



## CONTROLO *FUZZY* SEMI-ACTIVO PARA APARELHOS DE AMORTECIMENTO VARIÁVEL NA PROTECÇÃO SÍSMICA

**CRISTINA OLIVEIRA**

Prof. Adjunto

Escola Superior de Tecnologia do Barreiro

Instituto Politécnico de Setúbal

Portugal

### SUMÁRIO

No controlo estrutural, a lógica *fuzzy*, também denominada de lógica difusa, apresenta um potencial interessante no que respeita à mitigação das vibrações causadas por sismos.

No presente artigo expõem-se os conceitos onde este tipo de controlo assenta, bem como os vários passos constituintes da elaboração de um algoritmo *fuzzy*. É apresentado, descrito e testado um algoritmo simples usando controlo *fuzzy* para aplicação num aparelho semi-activo com amortecimento variável para controlo de estruturas sob a acção sísmica. Com base nos dados relativos aos deslocamentos e velocidades do sistema, as funções de pertença dos resultados estabelecem o valor do amortecimento a ser seleccionado para o aparelho. Os ensaios numéricos foram efectuados utilizando um acelerograma artificial representativo da Acção Sísmica Portuguesa num modelo de um grau de liberdade. Os resultados são depois comparados com protecção passiva tradicional usando um dissipador viscoso, permitindo tecer comparações entre os dois tipos de protecção.

### ABSTRACT

In the structural control, fuzzy logic, presents an interesting potential in terms of mitigating vibrations caused by earthquakes.

The present article exposes the concepts on which this type of control is based, as well as the various preparation steps of a fuzzy algorithm. A simple algorithm using fuzzy control for use in a semi-active device with variable damping to control structures under seismic action is presented, described and tested. Based on system's displacement and velocity, the membership functions of the results establish the damping value to be applied into the device. The numerical tests used an artificial accelerogram representative of the Portuguese Seismic Action in a model of a single degree of freedom. The results were then compared to the traditional passive protection using viscous dampers.

**PALAVRAS-CHAVE:** Controlo Estrutural; Lógica Fuzzy; Algoritmo de Controlo; Protecção Sísmica.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Sistemas de Protecção Sísmica

A actuação de acções dinâmicas em estruturas pode conduzir a níveis de vibração elevados e, conseqüentemente, danos estruturais importantes. Poderão existir situações, sem que a segurança estrutural esteja em perigo, mas com vibrações inaceitáveis do ponto de vista do conforto humano ou dos danos económicos que poderão existir. Modos de prevenir vibrações elevadas têm sido investigadas por todo o mundo.

A protecção estrutural para este tipo de acções poderá não ser conseguida (ou não ser desejável conseguir) pelo aumento da resistência ou rigidez dos seus elementos, devido a limitações próprias, quer por falta de capacidade resistente de fundações, custo associado ao aumento da resistência ou mesmo por razões estéticas. Adicionalmente, em determinadas situações como a acção sísmica, o aumento de rigidez poderá intensificar os efeitos das vibrações, ou seja, precisamente o que se pretendia prevenir. Além disso, deve-se referir que os métodos tradicionais de dimensionamento estrutural consideram a capacidade de deformação inelástica, admitindo danos importantes na estrutura. Esta questão poderá ser crítica em estruturas como hospitais, centrais de comunicações, edifícios históricos patrimoniais ou infraestruturas de transportes vitais, ou seja, estruturas ou percursos que devem permanecer operacionais durante e especialmente após a ocorrência de sismos de magnitude elevada. Nestes casos, a utilização de métodos alternativos de protecção sísmica poderá ser a solução adequada.

As técnicas utilizadas na protecção sísmica de estruturas não reforçam a estrutura, mas antes reduzem as forças absorvidas pela estrutura devido à acção actuante, reduzindo conseqüentemente a resposta estrutural. Estes sistemas têm sido aplicados tanto em construções novas como no reforço de estruturas antigas, particularmente, edifícios históricos que correspondam a importante herança patrimonial [1].

Estes sistemas são utilizados para resolução de problemas relacionados com acções dinâmicas potenciadoras de gerar danos, como acção do sismo, vento, tráfego pedestre, etc. Estes sistemas melhoram o comportamento estrutural dinâmico através da modificação das características dinâmicas da estrutura ou influenciando a forma como a acção é transmitida à estrutura. Os diferentes padrões de actuação resultam na classificação de diferentes tipos de protecção dinâmica.

Os sistemas de protecção sísmica podem ser designados como activos ou passivos dependendo da necessidade de energia para o seu funcionamento. O uso de aparelhos passivos como amortecedores viscosos não introduz energia no sistema, mas aumenta a capacidade de dissipação do sistema como um todo. Um aparelho passivo não tem a capacidade de se adaptar à acção actuante e uma vez instalado altera as propriedades dinâmicas da estrutura para qualquer que seja o tipo de acção. Por outro lado, os sistemas activos permitem ajustar a resposta da estrutura considerando a acção que está a actuar ou a sua intensidade. Além dos sistemas de protecção activos e passivos, existem ainda os sistemas híbridos e semi-activos.

