

CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL, TÉRMICA E MECÂNICA DE LIGAS NI-TI COM MEMÓRIA DE FORMA PARA APLICAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**Francisco Manuel
BRAZ FERNANDES**

CENIMAT/I3N, FCT-UNL
2829-516 Caparica
fbf@fct.unl.pt



**Cátia Susana
FAVA GASPAR**

CENIMAT/I3N, FCT-UNL
2829-516 Caparica
&
Faculdade de Engenharia
Univ Católica Portuguesa
2635-631 Rio de Mouro
cgaspar22@hotmail.com



**Karimbi Koosappa
MAHESH**

CENIMAT/I3N, FCT-UNL
2829-516 Caparica
kkm@fct.unl.pt



**Ionut Dragos
MOLDOVAN**

Faculdade de Engenharia
Univ Católica Portuguesa
2635-631 Rio de Mouro
ionut@fe.lisboa.ucp.pt

SUMÁRIO

As ligas com memória de forma (LMF) despertam interesse pelo facto de a conjugação do efeito de memória de forma (EMF) com o da superelasticidade (SE) viabilizar a sua aplicação como sensores e como actuadores em sistemas ditos “inteligentes”. Estes aspectos são analisados de modo a poder melhor compreender as potencialidades e as limitações impostas à utilização desta classe de materiais em aplicações de Engenharia Civil onde possam desempenhar papéis tão variados que vão desde o amortecimento de vibrações até à monitorização de deformação em estruturas.

Palavras-chave: ligas com memória de forma, superelasticidade, amortecimento de vibrações, monitorização de deformação.

1. INTRODUÇÃO

O efeito de memória de forma (EMF) e a superelasticidade (SE) estão presentes numa grande variedade de ligas metálicas, sendo as de maior interesse industrial as ligas Ni-Ti com uma composição química que se situa dentro de uma banda muito estreita, centrada em torno da composição equiatômica (50 at% Ti – 50 at% Ni). Pequenas variações da sua composição e/ou de condições de processamento dão origem a grandes variações das suas características de transformação (temperaturas de transformação, deformação recuperável por EMF, ...). Nas ligas Ni-Ti, as temperaturas de transformação poderão estar abaixo de -100°C ou pouco acima de $+100^{\circ}\text{C}$ e a deformação recuperável por efeito de memória de forma pode atingir 10%. Daí o seu interesse num vasto leque de aplicações envolvendo uma gama alargada de temperaturas e/ou valores elevados de energia específica que podem ser obtidos com as ligas Ni-Ti a partir do EMF ou da SE (Fig. 1).

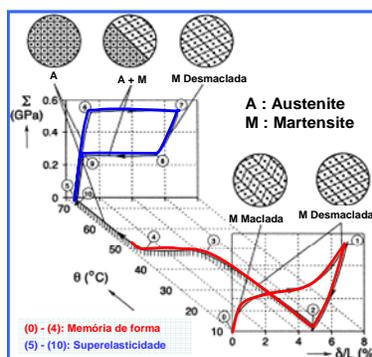


Figura 1 – Curvas σ - ϵ traduzindo (0 - 4) a deformação da martensite, recuperável por aquecimento até ao domínio austenítico (efeito de memória de forma), (5 - 10) a deformação superelástica da austenite (Adaptado a partir de [1]).

A aplicação de LMF em Engenharia Civil é uma área de investigação relativamente recente. A sua aplicação neste domínio da Engenharia pode ser generalizada ao controlo/atenuação das acções dinâmicas que podem actuar nestas estruturas, tais como o vento, o tráfego e até mesmo o funcionamento de equipamentos. No entanto, a acção dinâmica mais gravosa é, na generalidade dos casos, a acção sísmica.

