mm)	Pré-carga final (kN)
1 CP SE 2	1,2 (- 1)	0,2 (- 1)	1,15
2 CP SE 2	6 (+ 1)	0,2 (- 1)	6,00
3 CP SE 3	1,2 (- 1)	0,8 (+ 1)	0,00
4 CP SE 3	6 (+ 1)	0,8 (+ 1)	6,00
5 CP SE 4	3,6 (0)	0,5 (0)	3,33
6 CP SE 4	3,6 (0)	0,5 (0)	3,55
7 CP SE 4	3,6 (0)	0,5 (0)	3,47

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados das Tabelas 34 e 35, realizou-se uma análise estatística de variância e, com isso, calculou-se o nível de significância “ α ” dos fatores de controle sobre a pré-carga final (P_f). Esses níveis podem ser visualizados na Tabela 36. Níveis

de significância menores que 0,05, foram considerados estatisticamente significativos, de acordo com valores sublinhados e em negrito.

Tabela 36. Nível de significância dos fatores de controle sobre a variável de resposta.

Fatores	Parafusos AT	Parafusos SE
	Valores de α , Pré-carga final (P_f)	Valores de α , Pré-carga final (P_f)
Média	<u>0,000061</u>	<u>0,000011</u>
Pré-carga inicial (P_i)	<u>0,000289</u>	<u>0,000049</u>
Amplitude (A)	<u>0,049537</u>	<u>0,032835</u>
Interação, $P_i \times A$	0,399784	<u>0,032835</u>

Fonte: Autoria própria.

Os modelos matemáticos empíricos para a pré-carga final (P_f) dos parafusos AT e SE, codificados com os seus respectivos parâmetros estatísticos, são apresentados nas Equações 25 e 26, respectivamente.

$$P_f(AT) = 2,4200 + 1,9050A - 0,3100P_i \pm 0,1459 \quad (25)$$

$$P_f(SE) = 3,3600 + 2,7125A - 0,2875P_i + 0,2875AP_i \pm 0,1001 \quad (26)$$

O efeito da interação das variáveis apresentou nível de significância maior do que o estabelecido ($\alpha = 0,75469 > 0,05$) e, dessa forma, não foi considerado no modelo. Níveis de significância menores que 0,05 indicam efeitos estatisticamente significativos.

De acordo com os valores de α mostrados na Tabela 36, todos os fatores apresentaram níveis de significância menores do que 0,05, indicando efeitos estatisticamente significativos, exceto a interação das variáveis para os parafusos AT. Portanto, o efeito da interação ($P_i \times A$), que apresentou nível de significância maior do que o estabelecido ($\alpha = 0,399784 > 0,05$), não foi considerado no modelo, de acordo com a Equação 25.

Os resultados da análise de variância (ANOVA) dos fatores de influência na pré-carga final (P_f), de ambos os parafusos, estão ilustrados nas Tabelas 37 e 38.

Tabela 37. Análise de variância (ANOVA) para os fatores de influência na resposta P_f em parafusos AT submetidos a CTC.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado da Média (QM = SQ/GL)	F _{Calculado} (QM/QM _{RES})	*F _{Tabelado}
Efeito de Pi	14,5161	1	14,5161	389,4326	7,71
Efeito de A	0,3844	1	0,3844	10,3125	7,71
Interação	0,0361	1	0,0361	0,9685	7,71
Regressão	14,9366	2	7,4683	200,3568	6,94
Resíduo	0,1491	4	0,0373	1,0000	---
Falta de ajuste	0,1278	2	0,0639	1,7143	6,94
Erro Puro	0,0213	6	0,0036	0,0952	6,16
Total	30,0223	6	---	---	---
Coefficiente de correlação (R ²)	0,9950		---	---	---

p = Número de Coeficientes do Modelo = 3;
n = Número de Experimentos = 7;
m = Número de Experimentos únicos = 5.

*RODRIGUES & IEMMA, (2009).

Fonte: Autoria própria.

Tabela 38. Análise de variância (ANOVA) para os fatores de influência na resposta P_f em parafusos SE submetidos a CTC.

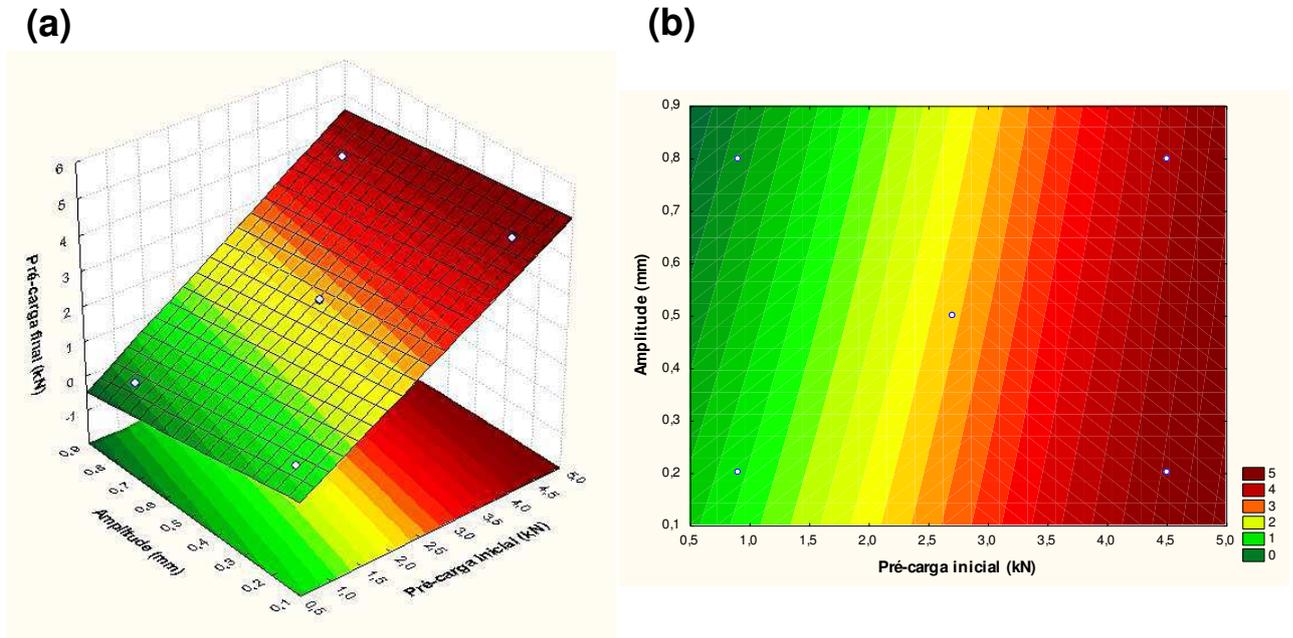
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Quadrado da Média (QM = SQ/GL)	F _{Calculado} (QM/QM _{RES})	*F _{Tabelado}
Efeito de d	29,4306	1	29,4306	1678,7519	7,71
Efeito de T _f	0,3306	1	0,3306	18,8589	7,71
Interação (d x T _f)	0,3306	1	0,3306	18,8595	7,71
Regressão	30,0919	2	15,0459	858,2351	6,94
Resíduo	0,0701	4	0,0175	1	---
Falta de ajuste	0,0601	2	0,0300	1,7143	6,94
Erro Puro	0,0100	6	0,0017	0,0952	6,16
Total	60,3240	6	---	---	---
Coefficiente de correlação (R ²)	0,9988		---	---	---

p = Número de Coeficientes do Modelo = 3;
n = Número de Experimentos = 7;
m = Número de Experimentos únicos = 5.

*RODRIGUES & IEMMA, (2009).

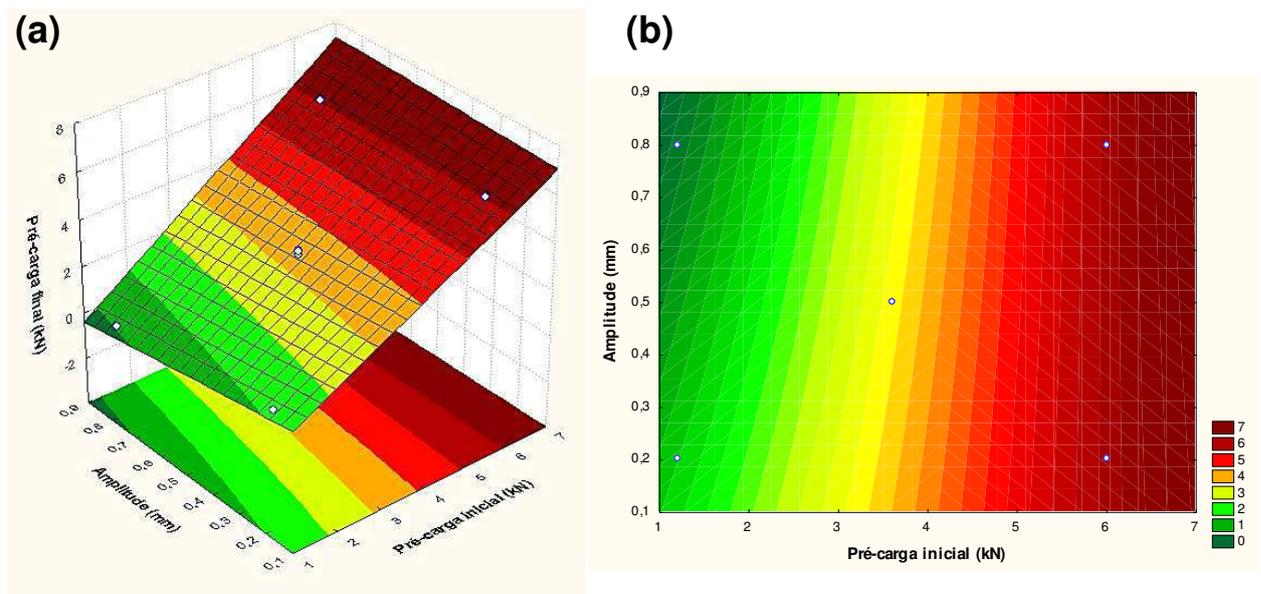
Fonte: Autoria própria.

Figura 107. Influência de A e P_i sobre a pré-carga final de um parafuso AT submetido a CTC.



Fonte: Autoria própria.

Figura 108. Influência de A e P_i sobre a pré-carga final de um parafuso SE submetido a CTC.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de $F_{\text{Calculado}}$ para os parafusos AT e SE demonstraram que os modelos foram estatisticamente significativos, pois $F_{\text{Calculado}} > F_{\text{Tabelado}}$ para todos os fatores, exceto a interação ($P_i \times A$) nos parafusos AT, que apresentou $\alpha > 0,05$. Conforme indica a ANOVA para os dois tipos de parafusos, a pré-carga inicial (P_i) e a amplitude (A) influenciaram significativamente nos valores da pré-carga final (P_f). Essa influência pode ser visualizada nas superfícies de resposta e curvas de contorno mostradas nas Figuras 107 e 108. As superfícies de resposta e curvas de contorno de ambos os parafusos mostraram que a pré-carga final retida ao término dos ciclos de cisalhamento aumenta com a pré-carga inicial e com menores valores de amplitude.

O guia de procedimentos para projeto de juntas aparafusadas (BICKFORD, 2007) VDI 2230 recomenda o uso do maior nível de pré-carga possível, sem causar danos ao fixador, para evitar a separação da união devido ao CTC. Os resultados experimentais obtidos para os parafusos de LMF indicaram que esta recomendação é válida, para as condições de pré-carga e amplitude estudadas. Um aumento na pré-carga inicial fornecida ao parafuso provoca um aumento da força de atrito e, conseqüentemente, a força transversal necessária para superar o atrito também será maior.

Os benefícios do baixo módulo de elasticidade das LMF no aumento da resistência ao afrouxamento espontâneo já foram discutidos anteriormente. A gama de aplicações para fixadores feitos com esses materiais está normalmente limitada às exigências no que diz respeito à corrosão, peso e condutividade térmica ou elétrica. Os resultados apresentados para os parafusos de LMF revelaram uma vantagem com relação resistência à vibração para este tipo de fixador. As desvantagens incluem custo mais elevado e baixa capacidade de carga mais baixa em relação ao aço, para uma dada dimensão.

6.7. Caracterização Morfológica: MEV

6.7.1. Superfícies de Fratura

Muitos dos parafusos de LMF NiTi romperam após serem submetidos aos diversos testes durante a fase de caracterização termomecânica. Os parafusos

fraturados podem ser visualizados na Figura 109. O tipo de teste durante o qual cada CP foi fraturado está descrito na Tabela 39.

Figura 109. Parafusos de LMF NiTi fraturados durante a caracterização termomecânica.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 39. Detalhamento das falhas ocorridas nos diversos parafusos NiTi.

