

COMPARAÇÃO DE REGULAMENTAÇÃO SOBRE AVALIAÇÃO E REFORÇO SÍSMICO DE EDIFÍCIOS ANTIGOS DE ALVENARIA

A.S. CASANOVA

Eng^a. Civil

TETRAPLANO

sofia.casanova@tetraplano.com

PORTUGAL

R. BENTO

Prof. Eng. Civil

IST - Lisboa

rbento@civil.ist.utl.pt

PORTUGAL

M. LOPES

Prof. Eng. Civil

IST - Lisboa

mlopes@civil.ist.utl.pt

PORTUGAL

SUMÁRIO

O objectivo deste artigo é apresentar uma comparação comentada dos enquadramentos normativos existentes a nível Nacional, Europeu e Americano relativamente a conceitos associados à avaliação e reforço sísmico de estruturas antigas de alvenaria e apresentar algumas conclusões e recomendações relativas à aplicação do EC8-3 em Portugal.

ABSTRACT

The objective of this paper is to present a comparison between the European and North American codes on seismic assessment and rehabilitation of old masonry buildings. Some conclusions of this study are drawn and some recommendations are proposed in order to contribute to the future Portuguese National Annex of Part 3 of Eurocode 8.

1. INTRODUÇÃO

A nível Nacional existe, neste momento, um vazio regulamentar no que respeita a intervenções em edifícios antigos, em especial para os edifícios de alvenaria e para a resistência sísmica destes. Por outro lado, dentro dos principais regulamentos existentes que abordam o tema destacam-se, a nível Europeu, o Eurocódigo 8 [1] que reserva a Parte 3 [2] para a “Avaliação e reforço de edifícios existentes” e a regulamentação Italiana, nomeadamente a norma OPCM 3274 de Maio de 2003 [3] e algumas alterações introduzidas nesta pela norma OPCM 3431 de Maio de 2005 [4]. Fora do panorama Europeu refere-se a regulamentação Americana que é composta por diversos documentos que se complementam e abrangem a temática associada.

O estudo apresentado foi elaborado com base numa tese de mestrado sobre o tema “Análise da regulamentação internacional sobre reabilitação e reforço sísmico de estruturas. Ênfase em edifícios antigos de alvenaria” [5] onde se procedeu à exposição dos documentos listados, de forma exaustiva para o EC8-3 e mais resumida para os restantes, e sobre a qual se efectuaram comparações e se retiraram as conclusões daí decorrentes que culminaram em algumas recomendações à aplicação do EC8-3 em Portugal.

Apresenta-se neste artigo um resumo alargado do trabalho efectuado.

2. SITUAÇÃO ACTUAL EM PORTUGAL

Actualmente em Portugal não existe uma regulamentação relativa à reabilitação sísmica de edifícios existentes. Nos últimos tempos têm sido elaborados alguns documentos de cariz técnico-científico vocacionados para edifícios com tipologias estruturais específicas, resultado de vários estudos efectuados e de experiências adquiridas no decorrer de intervenções em estruturas existentes. Estes documentos, no entanto, não fornecem uma perspectiva e uma metodologia global, abrangente e sistemática, que permita aos donos de obra e projectistas a elaboração de estudos e projectos de reabilitação sísmica de edifícios existentes de qualquer tipologia estrutural.

Como consequência imediata da ausência de regulamentação nesta área, qualquer pessoa ou entidade que pretenda “actuar” numa edificação antiga tem “carta branca” para proceder a alterações, ampliações, renovações e reabilitação arquitectónica sem ter a obrigação de proceder a uma avaliação da respectiva resistência sísmica nem de garantir um nível mínimo de segurança à acção sísmica.

Num futuro próximo será implementado em Portugal o Eurocódigo 8 - Parte 3 através da elaboração do respectivo Anexo Nacional correspondendo a uma importante inovação no nosso quadro regulamentar. A elaboração do Anexo Nacional será a oportunidade ideal para adequar um documento racional e generalista à realidade nacional, através da consideração das tipologias marcantes no território e do conhecimento adquirido ao longo do tempo sobre estas através de estudos efectuados, intervenções realizadas nestas tipologias e observações do seu comportamento após a ocorrência de sismos. Tal é exemplo das intervenções efectuadas em edifícios após os sismos nos Açores e as várias intervenções nos bairros antigos da cidade de Lisboa (Bairro Alto, Mouraria, Baixa Pombalina, Alfama etc.).

É por isso importante analisar o conteúdo do EC8-3 para evidenciar os pontos que deverão ser sujeitos a revisão para adaptar à realidade Portuguesa.

3. ABORDAGEM EUROPEIA

A nível europeu a abordagem do tema de avaliação e reabilitação sísmica de edifícios existentes encontra-se ainda em fase de desenvolvimento e de discussão técnica com os trabalhos de elaboração da Parte 3 do Eurocódigo 8 (EC8-3) e com o novo regulamento sísmico italiano que foi desenvolvido com base nas versões existentes dos Eurocódigos à data.

O Eurocódigo 8 (EC8) é a norma que se destina a ser utilizada no projecto estrutural das construções na União Europeia no que respeita ao projecto sismo-resistente e é composta e subdividida em 6 partes sendo a Parte 3 (EC8-3) a que foca a avaliação e reforço de edifícios à acção sísmica. Apresenta-se como um complemento à Parte 1, especificando os aspectos associados à temática de avaliação e reforço de edifícios de três tipologias estruturais

mais usuais e representativas do edificado existente, betão, aço em estruturas metálicas e alvenaria.

Em Itália, o novo regulamento sísmico corresponde à norma OPCM 3274 de Maio de 2003 com as revisões da norma OPCM 3431 de Maio de 2005, e define critérios de projecto para as construções em zonas sísmicas, com referência particular para o novo zonamento sísmico do território Italiano.

O novo regulamento italiano foi elaborado com o intuito de ser um documento de transição do regulamento anterior existente, datado de 1996, até à implementação do EC8 em Itália, incluindo todas as partes associadas. Como tal, foi elaborado tendo por base o EC8, na altura ainda em fase de aprovação para norma europeia, tendo sido adoptado a mesma organização e os mesmos conceitos, mas introduzindo algumas alterações que advieram da transposição de alguns pontos para a sua realidade nacional.

4. ABORDAGEM NORTE AMERICANA

Há vários países onde existem programas de reabilitação sísmica em curso, sendo o dos E.U.A. o mais avançado. A nível federal existem dois documentos legislativos importantes relacionados com a avaliação local do risco sísmico. São estes a Public Law 93-288 [6], alterada em 1988 pela Stafford Act [7] que estabelece as regras básicas para assistência e resolução de problemas em caso de desastre, e a Earthquake Hazards Reduction Act de 1977, alterada em 1990, [8] que estabelece o National Earthquake Hazards Reduction Program (NEHRP) [9].