Nas últimas décadas, o aumento da população a nível mundial levou a que houvesse uma grande concentração de estruturas em zonas de risco sísmico moderado/elevado. Este facto levou a que fosse imperativo dotar quer as estruturas existentes, quer as novas construções de mecanismos que pudessem, primordialmente, garantir a segurança dos utilizadores e, em última instância, assegurar o bom desempenho das estruturas face a estas solicitações. Sendo perceptível que não é economicamente viável projectar e construir estruturas convencionais que, para sismos intensos, permaneçam no regime elástico, tradicionalmente a prevenção anti-sísmica em Engenharia Civil é feita através da concepção de estruturas com a capacidade de se deformarem de forma dúctil [2] de modo a suportarem grandes deformações plásticas, mas sem colapsarem [3], respeitando os designados Estados Limites Últi-

mos. No entanto, é usual que as estruturas após ultrapassarem o patamar de cedência, se deformem irreversivelmente, existindo sempre uma deformação residual associada, mesmo que seja retirada a carga, ou atingindo a rotura. Ambas as situações acarretam custos bastante elevados de reparação, existindo mesmo, em grande número de casos, a impossibilidade de se reabilitar estas estruturas.

Sismos relativamente recentes, como o sismo de 1994 em Northridge nos EUA, o sismo de Kobe em 1995 no Japão ou o sismo de Kocaeli na Turquia em 1999, revelaram algumas deficiências em estruturas que até já estavam projectadas para resistirem a eventuais solicitações dinâmicas, mas que, mesmo assim, resultaram em perdas económicas avultadas devido à deformação permanente causada [2,3]. De forma a resolver estes problemas, a comunidade científica de Engenharia de Estruturas analisa continuamente e com detalhe o desempenho de várias estruturas sujeitas a acções sísmicas reais e tem desenvolvido sistemas para reduzir a deformação permanente nos elementos estruturais críticos, através de dois mecanismos principais: limitando a energia induzida no sistema estrutural, através de elementos de separação inseridos entre a superestrutura e a fundação (isolamento de base, como o aplicado no Hospital da Luz, em Lisboa) ou então aumentando a capacidade da superestrutura de dissipar a energia induzida, através de sistemas de controlo activo e passivo, tais como “*tuned mass dampers*” (TMD), já aplicado no edifício Taipei 101 (Taiwan), amortecedores metálicos/friccionais, utilizados geralmente em apoios de pontes e viadutos [2, 3] e vários outros. No entanto, existe ainda uma grande necessidade de desenvolver novos sistemas que permitam melhorar o desempenho de estruturas durante estes eventos [4], ou seja, dispositivos que dissipem ainda mais a energia gerada pelos sismos e que possam mesmo eliminar as deformações permanentes, mediante a utilização de mecanismos inseridos no sistema estrutural que têm um comportamento favorável predeterminado.

Assim, as LMF, mais concretamente as ligas Ni-Ti, enquadram-se dentro deste perfil, uma vez que possuem a propriedade única de retornarem à sua forma inicial, mesmo depois de terem atingido grandes deformações de cerca de 8% (por efeito de memória de forma ou por SE), bem como a facilidade de dissiparem energia devido ao seu comportamento histerético.



(a)



(b)

Figura 2 – Exemplos de aplicação de dispositivos baseados em LMF: (a) Basílica de S. Francisco de Assis (Itália), escola em Potenza (Itália).

Estas características têm suscitado grande interesse em diversas áreas científicas, sendo uma delas a Engenharia de Estruturas, que vê este material como um elemento de extrema importância em possíveis aplicações nas designadas *estruturas inteligentes* [5]. Actualmente existem já algumas aplicações reais de dissipadores histeréticos de ligas Ni-Ti, em Itália, como a Basílica de S. Francisco de Assis (Fig. 2-a) e ainda uma escola em Potenza (Fig. 2-b), onde é visível a aplicação destas ligas como elementos de contraventamento.

Quadro 1 – Exemplos de aplicações de LMF em Engenharia Civil no Japão.
(Adaptado de [6])

Características das LMF	Exemplos de aplicação
Efeito de memória de forma	Controle da temperatura ambiente usando LMF como sensores e actuadores. Controle da deformação de estruturas usando arames de LMF. Controle do pré-esforço em vigas de betão usando dispositivos de LMF. União de tubos de aço usando braçadeiras de LMF.
Superelasticidade	Elementos estruturais de betão armado com reforços de arames de LMF. Sistemas de isolamento de vibrações. Dispositivos de isolamento da base de estruturas por utilização combinada de LMF, borracha e chumbo. Dispositivos de absorção de solicitações sísmicas para edifícios históricos e pontes.