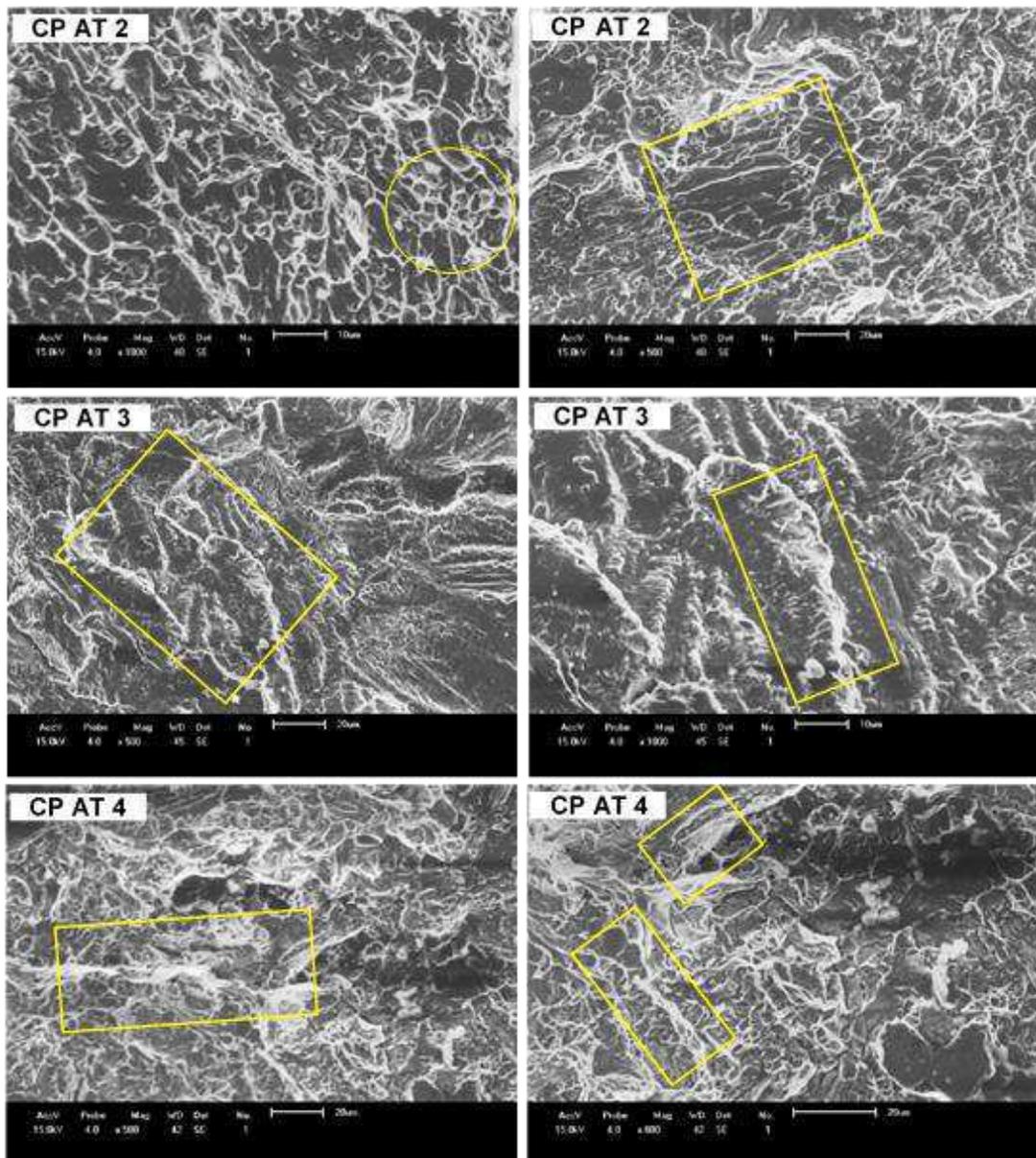
Parafuso	Ocorrência do rompimento	Descrição
CP AT 2	Aplicação de torque	Preparação para o 1º teste de CTC
CP AT 3	Aplicação de torque	Falhou depois de uma sequência de ensaios de CTC
CP AT 6	Aplicação de torque	Preparação para o 1º teste de CTC
CP AT 4	Ensaio de tração	Falhou durante deformação ($\epsilon > 6\%$) para testes de GPT
CP AT 5	Ensaio de tração	Falhou durante deformação ($\epsilon > 5\%$) para testes de GPT
CP SE 4	Caracterização preliminar	Falhou durante o 1º ciclo de estabilização mecânica ($\epsilon = 5\%$)
CP SE 6	Teste ISO	Falhou com deformação de 5% em $T = 40^\circ\text{C}$
CP SE 5	Aplicação de torque	Falhou depois de uma sequência de ensaios de CTC
CP SE 2	Teste ISO	Falhou com deformação de 4% em $T = 50^\circ\text{C}$
CP SE 8	Teste ISO	Falhou com deformação de 5% em $T = 55^\circ\text{C}$

Fonte: Autoria própria.

Todos os parafusos fraturaram na raiz da rosca, entre o primeiro e o quarto filete, considerando o corpo do parafuso como referência. Isso acontece devido à concentração de tensão associada à pequena área da raiz. Esse fato também foi observado por ABOLMAALI et al, (2006) e FANG et al., (2014), que testaram parafusos roscados, fabricados de uma liga NiTi, mostrados na Figura 21.

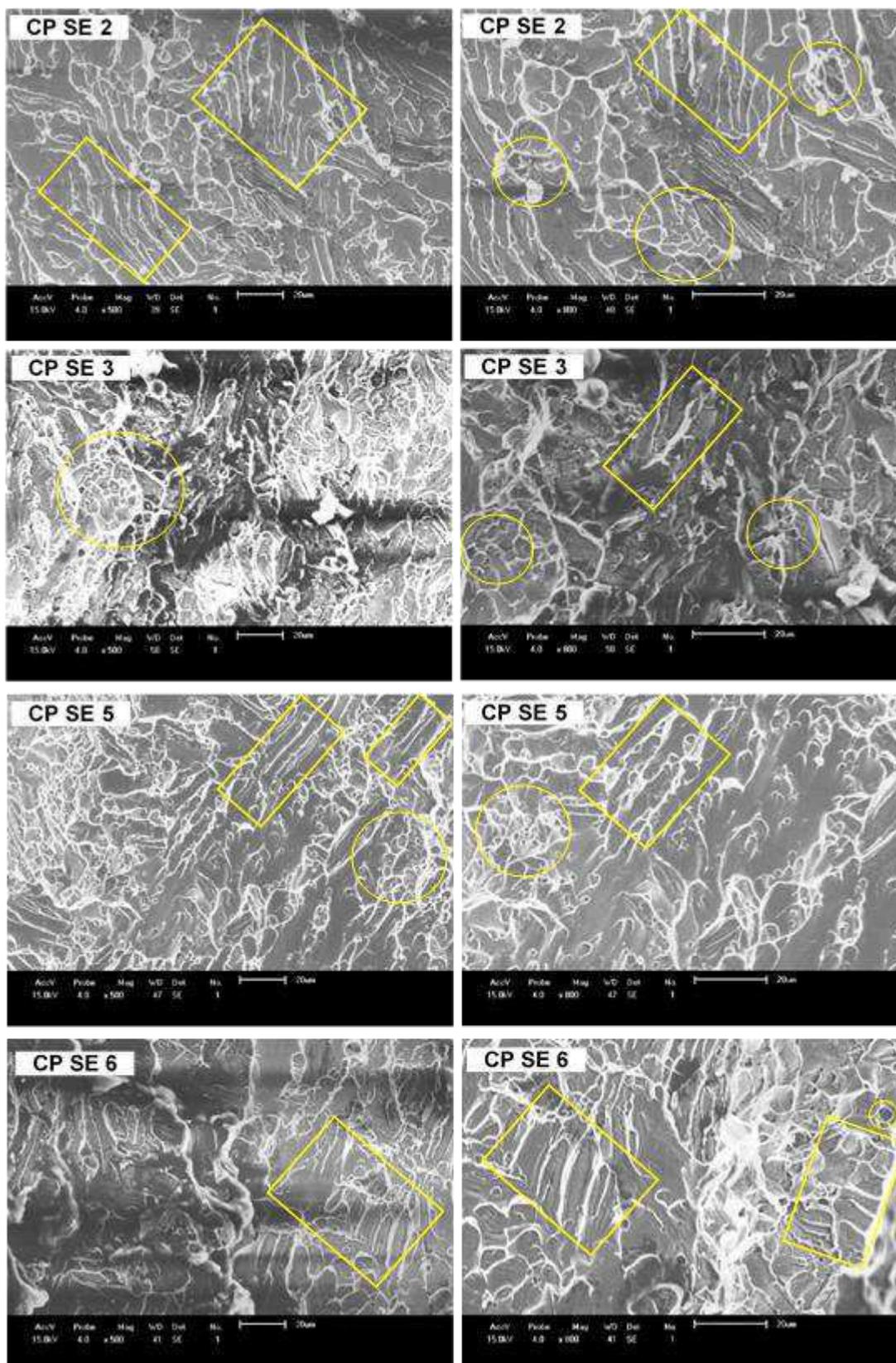
A partir dos parafusos fraturados realizaram-se as análises fractográficas pela técnica de MEV. As imagens obtidas são mostradas na Figura 110. O ponto de referência para tomada das imagens foi o centro dos CPs.

Figura 110. Imagens em MEV das superfícies de fratura dos CPs AT.



Fonte: Autoria própria.

Figura 111. Imagens em MEV das superfícies de fratura dos CPs SE.

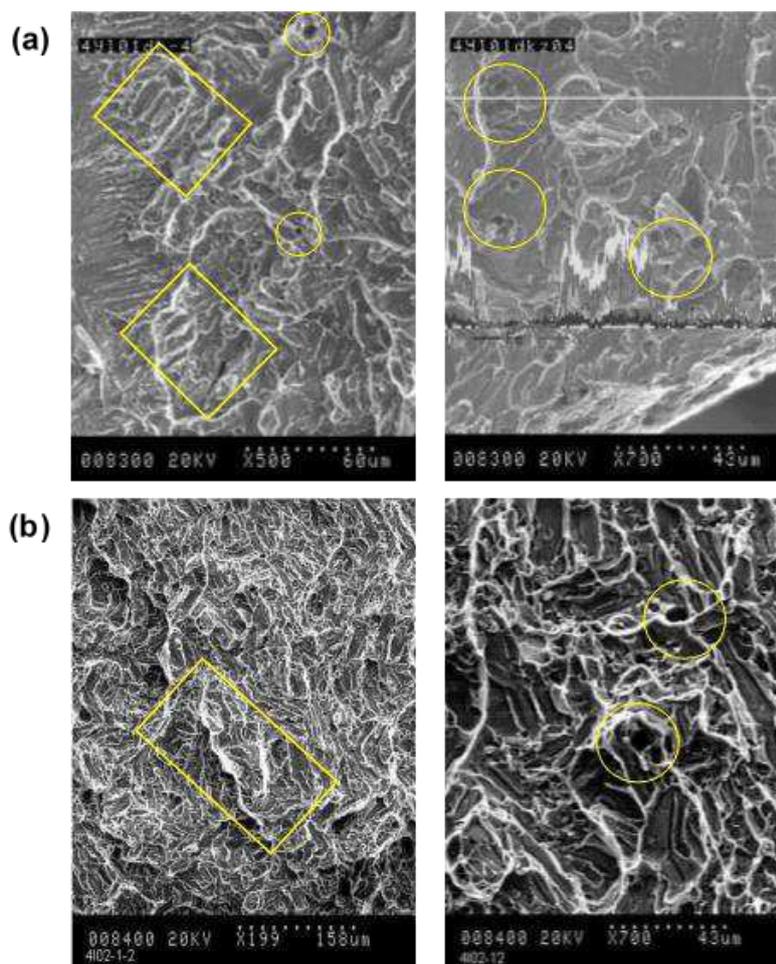


Fonte: Autoria própria.

De acordo com CHEN et al, (2005) e GLEN et al, (2001) o mecanismo de fratura em LMF de NiTi submetidas a tração é basicamente a clivagem. O padrão quase-clivagem prevalece em todas superfícies de fratura mostradas nas Figuras 110 e 111. Embora a clivagem seja predominante, a presença de *dimples* rasos está associada à ocorrência de deformações plásticas durante a ruptura, causadas pela orientação de martensita pela tensão aplicada (WANG et al, 2008). Por essa razão, a densidade de *dimples* é maior nos CPs AT, que estão na fase martensítica à temperatura ambiente (~27°C). As facetas de clivagem estão destacadas pelos retângulos em amarelo, enquanto os *dimples* estão destacados por círculos.

Para efeito de comparação, algumas superfícies de fratura obtidas por CHEN et al, (2005) em corpos-de-prova padrão de NiTi são mostradas na Figura 112.

Figura 112. Superfícies de fratura de corpos-de-padrão de NiTi submetidos a ensaios de tração:
(a) CP com entalhe e (b) CP liso.



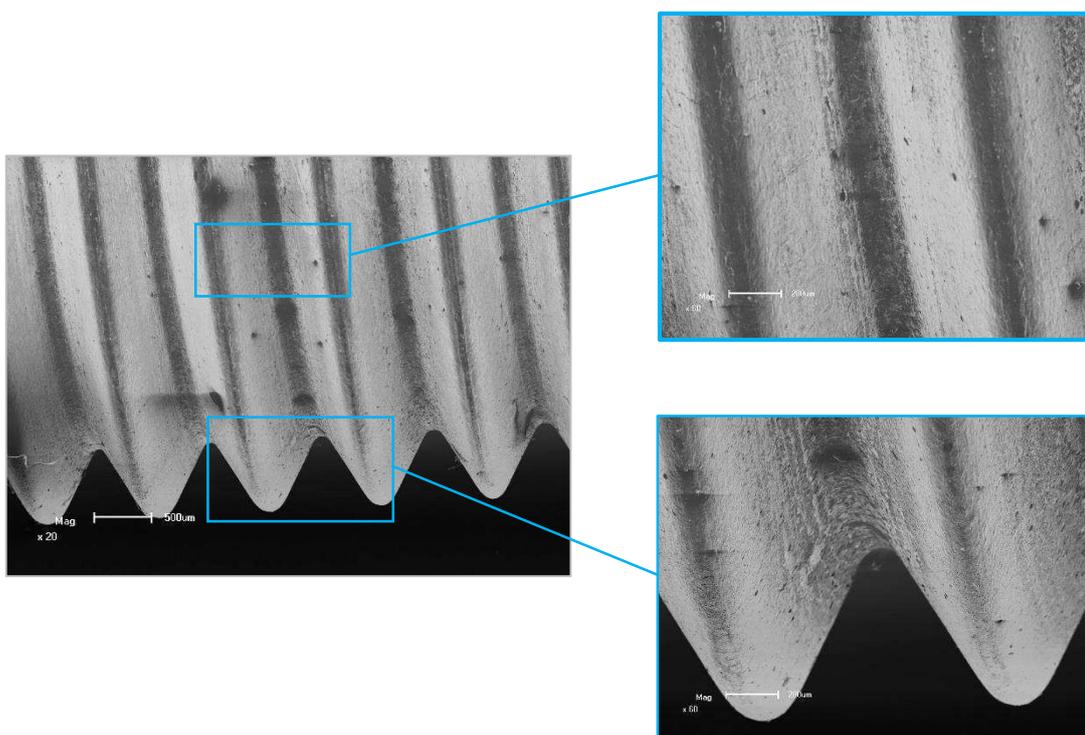
Fonte: CHEN et al, (2005).

A Figura 112(a) mostra as superfícies típicas de fratura de um CP padrão com entalhe, feito a partir de uma LMF de NiTi, testado à temperatura ambiente. O padrão de quase-clivagem predomina em toda a superfície da fratura. A Figura 112(b) ilustra uma superfície de fratura de um CP de NiTi liso, submetido a um ensaio de tração. A superfície de ruptura mostra um padrão de fratura significativamente mais resistente do que as observadas no CP entalhado. Nesse caso, foram encontradas facetas de clivagem muito mais finas e uma maior densidade de *dimples*. Segundo CHEN et al, (2005), as diferentes características das fraturas entre os CPs entalhado e liso mostraram que a liga NiTi é bastante sensível às condições de tensão.

