

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LIGAS MEMÓRIA DE FORMA PARA REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
CONCRETO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

PEDRO GOUVÊA SANGI ROCHA

JUIZ DE FORA

2025

LIGAS MEMÓRIA DE FORMA PARA REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
CONCRETO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

PEDRO GOUVÊA SANGI ROCHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Juiz de Fora, como
requisito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Civil.

Área de Conhecimento: Estruturas

Orientador: Prof. Cleber Maestri Gonçalves, M. Sc.

Juiz de Fora

Faculdade de Engenharia da UFJF

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Gouvêa Sangi Rocha, Pedro.

Ligas Memória de Forma para reforço de elementos estruturais de concreto : Revisão Bibliográfica / Pedro Gouvêa Sangi Rocha. -- 2025.

64 p. : il.

Orientador: Cleber Maestri Gongalves

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2025.

1. Liga Memória de Forma. 2. Reforço de Estruturas. I. Maestri Gongalves, Cleber, orient. II. Título.

LIGAS MEMORIA DE FORMA PARA REFORÇO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE
CONCRETO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

PEDRO GOUVÊA SANGI ROCHA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora constituída de acordo com a Resolução Nº 01/2018 do Colegiado do Curso de Engenharia Civil, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em:

Por:

Documento assinado digitalmente
 **CLEBER MAESTRI GONCALVES**
Data: 28/02/2025 14:07:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. CLEBER MAESTRI GONÇALVES, M.Sc.

UFJF/FAC. ENG./DEP. ESTR.

Documento assinado digitalmente
 **PAULA DE OLIVEIRA RIBEIRO**
Data: 28/02/2025 14:52:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. PAULA DE OLIVEIRA RIBEIRO, D.Sc. (Examinadora 01)

UFJF/FAC. ENG./DEP. ESTR.

Documento assinado digitalmente
 **WANDERSON FERNANDO MAIA**
Data: 28/02/2025 14:14:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. WANDERSON FERNANDO MAIA, D.Sc. (Examinador 02)

UFJF/FAC. ENG./DEP. ESTR.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Marconi e Michele, minha eterna gratidão. Mais do que ensinamentos, vocês me deram um olhar para o mundo. Com vocês, aprendi a importância de buscar conhecimento por conta própria e a compreender a dualidade do amor, que se manifesta tanto no cuidado quanto na liberdade. Foram vocês que me deram os primeiros livros, abrindo portas para um universo que moldou quem sou.

Aos meus avós, Rui e Eunice, que, mesmo diante das dificuldades, me criaram com amor e dedicação. Seu esforço e resiliência foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado por cada ensinamento e cada gesto de carinho.

Ao meu primo Rogério, sua esposa Alyne e seus filhos, sou imensamente grato. Desde o início da minha jornada, vocês me acolheram, me deram suporte e abriram suas portas para que eu pudesse seguir meu caminho com mais segurança. Seu apoio fez toda a diferença e sempre será lembrado com muito carinho.

Aos amigos e companheiros que encontrei ao longo do curso, meu sincero agradecimento. A caminhada acadêmica pode ser desafiadora e, muitas vezes, solitária, mas graças a vocês, essa jornada se tornou mais leve, repleta de aprendizado compartilhado e momentos inesquecíveis.

A todos os professores da UFJF, minha admiração e respeito. Cada ensinamento contribuiu para minha formação, moldando não apenas meu conhecimento, mas também minha forma de enxergar o mundo. Um agradecimento especial ao Professor Cleber, por seu acolhimento e paciência, e por me ensinar que o desafio é a ferramenta mais valiosa do educador para esculpir o aprendizado.

Por último a Deus, que sempre esteve ao meu lado, iluminando meu caminho e fortalecendo minha fé. Por meio d'Ele todas as coisas têm propósito.

"A engenharia estrutural é a arte de moldar materiais que não entendemos completamente, em formas que não podemos analisar com precisão, para resistir a forças que não podemos avaliar corretamente, de forma que o público em geral não tenha razão para suspeitar da extensão de nossa ignorância."

– James E. Amrhein

RESUMO

A Engenharia Civil moderna exige soluções estruturais que vão além da funcionalidade básica e da capacidade de carga. O desenvolvimento de estruturas mais leves, com grandes vãos e alta adaptabilidade ao uso, bem como a necessidade de reforço e manutenção de edificações existentes, impulsiona a busca por materiais inovadores. Nesse contexto, as Ligas memória de forma (LMF) surgem como uma alternativa promissora, pois apresentam propriedades únicas, como superelasticidade e reversibilidade de forma, que permitem sua aplicação no reforço de elementos estruturais. O objetivo deste trabalho é explorar o conhecimento sobre a utilização das LMF em estruturas de concreto, abordando desde a definição do material até suas aplicações conhecidas na Engenharia Civil. São abordadas suas principais características, os mecanismos que possibilitam o reforço estrutural e os cenários em que sua aplicação se mostra viável, como em reforço de elementos estruturais, situações de incêndio e protensão. Apesar do grande potencial das LMF para melhorar o desempenho estrutural e reduzir danos em condições extremas, sua aplicação ainda enfrenta desafios significativos. A pesquisa no campo de estruturas resilientes utilizando esses materiais ainda é limitada, e os altos custos e a complexidade de fabricação das ligas restringem sua adoção em larga escala.

Palavras-chave: Liga Memória de Forma; superelasticidade; efeito memória de forma; pseudoelasticidade; trincas; fissuras; incêndio; reforço; concreto armado; concreto protendido.

ABSTRACT

Modern civil engineering demands structural solutions that go beyond basic functionality and load-bearing capacity. The development of lighter structures with large spans and high adaptability, as well as the need for reinforcement and maintenance of existing buildings, drives the search for innovative materials. In this context, Shape Memory Alloys (SMA) emerge as a promising alternative, as they exhibit unique properties such as superelasticity and shape reversibility, allowing their application in the reinforcement of structural members. The objective of this study is to explore the knowledge regarding the use of SMAs in concrete structures, covering everything from the definition of the material to its known applications in civil engineering. This work discusses their main characteristics, the mechanisms enabling structural reinforcement, and the scenarios in which their application proves viable, such as structural reinforcement, fire situations, and prestressing. Despite the great potential of SMAs to improve structural performance and reduce damage under extreme conditions, their application still faces significant challenges. Research in the field of resilient structures using these materials remains limited, and the high costs and complexity of manufacturing these alloys restrict their widespread adoption.

Keywords: Shape Memory Alloy; superelasticity; shape memory effect; pseudoelasticity; cracks; fissures; fire; reinforcement; reinforced concrete; prestressed concrete.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Redes cristalinas de Fe-LMF	16
Figura 2: Assimetria da estrutura devido ao carregamento	16
Figura 3: Fases e estruturas cristalinas em LMF	17
Figura 4: Comportamento tensão-deformação de uma LMF superelástica.....	19
Figura 5: A torre do sino da Igreja de San Giorgio	24
Figura 6: Dispositivos de LMF instalados na Basílica de São Francisco.....	25
Figura 7: Aplicações de LMF em pontes	26
Figura 8: Corpos de prova ensaiados.....	28
Figura 9: Fibras curtas de LMF	29
Figura 10: Aquecimento do corpo de prova para ativação do EMF.....	29
Figura 11: Dispositivo para fechamento de trincas em Michigan.....	31
Figura 12: Módulo de elasticidade e recuperação percentual para diferentes composições de LMF.....	33
Figura 13: Detalhamento das vigas ensaiadas	34
Figura 14: Carga de trincamento dos grupos de ensaio.....	36
Figura 15: Carga de rompimento dos grupos de ensaio	37
Figura 16: Deflexão no meio do vão dos grupos de ensaio.....	37
Figura 17: Sistema FRP com uso de lâmina unidirecional.....	38
Figura 18: Foto das Fitas de Fe-LMF utilizadas no reforço.....	39

Figura 19: Fitas introduzidas em viga e método de aquecimento	40
Figura 20: Fitas nos sulcos da viga e fixação com argamassa.....	40
Figura 21: Desenvolvimento da tensão de recuperação nas fitas	41
Figura 22: Deslocamento do meio do vão de viga reforçada	42
Figura 23: Gráfico tensão-deformação da fita não deformada.....	43
Figura 24: Tensão-Deformação em fita pré-deformada	44
Figura 25: Barras de aço com efeito memória de forma	44
Figura 26: Foto do reforço com fitas de Fe-LMF.....	45
Figura 27: Barras de Fe-LMF em sulcos da laje	46
Figura 28: Ancoragem das barras com argamassa	47
Figura 29: Esquema de confinamento com LMF em espiral.....	48
Figura 30: Tensões desenvolvidas no fio de NiTiNb-LMF.....	49
Figura 31: Tensões desenvolvidas para diferentes deformações.....	49
Figura 32: Tensão-deformação do concreto confinado com LMF e não-confinado	50
Figura 33: Esquema de reforço cisalhante com fitas de Fe-LMF.....	51
Figura 34: Foto do experimento de reforço cisalhante	52
Figura 35: Foto das vigas ensaiadas após a falha	52
Figura 36: Carga-Deflexão das vigas ensaiadas	53
Figura 37: Variação da Resistência dos materiais em função da temperatura	54
Figura 38: Variação do módulo de elasticidade dos materiais em função da temperatura	54
Figura 39: Modelo proposto de reforço contra incêndio	56

Figura 40: Momento fletor último em viga reforçada x não-reforçada.....57

Figura 41: Deflexão em viga reforçada x não-reforçada.....57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições de LMF e suas propriedades	20
Tabela 2: Propriedades mecânicas de LMF.....	21
Tabela 3: Resultados de recuperação de fissuras do ensaio de flexão.....	30
Tabela 4: Propriedades mecânicas dos cabos de protensão.....	35
Tabela 5: Propriedades mecânicas da liga NiTi em temperaturas elevadas	55
Tabela 6: Resultados de reforço estrutural contra incêndio com LMF	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 LIGAS MEMORIA DE FORMA	14
2.1.1 HISTÓRICO	14
2.1.2 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA	15
2.1.3 HIPERELASTICIDADE	18
2.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS	20
2.1.5 APLICAÇÕES	21
2.2 LIGAS MEMORIA DE FORMA APLICADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
2.2.1 AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÕES E PROTEÇÃO CONTRA TERREMOTOS..	22
2.2.2 MELHORA DO DESEMPENHO DE PONTES	26
2.2.3 RECUPERAÇÃO DE TRINCAS E FISSURAS	27
2.3 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM LMF	32
2.3.1. PROTENSÃO UTILIZANDO CABOS DE NiTi-LMF	33
2.3.2. PROTENSÃO UTILIZANDO FITAS DE Fe-LMF	38
2.3.3. CONFINAMENTO ATIVO UTILIZANDO LMF	47
2.3.4. REFORÇO AO CISALHAMENTO UTILIZANDO Fe-LMF	50
2.3.5. PROTEÇÃO AO FOGO UTILIZANDO LIGAS MEMORIA DE FORMA	54
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios em projetar estruturas de concreto é conciliar a longa vida útil do material com a economia na construção: por um lado, a estrutura durará um longo período e estará exposta a inúmeras condições ambientais e de solicitações que podem pôr em risco sua integridade; por outro, quanto maior o número de solicitações consideradas no dimensionamento, mais cara e robusta será a estrutura (Carvalho e Filho, 2021).

Não é incomum que por razões práticas e econômicas se deseje estender a vida útil das estruturas de concreto em prédios e pontes. Isso, somado à impraticabilidade de prever e considerar todos os tipos de solicitações que tais estruturas podem sofrer, resulta na necessidade de realizar reforços nos elementos estruturais em algum momento de seu ciclo de vida; seja para reabilitar ou para adaptar a estrutura a uma nova solicitação (Czaderski *et al.*, 2014; Dyer, 2015)

Frequentemente, no entanto, as medidas comumente utilizadas para reforçar as estruturas de concreto vão de frente às exigências estéticas ou econômicas de cada tipo de obra, de forma que é preciso repensar os métodos e tecnologias utilizados para tais finalidades (Dyer, 2015).

Nesse sentido, cada vez mais vem sendo desenvolvidos estudos a respeito da viabilidade da aplicação de Ligas Memória de Forma (LMF) na construção civil, com o objetivo de garantir às obras e estruturas novas características de desempenho e adaptabilidade (Chang e Araki, 2016; Janke *et al.*, 2005; Pereira, 2011).

O presente estudo se propõe, portanto, a realizar uma Revisão Bibliográfica da utilização de ligas memória de forma como método de reforço em estruturas de concreto.

1.1 JUSTIFICATIVA

As exigências na Engenharia Civil moderna vão além de atender à funcionalidade básica e à capacidade de carga das estruturas. A busca por soluções mais eficientes, como estruturas mais leves, de grandes vãos e alta adaptabilidade ao uso, associada à necessidade de manutenção e reforço de estruturas existentes, torna o conceito de estruturas e sistemas adaptativos altamente relevante. Nesse cenário, o uso de materiais inovadores, como as Ligas

memória de forma (LMF), se destaca como alternativa eficaz para atender às necessidades de desempenho estrutural e de adaptabilidade (Janke *et al.*, 2005).

As LMF oferecem propriedades únicas, como superelasticidade e reversibilidade de forma, que as tornam ideais para o reforço de concreto em condições desafiadoras. Sua capacidade de alternar entre as fases martensita e austenita em resposta a variações de temperatura ou tensões externas proporciona maior resistência e adaptabilidade. Essas características possibilitam não apenas a melhoria da capacidade estrutural, mas também a redução de danos e custos de reparo em situações de cargas extremas, justificando sua aplicação como tecnologia inovadora no reforço de estruturas de concreto (Janke *et al.*, 2005).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é aprofundar o conhecimento a respeito da utilização de ligas memória de forma em estruturas de concreto, abordando desde a definição do material e suas aplicações civis, até suas possíveis aplicações em Engenharia Civil e seus mecanismos de promoção de reforço em estruturas.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Reunir informações sobre as possibilidades de utilização das Ligas Memória de Forma como reforço de elementos estruturais de concreto e as condições em que a técnica é viável na atualidade, incluindo aplicações em reforço, situações de incêndio, protensão, entre outros. Além disso, compreender o funcionamento das Ligas Memória de Forma, seus princípios de ativação e comportamento mecânico, para avaliar seu potencial e limitações nessas aplicações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS MEMÓRIA DE FORMA

Ligas memória de forma (LMF) são um grupo de ligas metálicas que se destacam por possuírem a habilidade de retornar a uma forma original, após deformadas, por meio de uma ativação térmica que irá induzir mudanças de fase em sua estrutura cristalina (Jani, *et al.*, 2014).

Essas mudanças de fase garantem às ligas memória de forma duas propriedades de grande interesse nos estudos das ciências dos materiais: o efeito memória de forma (EMF) e a superelasticidade - também chamada de pseudoelasticidade (Naresh e Rao, 2016).

O efeito memória de forma se trata, de fato, da capacidade de recuperação de grandes deformações mediante a ativação da mudança de fase da LMF (Naresh e Rao, 2016).

A superelasticidade, por sua vez, é a capacidade do material retornar à sua forma original apenas com o descarregamento das tensões aplicadas a ele enquanto permanece acima de uma determinada temperatura e possibilita que as LMF atuem como dissipadores de energia em sistemas vibracionais (Oliveira, 2014).

Graças a essas características, as ligas memória de forma são também chamadas de “materiais inteligentes” com aplicações civis, principalmente em sistemas que requerem capacidade de adaptação (Jani, *et al.*, 2014).

2.1.1 HISTÓRICO

As ligas memória de forma foram descobertas em 1932, quando o físico sueco Arne Ölander percebeu em uma liga metálica ouro-cádmio (Au-Cd) a capacidade de retornar à sua forma original pré-deformação quando aquecida. Esse fenômeno – que viria a ser denominado efeito memória de forma – foi observado em diversas ligas metálicas ao longo das décadas de 30 e 40, o que despertou grande interesse da comunidade científica; mas o alto custo dos materiais e da fabricação e propriedades mecânicas pobres inviabilizavam utilizações práticas dessas ligas (Jani, *et al.*, 2014).

Somente em 1962 é que a importância de ligas memória de forma começou a ser reconhecida, quando William Buehler e Frederick Wang desenvolveram a primeira liga de memória de forma comercialmente viável, conhecida como Nitinol, uma liga de níquel-titânio.

O nome Nitinol deriva de níquel-titânio e Naval Ordnance Laboratory (Laboratório de Armamento Naval), onde a liga foi desenvolvida (Jani, *et al.*, 2014).

Os primeiros produtos a serem comercializados com tecnologia memória de forma foram os tubos de acoplagem “shrink-to-fit” (encolher para caber) CryoFit™ da Raychem Corporation’s, em 1969, aeroespacial para os jatos F-14. Logo após, em 1971, George B. Andreasen desenvolveu os primeiros fios ortodônticos com LMF (Jani, *et al.*, 2014).

Desde então, as ligas memória de forma tem sido amplamente estudadas e aplicadas em diversas áreas, como medicina, eletrônica, aeroespacial e automotiva, devido às suas propriedades excepcionais. Avanços contínuos na pesquisa e desenvolvimento de novas composições de ligas e técnicas de processamento levaram a uma expansão significativa no uso e nas aplicações das LMF (Jani, *et al.*, 2014).

2.1.2 EFEITO MEMÓRIA DE FORMA

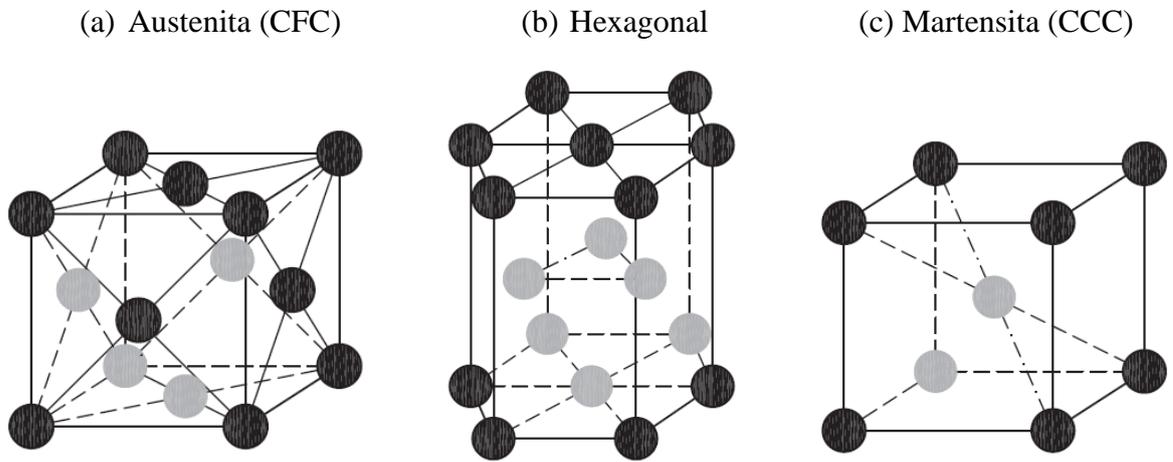
O efeito memória de forma (EMF) que dá o nome às ligas memória de forma, é o fenômeno caracterizado pelo retorno de um corpo a uma forma original quando deformado e posteriormente aquecido. Esse fenômeno ocorre graças a mudanças de fase que o material passa quando exposto a um ciclo de deformações e aquecimentos (Oliveira, 2014).