O Quadro 1 apresenta um resumo das situações identificadas como aplicações na área da Engenharia Civil, em resultado de um estudo suportado pelo governo japonês em colaboração com a NSF (National Science Foundation, Estados Unidos da América). A supressão de vibrações em estruturas de Engenharia Civil sujeitas a solicitações dinâmicas pode efectuar-se por controlo activo, semiactivo ou passivo. No modo de controlo activo, uma fonte de energia externa controla os actuadores de modo a que estes apliquem forças sobre componentes estruturais. No modo de controlo passivo, não é necessário o recurso a fontes de energia externas e as forças de actuação desenvolvem-se como resposta à deformação própria da estrutura. Os dispositivos de controlo semiactivo requerem consideravelmente menos energia para actuar sobre a estrutura do que os dispositivos activos. O controlo passivo de estruturas baseia-se na capacidade de amortecimento das LMF de modo a reduzir a amplitude da deformação plástica imposta aos componentes estruturais quando sujeitos a solicitações elevadas. As LMF podem ser utilizadas em infra-estruturas como sistemas de isolamento de base, ou em superestruturas como sistemas de dissipação de energia. Nos sistemas de isolamento de base, utilizam-se LMF para desacoplar uma estrutura do solo onde está assente, “filtrando” assim uma parte significativa das solicitações sísmicas. A dissipação de energia resulta da histerese presente nas curvas tensão-extensão das LMF

quer o seu estado inicial seja austenítico, quer seja martensítico. Nos dispositivos de isolamento de base as LMF deverão assegurar (i) rigidez variável da estrutura em função dos níveis de excitação, (ii) capacidade de dissipação de energia e (iii) capacidade de recentragem após descarga. Por isso, torna-se interessante para estes sistemas de isolamento de base a utilização do fenómeno da SE das LMF. Por outro lado, os sistemas de dissipação de energia baseiam-se essencialmente na capacidade de amortecimento das LMF, podendo essa capacidade de amortecimento ser assegurada pelo material tanto no estado austenítico (fenómeno de SE associado à transformação de austenite em martensite induzida por tensão) como martensítico (reorientação das variantes de martensite por deformação).

De um modo geral, os dispositivos baseados em LMF para controlo passivo utilizam a maior capacidade de amortecimento da martensite; no entanto, esta opção exige um posterior aquecimento do material para recuperação da geometria inicial (por EMF). Em contrapartida, embora se disponha de uma menor capacidade de amortecimento por parte do fenómeno da SE, esta está intrinsecamente associada a uma capacidade de recentragem da estrutura, sem que seja necessário fornecer qualquer tipo de energia ao sistema, o que viabiliza uma minimização da deformação residual após descarga.

2. CARACTERIZAÇÃO DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

A optimização das propriedades das LMF torna imprescindível um conhecimento detalhado das características de transformação destas ligas e da sua correlação com a composição química e os processos de tratamento (térmico, mecânico ou termomecânico).

Nesta comunicação serão apresentados resultados de

- (i) caracterização estrutural por difracção de raios X (DRX) in situ entre -180 e $+150^{\circ}\text{C}$ permitindo identificar as fases presentes em cada gama de temperaturas bem como o modo como as diferentes transformações têm lugar,
- (ii) caracterização térmica por calorimetria diferencial de varrimento (DSC, Differential Scanning Calorimetry) permitindo analisar a cinética das transformações sofridas na gama de -120 a $+150^{\circ}\text{C}$,
- (iii) caracterização eléctrica, permitindo identificar as variações de resistividade eléctrica associadas às diferentes transformações de fases,
- (iv) caracterização mecânica, com especial ênfase para o comportamento superelástico, permitindo determinar as tensões críticas de transformação durante a carga (transformação directa: austenite em martensite) ou durante a descarga (transformação inversa: martensite em austenite), a extensão da deformação recuperável e, conseqüentemente, a quantidade de energia específica absorvida por ciclo.

2.1 – Caracterização estrutural

A determinação das temperaturas de transformação das ligas Ni-Ti exige antes de mais o conhecimento detalhado dos domínios de temperaturas de estabilidade das diferentes formas estruturais. Tal pode ser efectuado com recurso à técnica de DRX a diferentes temperaturas (Fig. 3) utilizando uma câmara Anton Paar (de -180 e 450°C), montada sobre um goniómetro D5000 da Bruker e usando a radiação Cu K α produzida por um gerador de ânodo rotativo de 18 kW.