6.7.2. Danos Causados por Ensaio CTC

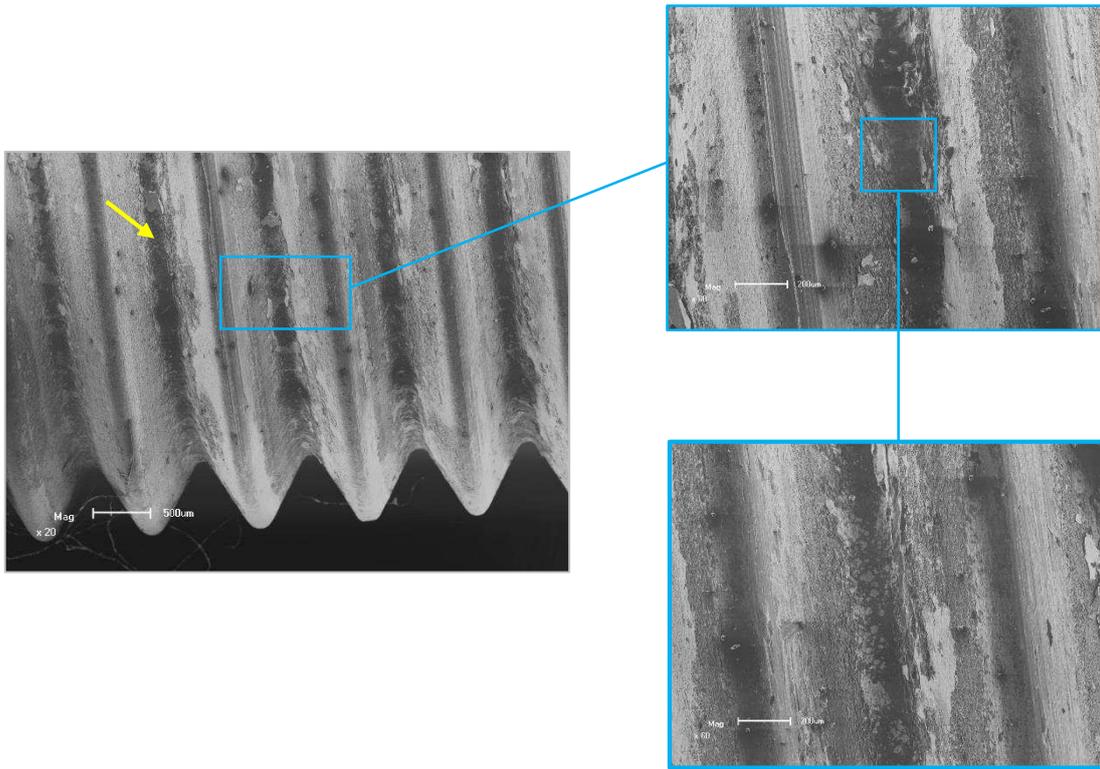
Alguns dos parafusos submetidos aos ensaios de CTC passaram por uma caracterização de qualidade da usinagem através da técnica de MEV, focando nas superfícies das roscas e usando o parafuso comercial M6 de aço como referência. Essas superfícies podem ser visualizadas na Figura 113 e 114.

Figura 113. Superfície do parafuso M6 de aço como recebido.



Fonte: Autoria própria.

Figura 114. Superfície do parafuso M6 de aço depois de 2500 ciclos de CTC.

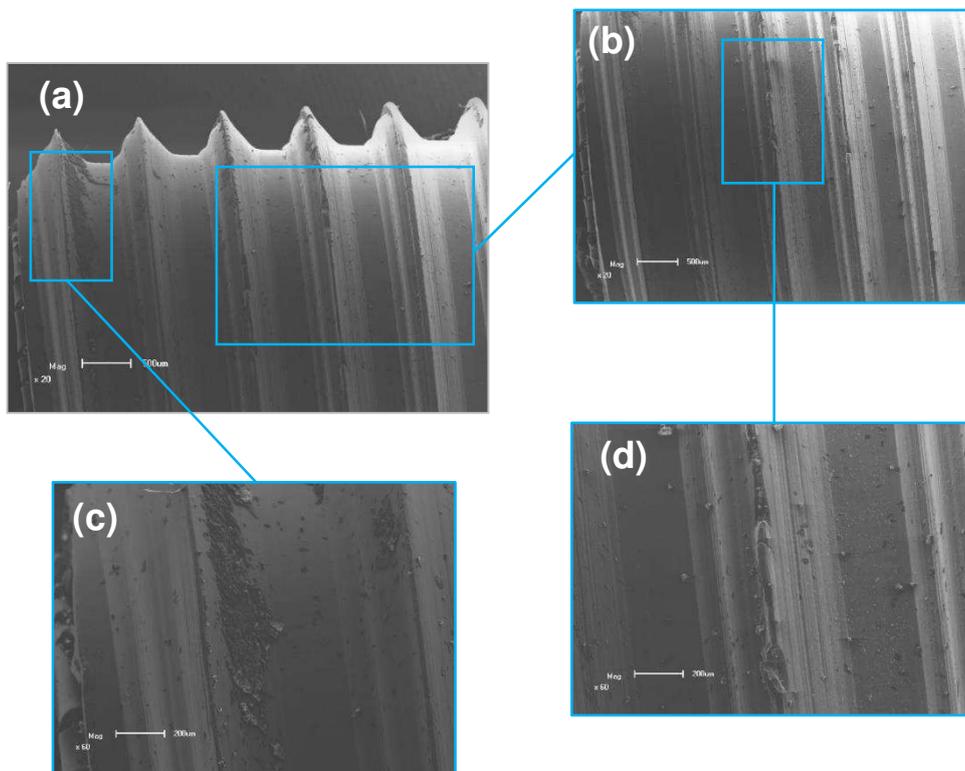


Fonte: Autoria própria.

A partir da análise comparativa das imagens, é possível perceber que o parafuso de aço sofreu danos de desgaste depois de realizados os ciclos de cisalhamento. O desgaste ocorreu principalmente na raiz da rosca, conforme mostrado nas ampliações da Figura 114 (detalhe da seta amarela). Essa região sofre a ação mecânica das roscas da porca e, por ter área pequena, a tensão se torna muito elevada, o que causa danos ao material do parafuso.

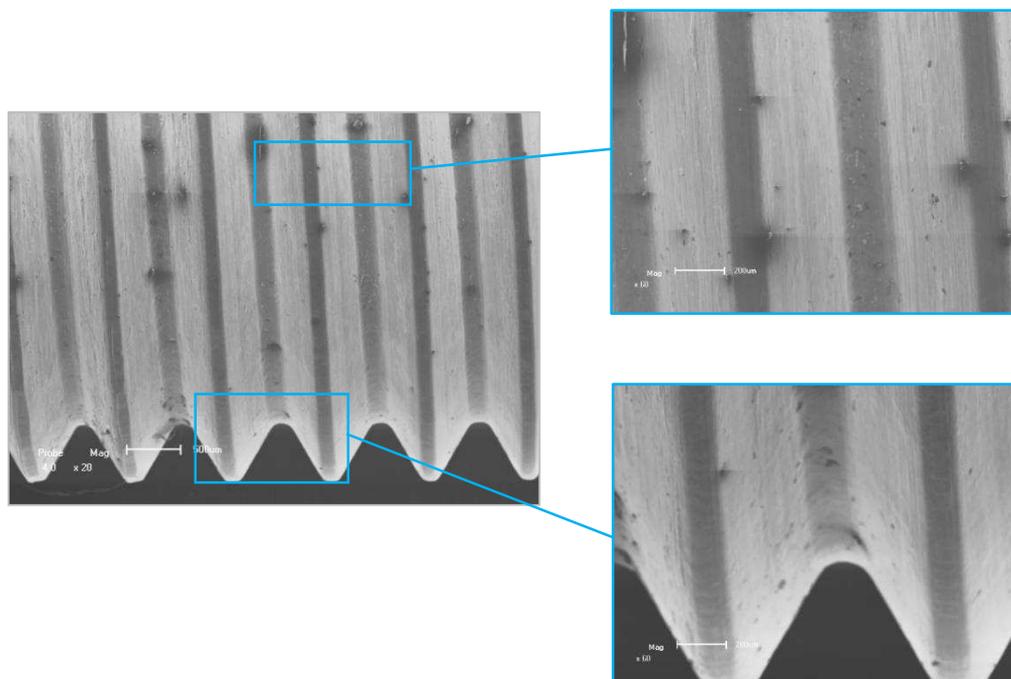
As superfícies das roscas dos parafusos de LMF NiTi são mostradas nas Figuras 115 e 116.

Figura 115. Superfície das roscas do parafuso de LMF NiTi CP AT 3 submetido a 7500 ciclos de CTC.



Fonte: Autoria própria.

Figura 116. Superfície das roscas do parafuso de LMF NiTi CP SE 5.



Fonte: Autoria própria.

As imagens obtidas para os parafusos de LMF NiTi novos são semelhantes às aquelas obtidas para o parafuso de aço como recebido (ver Figura 113), ou seja, não há presença de nenhum dano importante nas roscas dos CPs de LMF, principalmente o CP SE 5 (Figura 116). O CP AT 3 apresentou um leve dano de desgaste no filete (Figura 116d), devido a sua reutilização em 3 (três) testes de CTC. Além disso, nesse mesmo CP, houve a presença de uma camada de um outro material depositado em alguns dos filetes (ver detalhe da Figura 115c). Esse material provavelmente é oriundo da porca, que se desgastou, durante a realização dos ciclos, por ser fabricada a partir de um material mais mole (Aços doces e bronze, geralmente), para facilitar sua usinagem (SHIGLEY et al, 2006).

As causas que levaram aos danos de desgaste nas superfícies da rosca ainda necessitam de um estudo mais detalhado, sendo esta apenas uma seção introdutória, que teve como principal objetivo fomentar pesquisas futuras.

7. CONCLUSÕES

A partir dos resultados discutidos nesse trabalho de pesquisa, é possível concluir que:

Caracterização preliminar das barras de LMF NiTi:

- A caracterização térmica via DSC, das barras adquiridas comercialmente permitiu a determinação das temperaturas de transformação de fase das mesmas e, assim, foi possível identificar duas barras com comportamento bastante diferentes: a barra 1, menos rica em Ni (55,16Ni-Ti), apresentava-se na fase martensítica à temperatura ambiente, o que permitiu a fabricação de parafusos com EMF, chamados de Atuadores (AT); a barra 2, mais rica em Ni (55,91Ni-Ti), encontrava-se totalmente austenítica, o que permitiu a fabricação de parafusos com características superelásticas à essa temperatura, chamados de SE;

Fabricação dos parafusos de LMF:

- A combinação de técnicas de usinagem, torneamento do corpo do parafuso e fresamento das roscas, se mostrou adequada para fabricação dos parafusos de LMF NiTi a partir de ambas as barras (martensítica e austenítica);
- Durante a fase de torneamento do corpo do parafuso foi possível estabelecer parâmetros de corte para as barras de LMF NiTi, baseando-se nas informações fornecidas pelos fabricantes das ferramentas;
- Durante a fase de fresamento das roscas foi possível estabelecer uma programação de trajetória específica para a ferramenta que, em combinação com uma melhoria da fixação dos CPs, permitiu a fabricação dos parafusos de LMF NiTi com sucesso.

Caracterização dos cavacos de LMF:

- A caracterização térmica dos cavacos, via DSC e RET, permitiu concluir que o torneamento em diferentes velocidades de corte atua como um tratamento térmico de recozimento no material. Isso foi estabelecido com base em resultados encontrados na literatura para tratamentos térmicos em LMF de NiTi. De maneira geral, o aumento da velocidade de corte fez com

que as temperaturas de transformação de fase (A_s , A_f , M_s e M_f) tendessem a aumentar de maneira praticamente linear, enquanto que R_s e R_f tenderam a diminuir também de maneira praticamente linear;

- Os ciclos mecânicos realizados nos cavacos, através de ensaios de tração no DMA, permitiram a estabilização superelástica dos mesmos. Além disso, a partir desses ensaios, é possível concluir que há uma diminuição da rigidez dos cavacos à medida que a velocidade de corte aumenta. Esta diminuição pode estar associada ao processo de usinagem que, conforme já mostrado, funciona como um tratamento térmico de recozimento. Portanto, o aumento da velocidade de corte propicia um alívio de tensões no material que, provavelmente, encontrava-se encruado graças ao processo de fabricação original da barra de LMF NiTi;
- Os valores de microdureza Vickers obtidos para os cavacos não apresentaram mudanças significativas em função do aumento da velocidade de corte. No entanto, os valores encontrados neste trabalho estão dentro da faixa de valores encontrada na literatura.

Caracterização térmica dos parafusos de LMF:

- As temperaturas de transformação de fase, determinadas via RET, medidas nas roscas e no corpo (parte não rosçada) dos parafusos não apresentaram diferenças significativas ($< 2^\circ\text{C}$ entre as medições para a mesma temperatura). Portanto, as medições das temperaturas de transformação de fase realizadas na parte não rosca são confiáveis;
- O tratamento térmico com aquecimento estabelecido em 350°C durante 30 minutos, seguido de resfriamento em água a temperatura ambiente ($\sim 27^\circ\text{C}$), se mostrou adequado para alívio de tensões de usinagem nos parafusos de LMF. A determinação das temperaturas de transformação de fase antes e depois desse tratamento mostrou que as diferenças obtidas não foram significativas.

Caracterização preliminar dos parafusos de LMF:

- Os ciclos de carregamento/descarregamento promoveram a estabilização mecânica dos parafusos de LMF NiTi, graças à saturação de deformações plásticas no material.

Ensaio Superelásticos Isotérmicos (ISO):

- Os Ensaio ISO demonstraram que os parafusos SE apresentam um alto nível de recuperação de deformações, de cerca de 4 % em tração uniaxial. Além disso, no estado superelástico, os parafusos SE apresentaram a capacidade de ainda aumentar sua rigidez em função da temperatura;
- A variação de resistência elétrica dos parafusos SE, medida durante os ensaios ISO, apresentou uma relação linear com a deformação. Sendo assim, foi possível ajustar, através de um software, as respectivas equações da reta para cada nível de temperatura estudado, com boa aproximação estatística, tendo em vista que os respectivos coeficientes de regressão estão bem próximos de 1.

Ensaio de Geração de Pré-carga em função da Temperatura (GPT):

- Os ensaios de GPT nos parafusos AT demonstraram que a pré-carga gerada por tendência de contração via EMF apresenta uma forte dependência da deformação inicial do parafuso e da temperatura final de aquecimento. A análise da superfície de resposta dos dados do planejamento experimental mostrou que menores deformações combinadas com maiores temperaturas finais de aquecimento geraram os maiores níveis de pré-carga. Através da bateria de ensaios definida por uma metodologia de planejamento fatorial, foi possível combinar as variáveis de entrada (deformação e temperatura final) de maneira a se obter um modelo de comportamento para prever, com elevada precisão, a pré-carga gerada por EMF nestes parafusos. A ANOVA demonstrou, a partir dos testes estatísticos, que os fatores envolvidos no modelo são estatisticamente significativos, exceto a interação. Portanto, de posse desse modelo, é possível projetar um parafuso AT para uma junta e calcular

qual será sua pré-carga final, desde que se conheça a deformação inicial aplicada ao parafuso e a temperatura de trabalho da junta.

Ensaio de CTC: Varredura de Parâmetros

- A partir de uma varredura dos parâmetros em parafusos de aço (Pré-carga Inicial, P_i , Amplitude, A e Frequência, f), utilizados nos testes de CTC foi possível, através de um PF, calcular o nível de significância “ α ” dos fatores de controle sobre a pré-carga final (P_f). Dessa forma, o único fator do ensaio que apresentou um valor de α fora do estabelecido ($\alpha > 0,05$) foi a frequência e, portanto, é possível concluir que a mesma não tem significância estatística no ensaio de CTC. Desse ponto em diante, o valor da frequência foi mantido constante, reduzindo-se, assim, a quantidade de experimentos.