Essas mudanças de fase são, fundamentalmente, as transições de uma estrutura cristalina para outra em determinadas condições de temperatura e tensão. Assim, as LMF irão se apresentar em duas fases possíveis: martensita (maclada ou não-maclada) e austenita (Naresh e Rao, 2016).

Enquanto o material se mantém em baixas temperaturas e não recebe carregamento mecânico a liga metálica se apresenta na fase de martensita maclada e possui rede cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), como mostra a Figura 1, (c). Ao receber carregamento mecânico há a movimentação dos átomos da estrutura em curtas distâncias provocando sua assimetria – Figura 2 - e assumindo caráter ortorrômbico, monoclinico ou hexagonal, como é o caso de ligas memória de forma baseadas em ferro (Fe-LMF), apresentado na Figura 1, (b); assim recebendo a denominação de martensita não-maclada. Por fim, a fase austenítica possui rede cristalina cúbica de face centrada (CFC), como na Figura 1, (a) e é estável em altas temperaturas. Com o resfriamento, a liga retorna para a fase de martensita maclada e essa

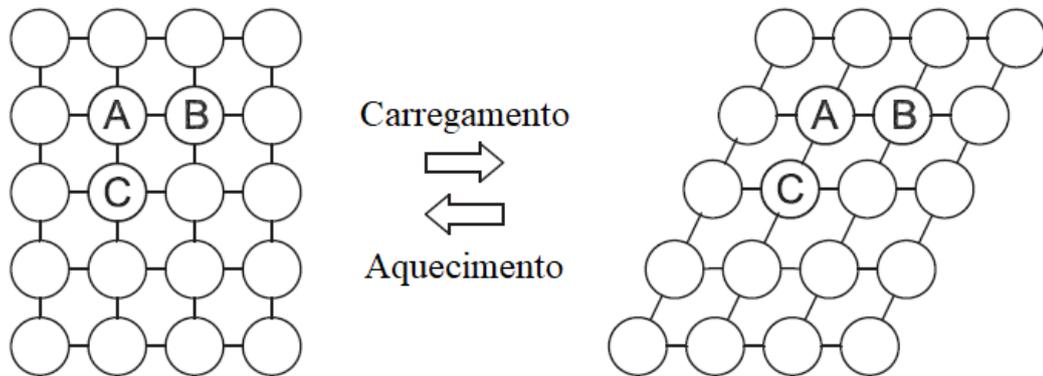
mudança de fase é chamada de Transformação Martensítica (Cladera *et al.*, 2014; Nishiyama, 1978).

Figura 1: Redes cristalinas de Fe-LMF



Fonte: Adaptado de Cladera *et al.* (2014)

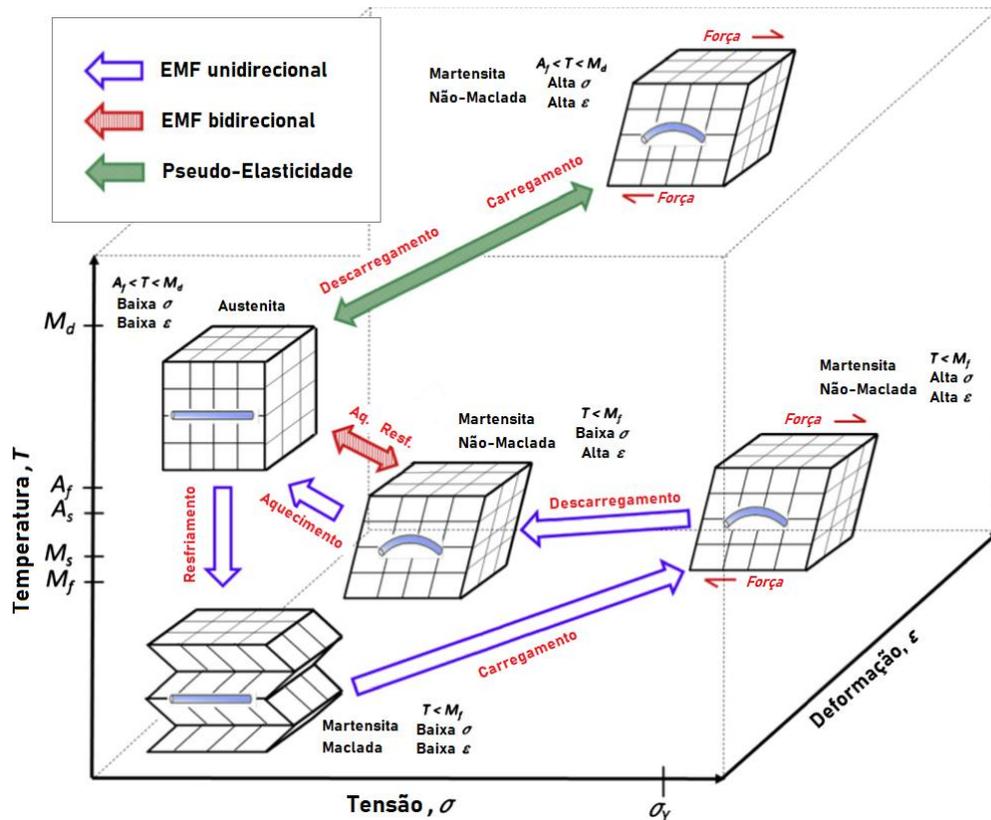
Figura 2: Assimetria da estrutura devido ao carregamento



Fonte: Adaptado de Cladera *et al.* (2014)

A Figura 3 ilustra como a transição entre essas fases ocorre, resultando no efeito memória de forma.

Figura 3: Fases e estruturas cristalinas em LMF



Fonte: Adaptado de Sun & Huang (2009, apud Jani *et al.*, 2014)

A ocorrência do efeito memória de forma unidirecional (*OWSME - One-Way Shape Memory Effect*) dentro do ciclo termodinâmico pode ser descrita da seguinte forma (Jani, *et al.*, 2014).

- O material se encontra originalmente na forma de martensita maclada, em baixa temperatura;
- Um carregamento mecânico é aplicado ao material, ainda em baixa temperatura, deformando e formando a martensita não-maclada;
- Quando a temperatura do material aumenta, o material começa a contrair e se transformar em austenita. As temperaturas de início e fim da transformação martensita-austenita são denominadas, respectivamente, de A_s e A_f ;
- Após a transformação em austenita, o reticulado cristalino assume a forma cúbica de corpo centrado, fazendo com que o material retorne para a forma original;

- e) Ao ter a temperatura reduzida, o material transforma da fase de austenita para martensita maclada. As temperaturas de início e fim da transformação austenita -martensita são denominadas, respectivamente, de M_s e M_f .

A alternativa ao EMF unidirecional é efeito memória de forma bidirecional (TWSME - Two-Way Shape Memory Effect), em que o fenômeno ocorre para duas formas diferentes, uma em temperaturas mais altas e outra em temperaturas mais baixas - sem a necessidade de aplicar carregamento no corpo (Jani, *et al.*, 2014).

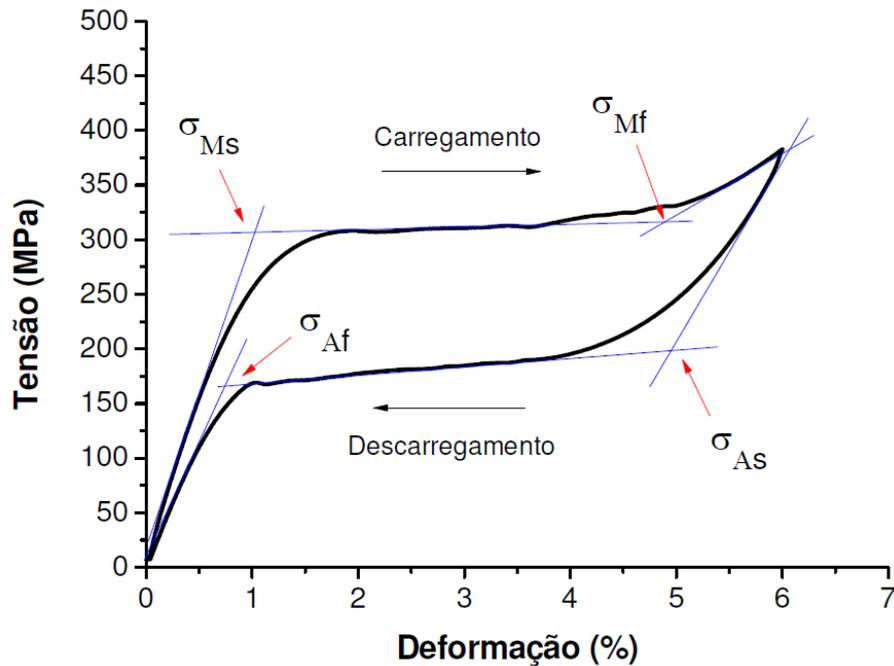
O EMF bidirecional, no entanto, precisa receber um “treinamento”, onde a liga é submetida a ciclos de aquecimento e resfriamento, com deformações aplicadas em cada fase. Esse processo cria uma memória bidirecional, onde a liga pode deformar-se de uma forma a outra quando a temperatura muda. Por exemplo, uma liga treinada pode adotar uma forma a uma temperatura baixa e outra forma completamente diferente a uma temperatura alta, sem a necessidade de uma carga externa (Kumar & Lagoudas, 2008; Otsuka & Wayman, 1998).

2.1.3 HIPERELASTICIDADE

Outra propriedade importante das ligas memória de forma relacionadas à essa dinâmica de aquecimento e deformações é a hiperelasticidade, também chamada de pseudoelasticidade. Se a temperatura da liga for mantida acima de A_f a mudança de fase ainda irá ocorrer com a aplicação de um carregamento mecânico ao corpo, mas a simples interrupção da carga faz o corpo retornar a forma original (Naresh e Rao, 2016).

Ou seja, durante a aplicação de uma carga o material se deforma significativamente, mas em vez de se romper ou se deformar permanentemente, a estrutura atômica muda para acomodar a deformação. Com isso, o material é capaz sofrer grandes deformações não-lineares e ainda assim retornar à forma original, como mostra a Figura 4 (Jani, *et al.*, 2014).

Figura 4: Comportamento tensão-deformação de uma LMF superelástica



Fonte: Oliveira (2014).

Quando a LMF é submetida a carregamento mecânico acima da temperatura crítica final de transformação austenítica (A_f), a fase austenítica começa a se deformar elasticamente até atingir a tensão crítica de início de transformação martensítica (σ_{MS}). Desse ponto, ocorre o início do patamar superelástico. À medida que a tensão aumenta, a transformação martensítica se completa ao atingir a tensão crítica final (σ_{MF}), momento em que a microestrutura é totalmente composta por martensita não-maclada. Durante o descarregamento, a transformação reversa para austenita se inicia ao alcançar a tensão crítica de início de transformação austenítica (σ_{AS}) e se conclui na tensão crítica final de transformação austenítica (σ_{AF}) (Oliveira, 2014).

É possível observar que durante o descarregamento o patamar de tensão de reversão da transformação é menor que o patamar de tensão que gerou a deformação. A essa diferença dá-se o nome de histerese e representa a diferença entre a energia recebida pelo material para sofrer a deformação e a energia devolvida ao sistema (Oliveira, 2014).

Esse ciclo de histerese é característico das LMFs e representa a energia dissipada durante a transformação de fase. A área dentro do ciclo de histerese na curva de tensão-deformação é uma medida da energia que é absorvida e dissipada pelo material durante o ciclo de carregamento e descarregamento. Esta propriedade é particularmente útil em aplicações que

requerem amortecimento e dissipação de energia, como em dispositivos de proteção sísmica (Kumar & Lagoudas, 2008).

Por exemplo, um grande valor de histerese é desejado quando o material precisa manter uma forma pré-definida em um grande intervalo de temperatura; por outro lado, um baixo valor de histerese é melhor quando o material precisa de uma resposta rápida ao acionamento do EMF (Jani, *et al.*, 2014).

2.1.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Da mesma forma que ligas metálicas comuns, diferentes composições e proporções químicas adotadas na fabricação das LMFs produzirão propriedades mecânicas e de transformação diferentes. Composições de Ligas Memória de Forma já observadas – mas não limitadas a estas – são apresentadas na Tabela 1 (Jani, *et al.*, 2014).

Tabela 1: Composições de LMF e suas propriedades

Composição	Faixa de Temp. de Transformação (°C)	Histerese Térmica (°C)	Deformação (%)	Recuperação (%)
Ti-Ni-Pd	100-530	20-26	2,6 - 5,4	90 ^{PE} – 100
Ti-Ni-Pt	110-1100	31-55	3 - 4	100
Ni-Ti-Hf	100-400	60	3	100
Ni-Ti-Zr	100-250	54	1,8	100
Cu-Al-Ni	100-400	21,5	3-5 ^{PE}	80 – 90 ^{PE}
Cu-Al-Nb	100-400	59-170	5,5-7,6	-
Co-Al	100-400	121	2	90
Co- Ni-Al	100-400	15,5	5 ^{PE}	100 ^{PE}
Ni-Al	100-300	-	-	-
Ni-Mn	100-670	20	3,9	90
Ni-Mn-Ga	100-400	85	10	70
Zr-Cu	100-600	70	8	44
Ti-Nb	100-200	50	2 - 3	97 – 100
U-Nb	100-200	35	7	97 – 100
Ti-Pd	100-510	40	10	88
Ti-Au	100-630	35	3	100
Ti-Pt-Ir	990-1184	66,5	10 ^{PE}	40 ^{PE}
Ta-Ru	900-1150	20	4	50
Nb-Ru	425-900	20	45	88

PE = Pseudoelástico

Fonte: Adaptado de Jani, *et al.* (2014).

No que diz respeito às propriedades mecânicas, a Tabela 2 apresenta as propriedades de LMF à base de NiTi (Nitinol) e Cobre (Naresh e Rao, 2016).

Tabela 2: Propriedades mecânicas de LMF

Propriedade	Ni-Ti	Cu-Zn-Al	Cu-Al-Ni
Temperatura de Fusão (°C)	1300	950 – 1020	1000 – 1050
Densidade (gcm ⁻³)	6,45	7,64	7,12
Resistividade (μΩcm)	70 – 100	8,5 – 9,7	11 – 13
Condutividade Térmica (Wcm ⁻¹ °C ⁻¹)	18	120	30 - 43
Modulo de Young (GPa)	83 (austenita) 26-48 (martensita)	72 (beta) 70 (martensita)	85 (beta) 80 (martensita)
Patamar de Escoamento (MPa)	195-690 (austenita) 70-140 (martensita)	350 (beta) 80 (martensita)	400 (beta) 130 (martensita)
Patamar de Ruptura (MPa)	895	600	500 – 800
Deformação Máx. da Memória de Forma (%)	8,5	4	4
Faixa de Temp. de Transformação (°C)	-200 – 110	<120	<200
Histerese Térmica (°C)	30 - 50	15 - 25	15 – 20

Fonte: Adaptado de Naresh e Rao (2016).

Quando se trabalha com LMF, portanto, é importante especificar corretamente quais materiais serão utilizados em sua composição, o que irá afetar diretamente não só suas propriedades mecânicas, mas também sua capacidade de memória de forma e hiperelasticidade (Naresh e Rao, 2016).

2.1.5 APLICAÇÕES

As Ligas Memória de Forma têm aplicações em dispositivos médicos, automóveis e Engenharia Aeroespacial graças à sua capacidade de recuperar a forma e suportar grandes deformações (Savi & Oliveira, 2013).

Em dispositivos médicos, *stents* coronários feitos de LMFs, especialmente Nitinol (NiTi), são usados para manter as artérias abertas em pacientes com doenças coronarianas. O efeito memória de forma permite que os *stents* sejam comprimidos para inserção e depois expandam para suportar a parede arterial (Machado & Savi, 2003).

Na Engenharia Aeroespacial, as LMF têm aplicação em sistemas de antenas retráteis em satélites e aeronaves espaciais. As antenas podem ser enviadas ao espaço dobradas, de forma

que resistam às forças aerodinâmicas do lançamento ou para que fiquem armazenadas em compartimentos. Uma vez que o satélite ou aeronave se encontra em órbita, o EMF é acionado por aquecimento e as antenas se desdobram. A capacidade de alterar a forma com precisão e retornar à configuração original é vital para essas aplicações (Jani *et al.*, 2014; Otsuka & Wayman, 1998).

Na indústria automotiva as LMF são empregadas em válvulas e sensores automotivos para controlar o fluxo de fluidos e ajustar componentes em resposta a mudanças de temperatura. Por exemplo, as válvulas de controle de temperatura podem usar LMF para abrir ou fechar com base na temperatura do motor (Jani *et al.*, 2014).

Recentemente, as LMFs têm sido exploradas na Construção Civil para reforço de estruturas de concreto e atenuação de vibrações. O efeito memória de forma e a superelasticidade as tornam ideais para aplicações onde a resistência à fadiga e a durabilidade são críticas. Estudos mostram que o uso de LMF pode melhorar significativamente a vida útil e a segurança das estruturas (Abraik, 2021; Alshannag *et al.*, 2023; Billah *et al.*, 2022; Chang & Araki, 2016; Choi *et al.*, 2021; Cladera, et al., 2014; Janke *et al.*, 2005; Mas *et al.*, 2017; Pereira, 2011; Qian *et al.*, 2022).

2.2 LIGAS MEMORIA DE FORMA APLICADAS À CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1 AMORTECIMENTO DE VIBRAÇÕES E PROTEÇÃO CONTRA TERREMOTOS

As LMFs são eficazes na dissipação de energia vibratória, o que é crucial para melhorar a durabilidade e a segurança das estruturas civis. Durante eventos como ventos fortes ou tráfego pesado, as estruturas estão sujeitas a vibrações que podem causar fadiga e eventual falha estrutural. As LMFs ajudam a mitigar esses efeitos através de seus mecanismos de dissipação de energia (Pereira, 2011).

As ligas memória de forma (LMF) destacam-se pela capacidade de recuperar deformações extremamente altas, variando de 6% a 10%. Essa característica superelástica permite que essas ligas absorvam significativamente mais energia durante deformações em comparação aos aços convencionais, sem que ocorra a ruptura estrutural. Essa propriedade é especialmente útil para aplicações antissísmicas, protegendo estruturas ao dissipar energia de maneira eficaz durante eventos de alta intensidade (Indirli e Castellano, 2008).