Muita da documentação e do crescimento do conhecimento científico relacionado com os sismos tem sido desenvolvida através da NEHRP que financia as pesquisas através de um grupo de quatro agências Federal Emergency Management Agency (FEMA); U.S. Geological Survey (USGS); National Science Foundation (NSF); National Institute of Standards and Technology (NIST).

A nível local, por exemplo, a cidade de Los Angeles possui, desde 1981, um código municipal Earthquake Hazard Reduction in Existing Buildings, visando promover a segurança pública e o bem estar, através da redução do risco em edifícios de alvenaria não reforçada, construídos antes de 1934. A experiência daquela cidade tem demonstrado que aquele tipo de edifícios é propenso a colapso parcial ou total durante sismos moderados a fortes [10].

Dos vários documentos existentes no âmbito do Programa Nacional de Redução de Perigosidade Sísmica ressaltam-se o Standard ASCE/SEI 31-03 [11] que apresenta critérios e procedimentos para a avaliação sísmica de estruturas existentes, o Standard ASCE/SEI 41-06 [12] para a reabilitação dos edifícios existentes à acção sísmica e documento FEMA 547 [13] que apresenta uma compilação de técnicas de reabilitação sísmica incluindo pormenores, detalhes e indicações práticas bem como indicações sobre as técnicas adequadas para mitigar tipos específicos de anomalias em vários tipos de estruturas.

Para a fase de diagnóstico existem documentos que permitem a rápida avaliação do estado do edifício, tais como FEMA 154 [14] e 155 [15] – Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards; SEI/ASCE 11-99 [16] - Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings.

Outros documentos importantes são aqueles que ajudam na tomada de decisão relativamente à melhor intervenção a realizar em determinado edifício, FEMA 227 [17] e 228 [18] – A Benefit-Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Buildings Volume 1: A User's Manual; Volume 2 - Supporting Documentation; FEMA 156 [19] e 157 [20] – Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings Volume 1 - Summary; Volume 2: Supporting Documentation.

5. ANÁLISE COMPARATIVA

5.1 Critérios gerais

Procedeu-se a uma análise comparativa entre os documentos mencionados, EC8-3 e Regulamento Italiano e destes com a abordagem norte americana.

A comparação foi feita nas vertentes de organização dos documentos, das condições de aplicação dos documentos à prática corrente, da ligação destes com planos de mitigação de risco sísmico existentes ou em estudo, da

metodologia patente nos documentos para levar a cabo a avaliação e/ou a reabilitação sísmica bem como todos os passos e processos que a definem e por fim os dados que disponibilizam para a escolha de intervenção e soluções de intervenção adequadas para o projecto.

5.2 Organização

Desde logo a organização do EC8-3, devido às constantes referências a outros capítulos, a outras partes do EC8 e a outros Eurocódigos (EC6 por exemplo), torna-se confusa e de difícil aplicação prática.

Verifica-se que a abordagem norte americana é mais completa que a europeia como se pode constatar pela quantidade de publicações existentes que abrangem todas as fases da avaliação, reabilitação e reforço de edifícios existentes com a possibilidade de escolha do tipo de intervenção a relações custo-benefício adequadas.

Os documentos europeus têm correspondência com o documento norte americano Standard ASCE/SEI 41-06. Estes três documentos focam essencialmente um processo sistemático para a reabilitação sísmica e são organizados sensivelmente da mesma forma, capítulos para cada tipologia que complementam uma parte geral.

Na abordagem europeia a metodologia a aplicar na fase de avaliação é mais complexa e mais exigente implicando maiores custos a despende pelas entidades responsáveis pelo edifício do que a avaliação preconizada pela abordagem norte americana no Standard ASCE/SEI 31-03.

5.3 Aplicabilidade dos documentos

Em termos de aplicabilidade podem-se distinguir duas vertentes, nomeadamente, em que situações será necessário aplicar e como e onde se aplicará o documento.

Na primeira vertente reside a grande diferença entre os dois documentos europeus. O Regulamento Italiano dá directamente critérios de aplicação obrigatória enquanto o EC8-3 remete esta questão para os Anexos Nacionais.

Os documentos norte americanos não indicam explicitamente as situações que despoletam a aplicação, mas apresentam critérios que facilitam sua aplicação em programas de risco sísmico ou em regulamentos locais, estatais ou governamentais e fornecem informações quanto a actividades catalisadoras para cada tipo de programa.

No que respeita ao como e onde se aplicam, os documentos europeus são idênticos em praticamente todos os aspectos, excepto na abordagem de alvenarias de pedra que o EC8 não abrange explicitamente. O Regulamento Italiano ao apresentar tabelas com características mecânicas para este tipo de alvenaria está implicitamente a incluí-la.

Os documentos norte americanos não abordam as alvenarias de pedra, o que se compreende visto que não é um material de utilização representativa no território. A alvenaria mais utilizada é a de blocos cerâmicos.

A nível europeu não existe uma política comum nem um plano global de mitigação de risco sísmico. Ainda se encontra em desenvolvimento o documento de aplicação harmonizada em toda a comunidade, pelo que, actualmente, cada país é responsável pela garantia de conservação do seu património e pela aplicação de acções de reabilitação. Mesmo após a entrada em vigor do Eurocódigo 8 e da sua Parte 3 a obrigatoriedade de aplicação deste documento terá que ser definida pela elaboração de Anexos Nacionais.

Nos E.U.A. esta política de mitigação já se encontra bem desenvolvida e com um grande número de documentos associados. Este facto pode ser explicado em parte pelo maior período de retorno dos sismos na Europa e em particular em Portugal relativamente a certas zonas dos E.U.A., como por exemplo o estado da Califórnia. Sismos recentes naquela zona possibilitaram o conhecimento do comportamento das estruturas existentes e de técnicas de reabilitação anteriormente utilizadas, que facilitaram e potenciaram a elaboração do programa de mitigação e de todos os documentos associados. De notar que este programa está em contínua actualização, o que se pode observar pela quantidade de novos documentos que vão sendo desenvolvidos anualmente.

5.4 Metodologia

É apresentada, nos dois códigos europeus, a mesma metodologia para a realização da avaliação da segurança e para a reabilitação sísmica de edifícios existentes. É uma metodologia baseada no conceito de desempenho da

estrutura e composta por etapas bem definidas para a definição das características da estrutura e para a verificação estrutural. No Regulamento Italiano é permitida a isenção de avaliação pela classificação dos edifícios em edifícios simples de alvenaria e a realização de verificações simplificadas para zonas de sismicidade baixa (aceleração de pico de solo $a_g = 0,05g$). A Figura 1 apresenta esquematicamente a metodologia proposta no EC8-3.