Ensaio de CTC em parafusos de LMF: AT e SE

- No caso dos parafusos AT, a elevada capacidade de amortecimento passivo da fase martensita termoelástica, devido à mobilidade das variantes de martensita ou das diferentes interfaces de fase, fez com que esses fixadores apresentassem rendimento superior aos parafusos de aço e aos demais dispositivos de travamento, quando testados por CTC nas mesmas condições;
- No caso dos parafusos SE, a transformação de fase induzida por tensão, que ocorre gerando dissipação de energia, fez com que esses fixadores apresentassem desempenho superior aos parafusos de aço e aos demais dispositivos de travamento, quando submetidos a testes de CTC em condições semelhantes;
- Do ponto de vista da dinâmica do CTC, o desempenho dos parafusos de LMF NiTi foi superior ao dos parafusos de aço e aos demais dispositivos de travamento devido ao baixo módulo de elasticidade dessas LMF. Segundo informações extraídas da literatura, esse fato influencia diretamente na capacidade do fixador em resistir ao afrouxamento espontâneo, pois o módulo de elasticidade está associado com o momento de flexão e com o contato lateral do eixo do fixador com a parede do furo;

- A partir da ANOVA e dos testes estatísticos aplicados para os parafusos AT e SE foi possível comprovar que os modelos para P_f propostos foram estatisticamente significativos, para todos os fatores, exceto a interação ($P_i \times A$) nos parafusos AT. Conforme indica a ANOVA para os dois tipos de parafusos, tanto a pré-carga inicial (P_i) quanto a amplitude (A) influenciaram significativamente nos valores da pré-carga final (P_f);
- A partir da análise das superfícies de resposta e das curvas de contornos, obtidas para os parafusos de LMF NiTi, é possível afirmar que a pré-carga final retida ao término dos ciclos de cisalhamento aumenta com a pré-carga inicial e com menores valores de amplitude.

Caracterização Morfológica: MEV

- A análise das superfícies de fratura demonstrou que o padrão de quase-clivagem prevalece em todas as imagens analisadas. Embora a clivagem seja predominante, a presença de *dimples* rasos, que são característicos de fratura dúctil, também é detectada. Isso pode estar associado à ocorrência de deformações plásticas durante a ruptura, causadas pela formação de martensita induzida por tensão;
- Os testes de CTC provocaram desgaste na superfície das roscas dos parafusos de aço, principalmente na raiz, o que não ocorreu na superfície dos parafusos de LMF. Isso pode ser associado à elevada dureza das LMF, no entanto, se faz necessário investigações mais profundas.

8. CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS E TECNOLÓGICAS

Através do presente estudo realizado em parafusos de LMF NiTi é possível vislumbrar diversas aplicações para os mesmos.

Considerando-se a alta capacidade de recuperação de deformações no estado SE (entre 4 e 5 %) e o aumento de rigidez em função da temperatura dos parafusos SE, pode-se vislumbrar a aplicação dos mesmos em juntas aparafusadas submetidas a carregamentos/descarregamentos constantes, tendo em vista que os metais clássicos, com os quais são fabricados os parafusos convencionais, apresentam baixos limites de elasticidade (~0,2 % em tração). Aliando-se a isso, também foi comprovado que a variação de resistência elétrica dos parafusos SE apresentou uma relação linear com a deformação. Esse resultado pode ser usado para vislumbrar mais uma funcionalidade desse parafuso: a possibilidade de sua utilização como sensor de pré-carga/deformação. Isso poderia ajudar a prever/monitorar o comportamento da junta, pois uma vez conhecida a variação de resistência elétrica, pode-se estimar a deformação/pré-carga a qual o parafuso está sendo submetido.

Tendo em vista os ensaios de geração de pré-carga em função da temperatura realizados nos parafusos AT e, considerando o modelo obtido, é possível projetar um parafuso para uma junta e calcular qual será sua pré-carga final, desde que se conheça a deformação inicial aplicada ao parafuso e a temperatura de trabalho da junta.

Os ensaios de CTC em parafusos de LMF realizados neste trabalho tiveram caráter pioneiro nessa área, pois, até então, não havia registros na literatura internacional sobre o comportamento de parafusos de LMF no tocante a suportar cisalhamento transversal cíclico (CTC). Nesse contexto, os parafusos de LMF (SE e AT) se enquadraram numa categoria de nível de travamento “excelente”, de acordo com a norma DIN 65151, em todas as condições de teste estudadas. Além disso, esses parafusos também apresentaram rendimento superior a parafusos de aço convencional e também a diversos dispositivos especiais de travamento, bastante conhecidos na indústria. No universo dos parafusos de LMF NiTi, comparando-se o parafuso SE com o AT quanto à resistência ao CTC, constatou-se que o parafuso SE apresentou uma maior retenção da pré-carga inicial em todos os testes.

De maneira geral, os parafusos de LMF NiTi apresentaram resultados bastante relevantes, quando comparados com os parafusos e com os métodos clássicos de travamento. Sendo a resistência ao CTC praticamente equivalente entre os parafusos de LMF NiTi, a escolha entre parafuso AT e SE deve ser realizada levando-se em consideração a especificidade de cada um desses parafusos, seja a geração de pré-carga do parafuso AT, seja o efeito superelástico juntamente com o aumento de rigidez do parafuso SE. No final, essa escolha dependerá das condições da junta aparafusada em serviço.

9. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Adaptar o processo de fabricação dos parafusos de LMF para outros dispositivos de fixação, a exemplo de porcas;
- Realizar um estudo metalúrgico aprofundado nas barras de NiTi adquiridas comercialmente;
- Repetir os experimentos realizados neste trabalho para outros diâmetros de parafusos de LMF para comparar os resultados;
- Realizar um planejamento experimental com réplicas para aumentar o grau de confiança dos modelos;
- Realizar um planejamento experimental dos ensaios de CTC introduzindo as variáveis diâmetro dos parafusos e temperatura, para estabelecer modelos com essas novas variáveis;
- Realizar simulações do comportamento de parafusos de LMF submetidos a ensaios de CTC e usar os resultados experimentais obtidos neste trabalho para calibrar o modelo;
- Realizar um estudo detalhado do perfil das roscas a fim de identificar as causas de desgaste na superfície da mesma.

10. REFERÊNCIAS

ABOLMAALIA, A., TREADWAY, J., ASWATH, P., LU, F. K., MCCARTHY, E., 2006. **Hysteresis behavior of t-stub connections with superelastic shape memory fasteners**. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 62, p. 831–838.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM F2004-5 - **Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis**, 2005. Annual Book of ASTM Standards, vol. 13.01, West Conshohocken, United States.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM F2005-5 - **Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys**, 2005. Annual Book of ASTM Standards, vol. 13.01, pp.1-3, West Conshohocken, United States.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM F2082-5 - **Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys by Bend and Free Recovery**, 2006. Annual Book of ASTM Standards, vol. 13.01, pp.1-7, West Conshohocken, United States.

ANDERSEN, A., HERFJORD, H. J., MARTINSEN, A. M., SANGESLAND, S., SIVERTSEN, Å., 1997, **Feasibility study of shape memory alloys in oil well applications**. SINTEF Petroleum, IKU Report n° 32.0896.00/01/97, 107p.

ANDERSEN, A., PEDERSEN, D., SIVERTSEN, Å., SANGESLAND, S., 1999. **Detailed study of shape memory alloys in oil well applications**. SINTEF Petroleum, Report n° 32.0924.00/01/99, 103p.

BICKFORD, J. H., 2007. **Introduction to the design and behavior of bolted joints - Non-gasketed joints**. Taylor & Francis Group, CRC Press Inc., 4^a ed., Boca Raton, FL.

BOGUE, R., 2009. **Shape-memory materials: a review of technology and applications**. Assembly Automation, Vol. 29, pp. 214–219.

CALADO, V. & MONTGOMERY, D. C., 2003. **Planejamento de Experimentos usando *Statistica***. E-Papers Serviços Editoriais, 1ª ed., Rio de Janeiro, RJ, ISBN 85-87922-83-1.

CALLISTER Jr, William D., 2008. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 7th ed., Nova York, NY.

CASTILHO, W., S., SILVA, E., P., 2011. **Algumas aplicações das Ligas com Memória de Forma (*Shape Memory Alloys – Sma*)**. In: Sinergia, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 99-108.

CATÁLOGO GERAL DE PRODUTOS CISER, 2014. Disponível em: <http://www.ciser.com.br/htcms/media/pdf/destaques/br/catalogo-geral-de-produtos.pdf>. Acessado em: 15/07/2014 às 15:00.

CHEATHAM, C. A., ACOSTA, C. F., HESS, D. P., 2009. **Tests and analysis of secondary locking features in threaded inserts**. Engineering Failure Analysis, vol. 16 pp. 39–57.

CHEN, J. H., SUN, W., WANG, G. Z., 2005. **Investigation on the fracture behaviour of shape memory alloy NiTi**. Metallurgical and Materials Transactions, vol. 36A, pp. 941-955.

CHOON, T. W., SALLEH, A. S., JAMIAN, S., GHAZAI, M., I., 2007. **Phase transformation temperatures for shape memory alloy wire**. ENFORMATIKA. Vol. 19. p. 304–307.

COLLINS, J. A., 2006. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: uma perspectiva de prevenção de falhas**. LTC, 1ª ed., Rio de Janeiro, RJ.

CULSHAW, B., 1996. **Smart structures and materials**. Artech House Optoelectronic Library, England.

DE ARAÚJO, C. J., GOMES, A. A. C., SILVA, J. A., CAVALCANTI, A. J. T., REIS, R. P. B., GONZALEZ, C. H., 2009. **Fabrication of shape memory alloys using the plasma skull push–pull process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 209, pp. 3657–3664.

DEUTSCHE NORM, 1991. DIN 946 - **Determination of coefficient of friction of bolt-nut assemblies under specified conditions**, Deutsche Norm.

DEUTSCHE NORM, 1994. DIN 65151 - **Dynamic testing of the locking characteristics of fasteners under transverse loading conditions**, Deutsche Norm.

DUERIG, T., 1990. **Applications of shape memory**. Materials science forum. Switzerland: Trans Tech Publication, pp. 679–692.

DUERIG, T., PELTON, A., STOCKEL, D., 1999. **An overview of nitinol medical applications**. Materials Science and Engineering, A273–275, pp. 149–160.

ECCLES, W., SHERRINGTON, I., ARNELL, R. D., 2009. **Towards an understanding of the loosening characteristics of prevailing torque nuts**. Journal of Mechanical Engineering Science. Vol. 224, Part C, p. 1483-1493.

ECCLES, W., 2010. **Tribological Aspects of the Self-Loosening of Threaded Fasteners**. Thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (PhD), Jost Institute for Tribotechnology, University of Central Lancashire, Lancashire, United Kingdom, 179p.

FANG, C., MICHAEL, C. H. Y., ANGUS, C. C. L., LANGKUN, X., 2014. **Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts**. Journal of Constructional Steel Research, vol. 94, pp. 122-136.

FERNANDES, F. M. B., 2013. **Shape Memory Alloys – Processing, Characterization and Applications**. Edited by F. M. B. Fernandes, InTech, Rijeka, Croatia.

FESTO, 2013. **BionicOpter – Inspired by dragonfly flight**. Catálogo de produtos.

FUJITA, H, TOSHIYOSHI, H., 1998. **Micro-actuators and their applications**. Microelectron Journal. Vol. 29, p. 637–40.

FUMAGALLI, L., BUTERA, F., CODA, A., 2009. **SmartFlex® NiTi wires for shape memory actuators**. Journal of Materials and Engineering Performance, vol. 18, pp. 691–695.

GALL, K., YANG, N., SEHITOGLU, H., CHUMLYAKOV, Y. I., 2001. **Fracture of Precipitated NiTi Shape Memory Alloys**. International Journal of Fracture, vol. 109, pp. 189–207.

GRASSI, E. N. D., 2014. **Comportamento Termomecânico de Minimolas Superelásticas de NiTi: Influência de Tratamentos Térmicos**. Dissertação de Mestrado - Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 115p.

GM, 2013. **Chevrolet Debuts Lightweight ‘Smart Material’ on corvette**. General Motors News. Disponível em: <http://media.gm.com/media/us/en/gm/news.detail.html/content/Pages/news/us/en/2013/Feb/0212-corvette.html>. Acessado em: 18/03/2014 às 15:00.

HAALAND, P. D., 1989. **Experimental Design in Biotechnology**. Marcel Dekker, INC., N.Y.

HESS, D. P., 1998. **Vibration- and Shock- Induced Loosening**, Chapter 40 in Handbook of Bolts and Bolted Joints, New York: Marcel Dekker Inc., pp. 757- 824.

HESSE, T., GHORASHI, M., INMAN, D. J., 2004. **Shape Memory Alloy in Tension and Compression and its Application as Clamping-force Actuator in a Bolted Joint: Part 1 – Experimentation**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 15, p. 577-587.

HUANG, W., 1998. **Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures**. Dissertation submitted for the fulfillment of the degree of Doctor of Philosophy, Department of Engineering, Civil Engineering, University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom, 192p.

HUANG, W., 2002. **On the selection of shape memory alloys for actuators**. In: Mater Des, v. 23, p. 11–19.

HUMBEECK, J. V., 2003. **Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys**. Journal of Alloys and Compounds, Vol. 355, p. 58–64.

JANI, J. M., LEARY, M., SUBIC, A., GIBSON, M. A., 2014. **A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**. Materials and Design. Vol. 56, p. 1078-1113.

JOHNSON, A. D., 1992. **Non-explosive separation device**. In: US Patents 5119555.

JOHNSON, A. D., 1998. **State-of-the-art of shape memory actuators**. In: 6th international conference on new actuators. Bremen, Germany.

JUVINALL, R. C. & MARSHEK, K., M., 2012. **Fundamentals of Machine Component Design**. John Wiley & Sons, Inc., 5th ed., Hoboken, NJ.

LAGOUDAS, D. C., 2008. **Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Application**. Edited by Lagoudas, D. C., Springer, Texas, USA.

LI, Y. F., MI, X. J., YIN, X. Q., XIE, H. F., 2014. **Constrained recovery properties of Ni-Ti shape memory alloy wire during thermal cycling.** Journal of Alloys and Compounds, vol. 588, pp. 525–529.

LIN, H., C., LIN, K., M., CHEN, Y., C., 2000. **A study on the machining characteristics of TiNi shape memory alloys.** Journal of Materials Processing Technology, vol. 105, pp. 327-332.

MA, H., CHO, C., WILKINSON, T, 2008. **A Numerical Study on Bolted End-Plate Connection Using Shape Memory Alloys.** Materials and Structures, v. 41, pp. 1419-1426.

MA, J., L., WU, K., H., 2000. **Effects of Tantalum addition on transformation behaviour of $(\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49})_{1-x}\text{Ta}_x$ and $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{50-y}\text{Ta}_y$ Shape Memory Alloys.** Materials Science and Technology, v.16, pp. 716-719, ISSN 1743-2847.