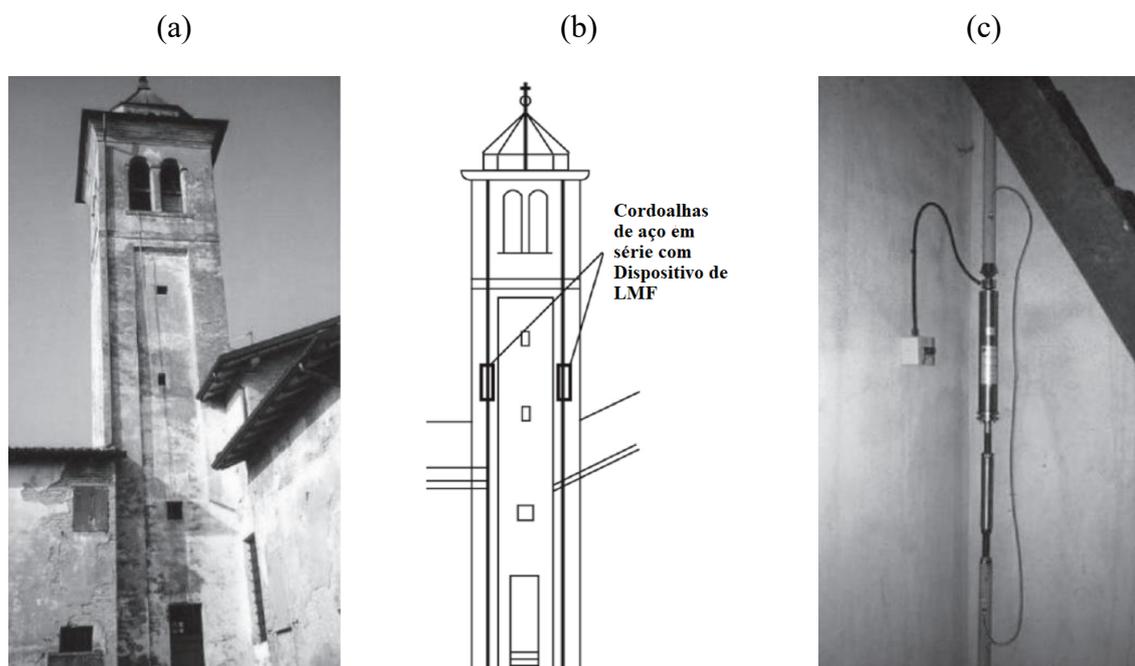
O princípio por trás da atenuação de vibrações com LMFs baseia-se na transformação de fase entre austenita e martensita. Quando uma LMF é deformada, ela absorve energia e, ao retornar à sua forma original, dissipa parte dessa energia na forma de calor. Esse armazenamento de energia com posterior dissipação reduz a amplitude da carga dinâmica solicitante e aumenta a condição de segurança da estrutura (Chang & Araki, 2016).

A capacidade de armazenamento de energia, bem como a frequência de dissipação estão diretamente ligadas à histerese da liga memória de forma. Ao dimensionar um sistema de amortecimento de vibrações utilizando LMF, deve-se levar em consideração a frequência do ciclo de carregamento dinâmico - sísmico ou de ventos – e a histerese específica da liga (Janke *et al.*, 2005).

Além de dissipar energia, as LMF também podem ajudar no realinhamento das estruturas após um terremoto. Isso significa que, além de reduzir os danos durante o evento sísmico, as LMFs podem ajudar a restaurar a estrutura à sua posição original, minimizando os custos de reparo e o tempo de inatividade (Chang & Araki, 2016).

A restauração da Igreja de San Giorgio, em Trignano, Itália, é um exemplo da utilização de LMF para essa finalidade. A torre do sino da igreja foi danificada por um terremoto em 1996. Em 1999, além da reforma estética, dispositivos combinando cordoalhas de aço e LMF foram instalados para aumentar a resistência estrutural, como pode ser visto na Figura 5 (Preciado *et al.*, 2015).

Figura 5: A torre do sino da Igreja de San Giorgio



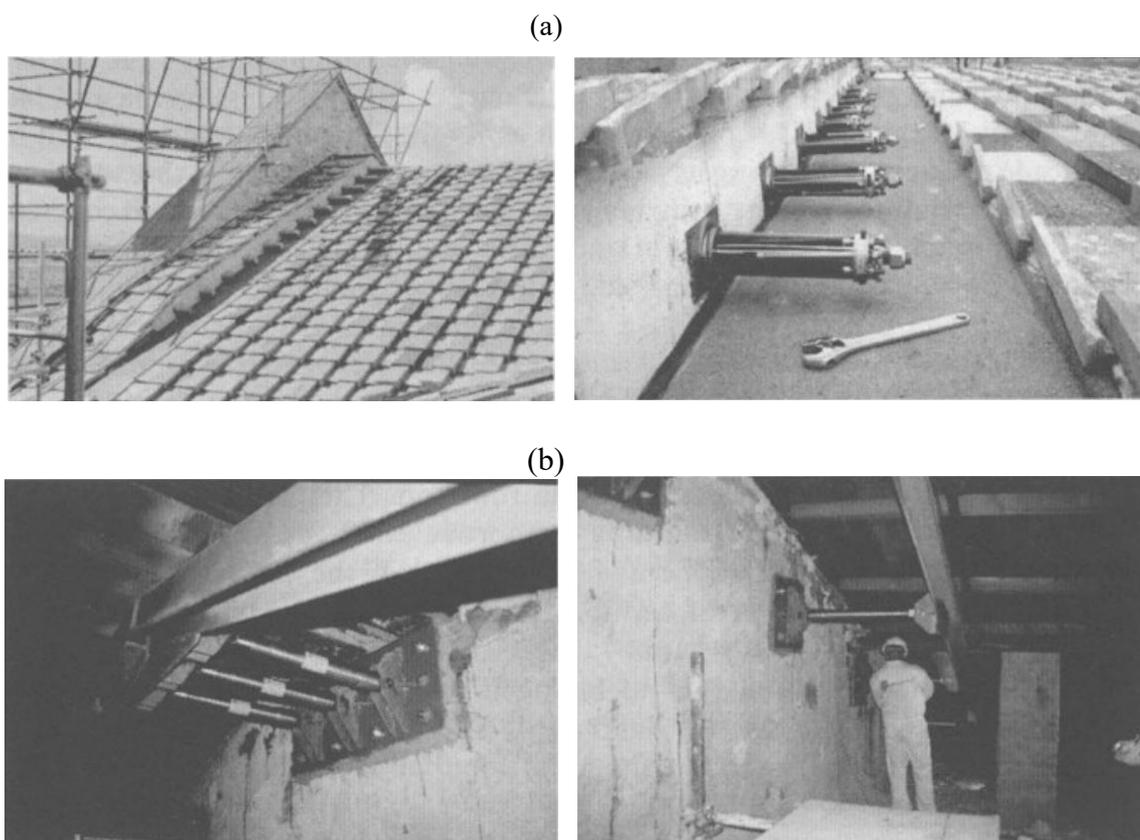
Fonte: Ferretti e Pascale (2019 apud Preciado *et al.*, 2015)

A combinação de cordoalhas de aço e LMF em série foram instalados verticalmente nos quatro cantos internos da torre para aumentar a resistência à flexão e cisalhamento. Cada cordoalha incluía um dispositivo de LMF no sexto andar, fabricado com 60 fios de 1,0 mm de diâmetro de NiTi. Os conjuntos foram ancorados no topo e na fundação, e uma protensão de 20 kN foi aplicada em cada um, de forma a manter compressão constante na alvenaria. Enquanto as cordoalhas de aço protendidas adicionam maior resistência às solicitações sofridas pela estrutura, os dispositivos de LMF são responsáveis pela capacidade de realinhamento da estrutura após pequenos deslocamentos, por meio do efeito memória de forma e superelasticidade. Após a restauração, um terremoto similar em 2000 não causou danos, confirmando a eficácia da intervenção (Preciado *et al.*, 2015).

Além da aplicação de ligas memória de forma (LMF) em cabos verticais para introduzir protensão e aumentar a resistência à flexão, esses mecanismos também podem ser utilizados horizontalmente para melhorar a resistência sísmica de estruturas. Nesse contexto, as LMF ajudam a prevenir danos em fachadas ao absorver e dissipar deformações provocadas por forças horizontais em paredes, como aquelas geradas por cargas sísmicas. Essa abordagem reduz a transmissão de tensões às fachadas, protegendo-as contra falhas estruturais durante eventos sísmicos (Indirli e Castellano, 2008).

Um exemplo da aplicação de ligas memória de forma (LMF) para aumentar a resistência sísmica horizontal pode ser observado na restauração da Basílica Superior de São Francisco, em Assis, Itália, após o terremoto de Úmbria-Marché. Nesse projeto, 47 dispositivos DLMFs (Dispositivos de Liga Memória de Forma) foram instalados para conectar o telhado aos tímpanos do transepto, absorvendo deformações laterais e redistribuindo as cargas horizontais geradas pelas forças sísmicas, como mostra a Figura 6 (Indirli e Castellano, 2008).

Figura 6: Dispositivos de LMF instalados na Basílica de São Francisco



Fonte: Indirli e Castellano (2008).

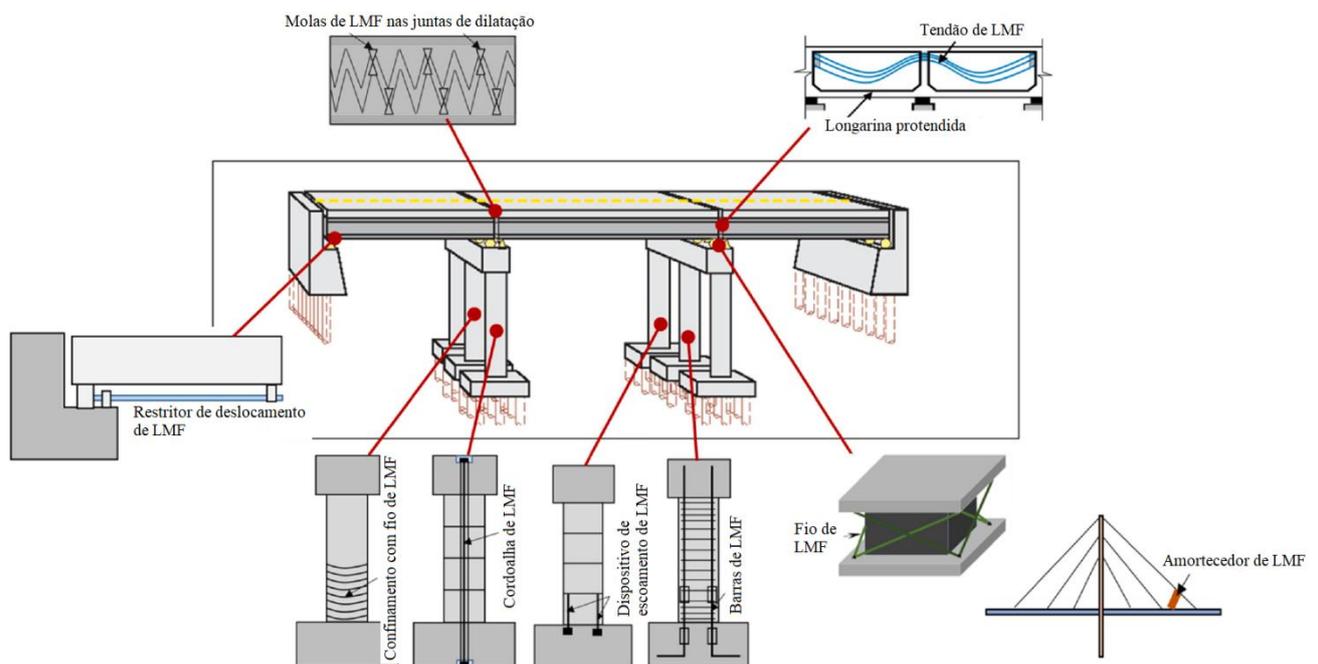
Esses dispositivos foram fixados em placas e contra placas de concreto, permitindo deslocamentos de ± 8 a ± 25 mm e suportando forças de 17 a 52 kN. Essa abordagem evitou a transmissão direta das tensões sísmicas para as fachadas, protegendo-as de danos severos e garantindo maior estabilidade estrutural. Importante notar que os dispositivos de liga memória de forma utilizados custaram menos que 1% do custo total da restauração (Indirli e Castellano, 2008).

2.2.2 MELHORA DO DESEMPENHO DE PONTES

As ligas memória de forma (LMF) têm sido estudadas para melhorar o desempenho estrutural de pontes e reduzir deformações permanentes após terremotos. Diferentes sistemas estruturais foram propostos, incluindo colunas de concreto armado reforçadas com LMF, pilares oscilantes com arruelas de LMF e vigas e tabuleiros equipados com fios pré-tensionados. Além disso, essas ligas são aplicadas em dispositivos projetados para aumentar a resistência estrutural, como rolamentos de isolamento sísmico e restritores de deslocamento (Billah *et al.*, 2022).

Muitos esforços têm sido dedicados à melhoria do desempenho de pontes utilizando ligas memória de forma (LMF) em diferentes aplicações. Em colunas de pontes inclui seu uso como barras longitudinais de reforço e elementos de dissipação de energia, além de fios para confinamento ativo e protensão, como representado pela Figura 7. Também há interesse no uso dessas ligas em rolamentos de isolamento e restritores de deslocamento, assim como em cabos de estais, juntas de dilatação e tendões de protensão em vigas. As principais aplicações pesquisadas para LMFs em pontes são rolamentos de isolamento sísmico (31%), pilares (22%), vigas (19%) e amortecedores (16%). O uso em restritores de deslocamento representa 10% dos estudos, enquanto juntas de dilatação correspondem a 2% (Billah *et al.*, 2022).

Figura 7: Aplicações de LMF em pontes



Fonte: Billah *et al.* (2022).

Nos pilares das pontes, seja como barras longitudinais ou espirais, as LMFs praticamente eliminaram o deslocamento residual, independentemente de sua composição (à base de cobre ou níquel). Nos rolamentos de isolamento sísmico equipados com fios ou cabos de LMF, observou-se uma melhoria significativa no comportamento estrutural geral da ponte, com exceção dos sistemas baseados em Cu-Al-Be. Além disso, devido à sua capacidade de amortecimento e superelasticidade, as LMFs demonstraram eficiência em amortecedores estruturais, reduzindo vibrações, deslocamentos e a demanda de forças na estrutura (Billah et al., 2022).

O uso de Ligas com Memória de Forma (LMF) no reforço de vigas principais (girders) de concreto protendido também tem demonstrado benefícios significativos, especialmente na redução da perda de protensão a longo prazo e no aumento da capacidade estrutural. Estudos mostram que tendões de LMF aderidos ao concreto melhoram a eficiência da protensão, enquanto vigas auto pós-tensionadas utilizam o efeito memória de forma ativado pelo calor da hidratação do cimento, eliminando a necessidade de equipamentos externos. Além disso, cabos pré-tensionados de LMF em conexões tabuleiro-pilar ajudam a mitigar vibrações induzidas pelo tráfego, enquanto sua aplicação em girders metálicos reduz a vibração torcional. O uso de barras nervuradas de LMF à base de ferro também melhora a aderência e a ductilidade do concreto protendido, tornando essa tecnologia promissora para reforço e aumento da vida útil de estruturas de pontes (Billah et al., 2022; Maji e Negret, 1998; Liu *et al.*, 2017; Ozbulut, 2013).

2.2.3 RECUPERAÇÃO DE TRINCAS E FISSURAS

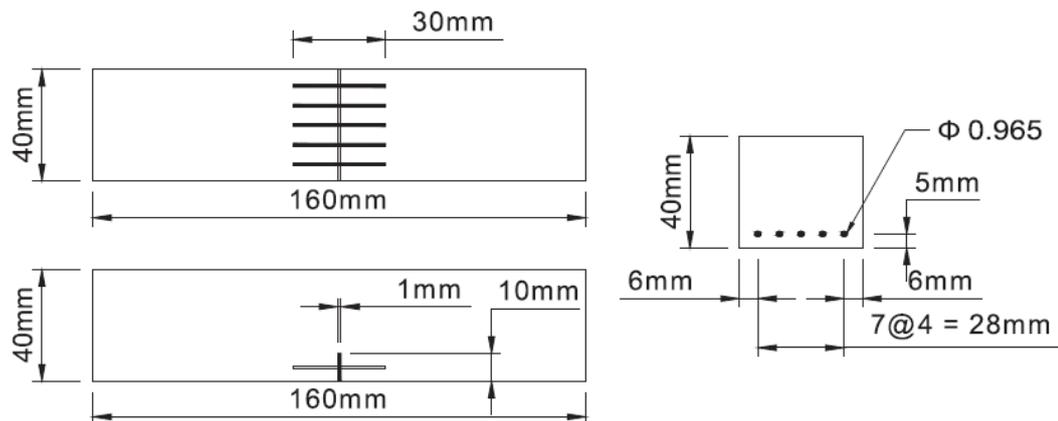
Face esses e outros experimentos, demonstra-se que a superelasticidade das ligas memória de forma desempenha um papel crucial na melhoria do comportamento estrutural durante terremotos e na reparação de danos mecânicos posteriores. Essa propriedade se destaca em comparação com a capacidade de amortecimento, que pode ser efetivamente fornecido por materiais alternativos, como borracha ou aços de baixo limite de escoamento, enquanto a superelasticidade é única para dissipar energia sem comprometer a integridade estrutural (Chang e Araki, 2016).

No concreto, as LMFs podem ser utilizadas de várias maneiras para recuperação de fissuras. Por exemplo, fibras curtas de LMF podem ser introduzidas na argamassa de cimento para formar um compósito capaz de se “autorrecuperar” de trincas ou fissuras a partir de uma ativação térmica (Choi *et al.*, 2015).

Quando aquecidos, os elementos de LMF se contraem, aplicando uma força de fechamento sobre a abertura. Este processo não apenas fecha a fissura, mas também aumenta a resistência do concreto naquela área específica (Nogueira, 2006; Choi *et al.*, 2015).

Em estudo realizado por Choi *et al.* (2014), vigas de concreto não-armadas foram submetidas ao teste de flexão a três pontos. Dois tipos de corpos de prova foram testados, vigas de argamassa sem e com reforço de fibras curtas de LMF. As vigas tinham 160 mm de comprimento e 40 mm de largura e altura, com resistência à compressão de 93 MPa. Para as vigas reforçadas, cinco fibras de LMF foram posicionadas a 5 mm acima da base, com um entalhe central de 1 mm de largura e 10 mm de profundidade para guiar a formação de fissuras. As fibras, espaçadas em 28 mm, foram fixadas em furos para evitar deslocamento durante o derramamento da argamassa, como mostra a Figura 8 (Choi *et al.*, 2015).

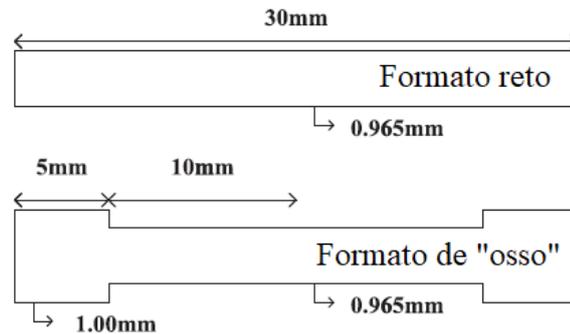
Figura 8: Corpos de prova ensaiados



Fonte: Choi *et al.* (2015).