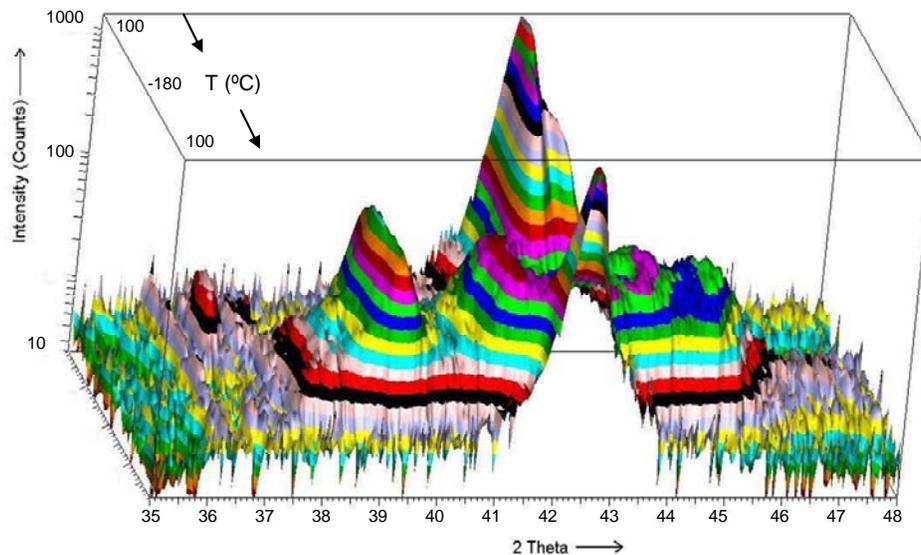


Figura 3 – Sequência de espectros de difracção de raios X obtidos para uma liga Ni-Ti rica em Ni, durante um ciclo térmico compreendendo um arrefecimento de +100 a -180°C (B2 \Rightarrow R, seguida de R \Rightarrow B19') e um aquecimento de -180 a +100°C (B19' \Rightarrow R, seguida de R \Rightarrow B2). Adaptado de [7].

2.2 – Caracterização térmica

Um dos aspectos principais na caracterização de LMF prende-se com a determinação dos domínios de temperaturas em que as diferentes transformações podem ocorrer.

As ligas do sistema Ni-Ti com possibilidade de apresentação do EMF e do comportamento superelástico situam-se numa faixa muito estreita de composições em torno de 50 at% Ni – 50 at% Ti. Neste sistema, estão presentes duas fases, uma de alta temperatura (austenite, estrutura B2, de simetria cúbica) e outra de baixa temperatura (martensite, estrutura B19', de simetria monoclinica). Para a liga com composição equiatómica, a temperatura de transformação de equilíbrio situa-se ligeiramente acima da temperatura ambiente (próximo de 60°C). Para as ligas com mais de 50 at% Ti (normalmente designadas por ricas em Ti), a temperatura de transformação pouco varia com a composição química, aumentando até

cerca de +100°C para cerca de 51 at% Ti. Em contrapartida, para as ligas com mais de 50 at% Ni (normalmente designadas por ricas em Ni), a temperatura de transformação varia muito abruptamente, diminuindo até cerca de -100°C para cerca de 51 at% Ni. A transformação austenite \leftrightarrow martensite pode ter lugar numa só etapa ou passando por uma etapa intermédia com formação de uma outra fase (fase-R, de simetria trigonal).

Quadro 2 – Designação das temperaturas de transformação.

Transformação	Arrefecimento		Aquecimento	
	Início	Final	Início	Final
Austenite \leftrightarrow Martensite	M_s	M_f	A_s	A_f
Austenite \leftrightarrow Fase-R	R_s	R_f	R'_s	R'_f

Estas transformações são delimitadas por temperaturas cuja designação está resumida no Quadro 2. A técnica mais frequentemente utilizada para a determinação dessas temperaturas é a calorimetria diferencial de varrimento, através da detecção das quantidades de calor absorvidas ou libertadas pelo material no decurso das transformações.