MATERIAL PROPETY DATA, 2014. Disponível em: <http://www.matweb.com/index.aspx>. Acessado em: 15/08/2014 às 15:00.

MILONE, G., 2009. **Estatística geral e aplicada.** São Paulo: Centage Learning. ISBN 85-221-0339-9. Capítulo 12.

NATIONAL AEROSPACE STANDARD, 1997. **NASM1312-7 Fastener Test Methods - Test 7 - Vibration,** National Aerospace Standard.

NOH, J. P., 2001. **Phase transformation behaviours and shape memory characteristics of $\text{Ti-(45-x)Ni-5Cu-xMo}$ ($x=0.3-1.0$) alloys.** Materials Science and Technology, v.17, pp. 1544-1550, ISSN 1743-2847.

NORDLOCK, 2014. **Arruelas série X da Nord-Lock: informações sobre o produto.** Disponível em: <http://www.nord-lock.com/pt-br/nord-lock/wedge-locking/washers/introduction/>. Acessado em 23/09/2014 às 11:35.

NORMA VDI 2230, 2003. **Systematic calculation of high duty bolted joints.**

NORTON, R. L., 2006. **Machine design: an integrated approach.** Pearson Education, Inc., 3rd ed., Upper Saddle River, NJ.

OLIVEIRA, H. M. R., GRASSI, E. N. D., ESPINDOLA, P. A. S., DE ARAÚJO, C. J., 2012. **Smart Lockwire: A Shape Memory Alloy Lockwire for improved reliability in bolted fixing in automotive and aeronautical applications.** In: 21^o CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAIS DE TECNOLOGIA DA MOBILIDADE, São Paulo - SP. Anais do Congresso SAE Brasil 2012. São Paulo - SP: SAE Brasil, Vol. 1, p. 1-5.

OTSUKA, K., WAYMAN, C.M., 1998. **Shape Memory Materials**, Editado por K. Otsuka and C. M. Wayman, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

PAI, N. G., 2002. **Vibration induced loosening of threaded fasteners: mechanisms, modeling and design guidelines.** Ph.D. Dissertation. University of South Florida, Tampa, Florida, USA.

PAI, N., G., HESS, D., P., 2002. **Experimental Study of Loosening of Threaded Fasteners due to Dynamic Shear Loads.** Journal of Sound and Vibration, 253(3), pp. 585-602.

PAULA, A. S., SANTOS, C. M. L. dos, CANEJO, J. H. P. G., MAHESH, K. K., BRAZ FERNANDES, F. M., COSTA VIANA, C. S. da, 2006. **Evolução da Textura em Ligas de Ni-Ti rica em Ti e rica em Ni Submetidas a Tratamento Termomecânico de Ausforming.** In: III Workshop sobre Textura, São Paulo, vol. 1, pp. 132-150.

PEREIRA, F. R. P., SIMOES, J. B., REIS, R. P. B. DOS, DE ARAÚJO, C. J., 2011. **Thermomechanical Tests of Shape Memory Alloy Belleville Washers.** In: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal - RN. Proceedings of COBEM 2011. Rio de Janeiro - RJ: ABCM, Vol. 1, pp. 1-10.

PEREIRA, F. F. R., 2012. **Desenvolvimento e Caracterização Termomecânica de Atuadores Cônicos de Ligas com Memória de Forma**. Trabalho de Conclusão de Curso – Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 20p.

PEREIRA, F. R. P., SIMOES, J. B., DE ARAÚJO, C. J., 2013. **Development and thermomechanical characterization of shape memory alloy conical actuators**. In: 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013), Ribeirão Preto - SP. Proceedings of COBEM 2013. Rio de Janeiro - RJ: ABCM, 2013. v. 1. p. 7541-7550.

PETRINI, L, MIGLIAVACCA, F., 2011. **Biomedical applications of shape memory alloys**. Journal of Metallurgy, Vol. 2011, 15p.

PIQUARD, R., D'ACUNTO, A., LAHEURTE, P., DUDZINSKI, D., 2014. **Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation**. Precision Engineering Journal, vol. 38, pp. 356-364.

PORTAL ACTION / ANOVA, 2014. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/content/24-an%C3%A1lise-de-vari%C3%A2ncia>. Acessado em: 12/10/2014 às 6:00.

RAGHAVAN, J, BARTKIEWICZ, T, BOYKO, S, KUPRIYANOV, M, RAJAPAKSE, N, YU, B., 2010. **Damping, tensile, and impact properties of superelastic shape memory alloy (SMA) fiber-reinforced polymer composites**. Compos. B. Eng., Vol. 41, p. 214–222.

REGO, E., B., 2013. **Análise da Microestrutura de uma Liga com Memória de Forma Submetida ao Processo de Sangramento Radial**. Projeto Final – Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 68p.

REIS, P. K. P., 2013. **Uso de Arruelas com Memória de Forma em Flanges de Conectores Submarinos**. Projeto de Graduação – Curso de Engenharia de Petróleo - UFRJ/Escola Politécnica Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 65p.

REIS, R. P. B., 2010. **Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de ligas com memória de forma usando o efeito termoelétrico**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação da UFCG. Departamento de Engenharia Mecânica. Campina Grande - PB.

RODRIGUES, M. I., IEMMA, A. F., 2009. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos**. Cárita Editora, 2ª ed., Campinas, SP.

SANCLEMENTE, J. A., HESS, D. P., 2007. **Parametric study of threaded fastener loosening due to cyclic transverse loads**. Engineering Failure Analysis, vol. 14, pp. 239–249.

SANDVIK, 2014. **Catálogos do fabricante**. Disponível em: <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx?country=br>. Acessado em: 05/07/2014 às 15:00.

SAKAI, T., 1978. **Investigations of bolt loosening mechanisms**, 1st Report. Bolts of transversely loaded joints. Bulletin of the JSME 21(159): pp. 1385-1390.

SAKAI, T., 1978. **Investigations of bolt loosening mechanisms**, 2nd Report. Center bolts of twisted joints. Bulletin of the JSME 21(159): pp. 1391-1394

SASE, N. & FUJII, H., 2001. **Optimizing study of SLBs for higher anti-loosening performance**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 119 (1-3), pp. 174-179.

SASE, N. & NISHIOKA, K., 1998. **An anti-loosening screw-fastener innovation and its evaluation**. Journal of Materials Processing Technology, vol. 77 (1-3), pp. 209-215.

SCI-SUPPLY, 2014. Disponível em: <http://www.sci-supply.com/>. Acessado em: 05/10/2014 às 18:00.

SINTEF, Petroleum Research, 2000. **Flanges (bolted connections):pre-force control, leakage control and increased performance**. PROJECT PROPOSAL, Feb, 17th.

SHOJI & SAWA, 2011. **Self-loosening of Nuts due to External Load**. SIMULIA, Customer Conference, vol. 1, pp. 1-15.

SILVA, M. M. da, 2006. **Fabricação de uma liga Ti-Ni-Cu com memória de forma pelo processo plasma skull push-pull: comparações com a liga Ti-Ni equiatômica**. Campina Grande: Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande. Trabalho de Conclusão de Curso, 52p.

SKF Equipaments, 2001. **Bolt-tightening Handbook**. Linear Motion & Precision Technologies. Disponível em: <http://www.motovated.co.nz/newsletter/aug12/SKF%20Bolt%20Tightening%20Handbook.pdf>. Acessado em 23/06/2014 às 14:00.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE, C. R., BUDYNAS, R. G., 2006. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora S. A., 526p.

SPEICHER, M., 2010. **Cyclic Testing and Assessment of Shape Memory Alloy recentering systems**. Thesis (Doctor) - Philosophy in the School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, EUA, May, 2010.

STANFORD, M. K., 2012. **Thermophysical Properties of 60-NITINOL for Mechanical Component Applications**, NASA/TM – 216056.

STOECKEL, D., 1990. **Shape memory actuators for automotive applications**. Materials Design Journal, vol. 11, pp.302–307.

STÖCKEL, D., 1995. **The shape memory effect: phenomenon, alloys, applications.** In: Shape memory alloys for power systems (EPRI), p. 1–13.

SUNRISE TITANIUM TECHNOLOGY, 2014. Disponível em: <http://www.sunriseti.com/>. Acessado em: 30/06/2014 às 14:00.

TRAVASSOS, G. D., 2010. **Desenvolvimento de um parafuso superelástico.** (Trabalho de conclusão de Curso – TCC). Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, VI Jornada de trabalho de conclusão curso, Campina Grande, 15p.

VOKOUN, D., MAJTÁS, D., FROST, M., SEDLÁK, P., SITTNER, P., 2008. **Shape Memory Hooks Employed in Fasteners.** Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 18, p. 706–710.

WALTER TOOLS, 2014. **Catálogos de produtos do fabricante.** Disponível em: <http://www.waltertools.com/engb/pages/search.aspx?q=H5150106M10X1&mode=productcatalog>. Acessado em: 01/11/2014 às 15:00.

WANG, X., XUA, B., YUE, Z., TONG, X., 2008. **Fracture behavior of the compact tension specimens in NiTi shape memory alloys.** Materials Science and Engineering, vol. 485A, pp. 14–19.

WANG, Z., G., ZU, X., T., FENG, X., D., ZHU, S., BAO, J. W., WANG, L., M., 2004. **Characteristics of two-way shape memory TiNi springs driven by electrical current.** In Mater Des. v. 25, p. 699–703.

WELP, E. G., BREIDERT, J., 2004. **Knowledge and method base for shape memory alloys.** Materialwiss Werkstofftech, v. 35, p. 294–299.

WU, M. H., SCHETKY, L. M., 2000. **Industrial applications for shape memory alloys.** In: International conference on shape memory and superelastic technologies, 1st ed. Pacific Grove, California, USA; pp. 171–82.

YOON, S. H., YEO, D. J., 2004. **Phase transformations of nitinol shape memory alloy by varying with annealing heat treatment conditions.** In Proceedings of SPIE 5648, Smart Materials III, 208, pp. 208–215.

ZHANG, X., NIE, J., HOU, G., 2000. **Development of Anti-Loosening Nuts using Shape Memory Alloys.** Materials Science Forum, Vols. 327-328, pp. 35-38.

ZHAO, X., YAN, X., YANG, Y., XU, H., 2006. **Wide hysteresis NiTi (Nb) shape memory alloys with low Nb content (4.5 at %).** Materials Science and Engineering:A. Vols.438–440, 575–578.

11. ANEXOS

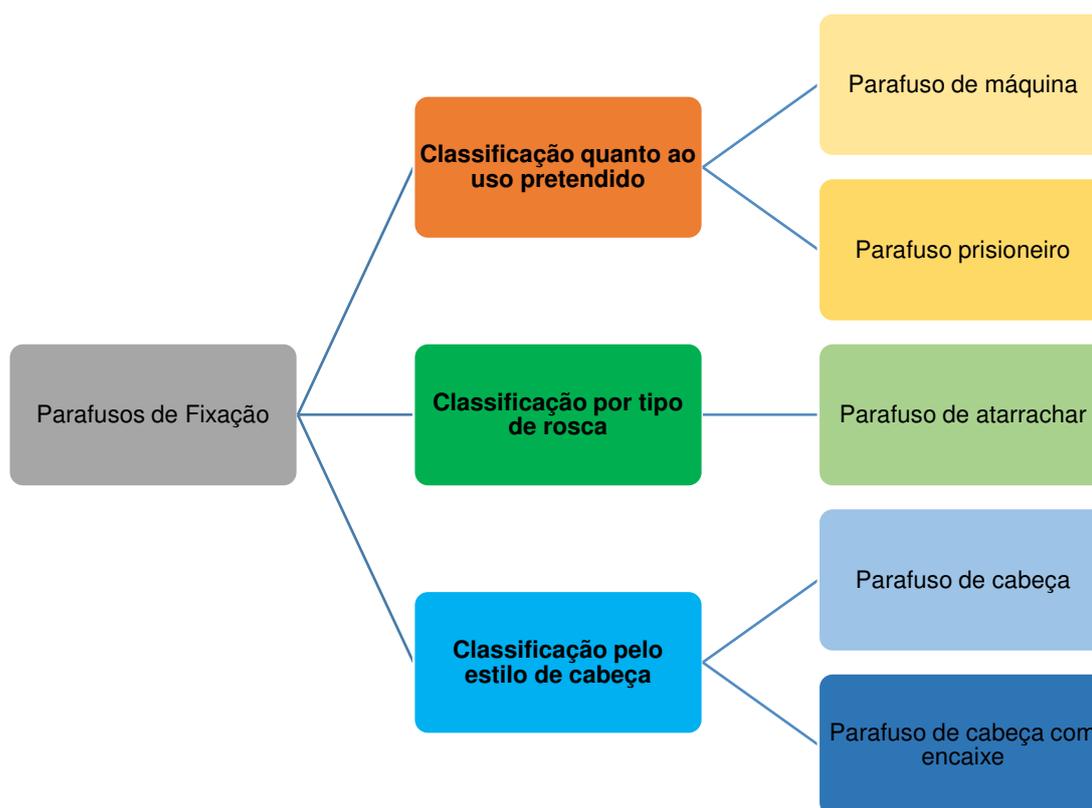
ANEXO A

Bibliografia para tipos de parafusos de fixação, porca e arruelas

Tipos de Parafusos de Fixação

De acordo com NORTON, (2006), os parafusos de fixação podem ser classificados de diferentes maneiras: por meio do uso pretendido, pelo tipo de rosca, pelo tipo de cabeça e por sua resistência mecânica. A classificação desses parafusos, bem como alguns exemplos, é mostrada na Figura 117.

Figura 117. Classificação de parafusos de fixação.