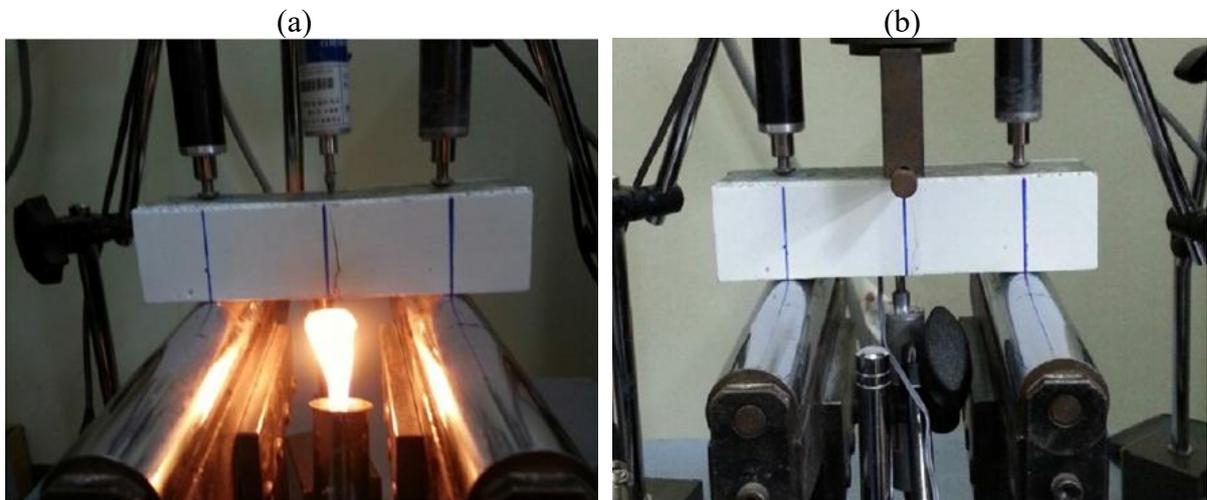
Duas geometrias de fibras foram usadas: retas e em formato de "osso", conforme Figura 9, sendo aquecidas por chama a 100 °C por 24 horas para ativar o efeito memória de forma (Figura 10). Essa configuração visava melhorar a aderência e induzir tensões de recuperação nas fibras, gerando protensão no material, ao mesmo tempo que visa evitar a formação de aglomerados de fibras em aplicações práticas, situação comum em fibras tradicionais de aço com extremidades em formato de gancho (Choi *et al.*, 2015).

Figura 9: Fibras curtas de LMF



Fonte: Adaptado de Choi *et al.* (2015).

Figura 10: Aquecimento do corpo de prova para ativação do EMF



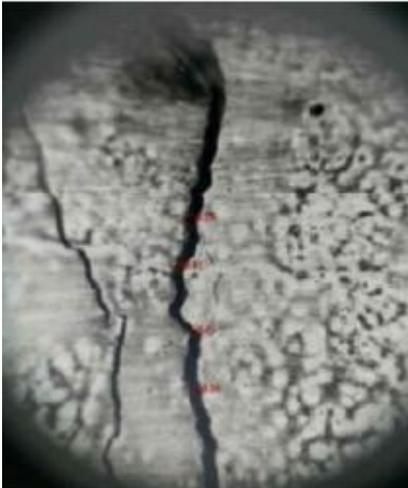
Fonte: Adaptado de Choi *et al.* (2015).

Os corpos de prova ensaiados apresentaram comportamento linear até o surgimento de fissuras, momento em que houve uma queda abrupta na resistência à flexão. No entanto, as vigas reforçadas com fibras de LMF mantiveram uma resistência residual devido à atuação das fibras. A tensão máxima registrada antes das fissuras foi, em média, de 1,46 kN para as vigas simples (sem reforço com fibras), enquanto as vigas com fibras retas e em formato "osso" alcançaram 1,81 kN e 1,95 kN, respectivamente. Esses resultados mostram que as fibras de LMF aumentaram a resistência à flexão ao proporcionar maior aderência e reforço estrutural (Choi *et al.*, 2015).

A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio no que diz respeito a capacidade de fechamento das trincas decorrentes do ensaio de flexão. As vigas reforçadas com fibras retas apresentaram uma recuperação de 61,4% das trincas, enquanto as vigas reforçadas com fibras em formato de "osso" apresentaram recuperação de 34,7%. Vale salientar que a menor

capacidade de recuperação de fibras em formato de osso também se deve ao fato de que as trincas que surgiram foram menores, sugerindo uma maior aderência das fibras à argamassa (Choi *et al.*, 2015).

Tabela 3: Resultados de recuperação de fissuras do ensaio de flexão

Formato da fibra	Trincas pré-aquecimento	Trincas pós- aquecimento
Reta	 0,58 mm	 0,29 mm
Osso	 0,38 mm	 0,15 mm

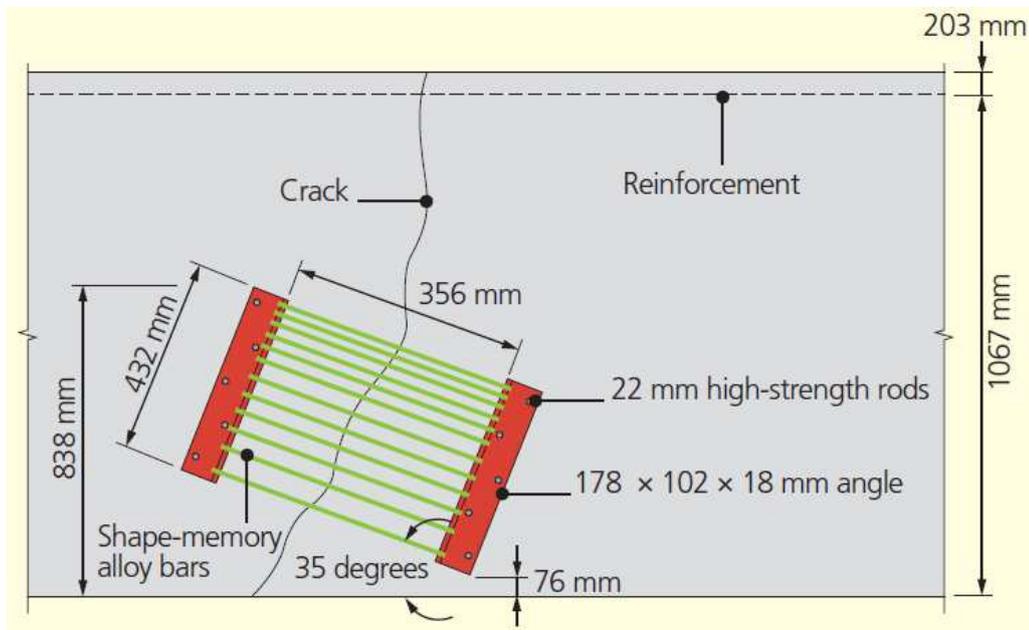
Fonte: Adaptado de Choi *et al.* (2015).

A utilização de fibras curtas para reforço de estruturas se mostrou adequada para prevenir a propagação de microfissuras e melhorar a resistência à tração, a tenacidade e durabilidade do concreto. Em infraestrutura críticas e edifícios históricos isso é particularmente útil, visto que a redução da frequência de manutenções é essencial nesses casos (Nogueira, 2006).

Outra abordagem para fechamento de trincas é a utilização de barras ou fitas de LMF, acopladas externamente à estrutura, de forma a exercer protensão quando ativadas – fechando as aberturas (Czaderski *et al.*, 2014; Shahverdi, *et al.*, 2016).

A primeira aplicação prática dessa tecnologia para fechamento de trincas foi realizada em uma ponte rodoviária em Michigan. A ponte apresentava fissuras devido à insuficiente resistência ao cisalhamento. Para reforçar a viga da ponte, hastes de liga memória de forma de ferro-mangânês-silício-cromo, foram instaladas atravessando as fissuras em ambos os lados da alma - Figura 11. Cada haste foi aquecida por efeito Joule, para alcançar 300°C, resultando em uma redução de 40% na largura das fissuras (Soroushian *et al.*, 2001).

Figura 11: Dispositivo para fechamento de trincas em Michigan



Fonte: Soroushian *et al.* (2001).

Importante ressaltar que em todas essas aplicações, o concreto permanece trincado após a restauração com barras ou fibras de LMF, não havendo transmissão de tensões na interface de concreto onde ocorre a trinca. As principais vantagens da aplicação de Ligas Memória de Forma nesse caso são reduzir os custos com os reparos posteriores, aumentar a durabilidade ao evitar o contato de agentes agressivos com as armaduras por meio do fechamento das aberturas e garantir à estrutura a capacidade de auto centragem (Chang e Araki, 2016).

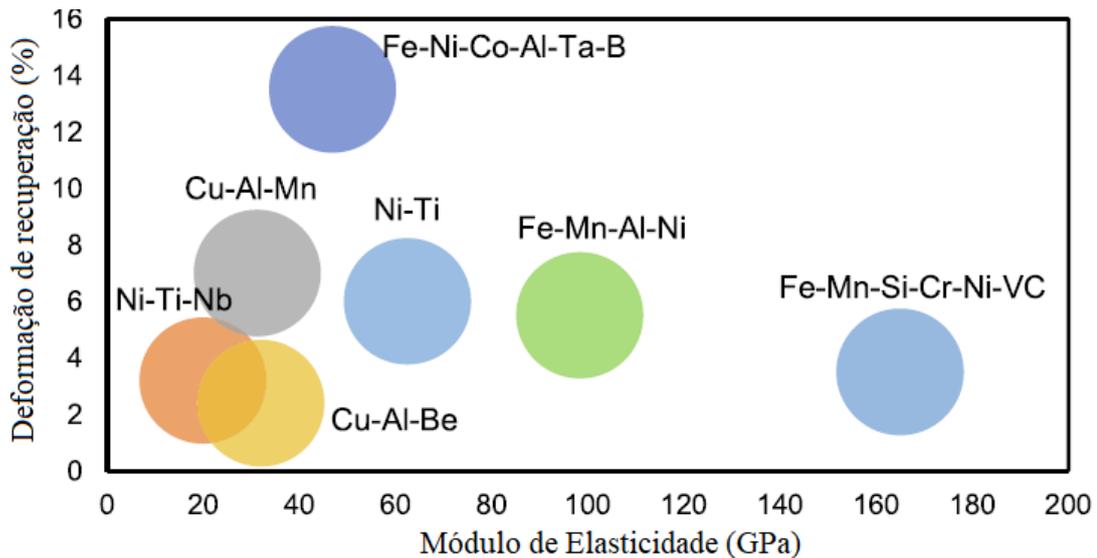
2.3 REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO COM LMF

O reforço de estruturas utilizando Ligas Memória de Forma se baseia em três conceitos fundamentais (Janke *et al.*, 2005):

- O **polimorfismo**, que se trata da capacidade das LMFs de alterar sua estrutura cristalina entre as fases martensita e austenita em resposta a variações de tensão ou temperatura. Essa transição permite que as ligas dissipem energia mecânica na forma de calor, funcionando como um mecanismo de **amortecimento eficiente para cargas dinâmicas**, reduzindo vibrações e aumentando a estabilidade estrutural;
- A **superelasticidade**, que confere às LMFs a habilidade de suportar grandes deformações não lineares e, em seguida, retornar à sua forma original. Essa propriedade é essencial para assegurar que as estruturas reforçadas não apenas mantenham sua integridade após eventos extremos, como terremotos, mas também ofereçam **capacidade de auto centragem**, reduzindo riscos de colapso devido a deformações excessivas e facilitando a recuperação da estrutura posteriormente;
- E o próprio **efeito de memória de forma**, que possibilita às ligas retornarem à sua configuração original mesmo após deformações permanentes, quando ativadas por aquecimento. Essa característica pode ser explorada como um mecanismo ativo de proteção estrutural, onde as ligas, ao se contrair durante a ativação, funcionam como elementos de reforço, restaurando a rigidez e resistência da estrutura.

A capacidade de reforço, custo e aplicação vão depender diretamente da composição da LMF utilizada. Ligas com base de ferro (Fe-LMF) possuem maior módulo de elasticidade, mas menor tensão de recuperação (importante para o efeito de protensão), enquanto ligas à base de níquel (Ni-LMF) possuem maior tensão de recuperação, mas menor módulo de elasticidade (deformações elevadas). A Figura 12 apresenta essa relação (Billah *et al.*, 2022).

Figura 12: Módulo de elasticidade e recuperação percentual para diferentes composições de LMF



Fonte: Billah *et al.* (2022).

2.3.1. PROTENSÃO UTILIZANDO CABOS DE NiTi-LMF

O efeito memória de forma permite a aplicação de forças de protensão em elementos de concreto através de barras ou tiras de ligas memória de forma (LMF). Em essência, ao deformar uma barra de LMF por tração e, posteriormente, aquecê-la acima da temperatura de ativação do EMF – que pode ser feita por aquecimento direto por exposição ao calor ou por passagem de corrente elétrica (Efeito Joule) pela LMF - a liga retorna ao seu comprimento original. No entanto, se esse movimento de recuperação for impedido — como no caso de uma LMF incorporada em concreto —, há o desenvolvimento de tensão no material durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. Essa tensão, conhecida como "tensão de recuperação", se mantém mesmo após o resfriamento da LMF e pode ser aproveitada para introduzir forças de protensão em elementos de concreto, aumentando seu desempenho e durabilidade (Shahverdi *et al.*, 2016).

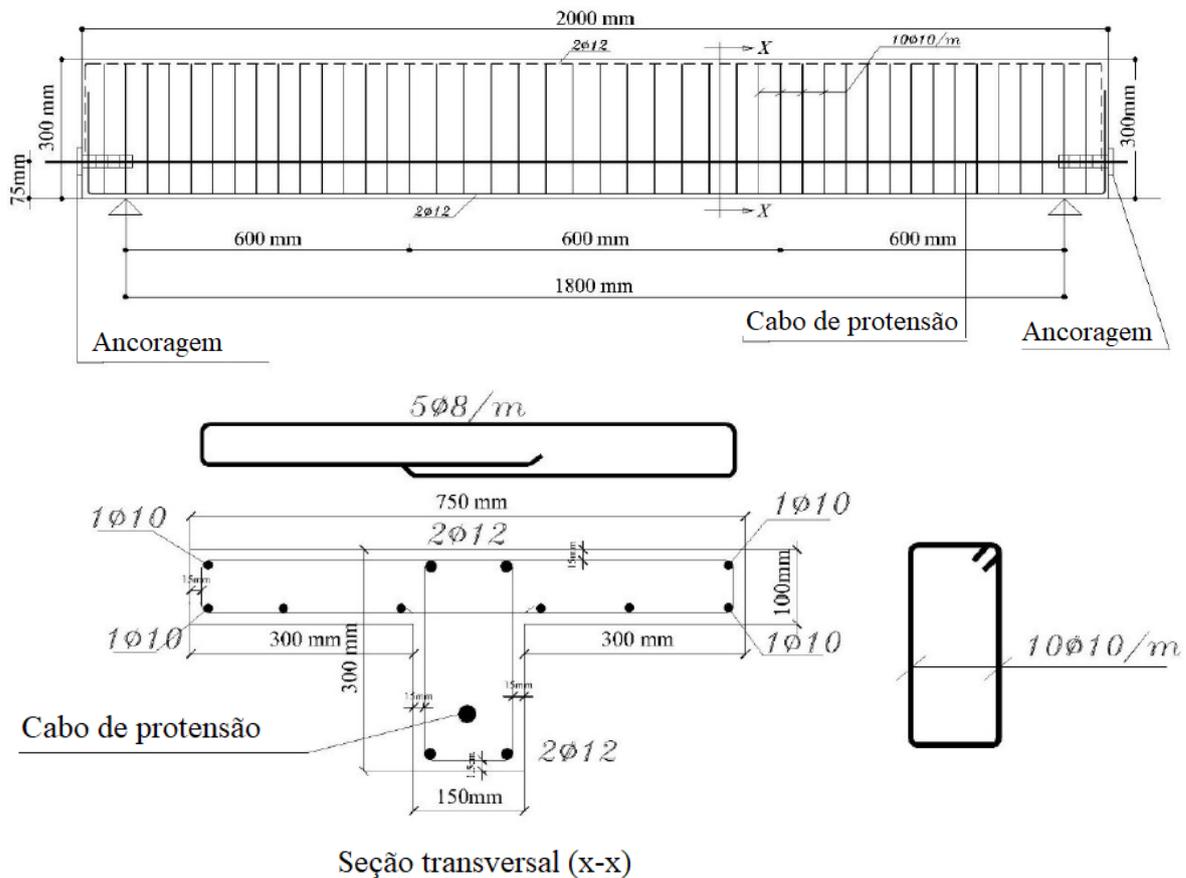
Uma vantagem dessa aplicação é a possibilidade de introduzir a protensão em elementos curvos de concreto sem a utilização de bainhas, utilizadas na protensão por pós-tensão. Dessa forma, não há perdas de tensão devido ao atrito cordoalha-bainha e o perfil de tensões é uniforme ao longo de todo o comprimento do elemento (Shahverdi *et al.*, 2016).

Não obstante, a aplicação de protensão pelos métodos convencionais exige a ancoragem e estiramento das barras de aço, de forma que toda a extensão do elemento estrutural sofre os efeitos da protensão em algum grau. Ao utilizar LMF para protensão, por outro lado, há a possibilidade de introduzir protensão ao concreto de maneira localizada, reforçando pontos

críticos da estrutura sem comprometer toda a extensão do elemento e consumindo um menor volume de material (Zhao e Andrawes, 2020).

Anter *et al.* (2023) exploraram a aplicação de protensão em vigas de concreto armado com seção T utilizando cabos de NiTi (liga com memória de forma), investigando seu desempenho em comparação com cabos de aço e cabos de fibra de carbono (CFRP). O estudo envolveu 15 vigas T, todas com 2.000 mm de comprimento total e um vão de 1.800 mm entre apoios. As dimensões e armadura das vigas são detalhadas na Figura 13:

Figura 13: Detalhamento das vigas ensaiadas



Fonte: Adaptado de Anter *et al.* (2023).

Os cabos de protensão empregados incluíram (Anter *et al.*, 2023):

- Cabos de NiTi (LMF): 12 fios de 4 mm de diâmetro.
- Cabos de Aço: 7 fios com diâmetro total de 15, 24 mm.
- Cabos de fibra de carbono (CFRP): cabo de 15 mm de diâmetro.