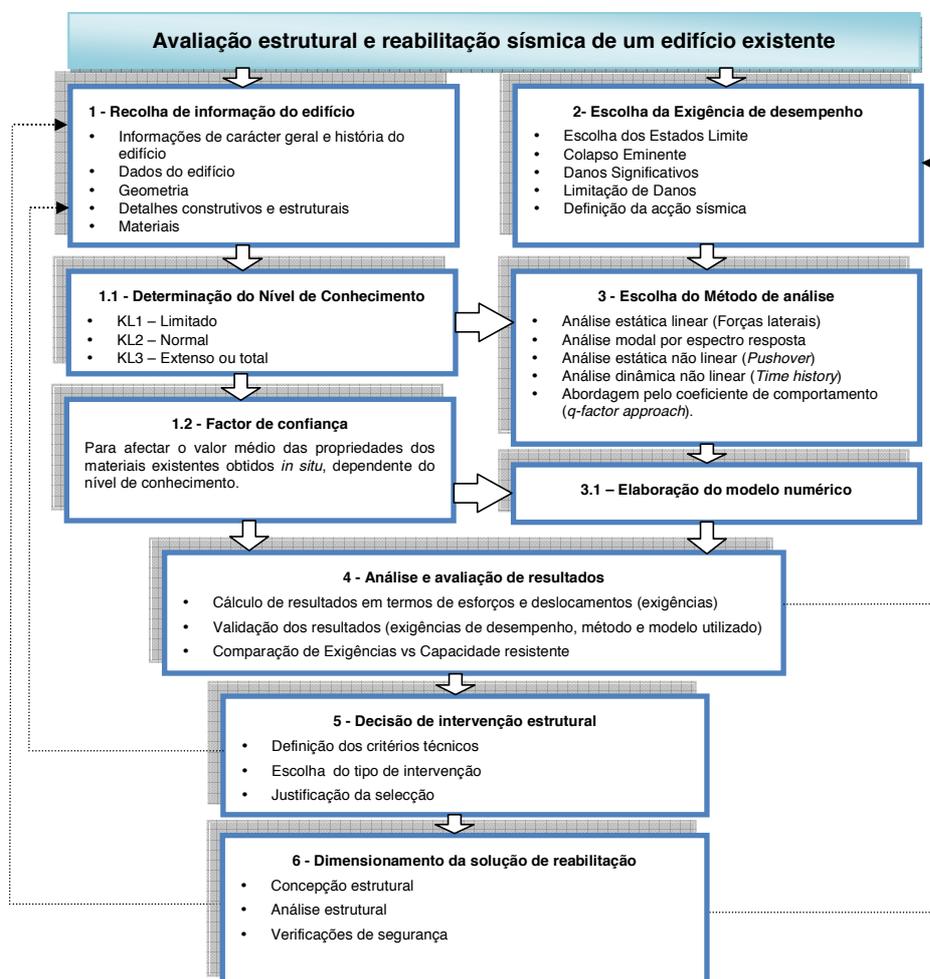


Figura 1: Metodologia para avaliação e reabilitação sísmica de edifícios existentes do EC8-3.

Na abordagem norte americana a avaliação pode ter diferentes níveis de exigência, variando do nível 1 ao nível 3. Com o aumento do nível aumentam as exigências em termos de recolha de informação e conhecimento das características estruturais, métodos de análise e modelos de cálculo, tempo dispendido e custos associados.

Na abordagem norte americana o processo de reabilitação pode ser sistemático ou simplificado e actualmente também incremental. O processo sistemático é similar à metodologia patente no EC8-3, mas permite a escolha mais alargada de objectivos de reabilitação. Como consequência, possibilita a realização de reabilitações com relações custo-benefício mais adequadas caso a caso. O simplificado corresponde à verificação dos níveis 1 e 2 equivalentes aos do processo de avaliação. Permite a elaboração de cálculos mais simples, se efectivamente necessários, e a verificação da segurança através de regras simples, patentes nas check lists do nível 1. O método simplificado tem correspondência no conceito de edifícios simples existente no Regulamento Italiano. A reabilitação incremental não tem paralelo nos documentos europeus.

Conclui-se assim que a abordagem norte americana é mais completa do que a europeia pois abrange todas as etapas de estudo de um edifício existente e dá as ferramentas necessárias aos projectistas para a escolha das melhores soluções em termos de relações custos-benefícios técnicas e económicas. Além disso, separa a fase de avaliação da fase de reabilitação, trazendo grandes vantagens e simplicidade de processos para quem pretende actuar.

5.5 Recolha de informação

No que respeita a recolha de informação, direccionada para edifícios com a tipologia de alvenaria, as diferenças entre o EC8-3 e o Regulamento Italiano são essencialmente decorrentes da diferente organização de cada um. Neste último a tipologia de alvenaria merece um sub-capítulo distinguindo-a das restantes (betão e estruturas metálicas), sendo uma mais-valia que permite adequar o processo de desenvolvimento de um projecto de reabilitação para a tipologia de alvenaria tendo em conta as características específicas deste material.

Os edifícios com tipologia de betão ou estrutura metálica, sendo estruturas reticuladas e compostas por materiais de características diferentes da alvenaria (em termos de comportamento pós-cedência), enquadram-se na forma de recolha de informação patente no EC8-3 que individualiza esta recolha por tipos de elementos (pilares, vigas, paredes). No caso da tipologia de alvenaria, onde existe uma preponderância de elementos estruturais de paredes resistentes, a organização dos dados apresentada pelo Regulamento Italiano para a definição do nível de conhecimento torna-se mais simples e mais adequada, basta caracterizar o material alvenaria não sendo necessário individualizar elementos.

Na determinação das características dos materiais a metodologia do Regulamento Italiano permite evitar a execução de testes desnecessários que além de terem um cariz destrutivo, desfavorável para a estrutura, tornam a recolha de informação num processo bastante mais oneroso. A possibilidade de recorrer a tabelas torna a determinação das características mecânicas numa tarefa bastante mais simples.

Os níveis de conhecimento são iguais em ambos os regulamentos bem como o valor dos factores de conhecimento associados a cada. A diferença reside nos critérios que definem cada nível de conhecimento, que são mais simples no Regulamento Italiano.

No documento norte-americano, a recolha de informação permite também a classificação de três níveis de conhecimento, mínimo, usual e abrangente. O valor do factor de conhecimento pode ser 0,75 ou 1,00, depende do objectivo de reabilitação e do nível de conhecimento e vai afectar, multiplicando, os valores das características mecânicas dos materiais no cálculo das capacidades. Verifica-se que os valores do documento norte-americano têm correspondência aproximada com os valores associados aos níveis KL1 e KL3 do EC8-3.