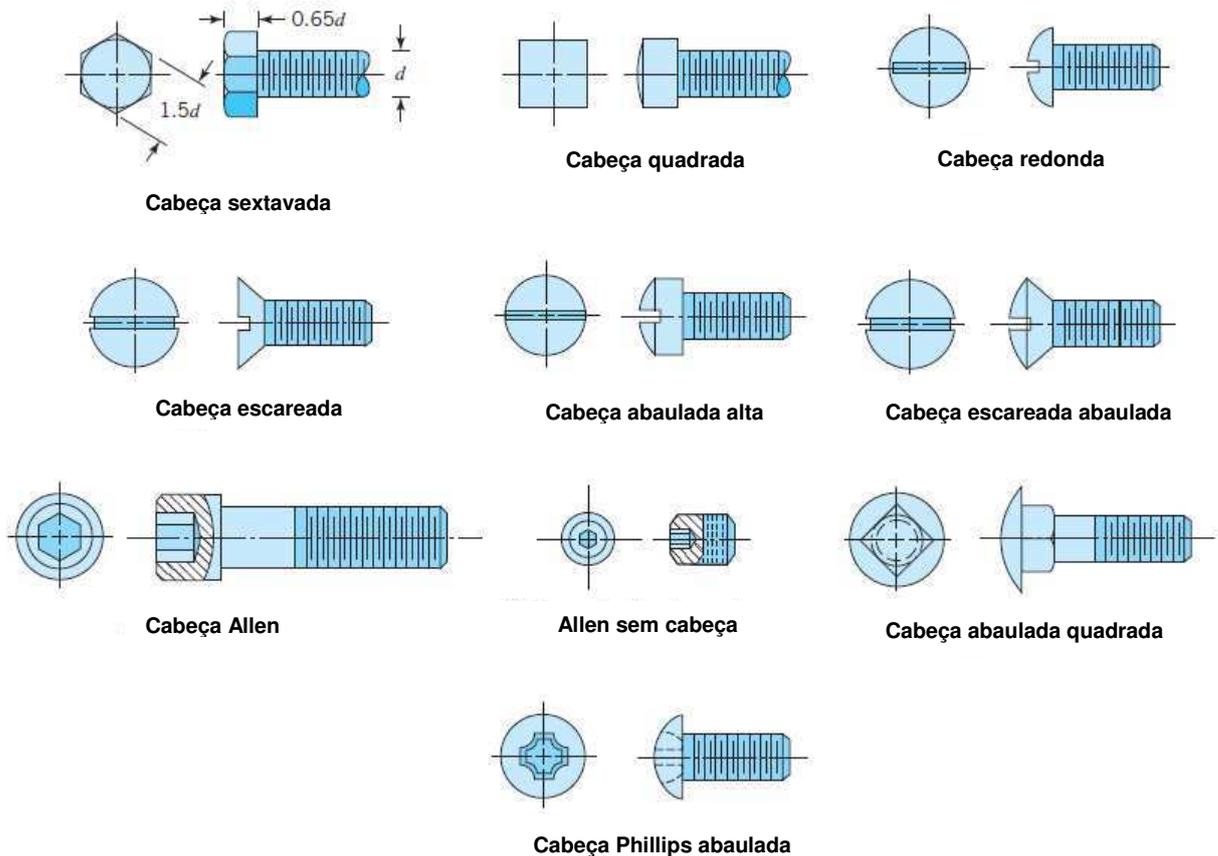


Fonte: Autoria própria.

Dentre estas várias classificações, a mais conhecida comercialmente é a classificação dos parafusos pelo estilo de cabeça. Vários estilos de parafusos de cabeça com encaixe são mostrados na Figura 118. Conforme ilustrado, os diferentes

tipos de encaixe (ou cavidade) permitem a introdução de uma chave de aperto específica aplicação do torque necessário. Esses parafusos são fabricados em geral de aço de alta resistência, aço endurecido, aço inoxidável e outros metais.

Figura 118. Exemplos de vários parafusos de cabeça com encaixe.



Fonte: Adaptado de JUVINALL & MARSHEK, (2012).

Porcas e Arruelas

Porcas e arruelas são elementos usados juntamente com os parafusos por várias razões. As porcas têm como função básica promover o travamento do parafuso. Já as arruelas, de maneira geral, servem para aumentar a área de contato entre a cabeça do parafuso ou porca e a junta, promovendo, assim, a distribuição da pré-carga numa área maior (NORTON, 2006).

No entanto, tanto as porcas quanto as arruelas podem apresentar funções específicas, de acordo com suas geometrias. Por exemplo, há uma preocupação universal com o afrouxamento espontâneo de porcas devido a vibração. Nesse

sentido, porcas e arruelas podem ter formatos particulares para resolver essa questão. Uma variedade de exemplos de porcas e arruelas é mostrada na Figura 119.

Figura 119. Diversos exemplos de (a) Porcas e (b) Arruelas.

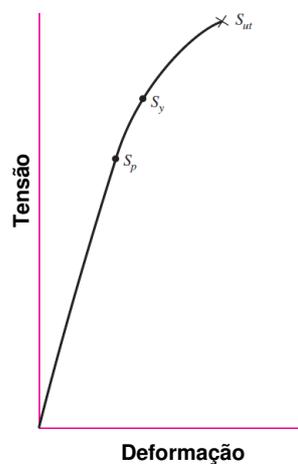


Fonte: (a) NPN PARAFUSOS, (2014) e (b) NHK FASTENER, (2014).

Resistência Mecânica de Parafusos Padronizados

Nas normas estabelecidas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), os parafusos de porca e parafusos de máquina para aplicações estruturais ou casos de cargas pesadas devem ser escolhidos com base na sua resistência de prova (S_p). Essa variável pode ser visualizada no diagrama tensão - deformação da Figura 120 (SHIGLEY et al, 2006).

Figura 120. Esquema de um diagrama tensão - deformação típico para parafusos.



Fonte: Adaptado de SHIGLEY et al, (2006).

A resistência de prova é a tensão máxima que o parafuso pode suportar sem adquirir uma deformação permanente. Na Figura 120 também estão destacadas as tensões correspondentes a resistência ao escoamento (S_y) e a resistência a ruptura (S_{ut}). As especificações para parafusos métricos (ISO) são fornecidas na Tabela 40.

Tabela 40. Categorias métricas de propriedades mecânicas para parafusos de aço (de porca) e parafusos prisioneiros.

Categoria da propriedade	Intervalo de tamanho	Resistência mínima de prova (MPa)	Resistência mínima à tração (MPa)	Resistência mínima ao escoamento (MPa)	Material	Marcação da cabeça
4.6	M5-M36	225	400	240	Baixo e médio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Baixo e médio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Baixo e médio carbono	
8.8	M16-M36	600	830	660	Baixo carbono, Q & T	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Baixo carbono, Q & T	
10.9	M5-M36	830	1040	940	Médio carbono, Q & T	
12.9	M1.6-M36	970	1220	110	Liga, Q & T	

Fonte: Adaptado de SHIGLEY et al, (2006).

ANEXO B

Bibliografia para cálculo de tensões em pontos críticos do parafuso e da porca.

Tensões de Tração Axial

A força de compressão entre o parafuso (tração) e a porca (compressão) atua nas roscas 1, 2 e 3, mostradas na Figura 38. A área usada para o cálculo da tensão (A_t) é dada pela Equação (27). A tensão de tração é dada pela Equação (28) (NORTON, 2006).

$$A_t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_p + d_i}{2} \right)^2 \quad (27)$$

$$\sigma_t = \frac{P}{A_t} \cdot n \quad (28)$$

na qual o número de roscas (n) é dado pelo quociente entre a espessura da porca (t) e o passo de rosca (p), ou seja, pelo parâmetro t/p . Combinando essas informações com as Equações (27) e (28), obtém-se a Equação (29).

$$\sigma_t = \frac{4P}{\pi \left(\frac{d_p + d_i}{2} \right)^2} \cdot \frac{p}{t} \quad (29)$$

Tensões de Cisalhamento por Torção

Quando uma porca é apertada num parafuso, ou quando um torque lhe é transmitido, uma tensão de cisalhamento por torção (τ) pode ser desenvolvida na seção transversal do fixador. A tensão de torção de fixadores roscados durante o aperto é dada pela Equação (30) (JUVINALL & MARSHEK, 2012).

$$\tau = \frac{Tr}{J} = \frac{16T}{\pi d_r^3} \quad (30)$$

para a qual T é o torque aplicado e d_r é o diâmetro da raiz da rosca.

Tensões de Cisalhamento Longitudinal

Para computar a tensão de cisalhamento ao longo do comprimento da rosca de um parafuso, é necessário considerar que todos os filetes sejam cisalhados simultaneamente, ou seja, a carga é igualmente compartilhada. A área de cisalhamento (A_c) para um filete de rosca é a área de um cilindro de seu diâmetro menor (d_r), dada pela Equações (31) e (32) (NORTON, 2006).

$$A_{ci} = \pi d_r w_i p \quad (31)$$

$$A_{co} = \pi d_r w_o p \quad (32)$$

em que, w_i e w_o são os fatores que definem a porcentagem do passo p ocupado pelo metal nos diâmetros menor e maior, respectivamente. Esses valores estão resumidos na Tabela 41.

Tabela 41. Fatores de área para cisalhamento por corte de roscas.

Tipo de rosca	w_i (Menor)	w_o (Maior)
UNS/ISO	0,80	0,88
Quadrada	0,50	0,50
Acme	0,77	0,63
Botaréu	0,9	0,83

Fonte: NORTON, (2006).

A tensão de cisalhamento para o rasgamento da rosca é calculada a partir da Equação (33).

$$\tau_t = \frac{P}{A_c} \quad (33)$$

Com base nessas informações, é possível calcular o comprimento mínimo da porca para o qual ocorrerá “espanamento”, que ocorre quando a tensão de cisalhamento para o rasgamento supera a tensão limite de ruptura do material da rosca. A força requerida para cisalhar a área transversal da rosca de um parafuso (F_b) é dada por:

$$F_b = A_t S_y \approx \frac{\pi}{4} (0,9d)^2 S_y \quad (34)$$

para a qual d é o diâmetro maior da rosca. Com base na Figura 38, JUVINALL & MARSHEK, (2012) estimaram a força cisalhante no parafuso para provocar o “espanamento” completo da porca. Esses autores se basearam numa distribuição de tensão parabólica, resultando na Equação (35).

$$F_n = \pi d (0,75t) S_{sy} \approx \pi d (0,9d) (0,58 S_y) \quad (35)$$

para a qual t é a espessura da porca e S_{sy} é a tensão limite de resistência por cisalhamento do material. Fazendo o balanço de forças entre as Equações (34) e (35), o valor de t será equivalente a:

$$t = 0,47d \quad (36)$$

As porcas são geralmente fabricadas com materiais mais dúcteis, quando comparadas aos parafusos. Isso é proposital, tendo em vista a necessidade de acomodação dos seus filetes de rosca para distribuição da tensão. Dessa forma, a espessura padrão das porcas é de aproximadamente $\frac{7}{8} d$.

Ainda no que diz respeito ao cisalhamento de roscas de parafusos, existe a componente de tensão de cisalhamento transversal ($\tau_{m\acute{a}x}$), devido à flexão da rosca. COLLINS, (2006) define essa tensão através da Equação (37).

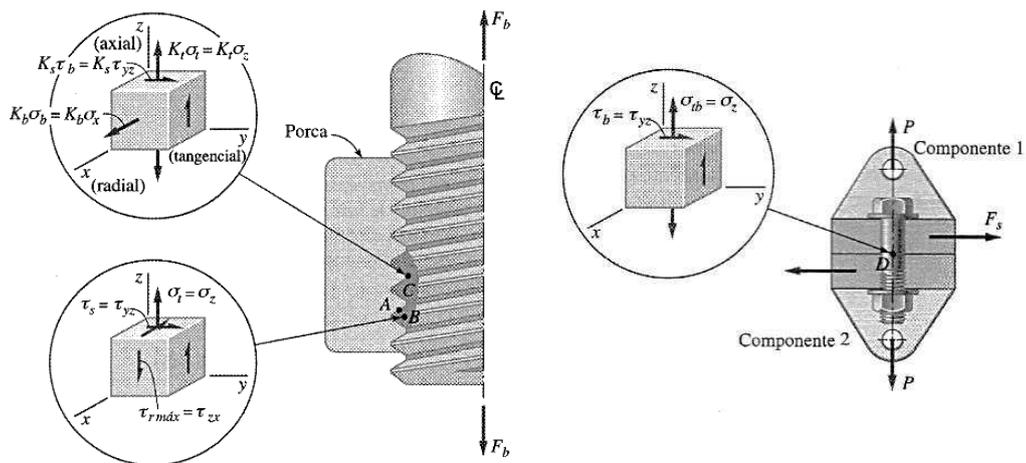
$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{3P}{\pi d_r p n} \quad (37)$$

na qual n é o número de roscas da região de contato que sustentam a carga do parafuso.

Pontos Críticos em Parafusos

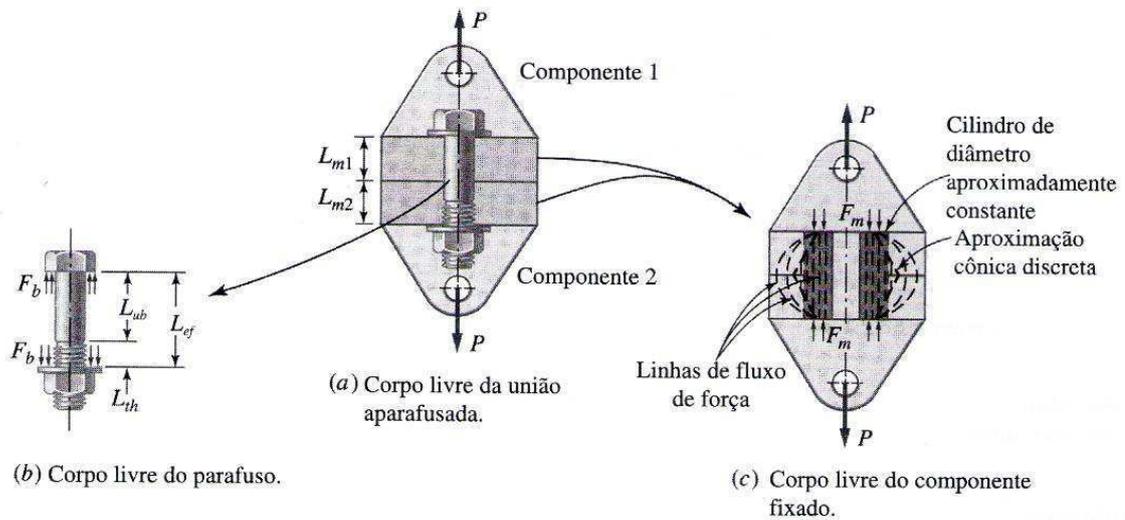
Quando se trata do estudo de tensões em parafusos é necessário conhecer quais são os pontos críticos na zona de contato na rosca, ilustrados na Figura 39 como A , B , C . Além desses, um quarto ponto, D , deve ser considerado se a união está sujeita a um carregamento cisalhante (COLLINS, 2006). Os diagramas de corpos livres (DCLs) do parafuso e dos componentes fixados podem ser visualizados em detalhes nas Figuras 121 e 122.

Figura 121. Pontos críticos e componentes de tensão em elementos de fixação roscados.



Fonte: Adaptado de COLLINS, (2006).

Figura 122. Diagramas de corpos livres do parafuso e dos componentes fixados.



Fonte: Adaptado de COLLINS, (2006).

O ponto crítico *A* é normalmente ignorado quando da análise de elementos de fixação roscados, considerando que não haja movimento relativo entre as roscas do parafuso e a porca depois da montagem.

No ponto crítico *B*, os modos de falha considerados são escoamento (espanamento) e fadiga, e as componentes pertinentes de tensão são cisalhamento torcional (τ), devido ao aperto, tensão trativa direta (σ_t), devido à força trativa (P), e tensão cisalhante transversal (τ_t), todas já abordadas em tópicos anteriores.