As vigas foram divididas em cinco grupos de teste, cada um com três espécimes. Os Grupos 2 e 3 analisaram o efeito de diferentes teores de fibras de aço introduzidas no concreto (0%, 1% e 1,5%), com resistência à compressão de 35 MPa. Já os Grupos 1, 4 e 5 compararam resistências à compressão de 35 MPa, 45 MPa e 55 MPa, mantendo o teor de fibras constante (0%). A Tabela 4 apresenta as propriedades mecânicas dos cabos empregados para protensão (Anter *et al.*, 2023):

Tabela 4: Propriedades mecânicas dos cabos de protensão

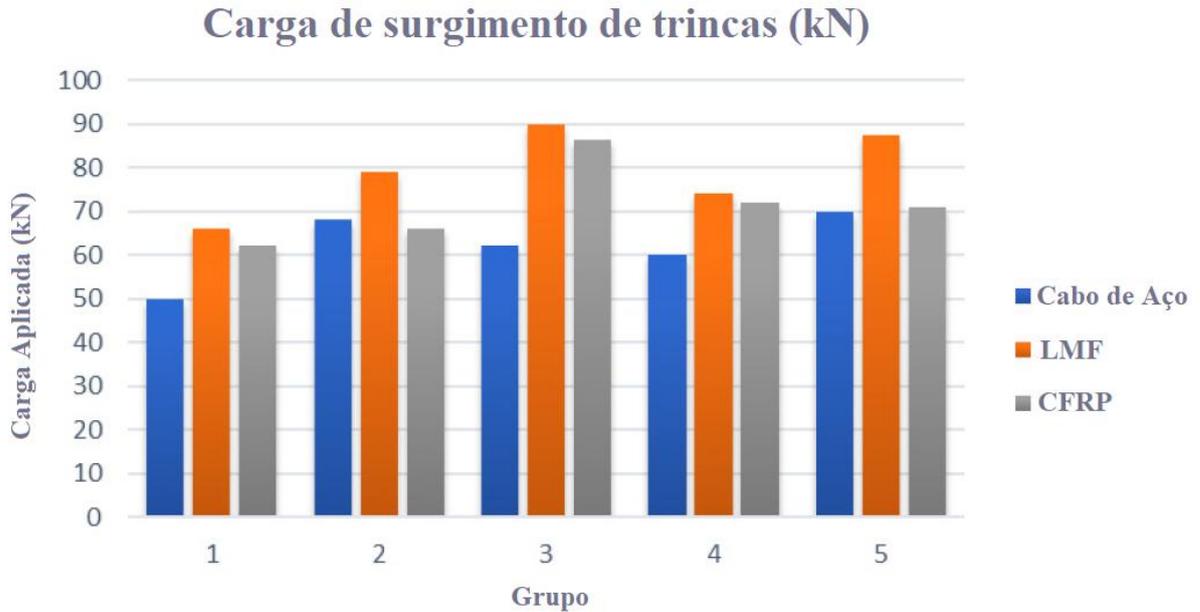
Propriedade	Cabo de Aço	Cabo de NiTi	Cabo de CFRP	Fibras de Aço
Diâmetro (mm)	15, 24	12x4 mm	15	0,8 ± 0,05
Comprimento (mm)	2600	2600	2600	35 ± 3
Área da seção (mm ²)	140	150	176,6	0,5
Tensão de Escoamento (MPa)	360	405	400	-
Tensão de Ruptura (MPa)	1860	840	2400	>1000
Alongamento máximo (%)	7	17,5	1,7	1
Módulo de Elasticidade (GPa)	204	120	160	200

Fonte: Adaptado de Anter *et al.* (2023).

Para aplicar a protensão utilizando os cabos de LMF, os cabos foram previamente introduzidos em dutos (de maneira semelhante às bainhas na pós-tensão) por onde se introduziu água acima da temperatura crítica final de transformação austenítica (Af), de forma a ativar o efeito memória de forma. Por terem a deformação à forma original impedida, os cabos de Nitinol aplicam uma força de protensão às vigas (Anter *et al.*, 2023).

A partir dos resultados foi possível observar que as vigas protendidas com cabos de Nitinol apresentaram os maiores valores de cargas de surgimento de trincas, como mostra a Figura 14. Além disso, as trincas observadas tinham menor largura e maior espaçamento entre elas dentre os grupos observados, com recuperação parcial das trincas após removido o carregamento, o que não ocorreu nas vigas protendidas com cabos de aço ou cabos de fibra de carbono (Anter *et al.*, 2023).

Figura 14: Carga de trincamento dos grupos de ensaio

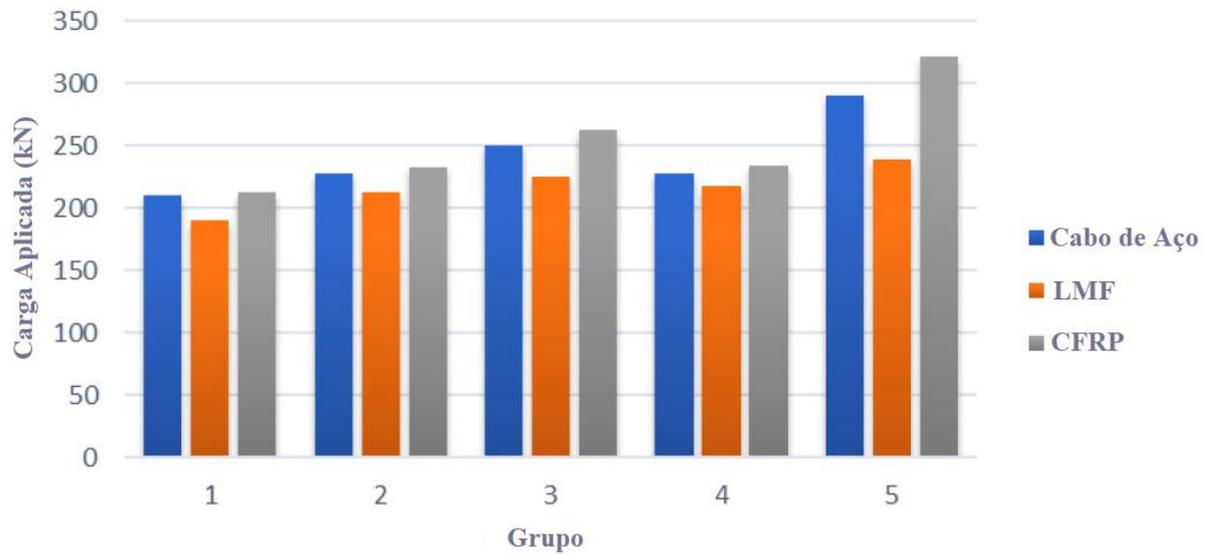


Fonte: Adaptado de Anter *et al.* (2023).

O fenômeno pode ser justificado uma vez que as trincas surgem na viga quando os cabos de fibra de carbono ou de aço começam a escoar livremente, sem tensão de recuperação sendo aplicada às vigas após o descarregamento, enquanto que no caso dos cabos de LMF as trincas surgem devido ao alto valor de alongamento máximo percentual dos cabos, que supera o do concreto, ao mesmo tempo que após o descarregamento a LMF ainda possui tensão de recuperação sendo aplicada ao concreto, devido ao efeito memória de forma (Anter *et al.*, 2023).

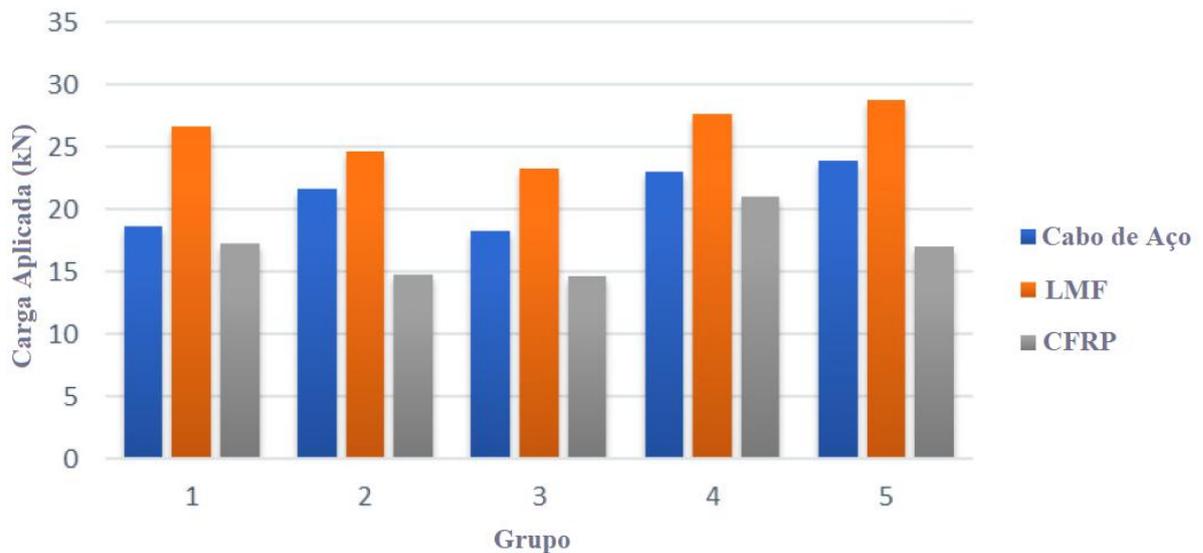
No que diz respeito ao rompimento dos corpos de prova ensaiados, no entanto, observou-se que as vigas protendidas com cabos de LMF apresentaram os menores valores de carga de ruptura quando comparados com os outros métodos de protensão, como pode ser visto na Figura 15. As vigas reforçadas com LMF também apresentaram maior deflexão no meio do vão, como mostra a Figura 16. Isso ocorre devido ao baixo módulo de elasticidade das LMF quando comparadas com os outros cabos utilizados (Anter *et al.*, 2023).

Figura 15: Carga de rompimento dos grupos de ensaio
Carga de rompimento (kN)



Fonte: Adaptado de Anter *et al.* (2023).

Figura 16: Deflexão no meio do vão dos grupos de ensaio
Deflexão no meio do vão (mm)



Fonte: Adaptado de Anter *et al.* (2023).

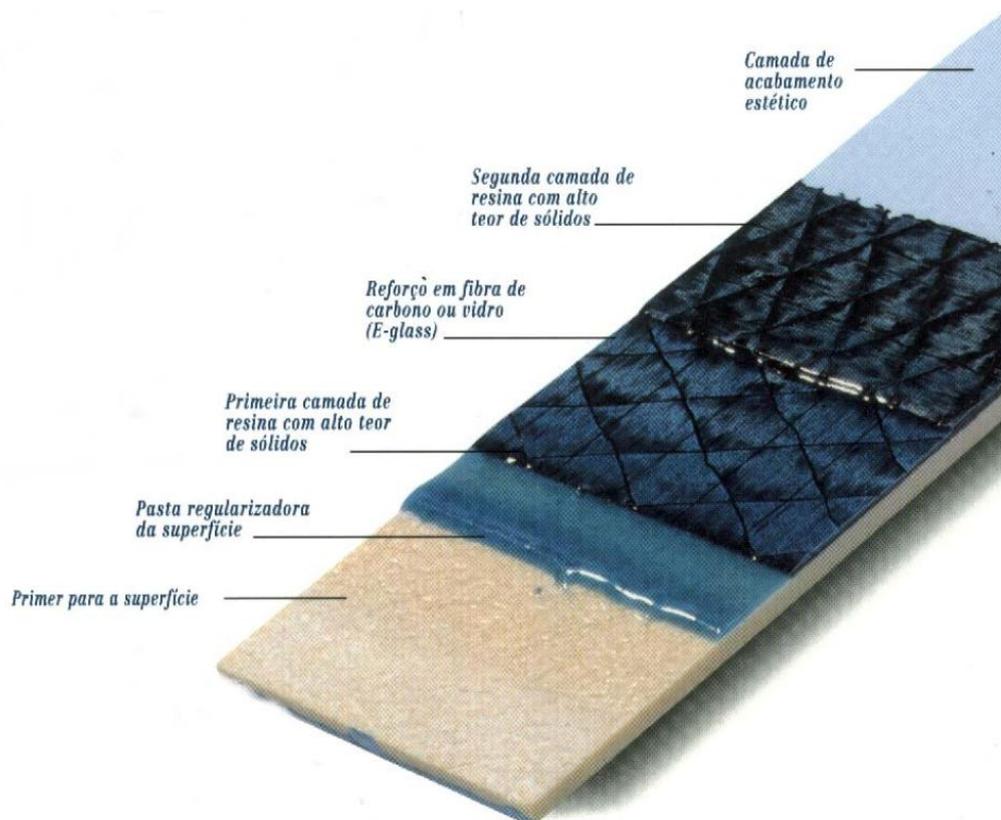
O que o estudo apontou é que os cabos de LMF apresentam **baixa resistência à tração** e **baixo módulo de elasticidade**, o que resulta em **baixa carga de ruptura** e **altas deflexões** em vigas de concreto com LMF. No entanto, o estudo também mostra que a **introdução de fibras de aço** pode ajustar os valores dessas cargas de ruptura e deflexões. Além disso, as vigas

de concreto com cabos de LMF possuem capacidade de **retornar à forma original**, tornando-as adequadas para estruturas sujeitas a **cargas cíclicas e terremotos** (Anter *et al.*, 2023).

2.3.2. PROTENSÃO UTILIZANDO FITAS DE Fe-LMF

Uma das grandes preocupações na Engenharia Civil é o reforço de pontes ou outras estruturas de concreto que envelhecem ou precisam suportar cargas adicionais. O desafio nesses casos é que o concreto, já endurecido, não comporta a adição de elementos de reforço em seu núcleo sem o prejuízo de suas propriedades resistentes. Nesses casos, uma alternativa para reforço é utilizar de colagem de elementos externos à peça a ser recuperada, como chapas de aço ou de polímero reforçadas com fibras (*fiber reinforced polymers – FRP*), fixados através de adesivo ou parafusos auto-fixantes, criando um reforço secundário solidário à peça estrutural. A Figura 17 mostra o sistema FRP unidirecional para esse reforço (Reis, 2001).

Figura 17: Sistema FRP com uso de lâmina unidirecional

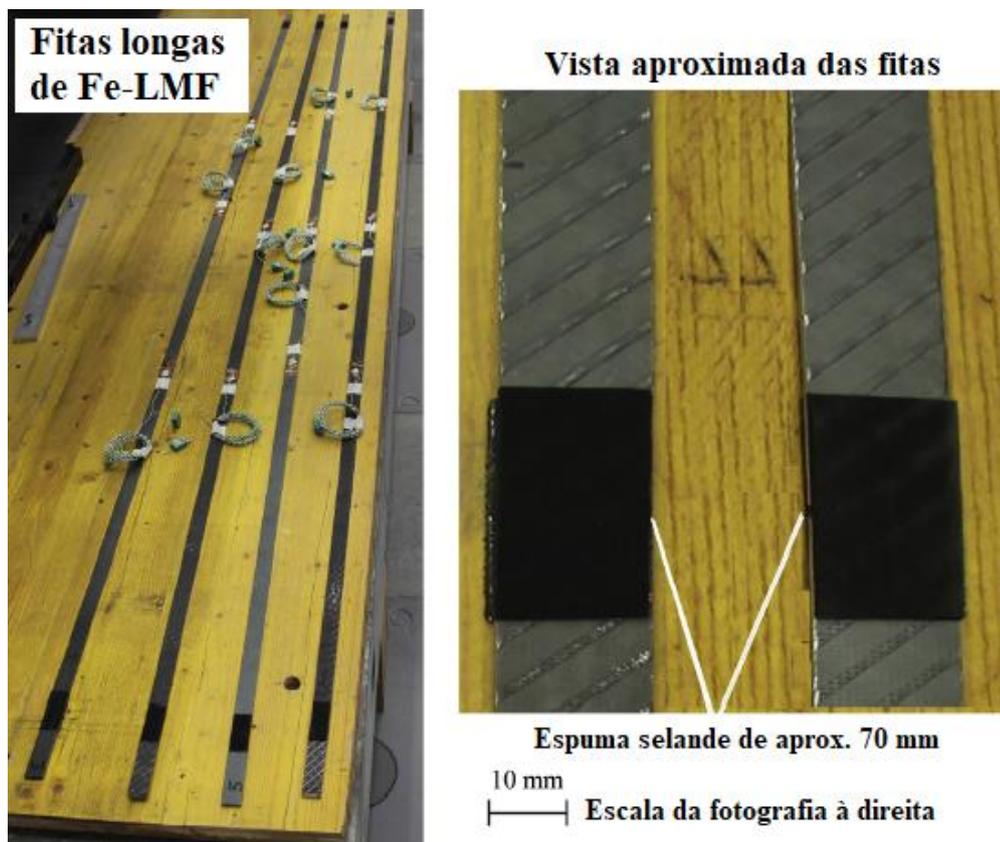


Fonte: Catálogo MBrace *apud* Reis (2001).

Os sistemas de reforço colados à superfície exigem atenção especial devido à sensibilidade dos adesivos à exposição a altas temperaturas e ao fogo que perdem resistência quando submetidos a temperaturas superiores a 70°C. Além disso, ao empregar chapas de aço para reforço externo, é essencial considerar o fenômeno do *peeling off*, onde ocorre a ruptura conjunta do concreto de cobertura da armadura devido à tensão cisalhante atuante na chapa de aço (Reis, 2001).

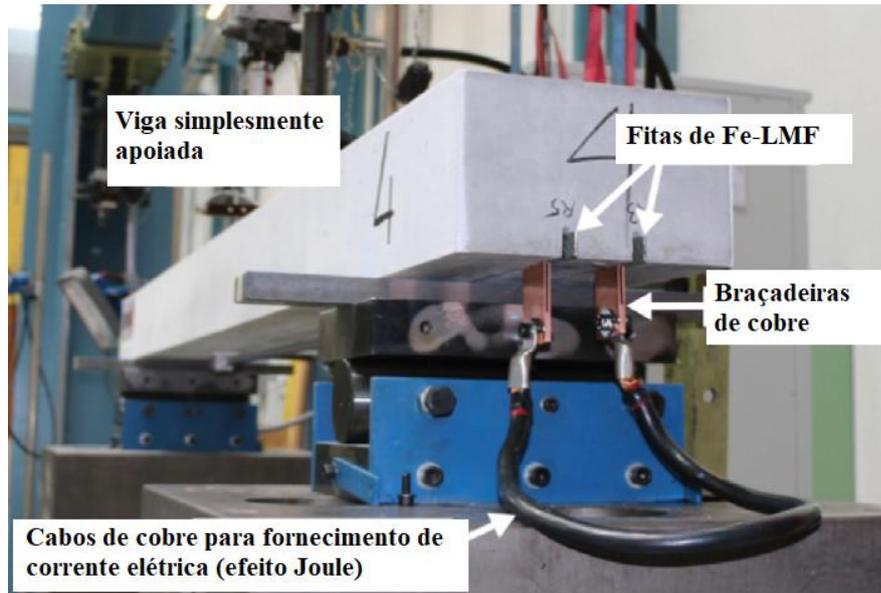
Uma alternativa promissora para esse problema é o uso de fitas de liga com memória de forma à base de ferro (Fe-LMF), que também podem ser aplicadas após o endurecimento do concreto através da inserção das fitas em sulcos na superfície do concreto, técnica conhecida como de montagem próxima à superfície (MPS). A ativação térmica das fitas gera tensões de recuperação que contribuem para a redução de deformações e fissuras pré-existent, aumentando a capacidade de carga e desempenho da estrutura. A Figura 18, Figura 19 e Figura 20 mostram a montagem das fitas na estrutura a ser reforçada (Shahverdi *et al.*, 2016).

Figura 18: Foto das Fitas de Fe-LMF utilizadas no reforço



Fonte: Shahverdi *et al.* (2016).

Figura 19: Fitas introduzidas em viga e método de aquecimento



Fonte: Shahverdi *et al.* (2016).