A utilização de sistemas semi-activos, híbridos ou activos tem implícita a aplicação de algum nível de controlo estrutural com um algoritmo de decisão. O princípio básico dos sistemas de protecção de controlo é a previsão “online” da resposta dinâmica da estrutura. Uma unidade de controlo processa a informação obtida em sensores colocados em locais cuidadosamente seleccionados na estrutura e que permitam aferir os parâmetros necessários a satisfazer o critério de controlo.

Sistemas activos utilizam energia para produzir e aplicar forças na estrutura, de modo a corrigir comportamentos estruturais inadequados [2]. Isto envolve uma elevada quantidade de energia, o que, em casos de cortes de energia como o que os acontecem durante sismos de magnitudes elevadas, poderão comprometer todo o funcionamento do sistema. Os sistemas semi-activos utilizam a energia para modificar as características dinâmicas do aparelho, afectando subsequentemente toda a estrutura. A energia necessária é muito menor, garantindo estabilidade ao sistema [3]. Os sistemas híbridos combinam dois ou mais tipos de aparelhos diferentes, reunindo vantagens e eliminando inconvenientes dos aparelhos isolados.

## 1.2. Sistemas Semi-Activos

Os dispositivos de control semi-activo podem ser designados, de uma forma genérica, por aparelhos passivos controláveis. A abordagem com controlo semi-activo consiste na aplicação indirecta de forças de controlo variáveis cuja energia deriva directamente do movimento da estruturas e que é obtida pela mudança instantânea dos parâmetros e características dinâmicas de acordo com um critério de controlo pré-determinado [4]. Os actuadores de controlo não inserem energia mecânica directamente para a estrutura, tornando todo o sistema intrinsecamente estável do ponto de vista dinâmica [5].

Adicionalmente, sistemas semi-activos não necessitam de fontes de alimentação com capacidade elevada de energia como os sistemas activos. Na realidade, muitos dos aparelhos semi-activos funcionam através de baterias simples, com vantagens claras no caso da acção sísmica. Além disso, no caso raro de haver uma falha de energia, as componentes passivas oferecem ainda alguma protecção. Efectivamente, a utilização de aparelhos semi-activos em estruturas foi inicialmente considerada para protecção sísmica pelo aspecto da energia necessária. No entanto, este tipo de aparelhos tem revelado um bom desempenho para outras acções dinâmicas e têm sido aplicados em diferentes situações. Uma das outras vantagens, o facto de necessitarem de um espaço de instalação muito menor do que os sistemas activos [6].

O inconveniente mais relevante deste tipo de sistemas é que a capacidade do controlo encontra-se restringida pela parte mecânica do aparelho [7]. Os aparelhos semi-activos são tão fiáveis quanto os aparelhos passivos, possuindo, ao mesmo tempo, a vantagem de características paramétricas ajustáveis como um controlo activo. Com um algoritmo adequado, os resultados obtidos poderão ser iguais ou superiores àqueles obtidos através de controlo activo [3].

Existem fundamentalmente dois tipos de aparelhos semi-activos: os que utilizam um sistema mecânico para alterar o seu funcionamento e aqueles que possuem fluidos especiais com características controláveis. Exemplos do primeiro tipo incluem aparelhos de amortecimento variável ou de rigidez variável, onde uma válvula permite ajustar o amortecimento ou a rigidez do aparelho. Para o segundo tipo de aparelhos semi-activos mencionado, existem os aparelhos electro-reológicos ou magneto-reológicos. Nos quais a aplicação de um campo eléctrico ou magnético permite

modificar as propriedades mecânicas do fluido e, conseqüentemente, a força de controlo no aparelho.

### 1.3. Aparelhos Semi-Activos Viscosos

À semelhança dos dissipadores passivos viscosos, também aqui a energia de excitação é dissipada pelo calor gerado pelo movimento dos dois extremos, um relativamente ao outro. Este movimento é consequência da passagem forçada de um fluido viscoso por uma pequena abertura, devido ao deslocamento do êmbolo. Nos aparelhos semi-activos em que a resposta é alterada através de um sistema mecânico, o tamanho do orifício por onde o fluido passa é ajustado com base num algoritmo de controlo. O amortecimento correspondente é ajustado pela taxa de abertura da válvula de controlo do escoamento dentro do dissipador. O coeficiente de amortecimento é modificado de modo a reduzir apropriadamente a resposta da aceleração durante as perturbações fortes. Para pequenas perturbações o sistema funciona como um dissipador passivo viscoso.