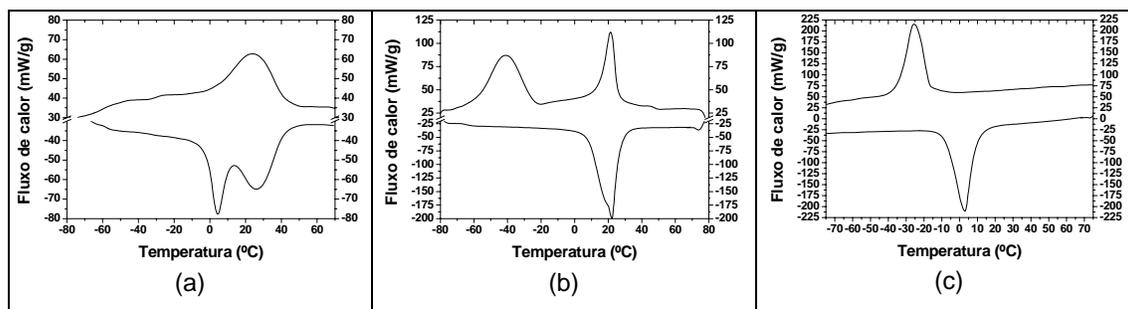


Figura 4 – Curvas DSC de um arame de liga Ni-Ti rica em Ni sujeito a diferentes tratamentos térmicos: (a) 350°C, (b) 500°C e (c) 600°C. (Adaptado de [7]).

Os ensaios DSC ilustrados na Fig. 4, efectuados num equipamento SETARAM DSC-92, com velocidades de aquecimento e arrefecimento de 7,5°C/min, permitem mostrar que as temperaturas de transformação para uma mesma liga (neste caso, uma liga Ni-Ti rica em Ni) podem ser significativamente afectadas em função da temperatura de tratamento térmico.

2.3 - Caracterização mecânica

O comportamento superelástico, em que existe capacidade de amortecimento, combinada com a recentragem das estruturas após descarga, revela-se particularmente interessante para muitas das aplicações. Na Fig. 5-a pode ver-se o resultado de ciclos de tracção carga/descarga realizados numa máquina Shimadzu AG-50 kN, à temperatura ambiente, sobre um arame (0,24 mm de diâmetro, 48 mm de comprimento útil) de uma liga Ni-Ti rica em Ni (austenítica à temperatura ambiente). Pode verificar-se que a capacidade de recuperação de deformação é de cerca de 8%. Esta deformação recuperável está associada

à transformação de austenite (fase estável à temperatura ambiente, na ausência de tensão aplicada) em martensite, sendo este mecanismo designado por SE. Por outro lado, o facto de a transformação (directa) da austenite em martensite induzida durante o carregamento apresentar uma histerese em relação à transformação (inversa) da martensite em austenite, permite que este material possa absorver energia durante ciclos consecutivos de carga/descarga, sendo a quantidade de energia absorvida dependente da geometria do provete (diâmetros de 0,240 e 0,406 mm) e da frequência desses ciclos (Fig. 5-b).

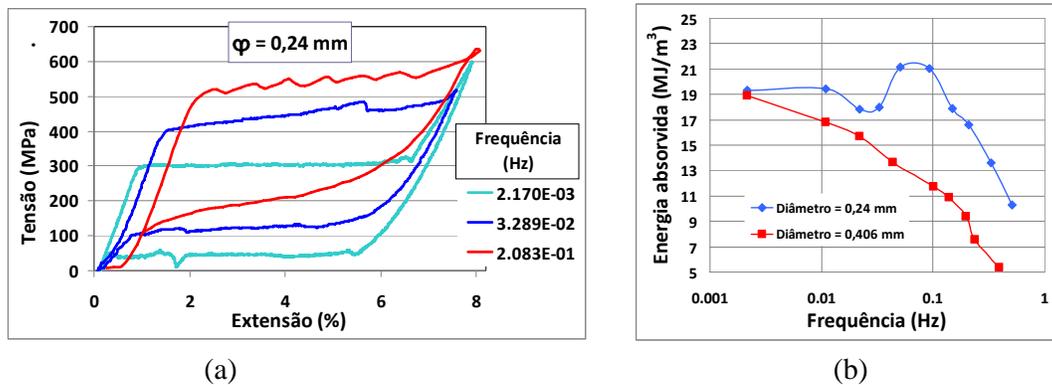


Figura 5 – (a) Ciclagem de um arame de 0,24 mm de diâmetro de uma liga Ni-Ti rica em Ni. (b) Energia absorvida por ciclo de carga/descarga em função da frequência para dois arames de 0,24 e 0,406 mm diâmetro de uma liga Ni-Ti rica em Ni (Adaptado de [7]).