5.6 Objectivos de reabilitação

Nos regulamentos europeus e nas normas norte americanas as exigências de desempenho são definidas em termos de estados de danos associados a uma acção sísmica, definida pelo período de retorno. O objectivo da avaliação e da reabilitação é definido por combinações de exigências de desempenho.

Nos regulamentos europeus os estados de danos são definidos pelos Estados Limite (EL) para cada qual se apresenta uma breve descrição de danos nos elementos estruturais e não estruturais. As exigências de desempenho são em mesmo número que os EL, correspondendo a cada um uma acção sísmica com um dado período de retorno.

O EC8-3 define três EL de entre os quais o de Colapso Eminente que corresponde a um estado de danos mais próximo do colapso da estrutura existente que o EL Último utilizado no dimensionamento de edifícios novos. Na realidade, o EC8-3 está a ser mais exigente na avaliação e reabilitação de edifícios existentes do que para o dimensionamento de edifícios novos, o que é um contra-senso.

O Regulamento Italiano, para as estruturas existentes, define somente dois EL, escolhidos de entre os três disponíveis no EC8-3, mas considerando o EL de Danos Limitados associado a uma acção sísmica menos gravosa que o equivalente no EC8-3.

Os estados de danos nas normas norte americanas denominam-se por níveis de desempenho, são descritos de forma mais aprofundada e são em maior número, cinco para os elementos estruturais e quatro para os não estruturais. As exigências de desempenho do edifício são também em maior número, tantas quantas as combinações possíveis dos níveis de desempenho, embora nem todas façam sentido nem sejam razoáveis. As mais importantes são quatro. A acção sísmica pode ter quatro níveis e, associada aos quatro níveis de desempenho, define a matriz (4x4) de escolha dos alvos de reabilitação. A combinação destes alvos de reabilitação define finalmente o objectivo de reabilitação.

O Regulamento Italiano define logo o objectivo ao definir a acção sísmica e ao impor à partida os Estados Limite a verificar. No EC8-3 esta escolha é remetida para os Anexos Nacionais. Nas normas norte americanas a escolha de um objectivo de reabilitação depende daquilo que motiva a execução da reabilitação, isto é, se ela é voluntária ou obrigatória sendo a escolha efectuada de entre três grupos de objectivos, o básico (BSO), o melhorado e o limitado.

O objectivo básico (BSO) da norma norte americana corresponde à verificação simultânea de dois dos alvos da matriz referida (p e k). Por comparação a verificação dos dois Estados Limite no Regulamento Italiano corresponde à verificação dos alvos de reabilitação a e k , que são menos exigentes, enquanto no EC8 corresponde aos alvos p , k e f , que são mais exigentes. Conclui-se que, segundo a terminologia norte americana e em comparação com esta, o EC8-3 corresponde a uma reabilitação melhorada e o Regulamento Italiano corresponde a uma reabilitação menos exigente ou limitada.

5.7 Definição da acção sísmica

Em todos os regulamentos e documentos a acção sísmica é definida da mesma forma, através de espectros de resposta.

Para a avaliação e reabilitação sísmica de edifícios existentes os regulamentos europeus utilizam o espectro de resposta reduzido para ter em conta a não linearidade da resposta da estrutura à acção sísmica. No entanto, o EC8-3 quando particulariza e complementa os pressupostos de cálculo para a tipologia de alvenaria, não dá indicações para valores de coeficientes de comportamento a utilizar.

Na definição do espectro de resposta reduzido o Regulamento Italiano apresenta valores para o coeficiente de comportamento associado a edifícios existentes de alvenaria, que são iguais aos utilizados para edifícios novos da mesma tipologia. Estes valores são mais ambiciosos do que os equivalentes no EC8 para edifícios novos.

As normas norte americanas não admitem a redução da acção sísmica através da consideração de um espectro reduzido. Consideram a não linearidade da resposta actuando directamente nos resultados da análise (exigências) ou no cálculo das capacidades resistentes.

No que respeita ao nível da acção sísmica a considerar os documentos diferem. O EC8-3 não menciona a possibilidade de qualquer redução, o Regulamento Italiano permite reduzir o nível da acção sísmica na avaliação e reabilitação até um valor mínimo de 65% da utilizada em edifícios novos e os documentos norte americanos permitem a redução de 25% da acção somente para a fase de avaliação.

5.8 Modelação

Todos os documentos consideram que a estrutura pode ser modelada por modelos lineares ou não lineares e planos (2D) ou espaciais (3D) dependendo de critérios geométricos, da tipologia e da composição estrutural. Directamente associado à modelação da estrutura está o método de análise adequado para a realização da verificação dos elementos da mesma.

Em termos de modelação o Regulamento Italiano é mais completo relativamente ao EC8-3 pois dá indicações, mesmo que muito gerais, para edifícios mistos ou inseridos em grupo e para a classificação dos pisos como rígidos de forma mais prática. No EC8-3 as indicações que existem são as correspondentes à modelação de edifícios novos, sendo que para a tipologia de alvenaria somente refere que a rigidez pode ser, na ausência de uma avaliação rigorosa, considerada pela metade.

As relações força-deslocamento a considerar nos modelos não-lineares são iguais nos regulamentos europeus e não contemplam a degradação da rigidez devido ao comportamento cíclico da acção. Pelo contrário, a norma norte americana ASCE/SEI 41-06 além de considerar relações que têm em conta este efeito, apresenta também o efeito da rigidez residual, no caso de existir. Não indica, no entanto, uma forma simplificada de considerar a rigidez dos elementos de alvenaria em fase fendilhada. Refere que a modelação deve ter em conta os diafragmas, dando expressões concretas para o cálculo da rigidez destes.

5.9 Métodos de análise

Em todos os documentos são possíveis quatro métodos de análise global das estruturas, lineares estáticas ou dinâmicas e não lineares estáticas ou dinâmicas. Cada documento apresenta os critérios de aplicabilidade de cada método de análise iniciando nas mais simples que são as análises estáticas lineares e impondo condições eliminatórias que vão culminar nas análises dinâmicas não lineares para os casos que não verifiquem qualquer condição.

A escolha do modelo da estrutura e do método de análise está intrinsecamente ligada, sendo representado na Figura 2 o processo patente no EC8-3.

Verifica-se que são utilizados critérios indirectos que resultam num procedimento mais simples para aplicação prática que no processo norte americano onde a escolha é baseada nos valores das quantidades que influenciam na resposta estrutural (capacidades e exigências). Idealmente, segundo a norma (ASCE/SEI 41-06), para verificar a aplicabilidade dos modelos 2D o projectista tem executar pelo menos uma análise estática linear em modelo 3D, tendo em conta a deformabilidade dos pisos, o que vai contra a simplificação e se torna num contra-senso.