Por outro lado, os dissipadores semi-activos de fluidos controláveis consistem em aparelhos que permitem a modificação reversível de um escoamento livre de um fluido viscoso, para um escoamento semi-sólido com uma resistência controlável. Isto acontece porque o fluido no interior do aparelho reúne certas características particulares, sendo constituído por micro-partículas não coloidais, polarizáveis magneticamente ou electricamente, dispersas em mineral ou óleo de silicone. Quando o fluido é exposto a um campo eléctrico ou magnético, a modificação dá-se em milissegundos [3]. São os denominados fluidos magneto-reológicos ou fluido electro-reológicos, conforme reagem a um campo magnético ou eléctrico, respectivamente.

Quando um campo magnético ou eléctrico é aplicado, são formadas cadeias de partículas, dando-se uma mudança repentina no comportamento reológico do fluido e este torna-se semi-sólido, exibindo comportamento visco-elástico [3]. A intensidade do campo magnético ou eléctrico pode ser controlada por um algoritmo adequado, produzindo as forças de amortecimento necessárias para melhorar o comportamento dinâmico do sistema.

Os fluidos magneto-reológicos têm apresentado vantagens relativamente aos fluidos electro-reológicos, como maior rapidez na resposta e capacidade de atingir valores mais elevados, tendo sido utilizados mais frequentemente. Além disso, têm provado ser muito rápidos na sua resposta e, por isso, particularmente adequados para as aplicações semi-activas da engenharia sísmica [5].

## 2. CONTROLO FUZZY

Num sistema semi-activo, existem um ou mais aparelhos ligados à estrutura capazes de modificar algumas das suas características próprias. Esta modificação é feita de acordo com um conjunto de regras, denominado algoritmo de controlo, como objectivo de melhorar a resposta estrutural. O algoritmo é responsável pela decisão da acção a realizar dependendo da informação obtida pelos sensores, pelo que a sua escolha e definição correcta é fundamental. Existem hoje em dia, diferentes algoritmos já propostos e estudados que poderão ter objectivos comuns: reduzir deslocamentos ou acelerações, controlar a energia de dissipação, etc.

Os algoritmos do tipo *Fuzzy* podem ser também utilizados para diferentes objectivos, devendo obedecer a um conjunto de regras. A Lógica *Fuzzy* foi identificada

originalmente por Lotfi Zadeh em [8] e é baseada na lógica humana utilizada durante a resolução de um problema. Os seres humanos possuem a habilidade de absorver e avaliar todo o tipo de informações sobre o mundo físico onde se encontram. Conseguem depois analisar mentalmente, resumir e condensar toda a informação para seleccionar um caminho óptimo de acção a tomar. Muita desta informação não se encontra detalhadamente caracterizada e grande parte do processamento da mesma também não é detalhadamente definida. O controlo *fuzzy* (denominado por vezes de lógica difusa) tenta imitar estes procedimentos. Existem ocorrências que não se conseguem classificar de forma precisa em “verdadeiro” ou “falso” (1 ou 0) e que correspondem a uma transição entre dois estados. A lógica difusa permite tratar esta informação e obter um resultado que seja depois aplicável na resolução de uma questão específica. A difusão da informação inicial é medida pelo grau da sua imprecisão.

Este tipo de lógica pode ser aplicada nos mais diversos campos como engenharia, economia, psicologia, marketing, previsão do tempo, biologia, política, etc. Trata-se de um controlo contínuo que não exige um modelo exacto do sistema, o que é a principal razão porque é tão largamente utilizado. Com uma metodologia do tipo difuso conseguem-se eliminar alguns passos demorados na fase de desenvolvimento, principalmente quando se pretende avaliar conceitos não quantificáveis. No entanto, poderá ter associado um tempo elevado de definição e afinação do algoritmo. Este tipo de controlo exige simulações e testes experimentais de modo a aferir a sua eficiência uma vez que é impossível identificar a solução óptima apenas por manipulação matemática.

A lógica *fuzzy* consiste na aplicação de regras que correlacionam dados com resultados de acordo com três passos básicos: fusificação, aplicação de regras e defusificação.

No passo correspondente à fusificação, a informação inicial é adquirida e transformada em informação difusa através de funções que definem os graus de pertença em cada uma das categorias. Os limites destas categorias não são precisos mas antes difusos, o que permite uma variação gradual evitando descontinuidades. A forma das funções de pertença pode tomar diferentes aspectos. A forma mais comum é triangular, mas trapezoides e curvas de 1º grau são também utilizadas. O número das curvas e sua localização são mais importantes que a sua forma. Triângulos estreitos permitem um controlo mais apertado, e são utilizados na zona central, enquanto triângulos mais alargados costumam estar nas extremidades. Três a sete curvas são geralmente adequadas para cobrir a gama de valores existentes nos dados de entrada [9].