2.4 – Resistividade eléctrica

As diferentes transformações de fases no sistema Ni-Ti estão associadas a variações de resistividade eléctrica. Para as transformações termicamente induzidas, observa-se, em arrefecimento, (Fig. 6): (i) um aumento da resistividade, para a transformação de B2 em R, (ii) uma diminuição de resistividade, para a transformação de B2 em B19', bem como para a de R em B19'. Para as correspondentes transformações em sentido inverso (durante o aquecimento), as variações de resistividade são também inversas das indicadas.

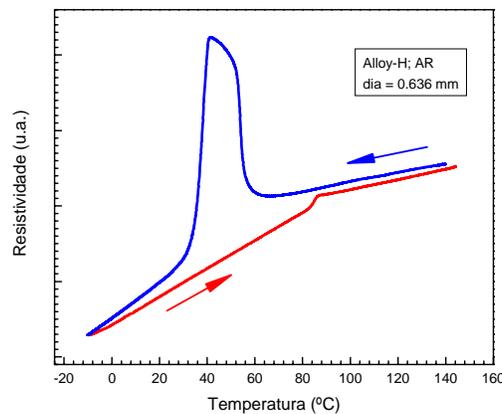


Figura 6 – Variação da resistividade em função da temperatura para uma liga Ni-Ti: durante o arrefecimento, a resistividade começa por aumentar (B2 \Rightarrow R) e depois diminui (R \Rightarrow B19'); durante o aquecimento, a resistividade aumenta (B19' \Rightarrow B2) [7].

Quando a transformação é induzida por deformação, observa-se uma variação da resistividade que se traduz por um aumento da resistividade eléctrica quando B2 se transforma em B19' (Fig. 7-a) e uma diminuição para a transformação inversa. Esta variação da resistividade em função da extensão é muito aproximadamente linear (Fig. 7-a,b) o que viabiliza a monitorização de grandes deformações (até cerca de 10% de extensão).

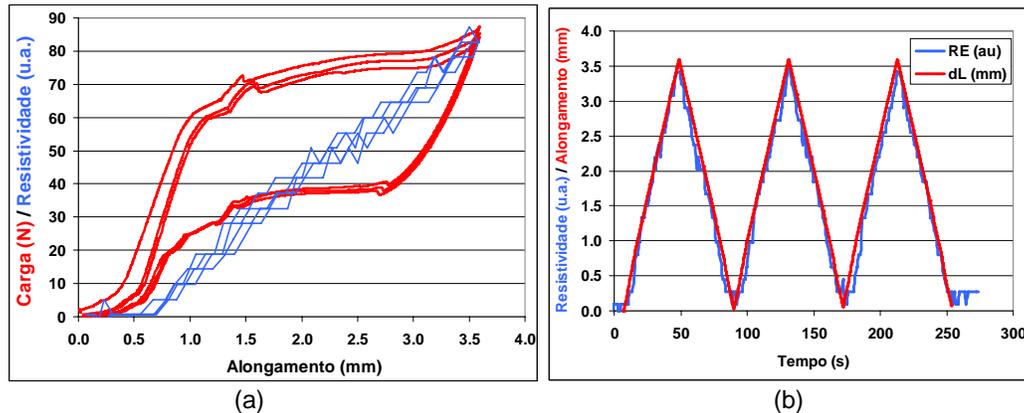


Figura 7 – Variação da resistividade eléctrica durante 3 ciclos consecutivos de carga-descarga para uma liga Ni-Ti rica em Ti: (a) sobreposição com curva tensão-extensão, (b) resistividade eléctrica e extensão em função do tempo. (Adaptado de [7]).

Quadro 3 – Frequências próprias obtidas para várias configurações. (Adaptado de [8]).