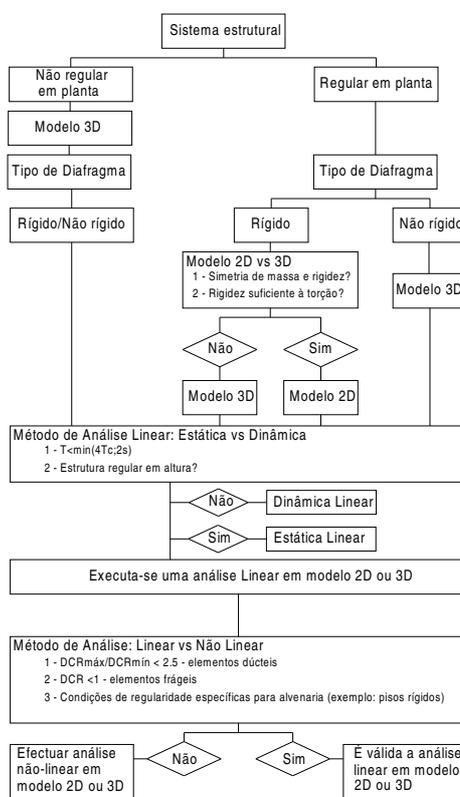


Figura 2: Processo de escolha do tipo de modelo e método de análise no EC8-3.

A utilização dos métodos de análise linear é limitada a estruturas que respeitem critérios de regularidade e condições de relação entre exigências e capacidades.

Verifica-se que as condições de relação entre exigências/capacidades de elementos dúcteis patente no EC8-3 e nos americanos (DCR's) não são adequadas a edifícios existentes de alvenaria por ser difícil fazer a distinção entre elementos dúcteis e frágeis.

O Regulamento Italiano, reconhecendo este facto, eliminou a classificação de elementos dúcteis/frágeis bem como a condição correspondente e impõe condições para aplicação das análises lineares a edifícios de alvenaria existentes somente de cariz geométrico ou descritivo. Isto implica numa simplificação substancial dos procedimentos para a verificação da segurança, já que as análises lineares apresentam uma boa fiabilidade e tornam-se numa verdadeira alternativa face às análises não-lineares.

As condições de regularidade específicas para os edifícios de alvenaria, patentes no EC8-3, são muito restritivas. Em especial, a condição de exigência de pisos rígidos inviabiliza na generalidade dos casos a utilização das análises lineares em edifícios existentes de alvenaria, que normalmente apresentam pisos de madeira, bastante flexíveis.

Apresenta-se no Quadro 1 um resumo dos critérios para aplicação das análises lineares, descritos em cada regulamento.

O conceito do coeficiente de comportamento para reduzir a acção sísmica só é utilizado nos regulamentos europeus. Nos E.U.A. este coeficiente afecta os resultados da análise e não a acção. No entanto esta diferença acaba por não ser importante e não afecta significativamente os resultados finais.

No EC8-3 a acção sísmica reduzida só está bem definida para o caso de edifícios existentes das tipologias de betão e de estruturas metálicas. No caso das alvenarias além de não serem dadas indicações sobre as verificações da segurança recorrendo a análises lineares com a acção sísmica reduzida também não são definidos os valores a adoptar para o coeficiente de comportamento adequado.

No Regulamento Italiano o coeficiente de comportamento, para as estruturas de alvenaria tanto novas como existentes, foi calibrado e redefinido para que os resultados obtidos com as análises lineares se aproximassem dos resultados obtidos pelas análises não lineares e pelos testes experimentais, garantindo sempre que não entrassem em contradição com o observado na prática e com as regras dos edifícios simples. De notar que os valores adoptados para os coeficientes de comportamento estão relacionados com soluções estruturais e detalhes construtivos típicos dos edifícios italianos [21]. Para outras soluções os valores terão que ser revistos e adaptados caso a caso.

Relativamente às análises estáticas não lineares, o método patente no EC8-3 e o Regulamento Italiano assume que a estrutura se comporta de forma elástica-perfeitamente plástica e não considera nem a degradação de rigidez nem o comportamento dinâmico e os efeitos da existência de pisos flexíveis. Os documentos norte americanos consideram estes factores no cálculo do deslocamento alvo e a degradação da rigidez na curva de capacidade.

No que respeita aos métodos de análise estrutural, o EC8 preconiza somente métodos para análise do comportamento global da estrutura enquanto nos restantes são permitidas análises locais recorrendo a métodos para mecanismos locais.

No Regulamento Italiano é considerado um método simplificado para grupos de edifícios que permite a análise do edifício em separado, individualizando-o como uma unidade estrutural dentro do grupo ou quarteirão, utilizando análises estáticas não-lineares. Se os pisos forem considerados rígidos a análise de cada piso pode ser feita em separado. No caso de pisos flexíveis a análise incide nas estruturas independentes de paredes isoladas ou complanares.

Tabela 1 - Resumo dos critérios para aplicação de análises estáticas lineares.

Regulamento	Critérios		
	Regularidade	Contribuição dos modos superiores	Outros
Eurocódigo 8	<p>Verifica os critérios de regularidade em altura, que são:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Continuidade em altura dos sistemas resistentes a carregamentos laterais; • Valores da rigidez lateral e massa de cada piso constantes ou a reduzir gradualmente em altura; • Para estruturas e pórtico, a relação entre a resistência real dos pisos e a calculada não deve variar desproporcionadamente de pisos para piso; • Os recuos existentes na estrutura verificam determinadas condições geométricas em termos de dimensão máxima e relativa; 	$T_1 \leq \begin{cases} 4T_C \\ 2,0s \end{cases}$ <p>com T_C definido de acordo com o gráfico do espectro resposta elástico (limite superior do período na zona correspondente a aceleração espectral constante).</p> <p>Esta condição limita o valor do período fundamental da estrutura na direcção em análise, correspondendo a um critério de limitação da contribuição dos modos superiores na resposta.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • $\rho_{max} / \rho_{min} < 2,5$ em que ρ_{max} e ρ_{min} são os valores máximos e mínimos de $\rho_i = D_i / C_i$, para todos os elementos dúcteis em que $\rho_i > 1$; • Capacidade > Exigências, em todos os elementos frágeis; • Os pisos são diafragmas rígidos; • Vigas entre paredes ligadas adequadamente ou com tirantes de ligação; • Cálculo da resposta da estrutura global só para verificação do estado limite de danos.
Regulamento Italiano	<p>Verifica os critérios de regularidade em altura, que são:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Todo sistema estrutural resistente se mantém ao longo da altura do edifício; • A massa e a rigidez mantêm-se constantes ou variam gradualmente, sem variações bruscas, da base ao topo do edifício; • Uma eventual diminuição da planta do edifício ocorre de modo gradual entre dois pisos sucessivos. 	$T_1 < 2,5T_C$ Sendo: <ul style="list-style-type: none"> • T_1 o período do primeiro modo de vibração na direcção em análise. Para edifícios com altura inferior a 40m pode ser calculado por $T_1 = C_1 H^{0,4}$; • H a altura do edifício, em metros, desde o nível das fundações; • $C_1 = 0,05$. 	
Documentos norte-americanos	<p>Verifica os critérios de regularidade necessários para a aplicação das análises lineares, acrescendo as seguintes condições:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relação entre a dimensão em planta em cada piso relativamente ao piso adjacente é inferior a 1,4; • O edifício não tem qualquer irregularidade de torção em cada piso; • O edifício não tem qualquer irregularidade de rigidez vertical; • O edifício tem um sistema ortogonal a conferir a resistência lateral. 	$T < 3,5T_S$ Sendo: <ul style="list-style-type: none"> • T o período fundamental da estrutura; • T_S equivalente ao T_C 	