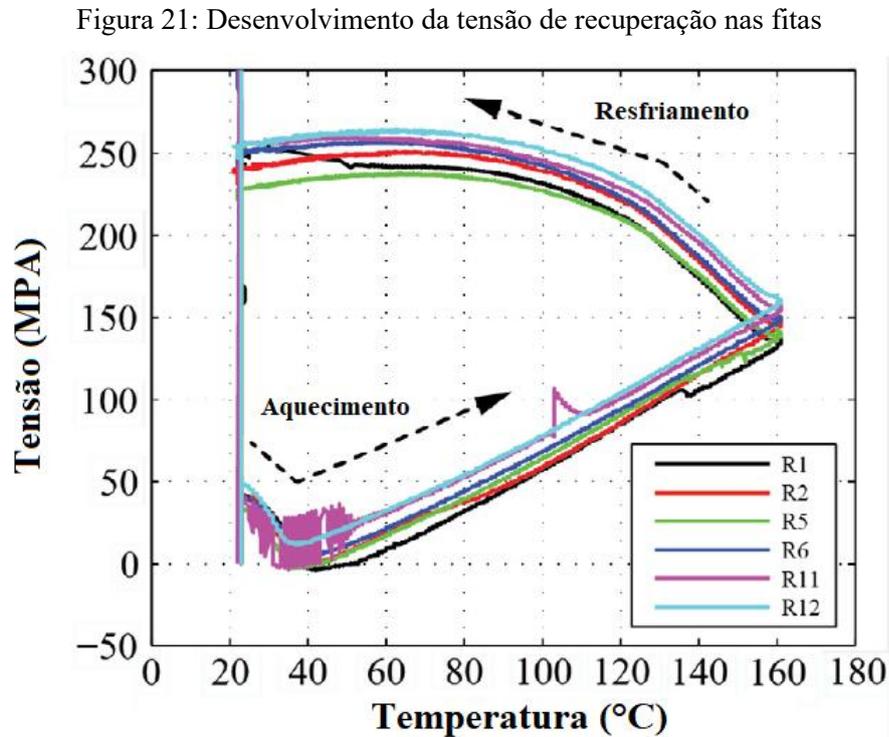
Figura 20: Fitas nos sulcos da viga e fixação com argamassa



Fonte: Shahverdi *et al.* (2016).

Para aplicação do efeito de reforço, as fitas são previamente deformadas longitudinalmente em 1,5%, e então introduzidas em sulcos na viga, fixadas por argamassa colante de cimento. Após a cura da argamassa, o efeito memória de forma é ativado por aquecimento causado por efeito Joule. Como as fitas estão impedidas de recuperar o tamanho original, desenvolve-se a chamada “**tensão de recuperação**” (*recovery stress* - σ_r), que alcança valores de 220 a 250 MPa por fita

e é transmitida ao concreto por aderência. A Figura 21 mostra o desenvolvimento das tensões de recuperação com o aquecimento das fitas (Shahverdi *et al.*, 2016).

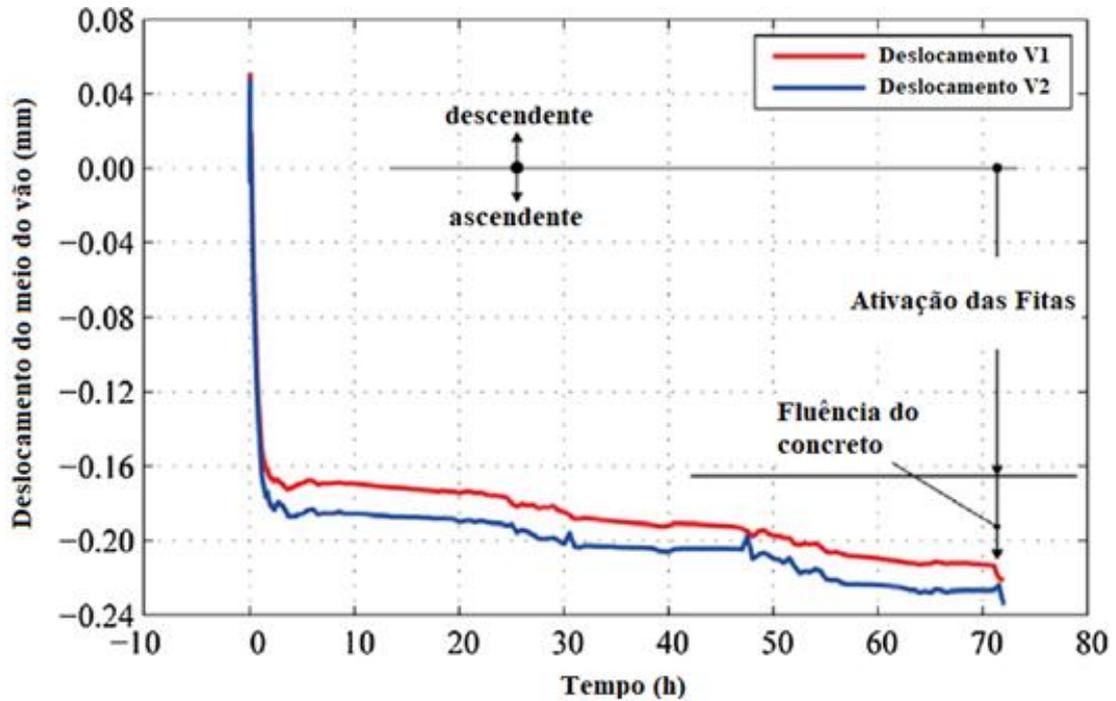


Onde: R1 até R12 são diferentes fitas ativadas termicamente

Fonte: Shahverdi *et al.* (2016).

A capacidade de reforço foi verificada em ensaio de flexão a dois pontos, onde constatou-se que, após ativação das fitas de LMF, a viga recuperou-se completamente da deflexão causada pela carga aplicada, sofrendo inclusive deflexão negativa e por fluência, constatando a transmissão da tensão de recuperação para o elemento estrutural e a viabilidade de uso como elemento de protensão, como mostra a Figura 22 (Shahverdi *et al.*, 2016).

Figura 22: Deslocamento do meio do vão de viga reforçada

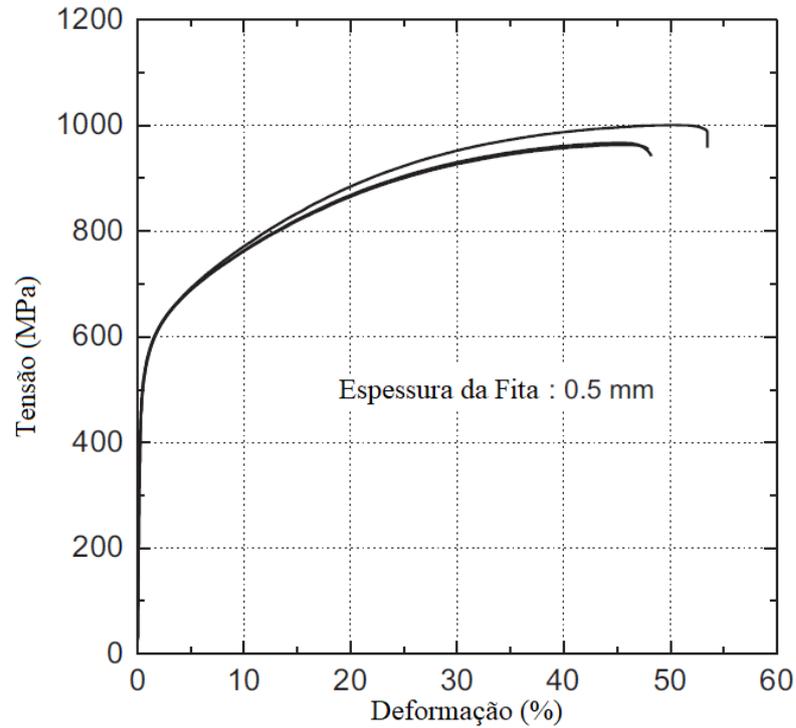


Onde: V1 e V2 são diferentes medidores de deslocamento

Fonte: Shahverdi *et al.* (2016).

As propriedades mecânicas das fitas de Fe-LMF foram exploradas por Shahverdi et al. em 2018, onde verificou-se que fitas de 0,50 mm de espessura, em estado indeformado, apresentaram tensão de escoamento f_y em torno de 500 MPa, tensão de ruptura f_u de até 1000 MPa e módulo de elasticidade E de aproximadamente 160 GPa, conforme mostra a Figura 23.

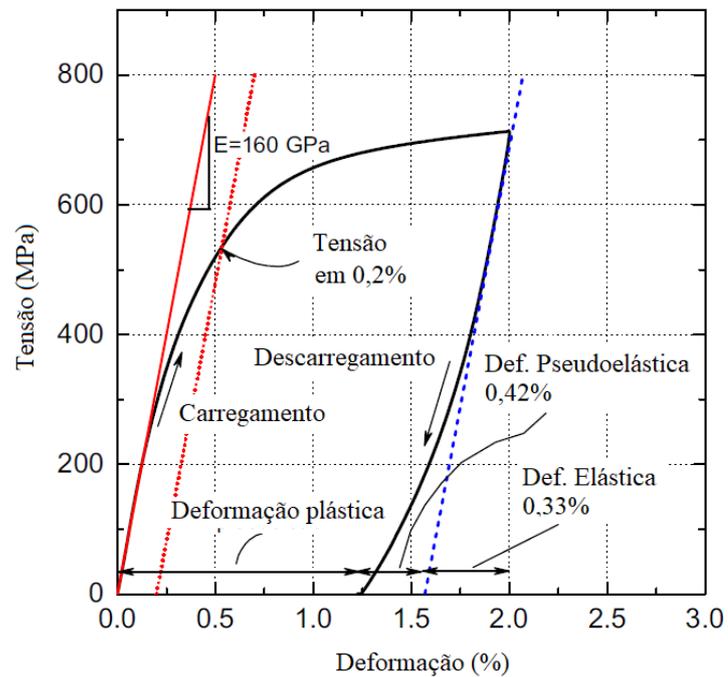
Figura 23: Gráfico tensão-deformação da fita não deformada



Fonte: Shahverdi *et al.* (2018).

O estudo também avaliou o comportamento de fitas deformadas longitudinalmente. No caso de fitas de 1,5mm de espessura, deformadas a 2,0%, observou-se comportamento superelástico – recuperação de 0,42% - após sofrer deformação adicional de 2,0% (4,0% total). A Figura 24 apresenta o gráfico tensão-deformação para o caso, o que demonstra que as fitas de Fe-LMF, além da capacidade de recuperação quando ativadas termicamente, também possuem propriedades mecânicas que garantem resistência passiva à estrutura (Shahverdi et al., 2018).

Figura 24: Tensão-Deformação em fita pré-deformada



Fonte: Shahverdi *et al.* (2018).

Com a possibilidade de utilização do material como armadura passiva, bem como ativa – embora com força de protensão menor que os métodos convencionais – estimulou a produção de barras de Fe-LMF para utilização como armadura em estruturas de concreto, como mostra a Figura 25, possibilitando a produção de concreto armado com ambas as capacidades de resistência passiva e ativa, quando acionado por calor (Schrantz *et al.*, 2019).

Figura 25: Barras de aço com efeito memória de forma



Fonte: Schrantz *et al.* (2019).

2.3.2.1. ESTUDO DE CASO 1: DEPÓSITO INDUSTRIAL (VILLIGEN, SUIÇA, 2017)

Em 2017, na Suíça, foi realizada a primeira aplicação mundial de reforço estrutural com chapas de memória de forma em uma laje de concreto armado, devido à remoção de uma parede portante. Para compensar a alteração estrutural, foram instaladas 14 chapas de memória de forma e um perfil de aço HEB 180 S355, além de 12 tiras de CFRP para suprir a falta de armadura de flexão (Ver Figura 26). A combinação dessas técnicas reduziu a perda de altura útil do ambiente e acelerou a execução da obra. Enquanto as chapas de memória de forma atenderam às exigências de serviço, o CFRP foi utilizado para suportar cargas adicionais. Além disso, apenas as chapas necessitaram de proteção contra incêndio, reduzindo as exigências de segurança. O pré-tensionamento foi realizado por aquecimento resistivo, monitorado por termopares, e exigiu escaneamento prévio da armadura interna para evitar curtos-circuitos (Schranz *et al.*, 2019).

Figura 26: Foto do reforço com fitas de Fe-LMF



Fonte: Schranz *et al.* (2019).

2.3.2.2. ESTUDO DE CASO 2: ÁREA DE MOMENTO FLETOR NEGATIVO EM LAJES DE CONCRETO (MÜNCHENSTEIN, SUÍÇA, 2018)

Durante a reforma de um edifício residencial em Münchenstein, Suíça, duas lajes de concreto foram reforçadas na região de momento fletor negativo. Para aumentar a capacidade de carga, foram instaladas dez barras de aço com memória de forma ($\text{Ø}16 \text{ mm}$) em sulcos superficiais na laje. Inicialmente, cortes de aproximadamente 3 cm de profundidade e largura foram feitos com serra diamantada, conforme Figura 27 e Figura 28. As extremidades das barras foram fixadas com argamassa cimentícia SikaGrout-311 em trechos de 30 a 40 cm. Após a cura, as barras foram aquecidas por infravermelho até 190°C , com controle por sensores, ativando e protendendo o sistema. Após o resfriamento, os sulcos foram preenchidos com argamassa, garantindo a total incorporação das barras à laje e evitando interferências futuras na estrutura (Schranz *et al.*, 2019).

Figura 27: Barras de Fe-LMF em sulcos da laje



Fonte: Schranz *et al.* (2019).

Figura 28: Ancoragem das barras com argamassa



Fonte: Schranz *et al.* (2019).

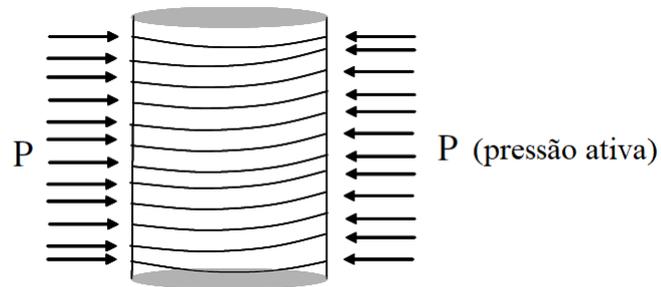
2.3.3. CONFINAMENTO ATIVO UTILIZANDO LMF

O concreto, apesar de amplamente utilizado na construção civil, apresenta comportamento frágil, com pouca capacidade de aviso antes da ruptura. Para melhorar sua resistência e ductilidade, uma técnica comum é o confinamento lateral, que aplica pressão perpendicular à direção da carga. Esse confinamento pode ser classificado em duas categorias principais: passivo e ativo. No confinamento passivo, a pressão lateral só é ativada após a dilatação do concreto, ou seja, quando já há algum nível de dano. Já no confinamento ativo, a pressão é aplicada antes do carregamento axial, proporcionando um ganho significativo de resistência e controle de fissuração. Apesar da superioridade do confinamento ativo, sua aplicação tradicional, que exige protensão acionada mecanicamente, é complexa, onerosa e demanda mão de obra especializada, limitando seu uso prático (Shin e Andrawes, 2010).

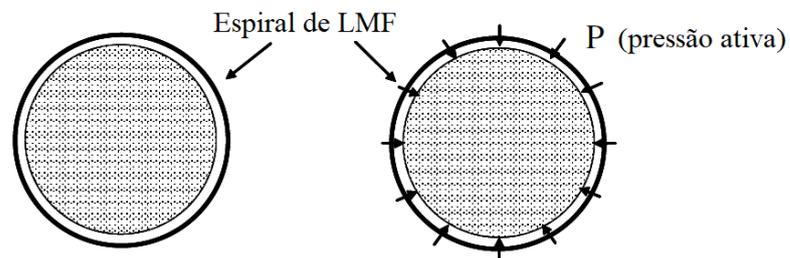
Para o confinamento ativo, Shin e Andrawes (2010) experimentaram a utilização de fios pré-tracionados de LMF dispostos em forma de espiral ao redor de corpos de prova de concreto. Quando ativados termicamente, esses fios geram tensão de recuperação, aplicando uma compressão lateral uniforme no concreto, conforme Figura 29 (Shin e Andrawes, 2010).

Figura 29: Esquema de confinamento com LMF em espiral

(a) Concreto confinado com espirais de LMF



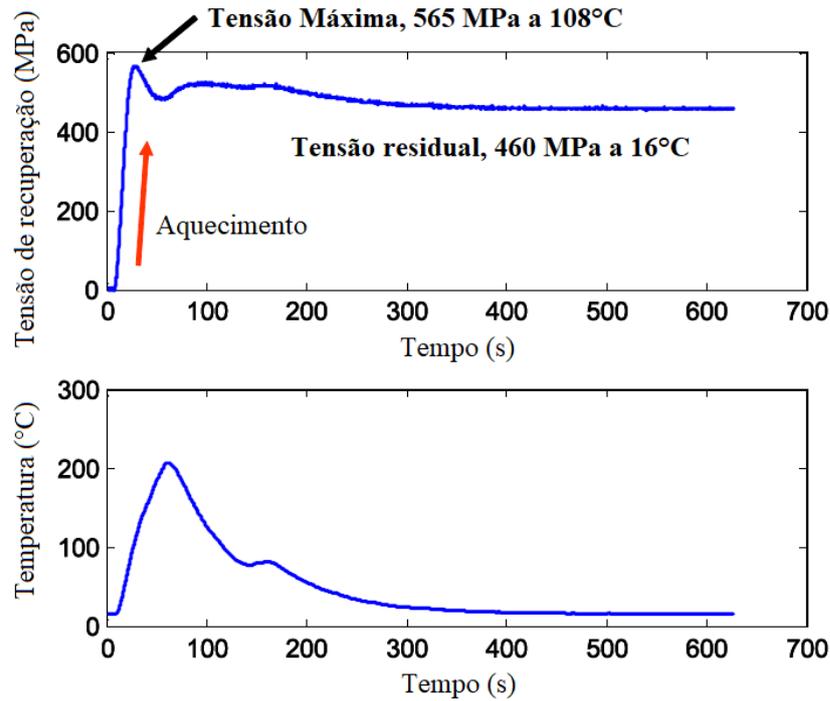
(b) Antes de depois da ativação térmica



Fonte: Shin e Andrawes (2010).

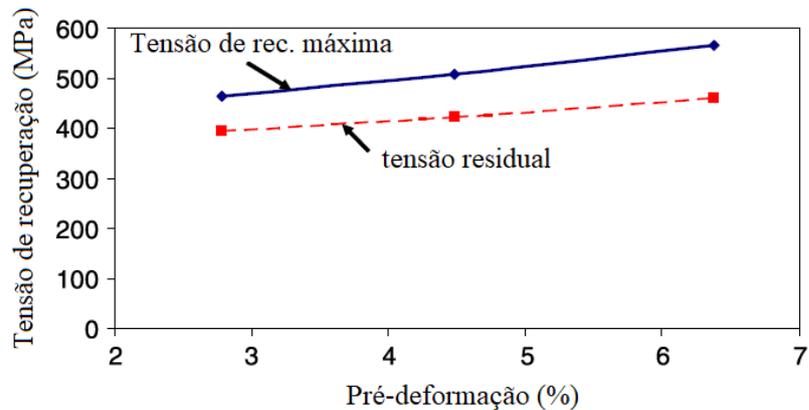
Os fios de LMF de NiTiNb utilizados para criar a espiral atingem uma tensão de recuperação máxima de 565 MPa aos 108°C; com o resfriamento dos fios, a tensão de recuperação diminui até um valor de 460 MPa, chamado de tensão residual, conforme mostra a Figura 30. As tensões de recuperação e residual são diretamente proporcionais à deformação que o fio sofre durante o pré-tracionamento, indicado na Figura 31 (Shin e Andrawes, 2010).