Depois, são aplicadas as regras que definem o algoritmo difuso e que relacionam os graus de pertença dos dados de entrada com os graus de pertença dos resultados.

No processo de defusificação, os valores difusos dos resultados são convertidos em valores precisos e quantificáveis através de um método previamente escolhido, como o método do centróide ou dos pesos ponderados, entre outros [10].

### **3. DESCRIÇÃO DO MODELO**

Considerou-se um modelo simples de um sistema de um grau de liberdade, conforme definido na Figura 1, com massa  $m_s$ , rigidez  $k_s$ , amortecimento  $c_s$  e um aparelho semi-activo SA, sujeito à acção sísmica portuguesa.

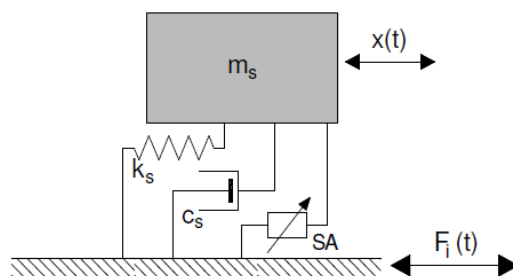


Figura 1 – Representação esquemática de um sistema de um grau de liberdade [11]

A formulação matemática geral para um sistema de um grau de liberdade com protecção dinâmica é:

$$m_s \ddot{x}(t) + c_s \dot{x}(t) + k_s x(t) + \Lambda(t) = F_i(t) \quad (1)$$

Em que,

$x(t)$  - Deslocamento relativo (e onde o ponto indica diferenciação relativamente ao tempo)

$m_s$  - Massa sistema estrutural

$c_s$  - Amortecimento do sistema estrutural

$k_s$  - Rigidez do sistema estrutural

$\Lambda(t)$  - Força introduzida no sistema estrutura pela protecção dinâmica

$F_i(t)$  - Acção exterior. No caso de um sismo  $F_i(t) = -m_s \ddot{x}_g$ , com  $\ddot{x}_g$  a representar a aceleração do solo

Uma vez que se pretende utilizar um aparelho semi-activo de amortecimento variável a força introduzida no sistema estrutural será dependente da velocidade e tomará a seguinte forma:

$$\Lambda(t) = c_{aparelho} \dot{x}(t) \quad (2)$$

Em que  $c_{aparelho}$  corresponde ao amortecimento variável do aparelho, constituindo a variável a controlar pelo algoritmo semi-activo.

Na Tabela 1 apresentam-se as características consideradas para o modelo testado.

Tabela 1 – Características do Modelo

Propriedade	Valor
Massa $m_s$	1 ton
Rigidez $k_s$	355,3 kN/m
Amortecimento $\zeta$	5%
Amortecimento $c_s$	1,885 kNs/m
Frequência	3Hz
Amortecimento do aparelho	Variável entre 0 e 20%

#### 4. CARACTERÍSTICAS DO ALGORITMO DE CONTROLO FUZZY

Neste artigo, o objectivo do controlo é minimizar os deslocamentos da massa do sistema através do controlo dos deslocamentos e velocidades. Considerando o sistema de um grau de liberdade descrito, o movimento da massa será oscilante entre

a sua posição de equilíbrio. A força elástica encontra-se continuamente a empurrar a força para a sua posição de equilíbrio. No entanto, a força de amortecimento tem por vezes o mesmo sinal da força elástica e outras vezes não. Isto significa que, por vezes, o próprio sistema regressa naturalmente à sua posição de equilíbrio enquanto outras vezes se afasta.

Foram definidas as funções de pertença para os dados de entrada e para os resultados, encontram-se as mesmas representadas nas Figuras 2 e 3. Relativamente aos dados de entrada, deslocamento e velocidade, foram definidos 5 níveis: negativo alto, negativo baixo, zero, positivo baixo e positivo alto. As funções de pertença para os resultados, que dizem respeito ao valor do amortecimento do aparelho semi-activo, consideram 4 níveis: zero, baixo, médio e alto.

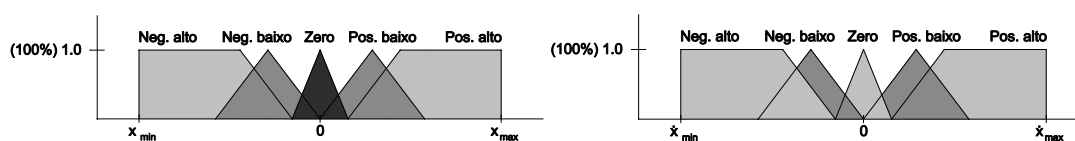


Figura 2 - Funções de pertença para os dados de entrada

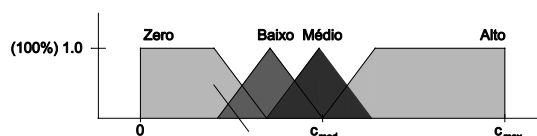


Figura 3 - Funções de pertença para os resultados

Os limites das várias funções de pertença foram considerados como descritos nas Tabelas 2 e 3. Os limites das zonas de pertença para os dados de entrada de Velocidade são idênticos aos indicados na Tabela 2, substituindo a referência ao deslocamento por velocidade.