O método de análise para mecanismos locais baseia-se em macro-elementos, que simulam mecanismos de colapso da estrutura, e aplica o princípio dos trabalhos virtuais para o cálculo da resistência sísmica em termos de um coeficiente multiplicativo das forças verticais que induz a perda de equilíbrio dos mecanismos simulados.

5.10 Verificação da segurança

A avaliação da segurança em todos os documentos é realizada através da comparação entre capacidades e exigências nos elementos estruturais, de forma a garantir as exigências de desempenho que se pretende para o edifício.

As exigências nos elementos estruturais correspondem aos resultados da análise efectuada ao modelo de cálculo para as acções consideradas.

No caso de análises lineares ambos os regulamentos europeus permitem uma redistribuição de esforços para permitir uma certa aproximação dos resultados aos da análise não linear e permitir contemplar a reserva de resistência das paredes. O Regulamento Italiano permite uma redistribuição mais generosa que o EC8-3, facto que se deve a resultados obtidos através do programa experimental em Itália.

O cálculo de capacidades é idêntica nos dois regulamentos, recorrendo a resistências ou a deslocamentos nas paredes e na estrutura global, dependendo do tipo de análise efectuada e do estado limite a verificar. No cálculo de resistências o Regulamento Italiano apresenta modelos de capacidade para as paredes ao corte, à flexão no plano (momento último) e fora do plano. O EC8-3 só calcula a resistência ao corte que pode ser comandada pela rotura ao corte ou à flexão.

O EC8-3, no que se refere aos edifícios existentes de alvenaria, não permite a realização de análises lineares “puras” (espectro de resposta elástico) para a verificação dos Estados Limite de colapso e de danos severos. O facto de ser omissivo relativamente à possibilidade de utilização de análises lineares com espectro de resposta de projecto acaba por limitar a aplicação de análises lineares para o Estado Limite de danos. Assim, dado que a avaliação da segurança de um edifício existente pressupõe à partida a garantia de um estado limite com danos elevados (de colapso ou danos severos), conclui-se que segundo o EC8 é sempre necessário realizar análises não lineares para edifícios existentes de alvenaria.

No Regulamento Italiano os critérios de verificação já estão calibrados para os elementos estruturais da tipologia de alvenaria. Permite análises lineares, que utilizam o espectro de resposta reduzido, para a verificação de todos os estados limite. Os coeficientes de comportamento também se encontram calibrados para as tipologias estruturais existentes. Além disso este regulamento propõe métodos para a verificação de mecanismos locais e para a análise de edifícios inseridos em grupos.

5.11 Escolha de intervenção

A escolha da intervenção baseia-se, em todos os regulamentos, nos resultados da avaliação previamente efectuada complementada com os resultados de um diagnóstico inicial.

Na abordagem europeia os pressupostos e critérios para o diagnóstico inicial não são definidos em nenhum dos documentos. Os tipos de intervenção são organizados de forma geral por categorias, similares em ambos os documentos europeus, que são desenvolvidas com maior ou menor extensão nos respectivos anexos. As listagens das técnicas de reabilitação apresentam aspectos de natureza mais qualitativa e descritiva, mas com poucos aspectos de natureza quantitativa, que permitam o cálculo e inclusão das soluções de reabilitação na análise estrutural. Pressupõe-se uma experiência prévia dos profissionais envolvidos na escolha do melhor tipo de intervenção a considerar e não é feita nenhuma relação entre as técnicas de reabilitação com as anomalias estruturais que o edifício apresenta.

No documento FEMA 547 a tarefa de intervenção é facilitada pois além de se individualizar as anomalias para a tipologia estrutural adequada ao edifício em estudo, existe a correspondência destas com as técnicas mais adequadas. O documento permite ao projectista ir directamente ao cerne da questão com a adjuvante de ter pormenores construtivos de cariz prático para as intervenções que ajudam o dimensionamento mais célere e eficaz.

6. RECOMENDAÇÕES

Das várias conclusões obtidas ressaltam e resumem-se aqui as mais importantes, seguidas das respectivas recomendações propostas.

Conclusão #1:

Mesmo com a entrada em vigor do EC8-3 em Portugal, continua a existir uma lacuna da regulamentação na parte da decisão de necessidade de avaliar o desempenho sísmico de edifícios existentes e no que respeita ao nível e tipo de reabilitação a levar a cabo, em edifícios de alvenaria, na sequência dos resultados da avaliação. Verifica-se que o Regulamento Italiano define, logo à partida, condições que levam à obrigatoriedade de realizar uma avaliação sísmica de um edifício existente, que pode ou não implicar num reforço ou reabilitação sísmica do mesmo.

Recomendação: Introdução no EC8-3 das condições apresentadas no Regulamento Italiano.

Conclusão #2:

No EC8-3 o processo de avaliação sísmica de uma estrutura existente tem o mesmo nível de exigência que o processo de reabilitação, tanto em termos de metodologia como em termos da definição da acção sísmica. Os documentos norte americanos, por outro lado, permitem uma avaliação de vários níveis de exigência que vão desde a simples observação da estrutura, passando por verificações sistemáticas parametrizadas (através de checklists) até à verificação da segurança com base em cálculos mais complexos. Verifica-se que o processo de avaliação patente no EC8-3 corresponde ao nível de avaliação mais exigente da norma norte americana, que esta recomenda somente para casos específicos, pois corresponde a procedimentos complexos e caros.