Figura 30: Tensões desenvolvidas no fio de NiTiNb-LMF



Fonte: Shin e Andrawes (2010).

Figura 31: Tensões desenvolvidas para diferentes deformações



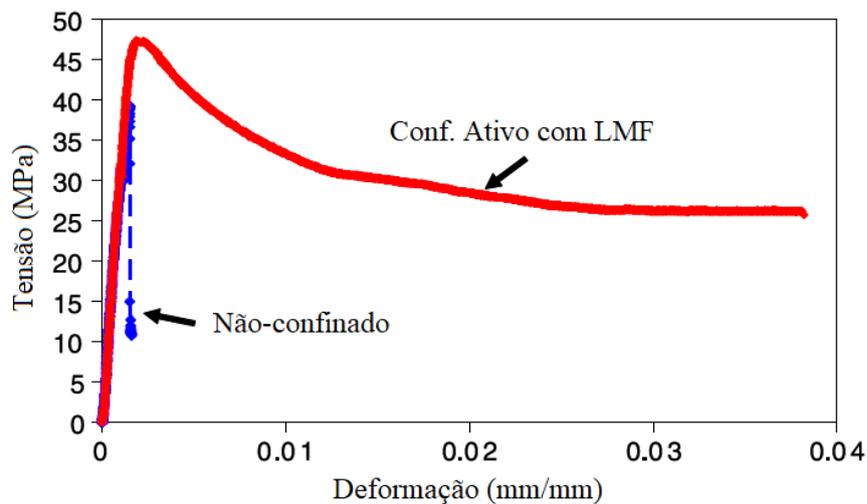
Fonte: Shin e Andrawes (2010).

Antes da aplicação da carga cíclica, a tensão de recuperação gerada nos fios de LMF já proporciona um confinamento ativo ao concreto. No entanto, à medida que o concreto se expande lateralmente sob carregamento axial, o confinamento passivo também é ativado, pois os fios em espiral desenvolvem tensões adicionais com a expansão diametral do concreto comprimido. Dessa forma, o confinamento fornecido pela espiral de LMF é uma combinação de confinamento ativo, antes do carregamento, e confinamento passivo, após a solicitação estrutural. Testes cíclicos demonstraram que a tensão de confinamento na espiral de LMF

permanece estável mesmo sob carregamentos repetitivos, como aqueles provocados por eventos sísmicos (Shin e Andrawes, 2010).

Com base na tensão de recuperação e na perda de pré-deformação previamente obtidas, a pressão total de confinamento aplicada ao cilindro de concreto testado foi de aproximadamente 1,42 MPa. O concreto confinado com espiral de LMF apresentou uma resistência máxima de 47,3 MPa, enquanto o concreto não confinado atingiu 39, 2 MPa, resultando em um aumento de cerca de 21% na resistência. Além disso, a deformação última do concreto confinado com LMF foi 24 vezes maior do que a do concreto não confinado, demonstrando um aumento significativo na ductilidade do material, conforme Figura 32 (Shin e Andrawes, 2010).

Figura 32: Tensão-deformação do concreto confinado com LMF e não-confinado



Fonte: Shin e Andrawes (2010).

2.3.4. REFORÇO AO CISALHAMENTO UTILIZANDO Fe-LMF

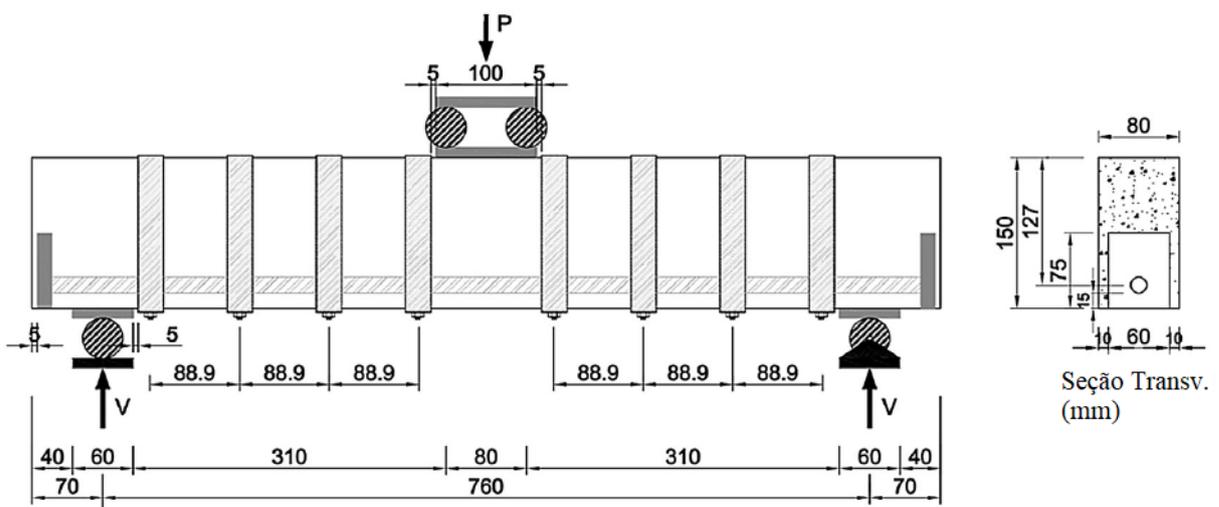
O reforço ao cisalhamento de vigas de concreto armado é uma necessidade recorrente na Engenharia Estrutural, especialmente em estruturas sujeitas a ações sísmicas ou aumento de carga. Diversas técnicas de reforço têm sido desenvolvidas para melhorar a resistência ao cisalhamento, incluindo o uso de estribos externos, camadas de concreto autoadensável e ângulos de aço combinados com fitas pré-tensionadas. No entanto, a maioria dessas soluções opera de forma passiva, ou seja, a estrutura precisa sofrer certa deformação ou dano antes que o reforço entre em ação (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

Utilizando fitas de Fe-LMF, é possível fazer o reforço ao cisalhamento de vigas de concreto através de confinamento ativo por armaduras externas transversais, que, ao comprimir o concreto, aumenta o valor da parcela do efeito pino na resistência ao cisalhamento do concreto. Assim, o reforço atua antes da aplicação de carga adicional e não expõe o elemento estrutural a mais deformações e danos (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

O efeito pino – ou efeito Dowell - é a capacidade da armadura de flexão de resistir à abertura e ao deslizamento das fissuras de cisalhamento em elementos de concreto e está relacionada à capacidade do concreto de transferir tensões da matriz de argamassa para a armadura de reforço. A melhora da aderência entre o concreto e a armadura de flexão, por exemplo por confinamento ativo, aumenta o valor da contribuição do efeito Dowell da resistência ao cisalhamento, reduzindo a evolução das fissuras (Lantsoght, 2019).

Montoya-Coronado *et al.* (2019), experimentaram esse método de reforço em seis vigas de concreto não-armado simplesmente apoiadas e submetidas a ensaios de flexão a três pontos. As vigas **R1** e **R2** não possuíam nenhum tipo de reforço e foram usadas de referência. As vigas **SP1** e **SP2** foram reforçadas com as fitas de LMF, mas sem ativação delas. As vigas **SA1** e **SA2** foram reforçadas com fitas de LMF que tiveram o EMF ativados para o confinamento ativo. Uma carga concentrada foi aplicada no centro do vão por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 100 kN, operando em controle por deslocamento até a ruptura da viga. O esquema do reforço é indicado na Figura 33 e a foto do experimento na Figura 34.

Figura 33: Esquema de reforço cisalhante com fitas de Fe-LMF



Fonte: Montoya-Coronado *et al.* (2019).

Figura 34: Foto do experimento de reforço cisalhante

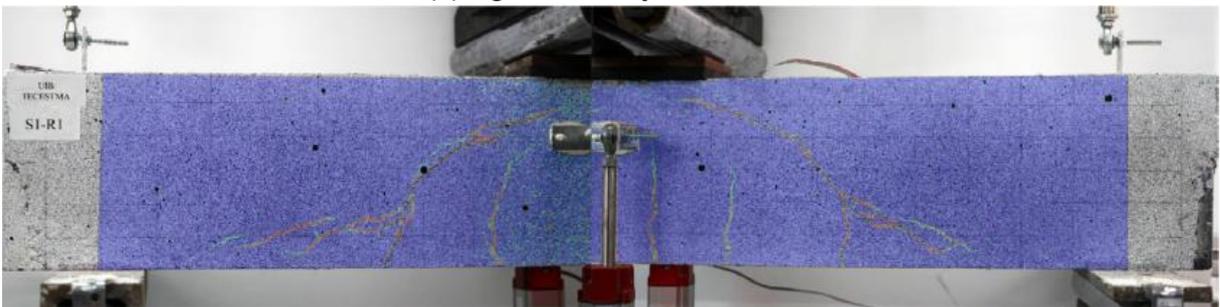


Fonte: Montoya-Coronado *et al.* (2019).

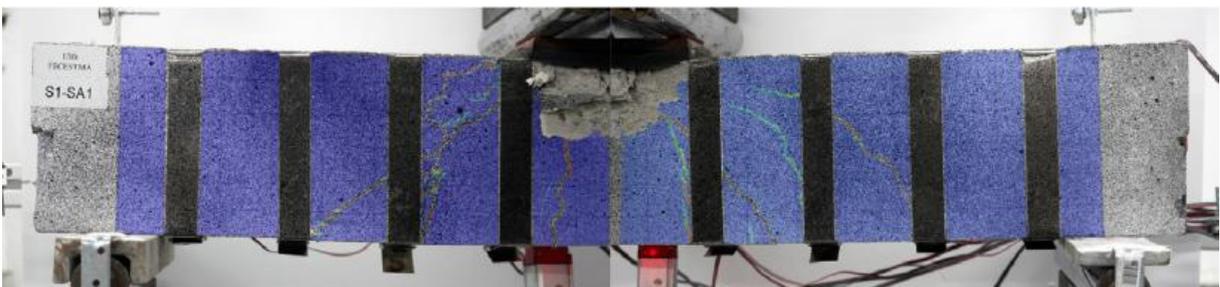
No experimento, observou-se que as vigas de referência, sem o reforço com Fe-LMF, falharam por cisalhamento, com o desenvolvimento de uma única e bem desenvolvida trinca que caracterizou a falha, enquanto as vigas reforçadas contra o cisalhamento falharam por flexão – ver Figura 35 (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

Figura 35: Foto das vigas ensaiadas após a falha

(a) Viga sem reforço cisalhante



(b) Viga com fitas ativadas de Fe-LMF

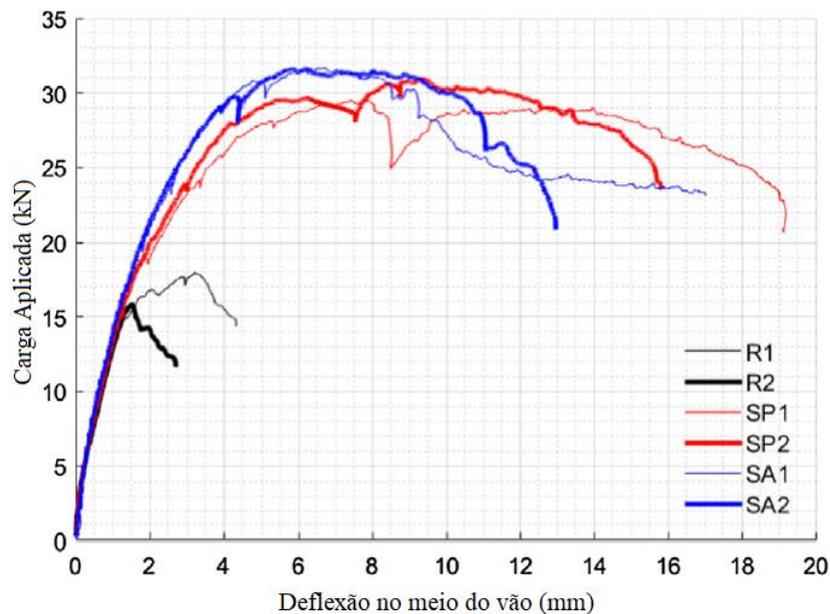


Fonte: Montoya-Coronado *et al.* (2019).

A resistência ao cisalhamento das amostras R1 e R2 foi de 17,95 kN e 15,82 kN, respectivamente. Com o uso de fitas de Fe-LMF como reforço externo, SP1 e SP2, sem ativação do EMF, essa capacidade praticamente dobrou, alcançando 29,51 kN e 31,01 kN. Já nas amostras com fitas ativadas, SA1 e SA2, os valores chegaram a 31,68 kN e 31,64 kN, demonstrando a eficácia do reforço ativo no aumento da resistência ao cisalhamento (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

O estudo mostrou que todas as vigas apresentaram rigidez semelhante no início dos testes, mas as vigas reforçadas com fitas de Fe-LMF ativadas demonstraram maior rigidez e menor deflexão na carga máxima, indicado na Figura 36 (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

Figura 36: Carga-Deflexão das vigas ensaiadas



Fonte: Montoya-Coronado *et al.* (2019).

A instrumentação da armadura longitudinal revelou que, nas vigas reforçadas com fitas largas, houve escoamento da armadura no meio do vão antes da ruptura, indicando um mecanismo de falha controlado por flexão. Já nas vigas de referência (sem reforço), a armadura não atingiu o escoamento, sugerindo que falharam por cisalhamento (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

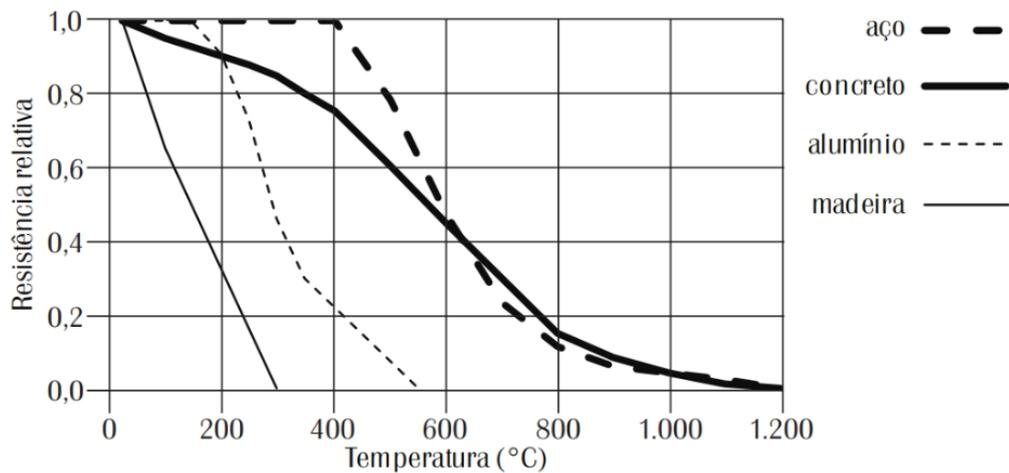
Além disso, as medições de deformação revelaram que a ativação das fitas melhorou o efeito *Dowel* – a capacidade da armadura longitudinal de resistir à abertura de fissuras de cisalhamento. Isso foi evidenciado pelo aumento das tensões compressivas registradas na

armadura longitudinal, o que indica que o confinamento externo das fitas ativadas ajudou a reduzir a propagação das fissuras e a aumentar a resistência ao cisalhamento (Montoya-Coronado *et al.*, 2019).

2.3.5. PROTEÇÃO AO FOGO UTILIZANDO LIGAS MEMORIA DE FORMA

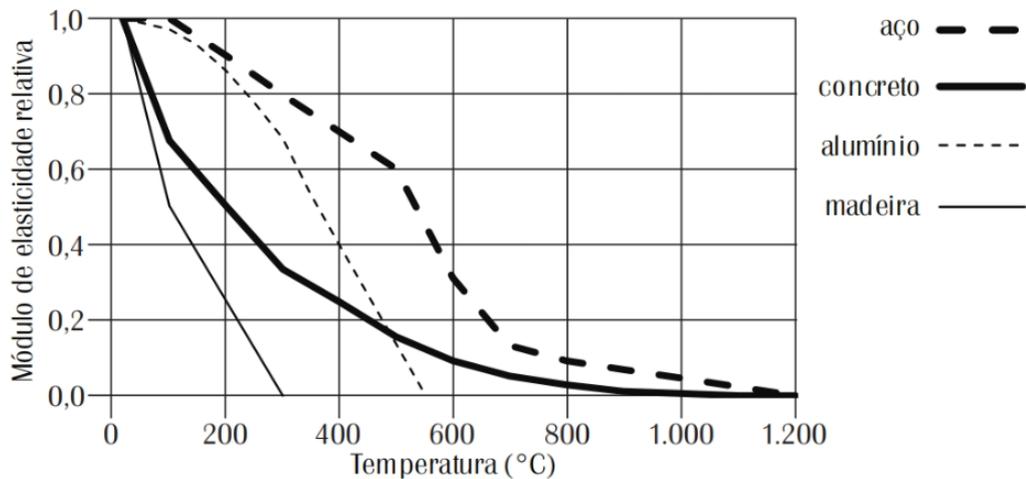
A proteção de estruturas de concreto contra incêndio é um desafio crítico na Engenharia Civil, dado que a resistência e a rigidez da maioria dos materiais de construção são reduzidas em situação de fogo contínuo, devido à degradação das propriedades mecânicas ou redução da área resistente, como mostram a Figura 37 e Figura 38 (Silva, 2012, p.20).

Figura 37: Variação da Resistência dos materiais em função da temperatura



Fonte: Silva (2012, p.20).

Figura 38: Variação do módulo de elasticidade dos materiais em função da temperatura



Fonte: Silva (2012, p.20).

Tradicionalmente, a segurança estrutural em condições de incêndio é alcançada ao aumentar a espessura do revestimento para proteger o concreto e, especialmente, as armaduras de aço, para que resistam pelo tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF). No entanto, com a perda de rigidez com o aumento de temperatura, as grandes deformações que ocorrem na estrutura antes do colapso podem dificultar a evacuação de ocupantes por barreiras físicas ou psicológicas (Wong e Liu, 2013).

Uma nova abordagem para reforço de estruturas de concreto armado em situações de incêndio consiste em um design híbrido utilizando tanto barras de NiTi (LMF) e barras de aço convencionais na armação: à temperatura ambiente, as barras de aço convencionais são responsáveis por garantir a resistência à flexão e as barras de NiTi são agentes passivos na estrutura; em altas temperaturas, a alta tensão de recuperação das barras de NiTi (ativação do EMF) compensam a perda de resistência das barras de aço e do concreto em altas temperaturas (Wong e Liu, 2013).

Essa abordagem se mostrou viável a partir do trabalho de Sadiq *et al.* (2013), que avaliou as propriedades mecânicas da LMF NiTi em diferentes temperaturas – Tabela 5 – e de onde foi possível estabelecer os modelos numéricos para a tensão de recuperação da LMF e seu correspondente módulo de elasticidade, conforme Equações 1 e 2 (Wong e Liu, 2013):

$$f_{yt,SMA} = -7,159t^5 + 120,3t^4 - 690,5t^3 + 1403t^2 - 298,7t + 243,5 \quad \text{Equação 1}$$

$$E_{SMA} = 648,4t^4 - 6742t^3 + 12791t^2 - 26783t + 14268 \quad \text{Equação 2}$$

Onde: $t = T_{SMA}/100$ e T_{SMA} é a temperatura da LMF.