Tabela 2 – Definição das zonas de pertença para os dados de entradas de Deslocamento

Propriedade	Valor	Altura h
Negativo alto	$x_{min}$	1
	$x_{min}/2$	1
	$x_{min}/6$	0
Negativo baixo	$3/5 * x_{min}$	0
	$3/10 * x_{min}$	1
	0	0
Zero	$x_{min}/6$	0
	0	1
	$x_{max}/6$	0
Positivo baixo	0	0
	$3/10 * x_{max}$	1
	$3/5 * x_{max}$	0
Negativo alto	$x_{max}/6$	0
	$x_{max}/2$	1
	$x_{max}$	1

Tabela 3 – Definição das zonas de pertença para os Resultados

Propriedade	Valor	Altura h
Zero	0	1
	$c_{max}/4$	1
	$3/8 * c_{max}$	0
Baixo	$c_{max}/4$	0
	$3/8 * c_{max}$	1
	$c_{max}/2$	0
Médio	$3/8 * c_{max}$	0
	$c_{max}/2$	1
	$5/8 * c_{max}$	0
Alto	$c_{max}/2$	0
	$5/8 * c_{max}$	1
	$c_{max}$	1

As regras do algoritmo têm em conta as questões descritas atrás e encontram-se expressas na Tabela 4, alterando o valor do amortecimento do aparelho semi-activo

para máximo quando o sistema se afasta do equilíbrio e para zero quando se aproxima, tirando partido da energia própria do sistema.

Tabela 4 – Regras do algoritmo *fuzzy*

Regra Geral:		Velocidade				
E		Negativo alto	Negativo baixo	Zero	Positivo baixo	Positivo alto
Deslocamento	Negativo alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
	Negativo baixo	Alto	Médio	Baixo	Médio	Alto
	Zero	Médio	Baixo	Zero	Baixo	Médio
	Positivo baixo	Alto	Médio	Baixo	Médio	Máximo
	Positivo alto	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

Os resultados serão obtidos pela combinação dos dados de entrada definidos na tabela em termos de percentagens.

Como exemplo, tenha-se em consideração que o sistema estaria a sofrer um deslocamento  $d_a$  e uma velocidade  $v_a$ . As percentagens associadas a cada uma das funções de pertinência são determinadas pelas alturas das intersecções entre as várias categorias, representado pelas alturas  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  e  $h_4$  na Figura 4.

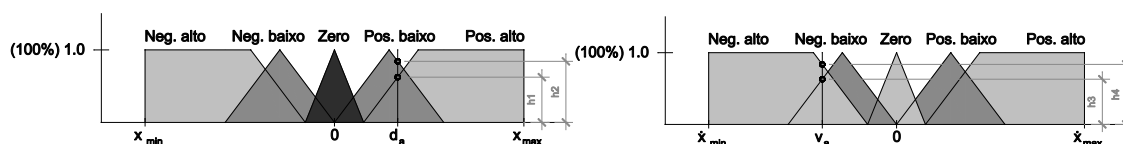
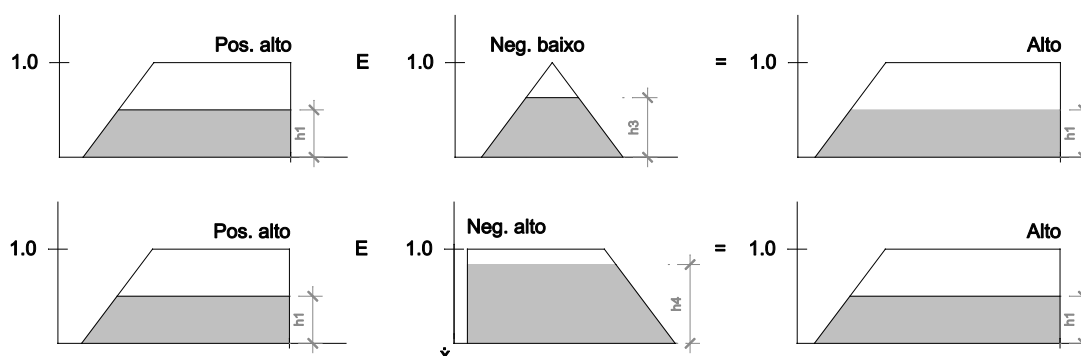