Para a fase de avaliação os documentos norte americanos (na norma ASCE/SEI 31-03) definem um valor 25% mais baixo para a intensidade da acção sísmica relativamente à utilizada na fase de reabilitação (norma ASCE/SEI 41-06), onde a acção é igual à considerada para o dimensionamento de edifícios novos. Ou seja, na abordagem norte americana a fase de avaliação é, em todos os aspectos, menos exigente do que a fase de reabilitação. Consideram que a partir do momento em que um edifício necessita de reforço ou de reabilitação sísmica, este deverá garantir os mesmos pressupostos que uma construção nova.

Recomendação: Introdução, no EC8-3, de um processo de avaliação simplificado e a consideração de um nível de acção sísmica mais reduzida para esta fase. Além disso, recomenda-se a clarificação da possibilidade de classificar os edifícios existentes como edifícios simples de alvenaria, tal como já é feito no caso de edifícios novos de alvenaria no EC8-1. Esta classificação permitirá fazer uma avaliação simplificada, visto que não é necessário proceder a cálculos específicos para a verificação da segurança sísmica do edifício, mas somente garantir critérios relacionados com a configuração geométrica da estrutura.

Conclusão #3:

Para a definição do objectivo da avaliação ou da reabilitação sísmica, o EC8-3 apresenta três Estados Limite (EL) de entre os quais se deve escolher, no Anexo Nacional, o número e o tipo a considerar na avaliação. Dos EL apresentados, o de Colapso Eminente corresponde a uma exigência de desempenho cujos danos se aproximam mais de um cenário de colapso da estrutura que os correspondentes ao Estado Limite Último apresentado na verificação de edifícios novos. O EL de danos limitados está associado a uma acção sísmica com um período de retorno de 225 anos, que é mais exigente que a acção sísmica considerada para o EL de limitação de danos utilizado para os edifícios novos, que tem um período de retorno de 95 anos.

Considera-se que não faz sentido ser mais exigente na avaliação e reabilitação sísmica de edifícios existentes que no dimensionamento de edifícios novos. Reconhecendo isto, o Regulamento Italiano não considera o EL de Colapso, para a reabilitação de edifícios existentes e ainda propõe uma acção sísmica com menor período de retorno para o EL de Limitação de Danos, definida com período de retorno de 72 anos. Além disso, este regulamento permite, na avaliação e reabilitação de edifícios existentes, uma redução até 35% do valor da acção sísmica igual à utilizada no dimensionamento dos edifícios novos.

Recomendação: Revisão das exigências de desempenho, em termos de Estados Limite, apresentadas no EC8-3, e a inclusão de uma maior gama de estados de danos associados a vários níveis de acção sísmica, para alargar o leque de escolha de objectivos de reabilitação para edifícios existentes, tal como se faz na abordagem norte americana. Além disto propõe-se a possibilidade de adoptar uma acção sísmica com um nível mais baixo que a utilizada para o dimensionamento de edifícios novos, tal como permitido no Regulamento Italiano.

Conclusão #4:

Em termos da metodologia apresentada no EC8-3, que é comum ao processo de avaliação e ao de reabilitação, continua a ser necessária a introdução de indicações de cariz mais prático no que respeita a métodos de cálculo, técnicas de reabilitação e características de materiais a utilizar como referência para a prática corrente. Só desta forma é possível a aplicação do regulamento por projectistas, com experiência limitada na área, em edifícios sem grande interesse histórico, sem que haja a necessidade de grandes campanhas de recolha de informação, que vão incrementar o custo e introduzir danos na estrutura através de testes destrutivos.

Por exemplo, o Regulamento Italiano permite o recurso a tabelas com características mecânicas dos materiais bem como a utilização de dados experimentais e informações obtidas de outros edifícios, o que simplifica bastante o processo de recolha de informação.

Considera-se que a metodologia do EC8-3 está mais vocacionada para edifícios existentes em betão armado ou em estrutura metálica. Relativamente aos edifícios em alvenaria existem algumas questões importantes que se levantam, relacionadas essencialmente com a recolha de informação e a posterior definição do nível de conhecimento, com os métodos de análise, em especial os lineares, e com as verificações da segurança.

Recomendação: Propõe-se que as metodologias para os edifícios de alvenaria e para os edifícios de betão armado e em estrutura metálica sejam apresentadas separadamente, adequando aos diferentes tipos estruturais os critérios para recolha de informação, de definição do nível de conhecimento e verificação da segurança para a alvenaria.

Conclusão #5:

Em termos de recolha de informação, a forma patente no EC8-3 é mais adequada às tipologias de betão e estruturas metálicas, pois individualiza a recolha por tipos de elementos (pilares, vigas, paredes, etc.). Para a tipologia de alvenaria, onde existe uma preponderância de elementos estruturais de paredes resistentes, a organização dos dados apresentada pelo Regulamento Italiano para a definição dos níveis de conhecimento torna-se mais simples e mais adequada, pois basta caracterizar o material alvenaria não sendo necessário individualizar elementos. Além disso, na determinação das características mecânicas da alvenaria o Regulamento Italiano permite evitar a execução de testes na estrutura.

Recomendação: Propõe-se adoptar a organização de dados e a metodologia para a recolha de informação e definição do nível de conhecimento do Regulamento Italiano. No seguimento disso, proceder à elaboração de tabelas com valores de referência de características mecânicas de materiais usualmente encontrados nos edifícios antigos, em especial os de alvenaria.

Conclusão #6:

Em termos de métodos de análise verifica-se que, se for aplicado o preconizado no EC8-3 para a generalidade dos edifícios existentes de alvenaria, é quase sempre necessário recorrer a análises não lineares para se fazer a verificação da segurança no âmbito de uma avaliação ou de uma reabilitação sísmica. Isto deve-se à existência de critérios bastante restritos para aplicação das análises lineares, de entre os quais a garantia de pisos rígidos é o mais condicionante.

Ora, se se considerar que os métodos lineares são os mais simples de aplicar e de maior utilização na prática corrente, conclui-se que o EC8-3 vem introduzir, neste aspecto, uma dificuldade acrescida a um processo que já tem um elevado grau de complexidade. Além disso, verifica-se que, para ser possível recorrer a análises não lineares, é necessário ter um nível de conhecimento da estrutura só conseguido com recurso a testes e inspecções mais detalhadas, o que vai incrementar os danos da estrutura e o custo da reabilitação estrutural.

Recomendação: Reformulação dos critérios de aplicação das análises lineares a edifícios existentes, possibilitando a utilização da acção sísmica de projecto para a tipologia de alvenaria, isto é reduzida através do coeficiente de comportamento. Consideração deste coeficiente como parâmetro de determinação nacional e definição, no Anexo Nacional, de valores para este coeficiente com base em campanhas experimentais para várias configurações estruturais da tipologia de alvenaria, tendo em conta os edifícios existentes em Portugal.