Tabela 5: Propriedades mecânicas da liga NiTi em temperaturas elevadas

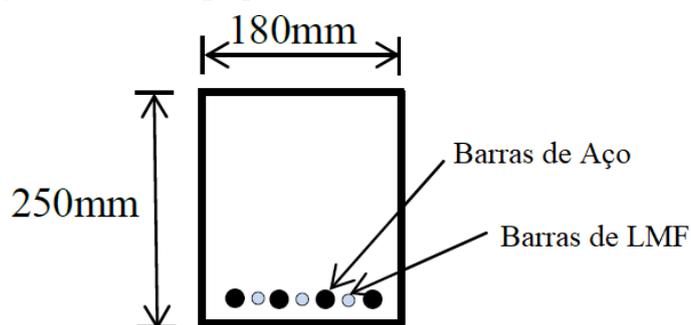
Temperatura (°C)	E_t (GPa)	Coef. De Variação	F_{yt} (MPa)	Coef. De Variação	F_{ut} (MPa)	Coef. De Variação
20	19,33	0,27	171,9	0,003	1451,2	0,07
100	50,55	0,13	780	0,02	1608,7	0,01
200	70,72	0,02	889,7	0,01	1469,7	0,004
300	84,32	0,10	823,2	0,03	1481,1	0,003
400	58,95	0,13	494,5	0,11	745,8	0,01
500	30,5	0,26	264,4	0,05	397,4	0,01
600	19,57	0,01	149,1	0,06	190,1	0,08

Fonte: Sadiq *et al.* (2013).

Importante observar que a liga atinge os maiores valores de propriedade mecânicas próximo de 300°C (Wong e Liu, 2013).

Wong e Liu (2013), avaliaram a utilização de Ligas memória de forma (LMF) no reforço de vigas de concreto armado contra incêndio por meio de cálculos estruturais e térmicos. A viga, com 4 metros de comprimento e seção transversal de 180mm × 250mm, foi projetada com armaduras de aço (320mm²) e LMF (59mm²). Para fins de comparação, também foi analisada uma viga sem LMF, na qual a área de aço foi aumentada para 340mm² para garantir capacidades de flexão equivalentes em temperatura ambiente. A Figura 39 apresenta o modelo proposto de reforço.

Figura 39: Modelo proposto de reforço contra incêndio

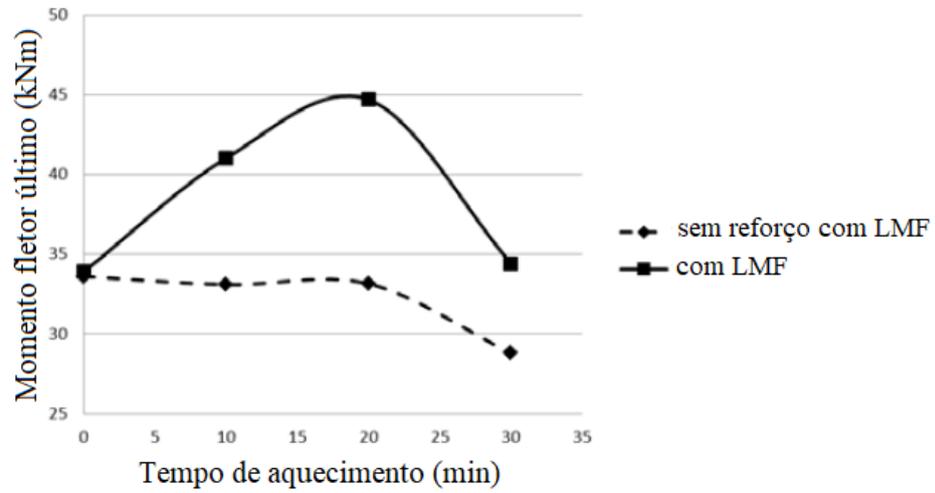


Fonte: Wong e Liu (2013).

O modelo incorpora o método simplificado do *Eurocode 2* (EC2) para prever a distribuição de temperatura na seção transversal da viga durante o incêndio – isoterma de 500°C. Foram determinadas as variações da capacidade resistente à flexão e da deflexão no meio do vão sob uma carga de 20kN ao longo de 30 minutos de exposição ao incêndio padrão. Jia *et al.* fez uma avaliação semelhante em 2020, também considerando o efeito de protensão convencional em uma viga (Wong e Liu, 2013).

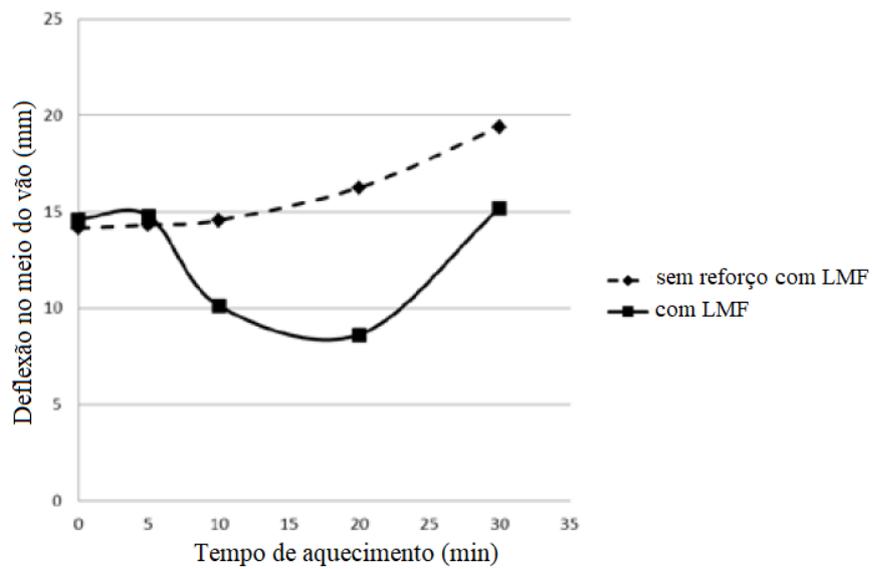
Os cálculos levam em conta a transformação de fase das LMF entre martensita e austenita, considerando a influência da temperatura ($T > A_f$ e $T < M_f$), o estresse e a deformação residual (4%), além da recuperação de tensões. Durante o incêndio, ocorre uma perda inicial de resistência e rigidez no concreto e no aço, mas essa redução é compensada pelo aumento da resistência e rigidez das LMF, garantindo um melhor desempenho estrutural da viga. Os resultados (Tabela 6) indicaram que, na viga reforçada com LMF, tanto a capacidade de flexão quanto a deflexão permaneceram praticamente inalteradas. Em contrapartida, na viga sem LMF, houve uma redução de 14% na capacidade de flexão e um aumento de 37% na deflexão ao final dos 30 minutos de incêndio, como mostra a Figura 40 e Figura 41 (Wong e Liu, 2013).

Figura 40: Momento fletor último em viga reforçada x não-reforçada



Fonte: Wong e Liu (2013).

Figura 41: Deflexão em viga reforçada x não-reforçada



Fonte: Wong e Liu (2013).

Tabela 6: Resultados de reforço estrutural contra incêndio com LMF

Tempo de aquecimento (min)	Sem reforço com LMF		Com reforço por LMF	
	M_u (kNm)	Deflexão (mm)	M_u (kNm)	Deflexão (mm)
0	33,6	14,2	33,9	14,6
20	33,1	16,1	44,7	7,9
30	28,8	19,4	34,4	15,6

Fonte: Wong e Liu (2013).

Os cálculos demonstram que, mesmo com uma quantidade relativamente pequena de LMF, os benefícios são significativos, sugerindo que um aumento na quantidade de LMF tornaria os efeitos ainda mais expressivos. Esse conceito inovador pode se tornar uma solução padrão para o reforço de vigas de concreto em projetos voltados para a resistência ao fogo, aprimorando a segurança e durabilidade das estruturas (Wong e Liu, 2013).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma das principais desvantagens das Ligas Memória de Forma (LMF) é o seu custo inicial elevado. Em particular, as ligas de Níquel-Titânio (NiTi) apresentam um valor significativamente superior ao das barras de aço convencionais, o que tem limitado sua aplicação em projetos de Engenharia Estrutural. No entanto, é fundamental considerar o ciclo de vida da estrutura ao avaliar a viabilidade econômica dessa tecnologia. A redução da necessidade de reparos ao longo do tempo, aliada ao aumento da durabilidade e adaptabilidade estrutural proporcionados pelas LMFs, pode compensar o alto custo inicial, tornando a solução mais competitiva em uma perspectiva de longo prazo. Até então, a aplicação das LMFs tem sido mais recorrente em projetos de recuperação e reforço de patrimônios históricos, onde a preservação do valor cultural e arquitetônico torna o fator econômico menos restritivo em comparação a obras convencionais (Schranz et al., 2019; Dyer, 2014).

Além da questão econômica, o reforço de estruturas utilizando ligas memória de forma (LMF) em comparação com barras de aço convencionais oferece uma série de vantagens e desvantagens que devem ser consideradas. Além do efeito memória de forma, as LMFs exibem superelasticidade, que é a capacidade de sofrer grandes deformações e retornar à forma original sem necessidade de aquecimento. Isso é particularmente vantajoso em aplicações onde a deformação reversível é necessária, como em estruturas sujeitas a cargas cíclicas ou eventos sísmicos (Shahverdi et al., 2016).

As ligas memória de forma, especialmente aquelas à base de níquel-titânio (NiTi), são altamente resistentes à corrosão. Essa característica aumenta significativamente a durabilidade das estruturas, reduzindo a necessidade de manutenção e reparos frequentes em ambientes agressivos, como áreas costeiras ou industriais (Choi et al., 2016).

A capacidade de ativar as LMFs após a instalação permite ajustes precisos e controlados da tensão aplicada ao concreto. De forma que o nível de tensão desenvolvido na LMF pode ser, inclusive, monitorado por celular. Isso é uma vantagem significativa sobre as barras de aço convencionais, que não oferecem a mesma flexibilidade para ajustes após a instalação inicial (Shahverdi et al., 2016; Schranz *et al.*, 2019).

Como o efeito memória de forma é resultado de um processo termodinâmico, o perfil de tensões ao longo do elemento estrutural não varia devido a perdas de protensão por atrito.

Isso garante uma distribuição uniforme de tensões ao longo da estrutura mesmo para barras de LMF curvas, melhorando a eficiência do reforço (Chang & Araki, 2016; Zhao & Andrawes, 2020).

No entanto, as LMFs, especialmente aquelas à base de ferro (Fe-LMF) alcançam valores de tensão de recuperação menores em comparação com os métodos convencionais de protensão com barras de aço ou reforço com FRP. Isso pode exigir uma avaliação de projeto mais detalhada quanto à quantidade de cabos ou fitas necessárias para resistir aos esforços da estrutura. A necessidade de usar mais material pode aumentar o custo e a complexidade do projeto (Shahverdi et al., 2016).

A aplicação de LMFs na construção civil ainda é relativamente nova em comparação com o uso de barras de aço convencionais. Isso significa que pode haver uma limitação na disponibilidade de materiais e na expertise técnica necessária para projetar e implementar sistemas de protensão utilizando LMFs (Chang & Araki, 2016).

Embora as LMFs ofereçam várias vantagens, o comportamento a longo prazo dessas ligas sob condições de carga contínua e ciclos térmicos ainda é uma área de pesquisa ativa. Há necessidade de mais estudos para entender plenamente a durabilidade e a resistência das LMFs ao longo de décadas de uso (Otsuka & Wayman, 1998).

A utilização de ligas memória de forma para reforço de estruturas de concreto é uma área promissora na Engenharia Civil. As LMFs oferecem vantagens significativas em termos de resistência, durabilidade e facilidade de aplicação.

Com as novas Ligas Memória de Forma baseadas em Ferro (Fe-LMF), estruturas de concreto reforçadas com esse material podem apresentar ambas as capacidades de resistência passiva e ativa, garantindo maior durabilidade e adaptabilidade às estruturas (Shahverdi et al., 2018).

A pesquisa contínua e a implementação prática dessas tecnologias podem levar a avanços significativos na Engenharia Civil e no desenvolvimento de estruturas mais resilientes.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAIK, Emad. Examining the yielding displacement of concrete bridge piers equipped with shape memory alloy rebars. In: **st Croatian Conference on Earthquake Engineering**. Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2021. p. 853-861.
- ALSHANNAG, Mohammad J.; ALQARNI, Ali S.; HIGAZEY, Mahmoud M. Superelastic nickel–titanium (NiTi)-based smart alloys for enhancing the performance of concrete structures. **Materials**, v. 16, n. 12, p. 4333, 2023.
- ANTER, Elsayed Mohamed; HILAL, Amr Mohamed; ASRAN, Ahmed Gomaa. **Smart Stressing of Concrete Beams with Nitinol Shape Memory Alloy Cables**. 2023.
- BILLAH, AHM Muntasir; RAHMAN, Jesika; ZHANG, Qi. Shape memory alloys (SMAs) for resilient bridges: A state-of-the-art review. In: **Structures**. Elsevier, 2022. p. 514-527.
- CARVALHO, R. C.; FILHO, J. R. D. F. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado: segundo a NBR 6118:2014**. 4. ed. São Carlos: EduFSCar, 2021.
- CHANG, Wen-Shao; ARAKI, Yoshikazu. Use of shape-memory alloys in construction: a critical review. In: **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering**. Thomas Telford Ltd, 2016. p. 87-95.
- CHOI, Eunsoo et al. Crack-closing of cement mortar beams using NiTi cold-drawn SMA short fibers. **Smart Materials and Structures**, v. 24, n. 1, p. 015018, 2014.
- CHOI, Eunsoo et al. Prestressing effect of embedded Fe-based SMA wire on the flexural behavior of mortar beams. **Engineering Structures**, v. 227, p. 111472, 2021.
- CZADERSKI, Christoph et al. Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 94-105, 2014.
- DYER, Thomas. **Concrete Durability**. 1 ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
- FERRETTI, Elena; PASCALE, Giovanni. Some of the latest active strengthening techniques for masonry buildings: a critical analysis. **Materials**, v. 12, n. 7, p. 1151, 2019.

- INDIRLI, Maurizio; CASTELLANO, Maria Gabriella. Shape memory alloy devices for the structural improvement of masonry heritage structures. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 2, n. 2, p. 93-119, 2008.
- JANI, Jaronie Mohd et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials & Design (1980-2015)**, v. 56, p. 1078-1113, 2014.
- JANKE, L. et al. Applications of shape memory alloys in civil engineering structures— Overview, limits and new ideas. **Materials and structures**, v. 38, p. 578-592, 2005.
- JIA, Ying-Qi et al. A hybrid steel–shape memory alloy prestressed concrete beam for improved fire resistance. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 27, n. 10, p. e2601, 2020.
- KUMAR, P. K.; LAGOUDAS, D. C. Introduction to shape memory alloys. In: **Shape memory alloys: modeling and engineering applications**. Boston, MA: Springer US, 2008. p. 1-51.
- LANTSOGHT, Eva OL. How do steel fibers improve the shear capacity of reinforced concrete beams without stirrups?. **Composites Part B: Engineering**, v. 175, p. 107079, 2019.
- LIU, Ai-Rong et al. A method of reinforcement and vibration reduction of girder bridges using shape memory alloy cables. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 17, n. 07, p. 1750076, 2017.
- MACHADO, L. G.; SAVI, M. A. Medical applications of shape memory alloys. **Brazilian journal of medical and biological research**, v. 36, p. 683-691, 2003.
- MAJI, Arup K.; NEGRET, Ihosvany. Smart prestressing with shape-memory alloy. **Journal of engineering mechanics**, v. 124, n. 10, p. 1121-1128, 1998.
- MAS, Benito et al. Superelastic shape memory alloy cables for reinforced concrete applications. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 307-320, 2017.

- MONTROYA-CORONADO, Luis A. et al. Experimental study on shear strengthening of shear critical RC beams using iron-based shape memory alloy strips. **Engineering Structures**, v. 200, p. 109680, 2019.
- NARESH, C.; BOSE, P. S. C.; RAO, C. S. P. Shape memory alloys: a state of art review. In: **IOP conference series: materials science and engineering**. IOP Publishing, 2016. p. 012054.
- NISHIYAMA, Zenji. Martensitic Transformation. Edited by Morris E. Fine, M. Meshii, C. M. Wayman. New York: Academic Press, 1978.
- NOGUEIRA, Cláudio Menezes et al. **Estudo das propriedades mecânicas de concretos reforçados com fibras curtas com efeito memória de forma**. 2006. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2006.
- OLIVEIRA, Henrique Martinni Ramos de. **Estudo experimental do comportamento térmico e dinâmico de fios de liga com memória de forma NiTi em regime superelástico**. 2014. Tese (Mestrado em Engenharia mecânica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2014.
- OTSUKA, Kazuhiro; WAYMAN, Clarence Marvin (Ed.). **Shape memory materials**. Cambridge university press, 1999.
- OZBULUT, Osman E. et al. **Feasibility of using shape memory alloys to develop self post-tensioned concrete bridge girders**. Mid-Atlantic Universities Transportation Center, 2013.
- PEREIRA, Luís Miguel Oliveira. **Ligas memória de forma: características e aplicações em Engenharia Civil**. 2011. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.
- PRECIADO, Adolfo; BARTOLI, Gianni; BUDELMANN, Harald. The use of prestressing through time as seismic retrofitting of historical masonry constructions: Past, present and future perspective. **CIENCIA ergo-sum**, v. 22, n. 3, p. 242-252, 2015.
- QIAN, Hui et al. Experimental study on the seismic performance of self-centering bridge piers incorporating ECC and superelastic SMA bars in the plastic hinge regions. In: **Structures**. Elsevier, 2022. p. 1955-1967.

- REIS, Lilia Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2001.
- DE ALMEIDA OLIVEIRA, Sergio. Os materiais inteligentes e suas aplicações. **Revista Marítima Brasileira**, v. 133, n. 10/12, p. 39-56, 2013.
- SCHRANZ, Bernhard et al. Strengthening of concrete structures with iron-based shape memory alloy elements: Case studies. In: **5th SMAR Conference, Potsdam, Germany**. 2019. p. 1-8.
- SHAHVERDI, Moslem; CZADERSKI, Christoph; MOTAVALLI, Masoud. Iron-based shape memory alloys for prestressed near-surface mounted strengthening of reinforced concrete beams. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 28-38, 2016.
- SHAHVERDI, Moslem et al. Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 586-599, 2018.
- SHIN, Moochul; ANDRAWES, Bassem. Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys. **Engineering Structures**, v. 32, n. 3, p. 656-664, 2010.
- SILVA, Valdir P. Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2012. E-book. p.20. ISBN 9788521206859. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521206859/>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- SOROUSHIAN, Parviz et al. Repair and strengthening of concrete structures through application of corrective posttensioning forces with shape memory alloys. **Transportation Research Record**, v. 1770, n. 1, p. 20-26, 2001.
- WONG, M. Bill; LIU, Jiaqi. Inherent Fire Protection Design of Concrete Beams Using Shape Memory Alloys. **Monash University**, 2013.
- ZHAO, Hang; ANDRAWES, Bassem. Innovative prestressing technique using curved shape memory alloy reinforcement. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117687, 2020.