Figura 4 – Percentagens das Funções de pertinência

São então determinadas as percentagens das funções de pertinência para os resultados com base nas regras do algoritmo. Assim, o deslocamento  $d_a$  intersecta a categoria positivo alto com a percentagem  $h_1$  e a velocidade  $v_a$  intersecta a categoria negativo baixo com a percentagem  $h_3$ . Uma vez que todas as regras da tabela 1 foram estabelecidas com a operação “E”, é adoptado o critério mínimo. Pela tabela, *deslocamento positivo alto E velocidade negativo baixo* conduz a um valor de *amortecimento máximo*. Como  $h_1 < h_3$ , considera-se a percentagem  $h_1$  para o amortecimento máximo para esta combinação 1. As restantes combinações são determinadas de forma igual, sendo apresentadas na figura 5.





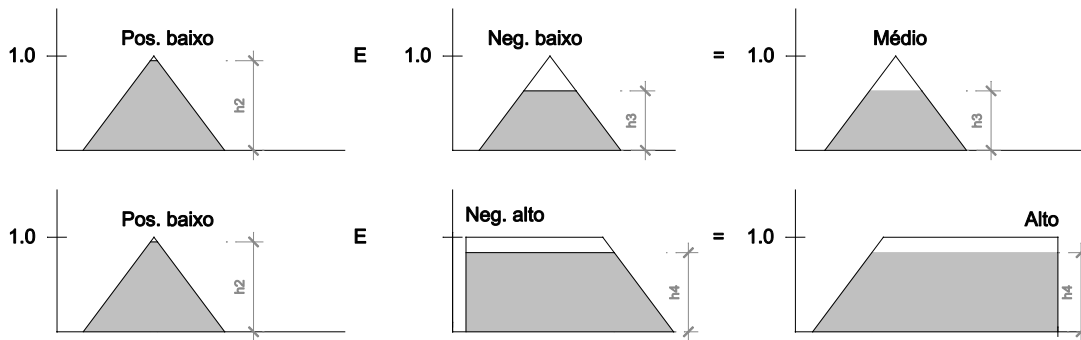


Figura 5 – Percentagens das funções de pertinência dos resultados

Considerando os quatro resultados obtidos, estes são sobrepostos e o ponto C é determinado através do Método do Centróide, obtendo-se desta forma o valor final para o amortecimento do aparelho, como está representado na Figura 6.

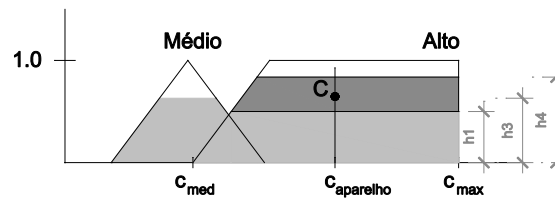


Figura 6 – Percentagens das funções de pertinência dos resultados

Como a lógica *fuzzy* não existe uma mudança súbita entre estados, mas antes uma variação do valor na função de pertinência. Quando perde valor numa função pertinência, ganha noutra.

## 5. ACÇÕES

Para ensaio do modelo considerou-se um acelerograma artificial representativo da acção sísmica tipo 1, terreno B, segundo o Eurocódigo 8 representada na Figura 7.

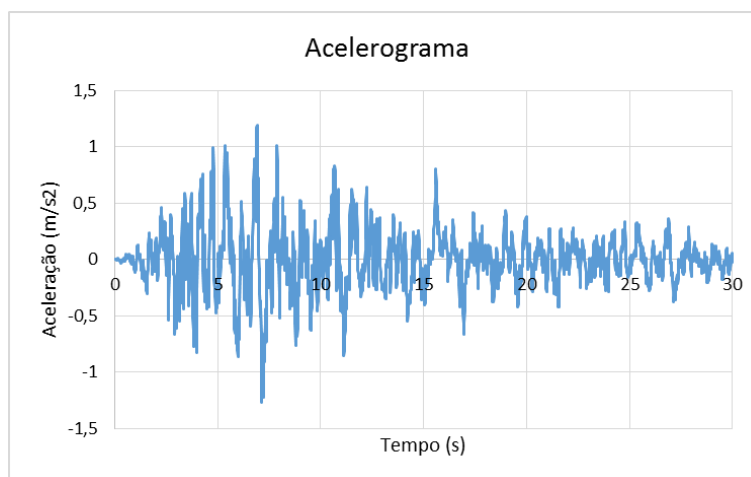


Figura 7 – Acelerograma artificial

## 6. RESULTADOS

Na definição dos valores precisos para os limites das funções de pertinência, considerou-se os resultados obtidos pela consideração de uma protecção passiva constituída por um dissipador passivo viscoso com um coeficiente de amortecimento de 20%. Desta forma, foi adoptado para o algoritmo fuzzy definido o valor absoluto máximo do deslocamento e velocidade e o amortecimento máximo correspondente a 20%.