No ponto *C* os modos potenciais de falha são escoamento ou fadiga. Os componentes de tensão pertinentes são tensão de cisalhamento torcional (Equação 4), tensão trativa direta (σ_{tc}) e tensão de flexão na rosca (σ_f). Segundo COLLINS, (2006), essas duas últimas tensões podem ser definidas respectivamente por:

$$\sigma_{tc} = \frac{4P}{\pi d_r^2} \quad (38)$$

$$\sigma_f = \frac{12P(d_p - d_r)}{\pi d_r n p^2} \quad (39)$$

No ponto crítico D , os modos de falha potenciais são escoamento (cisalhamento) e fadiga, e as componentes de tensão pertinentes são a tensão trativa direta no corpo (σ_{td}) e a tensão de cisalhamento no corpo (τ_{td}), dadas respectivamente pelas Equações (40) e (41).

$$\sigma_{td} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (40)$$

$$\tau_{td} = \frac{4F_s}{\pi d^2} \quad (41)$$

em que F_s é a força de cisalhamento no parafuso.

Pré-carga de Uniões em Tração

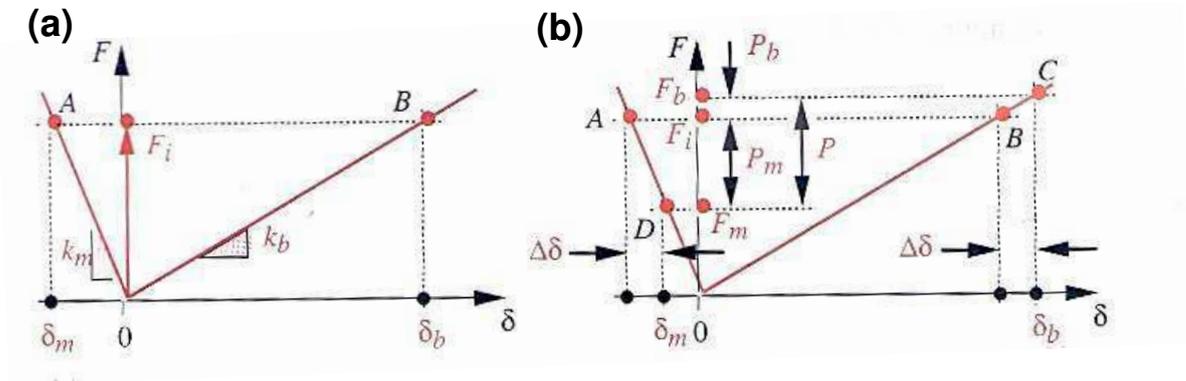
Uma das aplicações primárias de parafusos e porcas é a de unir peças em situações tais que as cargas aplicadas colocam os parafusos em tração. Quando uma união aparafusada, a exemplo daquela mostrada na Figura 39, o sofre aperto, uma força de tração é induzida no parafuso e de compressão nos flanges fixados (1 e 2). A consequência do processo é a produção de tensões sem a aplicação de qualquer carga externa, conforme mostrado no diagrama da Figura 123(a). Com a aplicação da carga P , mostrada no DCL da Figura 122, o novo diagrama força (F) - deflexão (δ) é mostrado na Figura 123(b).

Nessas condições, a união da Figura 122 funciona como um sistema de molas; o parafuso está em paralelo com os flanges, os quais estão em série uns com os outros. NORTON, (2006) define a rigidez total (k_{total}) de uma combinação de n molas em série e em paralelo, respectivamente, através das Equações (42) e (43).

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (42)$$

$$k_{total} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \quad (43)$$

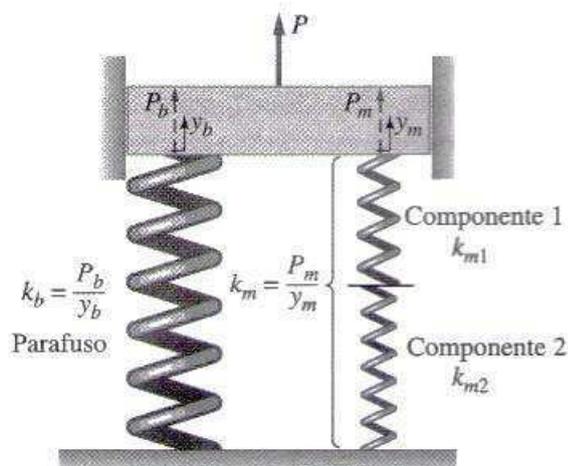
Figura 123. Efeitos causados pela pré-carga sobre o parafuso e material. (a) Pré-carregamento e deflexões iniciais. (b) Junta sob ação de uma carga P e forças resultantes.



Fonte: Adaptado de NORTON, (2006).

Uma união aparafusada pré-carregada constitui um sistema elástico indeterminado. Portanto, a força trativa axial no parafuso é uma função tanto da pré-carga inicial (F_i), devido ao aperto, quanto da força de operação subsequentemente aplicada, P , a qual tende a separar os componentes fixados. Considerando os parafusos e os componentes fixados como molas lineares, uma união aparafusada, como aquela mostrada na Figura 122, pode ser modelada como o sistema de molas em paralelo mostrado na Figura 124.

Figura 124. Modelo de molas em paralelo para a união aparafusada.



Fonte: Adaptado de COLLINS, (2006).

Pelo equilíbrio de forças e por compatibilidade geométrica, ter-se-á, respectivamente, que:

$$P = P_b + P_m \quad (44)$$

$$y_b = y_m = \frac{P_i L}{AE} \quad (45)$$

em que P_b é a força no parafuso, P_m é a força nos componentes unidos, P_i é a pré-carga geral, L é o comprimento útil, A é a área de seção transversal e E é o módulo de Young do material. Combinando as equações da Figura 124 com as Equações (44) e (45), pode-se reescrever que:

$$P_b = \left(\frac{k_b}{k_b + k_m} \right) P \quad (46)$$

$$P_m = \left(\frac{k_m}{k_b + k_m} \right) P \quad (47)$$

Logo, as forças resultantes nos parafusos (F_b) e nos componentes unidos (F_m) são, respectivamente:

$$F_b = P_b + F_i = \left(\frac{k_b}{k_b + k_m} \right) P + F_i \quad (48)$$

$$F_m = P_m + F_i = \left(\frac{k_m}{k_b + k_m} \right) P + F_i \quad (49)$$

ANEXO C

Código G para Trajetória 1 (T1) – (Corpo-de-prova 1, profundidade = 0,69mm)

%	N400 G01 X1.718 Y-6.693 Z-0.46
O0300	N410 G01 X0.434 Y-6.896 Z-0.49
N10 G21 G94 G97 G40	N420 G01 X-0.866 Y-6.856 Z-0.52
N20 G90 G17 G59	N430 G01 X-2.135 Y-6.572 Z-0.55
N30 G0 X20 Y-8 Z50	N440 G01 X-3.329 Y-6.055 Z-0.58
N50 G0 Z1	N450 G01 X-4.405 Y-5.324 Z-0.61
N60 S1275 M03	N460 G01 X-5.324 Y-4.405 Z-0.64
N70 G01 X0 Y-8 z0.5 F40	N470 G01 X-6.055 Y-3.329 Z-0.67
N90 G01 X-1.486 Y-7.791 Z0.47	N480 G01 X-6.572 Y-2.135 Z-0.70
N100 G01 X-2.895 Y-7.312 Z0.44	N490 G01 X-6.856 Y-0.866 Z-0.73
N110 G01 X-4.177 Y-6.582 Z0.41	N500 G01 X-6.896 Y0.434 Z-0.76
N120 G01 X-5.290 Y-5.633 Z0.38	N510 G01 X-6.693 Y1.718 Z-0.79
N130 G01 X-6.197 Y-4.502 Z0.35	N520 G01 X-6.252 Y2.942 Z-0.82
N140 G01 X-6.869 Y-3.232 Z0.32	N530 G01 X-5.590 Y4.062 Z-0.85
N150 G01 X-7.287 Y-1.871 Z0.29	N540 G01 X-4.730 Y5.037 Z-0.88
N160 G01 X-7.440 Y-0.468 Z0.26	N550 G01 X-3.703 Y5.834 Z-0.91
N170 G01 X-7.329 Y0.926 Z0.23	N560 G01 X-2.544 Y6.425 Z-0.94
N180 G01 X-6.961 Y2.262 Z0.20	N570 G01 X-1.295 Y6.788 Z-0.97
N190 G01 X-6.354 Y3.493 Z0.17	N580 G01 X0.000 Y6.910 Z-1.00
N200 G01 X-5.534 Y4.578 Z0.14	N590 G01 X1.308 Y6.855 Z-1.03
N210 G01 X-4.535 Y5.482 Z0.11	N600 G01 X2.594 Y6.551 Z-1.06
N220 G01 X-3.395 Y6.175 Z0.08	N610 G01 X3.812 Y6.007 Z-1.09
N230 G01 X-2.156 Y6.637 Z0.05	N620 G01 X4.917 Y5.236 Z-1.12
N240 G01 X-0.866 Y6.856 Z0.02	N630 G01 X5.866 Y4.262 Z-1.15
N250 G01 X0.434 Y6.896 Z-0.01	N640 G01 X6.622 Y3.116 Z-1.18
N260 G01 X1.718 Y6.693 Z-0.04	N650 G01 X7.155 Y1.837 Z-1.21
N270 G01 X2.942 Y6.252 Z-0.07	N660 G01 X7.440 Y0.468 Z-1.24
N280 G01 X4.062 Y5.590 Z-0.10	N670 G01 X7.464 Y-0.943 Z-1.27
N290 G01 X5.037 Y4.730 Z-0.13	N680 G01 X7.220 Y-2.346 Z-1.30
N300 G01 X5.834 Y3.703 Z-0.16	N690 G01 X6.712 Y-3.690 Z-1.33
N310 G01 X6.425 Y2.544 Z-0.19	N700 G01 X5.954 Y-4.926 Z-1.36
N320 G01 X6.788 Y1.295 Z-0.22	N710 G01 X4.969 Y-6.007 Z-1.39
N330 G01 X6.910 Y0.000 Z-0.25	N720 G01 X3.788 Y-6.891 Z-1.42
N340 G01 X6.788 Y-1.295 Z-0.28	N730 G01 X2.451 Y-7.544 Z-1.45
N350 G01 X6.425 Y-2.544 Z-0.31	N740 G01 X1.003 Y-7.937 Z-1.48
N360 G01 X5.834 Y-3.703 Z-0.34	N750 G01 X0 Y-8 Z-1.5
N370 G01 X5.037 Y-4.730 Z-0.37	N760 G01 X-20 Y-8
N380 G01 X4.062 Y-5.590 Z-0.40	N770 G00 Z50
N390 G01 X2.942 Y-6.252 Z-0.43	N780 M30
	%

Código G para Trajetória 2 (T2) – (Corpo-de-prova 3, profundidade = 0,99mm)

%	N420 G01 X6.667 Y2.166 Z-1.20
O0300	N430 G01 X7.010 Y0.000 Z-1.25
N10 G21 G94 G97 G40	N440 G01 X6.667 Y-2.166 Z-1.30
N20 G90 G17 G59	N450 G01 X5.671 Y-4.120 Z-1.35
N30 G0 Z50	N460 G01 X4.120 Y-5.671 Z-1.40
N40 G0 X20 Y-8	N470 G01 X2.166 Y-6.667 Z-1.45
N50 G0 Z1	N480 G01 X0.000 Y-7.010 Z-1.50
N60 S1275 M03	N490 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-1.55
N70 G01 F40 X10 Y-8.000 Z0.5	N500 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-1.60
N80 G01 X0.000 Y-8.000 Z0.50	N510 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-1.65
N90 G01 X-2.442 Y-7.514 Z0.45	N520 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-1.70
N100 G01 X-4.586 Y-6.312 Z0.40	N530 G01 X-7.010 Y0.000 Z-1.75
N110 G01 X-6.232 Y-4.528 Z0.35	N540 G01 X-6.667 Y2.166 Z-1.80
N120 G01 X-7.232 Y-2.350 Z0.30	N550 G01 X-5.671 Y4.120 Z-1.85
N130 G01 X-7.505 Y0.000 Z0.25	N560 G01 X-4.120 Y5.671 Z-1.90
N140 G01 X-7.044 Y2.289 Z0.20	N570 G01 X-2.166 Y6.667 Z-1.95
N150 G01 X-5.911 Y4.295 Z0.15	N580 G01 X0.000 Y7.010 Z-2.00
N160 G01 X-4.237 Y5.831 Z0.10	N590 G01 X2.166 Y6.667 Z-2.05
N170 G01 X-2.197 Y6.761 Z0.05	N600 G01 X4.120 Y5.671 Z-2.10
N180 G01 X0.000 Y7.010 Z0.00	N610 G01 X5.671 Y4.120 Z-2.15
N190 G01 X2.166 Y6.667 Z-0.05	N620 G01 X6.667 Y2.166 Z-2.20
N200 G01 X4.120 Y5.671 Z-0.10	N630 G01 X7.010 Y0.000 Z-2.25
N210 G01 X5.671 Y4.120 Z-0.15	N640 G01 X6.667 Y-2.166 Z-2.30
N220 G01 X6.667 Y2.166 Z-0.20	N650 G01 X5.671 Y-4.120 Z-2.35
N230 G01 X7.010 Y0.000 Z-0.25	N660 G01 X4.120 Y-5.671 Z-2.40
N240 G01 X6.667 Y-2.166 Z-0.30	N670 G01 X2.166 Y-6.667 Z-2.45
N250 G01 X5.671 Y-4.120 Z-0.35	N680 G01 X0.000 Y-7.010 Z-2.50
N260 G01 X4.120 Y-5.671 Z-0.40	N690 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-2.55
N270 G01 X2.166 Y-6.667 Z-0.45	N700 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-2.60
N280 G01 X0.000 Y-7.010 Z-0.50	N710 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-2.65
N290 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-0.55	N720 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-2.70
N300 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-0.60	N730 G01 X-7.010 Y0.000 Z-2.75
N310 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-0.65	N740 G01 X-6.667 Y2.166 Z-2.80
N320 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-0.70	N750 G01 X-5.671 Y4.120 Z-2.85
N330 G01 X-7.010 Y0.000 Z-0.75	N760 G01 X-4.120 Y5.671 Z-2.90
N340 G01 X-6.667 Y2.166 Z-0.80	N770 G01 X-2.166 Y6.667 Z-2.95
N350 G01 X-5.671 Y4.120 Z-0.85	N780 G01 X0.000 Y7.010 Z-3.00
N360 G01 X-4.120 Y5.671 Z-0.90	N790 G01 X2.166 Y6.667 Z-3.05
N370 G01 X-2.166 Y6.667 Z-0.95	N800 G01 X4.120 Y5.671 Z-3.10
N380 G01 X0.000 Y7.010 Z-1.00	N810 G01 X5.671 Y4.120 Z-3.15
N390 G01 X2.166 Y6.667 Z-1.05	N820 G01 X6.667 Y2.166 Z-3.20
N400 G01 X4.120 Y5.671 Z-1.10	N830 G01 X7.010 Y0.000 Z-3.25
N410 G01 X5.671 Y4.120 Z-1.15	N840 G01 X6.667 Y-2.166 Z-3.30