Contraventamento		Frequências próprias (Hz)			
		Sismo simulado			Média
		El Centro	Northridge	Kobe	
Estrutura livre	-	6,1	6,1	5,1	5,8
Arame de aço 0,410 mm diâm	Sem pré-esforço	6,8	6,3	4,9	6,0
	Com pré-esforço	10,0	10,0	5,1	8,4
Arame de Ni-Ti 0,406 mm diâm	Sem pré-esforço	6,8	7,1	5,1	6,3
	Com pré-esforço	12,0	12,0	12,0	12,0

2.5. Ensaios em Mesa Sísmica

Após a caracterização mecânica e térmica a que os vários materiais foram sujeitos, realizaram-se ensaios na mesa sísmica (Departamento de Engenharia Civil da FCT-UNL) com arames de aço (diâmetro 0,410 mm) e com uma liga Ni-Ti rica em Ni (diâmetro 0,406 mm). Estes ensaios basearam-se na aplicação deste tipo de arames numa estrutura previamente montada, na qual se dispôs os arames de Ni-Ti sob a forma de contraventamento diagonal. Foram testados três sismos de referência e de magnitude elevada: (i) El Centro, EUA, 1940, (ii) Kobe, Japão, 1995, (iii) Northridge, EUA, 1994. Para estas três diferentes solicitações, foi feita uma primeira análise para ver qual a resposta da estrutura no seu estado livre. Seguidamente, realizaram-se os ensaios para o arame de aço sem e com pré-esforço (cerca de

1% do comprimento total do arame) e para o arame de liga Ni-Ti de 0,406 mm de diâmetro, sem e com pré-esforço (cerca de 4% do comprimento total do contraventamento). Procedeu-se depois ao cálculo das frequências próprias da estrutura, para cada uma das configurações estruturais (Quadro 3). Nota-se que a presença de LMF sem pré-esforço em pouco altera a frequência fundamental da estrutura, não levando a aumentos significativos da (pseudo-) aceleração espectral, embora contribua de maneira significativa para o aumento do amortecimento estrutural.

3. CONCLUSÕES

As LMF representam uma classe de materiais com grandes potencialidades de aplicação em Engenharia Civil. A aplicação de ligas Ni-Ti como solução de contraventamento pode ser calibrada de modo a induzir um acréscimo de rigidez inferior àquele que é proporcionado pelos contraventamentos de aço. A capacidade recentradora destas ligas permite que, após cada solicitação dinâmica em que a extensão não exceda cerca de 8%, a estrutura esteja logo pronta para voltar a trabalhar com a sua capacidade inicial em caso de réplica. Tal não é possível com os contraventamentos de aço, que plastificam e necessitam de substituição imediata após a primeira solicitação dinâmica violenta. O êxito destas aplicações está, no entanto, fortemente dependente do conhecimento detalhado das propriedades destas ligas e do modo como podem ser alteradas em função das condições de processamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a (i) FCT/MCTES pelo financiamento plurianual do CENIMAT e do projecto “Smart Composites (PTDC/CTM/66380/2006), (ii) Corneliu Cismasiu (DEC, FCT-UNL) pelo acesso à mesa sísmica e apoio nos ensaios. KKM agradece bolsa CIÊNCIA 2007.

REFERÊNCIAS

- [1] Shaw J.A. – “A thermomechanical model for a 1-D shape memory alloy wire with propagating instabilities”. *Intern. J. of Solids and Structures*, 39 (2002) p. 1275-1305.
- [2] REBAP – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado – Porto Editora, 2006.
- [3] DesRoches R; Delemont M. – “Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys”, *Engineering Structures* 24 (2002) p. 325–32.
- [4] Lafortune P. et al. – “Testing of Superelastic Recentering Pre-Strained Braces for Seismic Resistant Design”, *Journal of Earthquake Engineering* 11 (2007) p. 383-399.
- [5] Tamai H.; Kitagawa Y. – “Pseudoelastic behaviour of shape memory alloy wire and its application to seismic resistance member for building”, *Computational Materials Science* 25 (2002) p. 218-227.
- [6] Otani, S. et al. – “Development of Smart Systems for Building Structures”, SPIE’s 7.th Annual Intern. Symp. on Smart Structures and Materials, California, March 2000, 8 p.

- [7] Braz Fernandes, F.M. et al. – Relatório de 2009 do projecto “Smart Composites” – PTDC/CTM/66380/2006. Lisboa, Janeiro de 2010.
- [8] Gaspar, C. – “Aplicação de Ligas Ni-Ti em Estruturas de Engenharia Civil”. Dissertação Mestrado Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade Católica Portuguesa, Rio de Mouro, Julho 2009.