Conclusão #7:

No que respeita à verificação da segurança, no EC8-3 não é referida a necessidade de estudar o comportamento de um edifício inserido num quarteirão ou grupo de edifícios e nem são dadas indicações para o estudo de edifícios com tipologia estrutural mista (alvenaria e betão, alvenaria e madeira, etc.). Pelo contrário o Regulamento Italiano dá indicações a esse nível, embora de forma relativamente superficial.

Recomendação: Introduzir indicações para mecanismos locais, para edifícios inseridos em quarteirões e grupos de edifícios e para edifícios de tipologia mista, em termos de métodos de cálculo, modelação, verificação da segurança e técnicas de intervenção. Estas indicações deverão ser feitas mais aprofundadamente no Anexo Nacional, permitindo a actualização dos métodos e o acompanhamento da evolução do conhecimento científico.

Conclusão #8:

As técnicas de reabilitação e reforço sísmico no EC8-3 são listadas de uma forma qualitativa e não são dadas indicações que permitam escolher a intervenção que melhor se adequa às anomalias apresentadas pelo edifício. Os documentos americanos são mais completos nesta área pois definem edifícios tipo para os quais são associadas as anomalias mais correntes e as técnicas de intervenção mais adequadas para a sua mitigação. Para cada técnica são apresentados pormenores construtivos que facilitam a tarefa do projectista, que mesmo com pouca experiência no assunto consegue obter dados qualitativos e quantitativos que permitem a escolha e o dimensionamento das soluções de reforço e reabilitação.

Recomendação: Seguir a abordagem norte americana e incluir no Anexo Nacional do EC8-3 informação sobre técnicas de reabilitação. Realizar um levantamento das tipologias estruturais dos edifícios existentes em Portugal e criar uma classificação por edifícios modelo. Construir uma base de dados de anomalias correntes para cada tipo de edifício e relacioná-las com técnicas de intervenção adequadas a cada situação.

7. COMENTÁRIOS FINAIS

Com base nas comparações e conclusões retiradas da análise dos documentos existentes a nível europeu e internacional sobre o tema de avaliação e reabilitação sísmica de edifícios existentes, são propostas algumas recomendações que se podem inserir no desenvolvimento do Anexo Nacional do EC8-3 e no desenvolvimento de um plano de mitigação de risco sísmico em Portugal. Certas recomendações focam forçosamente alterações a efectuar ao próprio EC8-3, por saírem fora do âmbito de aplicação do Anexo Nacional.

Concluiu-se que existem pontos em que a abordagem norte-americana apresenta metodologias que podem ser seguidas ou adaptadas na Europa e em Portugal e outros em que os estudos efectuados ou ainda em curso em Itália podem ser adoptados na melhoria da versão actual do EC8-3 e na aplicação deste a cada país.

Relativamente ao EC8-3 verifica-se que há um caminho ainda grande a percorrer até se obter um documento que regule a intervenção em edifícios existentes, que seja de aplicação prática e que permita a donos de obra e projectistas a elaboração de projectos “possíveis” de executar com relações de custo-benefício adequadas. Só dessa forma se poderá potenciar a reabilitação e garantir condições de segurança adequadas do nosso património edificado para a actuação da acção sísmica.

8. REFERÊNCIAS

- [1] CEN, “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, Ref. N° EN 1998-1:2003 E, 2004.
- [2] CEN, “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Strengthening and repair of buildings”, EN 1998-3, 2005
- [3] OPCM n. 3274, “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sísmica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sísmica”, Suppl. ord. n.72 alla G.U. n. 105 del 8/5/2003, e successive modifiche ed integrazioni, 2003.
- [4] OPCM. n. 3431. “Ulteriori modifiche ed integrazioni all'Ordinanza n.3274 del 20/3/2003, recante ‘Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sísmica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sísmica’ ” Suppl. ord. n.85 alla G.U. n.107 del 10/5/2005, 2005.
- [5] Casanova, A.S. et al, “Análise da regulamentação internacional sobre reabilitação e reforço sísmico de estruturas. Ênfase em edifícios antigos de alvenaria.”, Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Estruturas, 2009, 190 p.
- [6] “Disaster Relief Act”, Public Law 93-288, Approved May 22, 1974 (88 Stat. 143), USA
- [7] “Robert T. Stafford Disaster Relief and Emergency Assistance Act”, Public Law 100-707, signed into law November 23, 1988.
- [8] “Earthquake Hazards Reduction Act of 1977”, Public Law 95-124, 42 U.S.C. 7701 et. seq, Amended 2004.
- [9] “National Earthquake Hazards Reduction Program Reauthorization Act of 2004”, Public Law 108-360, 2004
- [10] Cóias e Silva, V., “Viabilidade Técnica de Execução do Programa Nacional de Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado”, Redução da Vulnerabilidade Sísmica do Edificado, SPES e GECORPA, 2001.
- [11] ASCE/SEI 31-03, “Seismic Evaluation of Existing Buildings”, American Society of Civil Engineers, 2003, U.S.A..
- [12] ASCE/SEI 41-06, “Seismic Rehabilitation of Existing Buildings”, American Society of Civil Engineers, 2007, U.S.A..
- [13] FEMA 547, “Techniques for the Seismic Rehabilitation of Existing Building”, Federal Emergency Management Agency, 2006, U.S.A..
- [14] FEMA 154, “Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook, Second Edition”, Federal Emergency Management Agency, 2002, U.S.A..
- [15] FEMA 155, “Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation, Second Edition”, Federal Emergency Management Agency, 2002, U.S.A..
- [16] SEI/ASCE 11-99, “Guideline for Structural Condition Assessment of Existing Buildings”, American Society of Civil Engineers, 2000, U.S.A..
- [17] FEMA 227, “A Benefit-Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Volume 1: A user's manual”, Federal Emergency Management Agency, 1992, U.S.A..
- [18] FEMA 228, “A Benefit-Cost Model for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Volume 2: Supporting

documentation”, Federal Emergency Management Agency, 1992, U.S.A..

- [19] FEMA 156, “Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Volume 1: Summary. Second Edition”, Federal Emergency Management Agency, 1994, U.S.A..
- [20] FEMA 157, “Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Volume 2: Supporting Documentation. Second Edition”, Federal Emergency Management Agency, 1994, U.S.A..
- [21] Morandi, P. “Inconsistencies in codified procedure for seismic design of masonry buildings”, MSc Dissertation, 2006, Rose School, University of Pavia, Italy, 132 p.



ANA SOFIA CASANOVA
Eng^a Civil
TETRAPLANO
LISBOA



RITA BENTO
Professor Associada
IST – UTL / ICIST
LISBOA



MÁRIO LOPES
Professor Auxiliar
IST – UTL / ICIST
LISBOA