Na Figura 8 comparam-se os resultados obtidos pelo modelo descrito sujeito à acção sísmica definida no ponto anterior em duas situações: sem qualquer protecção sísmica, considerando apenas o amortecimento próprio da estrutura, e com a protecção semi-activa de amortecimento variável seguindo o algoritmo fuzzy definido.

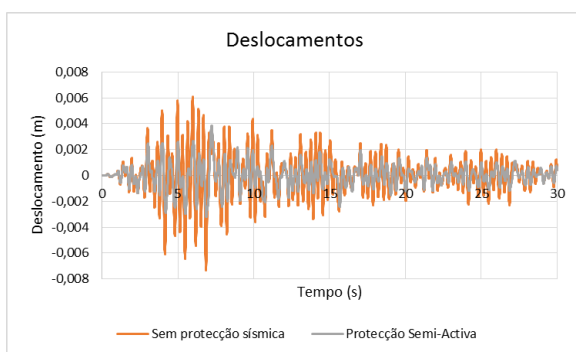


Figura 8 – Resposta de Deslocamentos

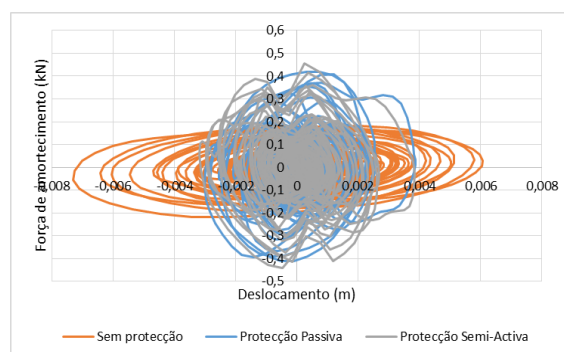


Figura 9 – Gráfico Força-Deslocamento

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados numéricos obtidos, constatando-se que o comportamento do sistema passivo e do sistema semi-activo é muito semelhante, existindo, no entanto, uma muito ligeira redução do deslocamento máximo neste último.

Tabela 5 – Resultados numéricos

Propriedade	Sem Protecção Sísmica	Com Protecção Passiva	Com Protecção Semi-Activa
$d_{min}$	-0,00731	-0,00302	-0,00320
$d_{max}$	0,00607	0,00386	0,00384
$v_{min}$	-0,11644	-0,04353	-0,04688
$v_{max}$	0,09546	0,04446	0,04851

A Figura 9 apresenta o gráfico força-deslocamento para as três situações consideradas (sem protecção sísmica, com protecção passiva e com protecção semi-activa) e a Figura 10 mostra a dissipação de energia dos dois tipos diferentes de protecção. A protecção semi-activa permite uma energia de dissipação ligeiramente superior apesar de utilizar valores de amortecimento inferiores à protecção passiva, como se pode observar na Figura 11, onde se apresenta a evolução do amortecimento  $c$  ao longo do tempo.

As diferenças para com a protecção passiva são muito reduzidas, mas existem e são positivas para um algoritmo extremamente simples, demonstrando que existe espaço para melhorias com outro tipo de regras ou limites para as funções de pertinência que sejam definidos de uma forma mais elaborada e recorrendo a técnicas de programação mais aprofundadas.

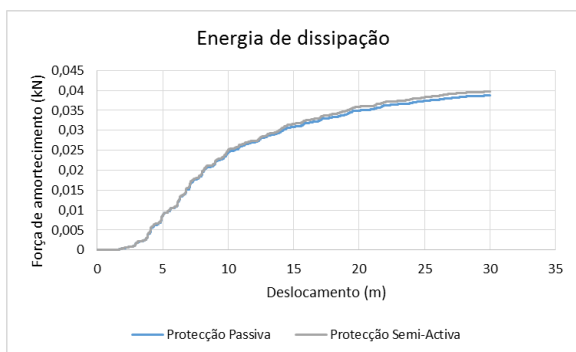


Figura 10 – Energia de Dissipação

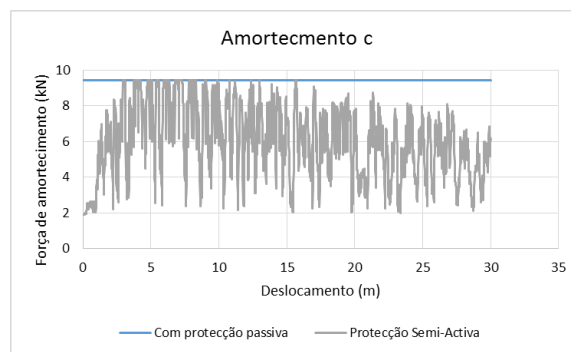


Figura 11 – Evolução do Amortecimento c

## 7. CONCLUSÕES

O controlo *fuzzy* tem sido largamente implementado nos mais diversos campos devido à sua eficiência, tendo ao mesmo tempo regras simples e directas. No controlo estrutural, a lógica *fuzzy*, também denominada de lógica difusa, apresenta um potencial interessante no que respeita à mitigação das vibrações causadas por sismos. A reacção de um sistema de controlo *fuzzy* consegue adaptar-se convenientemente à aleatoriedade elevada das acelerações sísmicas, de uma forma estável e adequada.