N850 G01 X5.671 Y-4.120 Z-3.35
N860 G01 X4.120 Y-5.671 Z-3.40
N870 G01 X2.166 Y-6.667 Z-3.45
N880 G01 X0.000 Y-7.010 Z-3.50
N890 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-3.55
N900 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-3.60
N910 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-3.65
N920 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-3.70
N930 G01 X-7.010 Y0.000 Z-3.75
N940 G01 X-6.667 Y2.166 Z-3.80
N950 G01 X-5.671 Y4.120 Z-3.85
N960 G01 X-4.120 Y5.671 Z-3.90
N970 G01 X-2.166 Y6.667 Z-3.95
N980 G01 X0.000 Y7.010 Z-4.00
N990 G01 X2.166 Y6.667 Z-4.05
N1000 G01 X4.120 Y5.671 Z-4.10
N1010 G01 X5.671 Y4.120 Z-4.15
N1020 G01 X6.667 Y2.166 Z-4.20
N1030 G01 X7.010 Y0.000 Z-4.25
N1040 G01 X6.667 Y-2.166 Z-4.30
N1050 G01 X5.671 Y-4.120 Z-4.35
N1060 G01 X4.120 Y-5.671 Z-4.40
N1070 G01 X2.166 Y-6.667 Z-4.45
N1080 G01 X0.000 Y-7.010 Z-4.50
N1090 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-4.55
N1100 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-4.60
N1110 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-4.65
N1120 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-4.70
N1130 G01 X-7.010 Y0.000 Z-4.75
N1140 G01 X-6.667 Y2.166 Z-4.80
N1150 G01 X-5.671 Y4.120 Z-4.85
N1160 G01 X-4.120 Y5.671 Z-4.90
N1170 G01 X-2.166 Y6.667 Z-4.95
N1180 G01 X0.000 Y7.010 Z-5.00
N1190 G01 X2.166 Y6.667 Z-5.05
N1200 G01 X4.120 Y5.671 Z-5.10
N1210 G01 X5.671 Y4.120 Z-5.15
N1220 G01 X6.667 Y2.166 Z-5.20
N1230 G01 X7.010 Y0.000 Z-5.25
N1240 G01 X6.667 Y-2.166 Z-5.30
N1250 G01 X5.671 Y-4.120 Z-5.35
N1260 G01 X4.120 Y-5.671 Z-5.40
N1270 G01 X2.166 Y-6.667 Z-5.45
N1280 G01 X0.000 Y-7.010 Z-5.50
N1290 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-5.55

N1300 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-5.60
N1310 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-5.65
N1320 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-5.70
N1330 G01 X-7.010 Y0.000 Z-5.75
N1340 G01 X-6.667 Y2.166 Z-5.80
N1350 G01 X-5.671 Y4.120 Z-5.85
N1360 G01 X-4.120 Y5.671 Z-5.90
N1370 G01 X-2.166 Y6.667 Z-5.95
N1380 G01 X0.000 Y7.010 Z-6.00
N1390 G01 X2.166 Y6.667 Z-6.05
N1400 G01 X4.120 Y5.671 Z-6.10
N1410 G01 X5.671 Y4.120 Z-6.15
N1420 G01 X6.667 Y2.166 Z-6.20
N1430 G01 X7.010 Y0.000 Z-6.25
N1440 G01 X6.667 Y-2.166 Z-6.30
N1450 G01 X5.671 Y-4.120 Z-6.35
N1460 G01 X4.120 Y-5.671 Z-6.40
N1470 G01 X2.166 Y-6.667 Z-6.45
N1480 G01 X0.000 Y-7.010 Z-6.50
N1490 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-6.55
N1500 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-6.60
N1510 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-6.65
N1520 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-6.70
N1530 G01 X-7.010 Y0.000 Z-6.75
N1540 G01 X-6.667 Y2.166 Z-6.80
N1550 G01 X-5.671 Y4.120 Z-6.85
N1560 G01 X-4.120 Y5.671 Z-6.90
N1570 G01 X-2.166 Y6.667 Z-6.95
N1580 G01 X0.000 Y7.010 Z-7.00
N1590 G01 X2.166 Y6.667 Z-7.05
N1600 G01 X4.120 Y5.671 Z-7.10
N1610 G01 X5.671 Y4.120 Z-7.15
N1620 G01 X6.667 Y2.166 Z-7.20
N1630 G01 X7.010 Y0.000 Z-7.25
N1640 G01 X6.667 Y-2.166 Z-7.30
N1650 G01 X5.671 Y-4.120 Z-7.35
N1660 G01 X4.120 Y-5.671 Z-7.40
N1670 G01 X2.166 Y-6.667 Z-7.45
N1680 G01 X0.000 Y-7.010 Z-7.50
N1690 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-7.55
N1700 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-7.60
N1710 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-7.65
N1720 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-7.70
N1730 G01 X-7.010 Y0.000 Z-7.75
N1740 G01 X-6.667 Y2.166 Z-7.80

N1750 G01 X-5.671 Y4.120 Z-7.85
N1760 G01 X-4.120 Y5.671 Z-7.90
N1770 G01 X-2.166 Y6.667 Z-7.95
N1780 G01 X0.000 Y7.010 Z-8.00
N1790 G01 X2.166 Y6.667 Z-8.05
N1800 G01 X4.120 Y5.671 Z-8.10
N1810 G01 X5.671 Y4.120 Z-8.15
N1820 G01 X6.667 Y2.166 Z-8.20
N1830 G01 X7.010 Y0.000 Z-8.25
N1840 G01 X6.667 Y-2.166 Z-8.30
N1850 G01 X5.671 Y-4.120 Z-8.35
N1860 G01 X4.120 Y-5.671 Z-8.40
N1870 G01 X2.166 Y-6.667 Z-8.45
N1880 G01 X0.000 Y-7.010 Z-8.50
N1890 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-8.55
N1900 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-8.60
N1910 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-8.65
N1920 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-8.70
N1930 G01 X-7.010 Y0.000 Z-8.75
N1940 G01 X-6.667 Y2.166 Z-8.80
N1950 G01 X-5.671 Y4.120 Z-8.85
N1960 G01 X-4.120 Y5.671 Z-8.90
N1970 G01 X-2.166 Y6.667 Z-8.95
N1980 G01 X0.000 Y7.010 Z-9.00
N1990 G01 X2.166 Y6.667 Z-9.05
N2000 G01 X4.120 Y5.671 Z-9.10
N2010 G01 X5.671 Y4.120 Z-9.15
N2020 G01 X6.667 Y2.166 Z-9.20
N2030 G01 X7.010 Y0.000 Z-9.25
N2040 G01 X6.667 Y-2.166 Z-9.30
N2050 G01 X5.671 Y-4.120 Z-9.35
N2060 G01 X4.120 Y-5.671 Z-9.40
N2070 G01 X2.166 Y-6.667 Z-9.45
N2080 G01 X0.000 Y-7.010 Z-9.50
N2090 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-9.55
N2100 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-9.60
N2110 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-9.65
N2120 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-9.70
N2130 G01 X-7.010 Y0.000 Z-9.75
N2140 G01 X-6.667 Y2.166 Z-9.80
N2150 G01 X-5.671 Y4.120 Z-9.85
N2160 G01 X-4.120 Y5.671 Z-9.90
N2170 G01 X-2.166 Y6.667 Z-9.95
N2180 G01 X0.000 Y7.010 Z-10.00
N2190 G01 X2.166 Y6.667 Z-10.05
N2200 G01 X4.120 Y5.671 Z-10.10
N2210 G01 X5.671 Y4.120 Z-10.15
N2220 G01 X6.667 Y2.166 Z-10.20
N2230 G01 X7.010 Y0.000 Z-10.25
N2240 G01 X6.667 Y-2.166 Z-10.30
N2250 G01 X5.671 Y-4.120 Z-10.35
N2260 G01 X4.120 Y-5.671 Z-10.40
N2270 G01 X2.166 Y-6.667 Z-10.45
N2280 G01 X0.000 Y-7.010 Z-10.50
N2290 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-10.55
N2300 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-10.60
N2310 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-10.65
N2320 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-10.70
N2330 G01 X-7.010 Y0.000 Z-10.75
N2340 G01 X-6.667 Y2.166 Z-10.80
N2350 G01 X-5.671 Y4.120 Z-10.85
N2360 G01 X-4.120 Y5.671 Z-10.90
N2370 G01 X-2.166 Y6.667 Z-10.95
N2380 G01 X0.000 Y7.010 Z-11.00
N2390 G01 X2.166 Y6.667 Z-11.05
N2400 G01 X4.120 Y5.671 Z-11.10
N2410 G01 X5.671 Y4.120 Z-11.15
N2420 G01 X6.667 Y2.166 Z-11.20
N2430 G01 X7.010 Y0.000 Z-11.25
N2440 G01 X6.667 Y-2.166 Z-11.30
N2450 G01 X5.671 Y-4.120 Z-11.35
N2460 G01 X4.120 Y-5.671 Z-11.40
N2470 G01 X2.166 Y-6.667 Z-11.45
N2480 G01 X0.000 Y-7.010 Z-11.50
N2490 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-11.55
N2500 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-11.60
N2510 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-11.65
N2520 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-11.70
N2530 G01 X-7.010 Y0.000 Z-11.75
N2540 G01 X-6.667 Y2.166 Z-11.80
N2550 G01 X-5.671 Y4.120 Z-11.85
N2560 G01 X-4.120 Y5.671 Z-11.90
N2570 G01 X-2.166 Y6.667 Z-11.95
N2580 G01 X0.000 Y7.010 Z-12.00
N2590 G01 X2.166 Y6.667 Z-12.05
N2600 G01 X4.120 Y5.671 Z-12.10
N2610 G01 X5.671 Y4.120 Z-12.15
N2620 G01 X6.667 Y2.166 Z-12.20
N2630 G01 X7.010 Y0.000 Z-12.25
N2640 G01 X6.667 Y-2.166 Z-12.30

N2650 G01 X5.671 Y-4.120 Z-12.35
N2660 G01 X4.120 Y-5.671 Z-12.40
N2670 G01 X2.166 Y-6.667 Z-12.45
N2680 G01 X0.000 Y-7.010 Z-12.50
N2690 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-12.55
N2700 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-12.60
N2710 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-12.65
N2720 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-12.70
N2730 G01 X-7.010 Y0.000 Z-12.75
N2740 G01 X-6.667 Y2.166 Z-12.80
N2750 G01 X-5.671 Y4.120 Z-12.85
N2760 G01 X-4.120 Y5.671 Z-12.90
N2770 G01 X-2.166 Y6.667 Z-12.95
N2780 G01 X0.000 Y7.010 Z-13.00
N2790 G01 X2.166 Y6.667 Z-13.05
N2800 G01 X4.120 Y5.671 Z-13.10
N2810 G01 X5.671 Y4.120 Z-13.15
N2820 G01 X6.667 Y2.166 Z-13.20
N2830 G01 X7.010 Y0.000 Z-13.25
N2840 G01 X6.667 Y-2.166 Z-13.30
N2850 G01 X5.671 Y-4.120 Z-13.35
N2860 G01 X4.120 Y-5.671 Z-13.40
N2870 G01 X2.166 Y-6.667 Z-13.45
N2880 G01 X0.000 Y-7.010 Z-13.50
N2890 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-13.55
N2900 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-13.60
N2910 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-13.65
N2920 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-13.70
N2930 G01 X-7.010 Y0.000 Z-13.75
N2940 G01 X-6.667 Y2.166 Z-13.80
N2950 G01 X-5.671 Y4.120 Z-13.85
N2960 G01 X-4.120 Y5.671 Z-13.90
N2970 G01 X-2.166 Y6.667 Z-13.95
N2980 G01 X0.000 Y7.010 Z-14.00
N2990 G01 X2.166 Y6.667 Z-14.05
N3000 G01 X4.120 Y5.671 Z-14.10
N3010 G01 X5.671 Y4.120 Z-14.15
N3020 G01 X6.667 Y2.166 Z-14.20
N3030 G01 X7.010 Y0.000 Z-14.25
N3040 G01 X6.667 Y-2.166 Z-14.30
N3050 G01 X5.671 Y-4.120 Z-14.35
N3060 G01 X4.120 Y-5.671 Z-14.40
N3070 G01 X2.166 Y-6.667 Z-14.45
N3080 G01 X0.000 Y-7.010 Z-14.50
N3090 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-14.55
N3100 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-14.60
N3110 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-14.65
N3120 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-14.70
N3130 G01 X-7.010 Y0.000 Z-14.75
N3140 G01 X-6.667 Y2.166 Z-14.80
N3150 G01 X-5.671 Y4.120 Z-14.85
N3160 G01 X-4.120 Y5.671 Z-14.90
N3170 G01 X-2.166 Y6.667 Z-14.95
N3180 G01 X0.000 Y7.010 Z-15.00
N3190 G01 X2.166 Y6.667 Z-15.05
N3200 G01 X4.120 Y5.671 Z-15.10
N3210 G01 X5.671 Y4.120 Z-15.15
N3220 G01 X6.667 Y2.166 Z-15.20
N3230 G01 X7.010 Y0.000 Z-15.25
N3240 G01 X6.667 Y-2.166 Z-15.30
N3250 G01 X5.671 Y-4.120 Z-15.35
N3260 G01 X4.120 Y-5.671 Z-15.40
N3270 G01 X2.166 Y-6.667 Z-15.45
N3280 G01 X0.000 Y-7.010 Z-15.50
N3290 G01 X-2.166 Y-6.667 Z-15.55
N3300 G01 X-4.120 Y-5.671 Z-15.60
N3310 G01 X-5.671 Y-4.120 Z-15.65
N3320 G01 X-6.667 Y-2.166 Z-15.70
N3330 G01 X-7.010 Y0.000 Z-15.75
N3340 G01 X-6.667 Y2.166 Z-15.80
N3350 G01 X-5.671 Y4.120 Z-15.85
N3360 G01 X-4.120 Y5.671 Z-15.90
N3370 G01 X-2.166 Y6.667 Z-15.95
N3380 G01 X0.000 Y7.010 Z-16.00
N3390 G01 X2.197 Y6.761 Z-16.05
N3400 G01 X4.237 Y5.831 Z-16.10
N3410 G01 X5.911 Y4.295 Z-16.15
N3420 G01 X7.044 Y2.289 Z-16.20
N3430 G01 X7.505 Y0.000 Z-16.25
N3440 G01 X7.232 Y-2.350 Z-16.30
N3450 G01 X6.232 Y-4.528 Z-16.35
N3460 G01 X4.586 Y-6.312 Z-16.40
N3470 G01 X2.442 Y-7.514 Z-16.45
N3480 G01 X0.000 Y-8.000 Z-16.50
N3490 G01 X-10.000 Y-8.000 Z-16.50
N3500 G00 Z50
N3510 M30
%

ANEXO D

Curvas da Pré-carga em função do número de ciclos para parafusos de aço submetidos a CTC de acordo com um PF igual 2^3+3 experimentos