Um algoritmo simples usando controlo *fuzzy* foi desenvolvido para aplicação num aparelho semi-activo com amortecimento variável para controlo de estruturas sob a acção sísmica. As funções de pertinência dos dados de entrada foram seleccionadas utilizando controlo de deslocamentos e velocidades. As funções de pertinência dos resultados estabelecem o valor do amortecimento a ser seleccionado para o aparelho utilizando o método do centróide. Todas as funções de pertinência foram definidas através de funções triangulares ou trapezoidais.

O algoritmo proposto foi testado com simulações numéricas, utilizando um acelerograma artificial representativo da acção sísmica tipo 1, terreno B, segundo o Eurocódigo 8, num modelo de um grau de liberdade. Os resultados são depois comparados com protecção passiva tradicional usando um dissipador viscoso com um amortecimento de 20%.

O comportamento dos sistemas passivo e semi-activo é muito semelhante, com resultados bastante próximos. No entanto, a protecção semi-activa permite uma ligeira redução do deslocamento máximo com aumento da energia de dissipação, apesar de utilizar valores de amortecimento inferiores à protecção passiva.

Efectivamente, para este algoritmo, as diferenças entre a protecção semi-activa e a protecção passiva são reduzidas, mas existem e são positivas. O algoritmo apresentado é extremamente simples e básico, demonstrando-se que existe espaço para melhorias com outro tipo de regras ou limites para as funções de pertinência que sejam definidos de uma forma mais sofisticada, pelo que algoritmos deste tipo de controlo devem ser desenvolvidos, analisados e estudados para aplicação em estruturas.

A demonstração que foi feita considerou um sistema de um grau de liberdade, considerando-se que deve ser explorada a utilização deste tipo de algoritmo em sistemas de vários graus de liberdade.

## 8. REFERÊNCIAS

- [1] Martelli, A. (2006) – “Modern Seismic Protection Systems for Civil and Industrial Structures”, SAMCO, Final Report 2006, available online at <http://www.samco.org>.
- [2] Lametrie, Christine (2001) – “A Literary Review of Structural Control: Earthquake Forces”, Parsons Brinckerhoff Technical papers, available online at <http://www.pbworld.com>, USA.
- [3] Soong, T. T.; Spencer, B. F. (2000) - "Active, Semi-Active and Hybrid control of Structures", Proceedings of the 12th World Conference in Earthquake Engineering, paper no.2834, Canada
- [4] Palazzo, B., Petti, L. (2002) – “Optimal Semi-Active Control of Based Isolated Systems”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, paper no.788, London, United Kingdom
- [5] Serino, G.; Spizzuoco, M. (2002) – “About the Design of Passive and Semi-Active MR Dampers for Seismic Protection of Buildings”, 12th European Conference on Earthquake Engineering, paper no.709, London, United Kingdom
- [6] Symans, Michael D.; Constantinou, Michael C. (1999) – “Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the art review”, Engineering Structures, Volume 21, Issue 6, pp. 469-487, Elsevier, June 1999
- [7] Zhang, X.Z.; Cheng, F.Y.; Jiang, H.P. (2006) – “Hybrid actuator–damper–bracing control (HDABC) system with intelligent strategy and soil–structure interaction”, Engineering Structures, Volume 28, Issue 14, pp.2010–2022, Elsevier, December 2006
- [8] Zadeh, Lotfi A. (1972) – “A rationale for fuzzy control,” Journal of Dynamic Systems Measure Control, Volume 94, series G, pp.3-4, ASME
- [9] Aziz, Shahariz Bin Abdul (1996) – “Everything you've always wanted to know about designing Fuzzy Logic Machines but were afraid to ask”, Surprise 96 Journal, Volume 2, Imperial College, London
- [10] Casciati, Fabio; Magonette, Georges; Marazzi, Francesco (2006) – “Technology of Semiactive Devices and Application in Vibration Engineering”, ISBN: 0-470-02289-2, John Wiley & Sons, Ltd
- [11] Oliveira, Cristina (2009) – “Dynamic Behaviour Analysis of Bridges with Adaptive Protection Systems”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal