

Diferenciação de níveis de resposta de estruturas de betão armado a eventos naturais extremos

Nuno Marques de Almeida

IST, Lisboa, Portugal, nunomarquesalmeida@tecnico.ulisboa.pt

Maria João Falcão Silva

LNEC, Lisboa, Portugal, mjoaofalcao@lnec.pt

Filipa Salvado

LNEC, Lisboa, Portugal, asalvado@lnec.pt

Resumo

A frequência de ocorrência de eventos naturais extremos tem vindo a aumentar nos últimos anos, bem como os impactes em termos de vidas humanas e de prejuízos em ativos construídos que suportam o funcionamento da sociedade e o desenvolvimento económico e social sustentável. Perspetiva-se que a ocorrência de eventos naturais extremos, bem como os seus impactes, continuarão a aumentar devido às mudanças climáticas e ao aumento da exposição e vulnerabilidade provocada pela urbanização de crescimento intenso. Esta situação tem implicações da maior importância e relevância em termos de consideração da resiliência das estruturas no longo prazo.

Neste contexto, o Regulamento dos Produtos da Construção (RPC) prevê que os ativos construídos devam, no seu todo e nas partes constituintes, estar aptos, em qualquer momento e perante qualquer solicitação, para o uso a que se destinam devendo satisfazer, em condições normais de manutenção, sete requisitos básicos durante um período de vida útil economicamente razoável, designadamente: i) resistência mecânica e estabilidade; ii) segurança contra incêndio; iii) higiene, saúde e ambiente; iv) segurança e acessibilidade na utilização; v) proteção contra o ruído; vi) economia de energia e isolamento térmico; vii) utilização sustentável dos recursos naturais. Evidencia-se assim a grande importância de, tendo em conta a grande diversidade de ativos construídos em momentos diferentes e com diferentes níveis de exigência, diferenciar a real capacidade dos mesmos em função destas exigências.

O presente artigo visa assim apresentar uma metodologia que permite diferenciar os níveis de resposta de estruturas de betão armado em termos do primeiro requisito do RPC (resistência mecânica e estabilidade) aquando da ocorrência de eventos naturais extremos, designadamente ações climáticas e ações sísmicas.

Palavras-chave: Resistência mecânica e estabilidade; Resiliência; Estruturas de betão armado; Eventos naturais extremos

1. INTRODUÇÃO

Os riscos induzidos pela natureza, e pelo ser humano, estão sempre presentes na construção e exploração de estruturas de engenharia. O ambiente construído está permanentemente vulnerável a determinadas ações que são, em muitas circunstâncias, fisicamente impossíveis de erradicar por completo, sendo, como tal, necessário focar-se na redução e mitigação das suas consequências. Neste sentido, a resiliência das estruturas de engenharia deve ser determinada para que as suas fragilidades sejam determinadas e melhoradas, para que assim se torne possível garantir a sua segurança, funcionalidade, operacionalidade e durabilidade [1]. Na perspetiva de engenharia civil, a resiliência de estruturas pode ser definida como a capacidade de manter ou restaurar a sua funcionalidade após a ocorrência de um evento extremo e inesperado dentro de um intervalo de tempo determinado [2].

As ações estruturais podem ser definidas como o conjunto de forças (cargas) aplicadas em estruturas ou o conjunto de deformações ou acelerações impostas que induzem efeitos no subsistema estrutural ou nas suas partes [2]. A parametrização destas ações estruturais, no âmbito da engenharia de estruturas, distingue as ações permanentes (G), as ações variáveis (Q), as ações de sismos (AE), as ações acidentais (A), as ações provenientes de fontes de vibração, as ações provenientes de fontes de impacto, as ações provenientes de acessórios instalados e, ainda, outro tipo de ações.

O presente artigo apresenta uma metodologia que permite a diferenciação de estruturas no que respeita ao grau de cumprimento do primeiro requisito do RPC (resistência mecânica e estabilidade), com enfoque nas combinações de ações relevantes e na resposta estrutural expectável perante essas ações, nomeadamente aquando da ocorrência de eventos naturais extremos que geram ações climáticas e ações sísmicas importantes.

2. ENQUADRAMENTO CONCEPTUAL

No campo da engenharia civil o termo resiliência foi introduzido por volta de 2000, quando as Nações unidas aprovaram a Estratégia Internacional para a Redução de Desastres (International Strategy for Disaster Reduction – ISDR) com o intuito de promover o aumento de resiliência das comunidades face a desastres naturais [1]. Os métodos para a avaliação da resiliência, de carácter quantitativo ou qualitativo, apresentam um grau muito reduzido de normalização o que pode dar origem a orientações pouco claras, objetivas e concisas [3]. A resiliência em estruturas de engenharia tem apresentado importância e popularidade crescentes nas últimas décadas. Identificam-se diversos fatores que podem explicar esta evolução: i) as ações naturais extremas ou as ações extremas induzidas pelo Homem tem vindo gradualmente a aumentar em frequência, intensidade o que, por si só já acarreta consequências muito devastadoras; ii) a população e as infraestruturas são cada vez em maior número o que significa que a exposição ao risco se vai tornando cada vez maior; iii) os progressos e evolução mais recentes observadas ao nível da sustentabilidade no setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) tem vindo a fomentar a investigação e inovação em muitas questões e procedimentos; iv) aumento da perceção da dependência que as comunidades tem das suas infraestruturas habitacionais, comerciais e industriais, bem como do impacto que estas poderão ter no dia-a-dia do utentes e na própria comunidade como um todo, no que se refere a questões de índole económica, social e ambiental (ISO 20).

Considerando que a frequência e as perdas económicas associadas a ações resultantes de eventos naturais extremos apresentam uma tendência ascendente, sendo prejudiciais à segurança do ser humano e da propriedade e ao desenvolvimento económico e social. As ações resultantes de riscos climáticos globais continuarão a aumentar devido às mudanças climáticas e ao aumento da exposição e vulnerabilidade trazida pela urbanização e que podem ter impacto muito significativo em estruturas de engenharia civil. Essas ações têm implicações importantes por considerar o padrão de resiliência de estruturas a longo prazo. Alguns países e organizações tem vindo a propor iniciativas e planos de ação para abordar as ações naturais extremas que podem ter implicações para a resiliência de estruturas de engenharia civil [4]. Uma dessas iniciativas passa por implementar estratégias de sistemas de atestação da resposta estrutural, quer em condições de utilização normal quer em caso de eventos extremos, tendo em vista assegurar a satisfação dos requisitos das partes interessadas e providenciar informação relevante sobre os reais níveis de desempenho dos ativos construídos. Esta informação, em Portugal, praticamente nunca é disponibilizada, nomeadamente nas transações correntes de imóveis para fins residenciais, apesar de se saber que a capacidade de resposta estrutural do parque edificado é muito diferenciada [5].

Em relação ao primeiro requisito básico estabelecido pelo Regulamento (UE) n.º 305/2011 do Parlamento Europeu e do Conselho, ou seja, resistência mecânica e estabilidade, as necessidades dos utilizadores finais podem ser formuladas por declarações genéricas que contenham aspetos relevantes avaliados pelos utilizadores finais em termos de desempenho estrutural ou pelo uso de atributos qualitativos a serem considerados por estruturas de edifícios. Essas afirmações podem ser formuladas, por exemplo, da seguinte forma [5-6]: i) segurança de estruturas, proteção de pessoas e bens, confiabilidade nas transações comerciais (Decreto-Lei nº 301/2007, Legislação portuguesa); ii) proteção de vidas humanas, limitação de perdas económicas e manutenção de importantes instalações de proteção civil (Eurocódigo 8); iii) segurança dos ocupantes das habitações (ISO 15928-1); iv) aceitação, por parte dos ocupantes, da funcionalidade e estética da habitação e seus componentes, das atividades dos restantes ocupantes, do funcionamento dos equipamentos na habitação, do conforto proporcionado e do valor real do imóvel (ISO 15928-2); v) aceitação, por parte dos ocupantes, do nível de segurança e de funcionalidade estrutural da habitação ao longo da vida útil considerada (ISO 15928-3); vi) proteger a vida dos ocupantes, evitando lesões aos ocupantes, salvaguardando a propriedade [7]; vii) proteção da vida humana, salvaguardando a propriedade, mantendo as funcionalidades e todos os objetivos esperados do edifício [8].

A segurança estrutural e a capacidade de resposta dos edifícios construídos contra desastres naturais extremos pode ser avaliada através de métricas baseadas no desempenho e com informação do risco que expressam de forma quantitativa tanto os agentes que atuam e / ou afetam qualitativamente o comportamento técnico do edifício (parâmetros que descrevem o desempenho técnico), como a incerteza associada ao alcance do desempenho e / ou comportamento (parâmetros que descrevem o risco técnico inerente). Uma lista completa de parâmetros que podem ser utilizados para descrever o desempenho estrutural e uma explicação detalhada dos princípios subjacentes à sua escolha é apresentada noutros estudos relacionados (Falcão Silva et. Al, 2020), que poderão ser consultados em complemento às considerações sobre a avaliação da segurança estrutural dos edifícios que se apresentam seguidamente.

3. AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL

O princípio para descrever a segurança estrutural consiste na determinação dos agentes que podem de alguma forma alterar a segurança estrutural dos edifícios. Na prática, esta descrição consiste na determinação e parametrização das ações estruturais e da resistência estrutural sob o efeito dessas ações (ISO 15928-1). A parametrização proposta assenta nas orientações da norma ISO 15928-1, no caso dos *parâmetros para a descrição do desempenho técnico* (a), e nas considerações de outras fontes normativas que também reúnem elevado grau de consenso (ISO 2103; ISO 4354; ISO 3010; ISO 4355; ISO 22111; ISO 2394; EN 1990; EN 1991; EN 1997; EN 1998), no caso dos *parâmetros para a descrição do risco técnico inerente* (b).

Considerando a ação do vento e as métricas para avaliar a segurança estrutural do edifício, a parametrização deve ser: i) Valor representativo da velocidade do vento (ou da pressão dinâmica do vento); ii) Probabilidade anual de ocorrência (ou período de retorno médio); iii) Coeficiente de segurança parcial γ_Q ; iv) Fator multiplicativo K. A velocidade do vento pode ser utilizada como parâmetro representativo das ações devidas ao vento. A pressão dinâmica do vento é outra forma de representação desta ação. A opção de parametrização mais adequada dependerá dos métodos de consideração das circunstâncias locais que forem estabelecidos nos regulamentos técnicos de cada país (ISO 15928-1). Detalhes relativos à conversão entre os diferentes tipos de velocidade do vento, e à conversão das diferentes velocidades em forças, podem ser encontrados na norma internacional ISO 4354 e nos Eurocódigos Estruturais (EN 1991-1-4).

Relativamente à ação da neve, as métricas devem ser i) Valores representativos da acumulação da neve (dados meteorológicos ou valor característico da carga da neve ao nível do solo); ii) Probabilidade anual de ocorrência (ou período de retorno médio); iii) Coeficiente de segurança parcial γ_Q ; iv) Fator multiplicativo K. A descrição da ação da neve pode ser feita por recurso a valores representativos de um conjunto de parâmetros normalizados (ISO 15928-1; ISO 4355), os quais podem ser modificados em função das condições locais.

Para ações sísmicas as métricas para avaliar a segurança estrutural do edifício, a parametrização deve ser: i) Parâmetros representativos da atividade sísmica (aceleração efetiva de pico do terreno e espectro de resposta de aceleração ou outros); ii) Probabilidades de ocorrência (ou períodos de retorno médio); iii) Coeficiente de importância γ_I ; iv) Fator multiplicativo K. Os regulamentos técnicos de cada país descrevem as ações sísmicas (A_E) de diferentes formas, embora existam já várias normas internacionais que visam a harmonização dessa descrição (ISO 15928-1; ISO 3010).

O valor representativo da atividade sísmica deve basear-se em condições locais tais como a sismicidade da região ou as características locais do terreno e no comportamento de resposta da estrutura, entre outros aspetos mencionados nas normas e regulamentos aplicáveis ou noutra documentação de referência [9]. As propriedades dinâmicas da estrutura são da responsabilidade do projetista (ISO 15928-1), pelo que se excluem da parametrização apresentada.

Relativamente a combinações de ações a parametrização devesa contemplar: i) Conjunto de situações de combinação de ações (persistentes ou transitórias e de acidente); ii) Valores de cálculo das ações em situação de combinação; iii) Conjunto de situações de carregamento. Deve-se descrever devidamente a combinação de todas as ações e descrever os parâmetros representativos dos valores de cálculo para ações que apresentem probabilidade de ocorrência simultânea. O tipo de parâmetros

representativos depende do método de conceção adotado (estados limites ou tensões admissíveis). As normas internacionais ISO 22111 e ISO 2394 fornecem orientações para aquelas descrições, designadamente para o caso dos estados limites últimos (relacionados com a segurança estrutural).

Finalmente no que concerne a resistência estrutural refira-se que a métrica deverá compreender: i) Valor característico da resistência dos materiais; ii) Métodos de ensaios para determinação dos valores característicos da resistência dos materiais; iii) Coeficiente de segurança parcial γ_R iv) Fator multiplicativo K. A resistência estrutural pode ser definida, de forma lata, como a capacidade de uma secção transversal ou de um elemento estrutural suportar ações sem falhar mecanicamente (ISO 22111).

A resistência estrutural, assim definida, pode ser descrita em termos da resistência de materiais cujas propriedades sejam reconhecidas pela disciplina da engenharia (ISO 15928-1). A estratégia de parametrização apresentada desconsidera a descrição em termos de materiais sem propriedades reconhecidas. A parametrização da resistência estrutural (fatores de redução da resistência, o valor característico utilizado para definir a resistência dos materiais e ainda os métodos de ensaio adotados na determinação destes valores característicos) baseia-se no critério de conceção dos estados limites e nas considerações das normas ISO 15928-1, ISO 22111 e ISO 2394

Para descrição do risco técnico inerente nos casos das ações naturais que podem ser avaliadas estatisticamente, tais como as devidas a vento, neve e sismos, a descrição da segurança estrutural inclui ainda parâmetros representativos da casualidade dos eventos subjacentes às ações (probabilidades de ocorrência ou períodos de retorno), a partir dos quais derivam os valores a atribuir aos parâmetros para a descrição do desempenho técnico em serviço. No caso da resistência estrutural (R), a descrição da segurança estrutural também se pode basear em parâmetros estratégicos para sistematizar e facilitar a definição da fiabilidade estrutural (coeficientes de segurança parciais ou fatores de multiplicação) (ISO 15928-1). Os métodos de ensaio adotados também podem influenciar a fiabilidade estrutural.

Uma escala de classificação (Tabela 1) pode e deve ser utilizada para medir e comparar os níveis de desempenho estrutural de edifícios novos e existentes. Estas considerações consubstanciam a base para um esquema de avaliação e certificação da conformidade do edifício que inclui mecanismos de diferenciação do “nível da qualidade estrutural” do edifício, à semelhança do que sucede nos certificados de eficiência energética dos edifícios. Essas escalas possibilitam, de acordo com a ISO 11863 [10]: i) comunicação com linguagem simples que pode ser facilmente compreendida pelo lado da “procura” sem a necessidade de fazer julgamentos técnicos; ii) avaliação da conformidade do lado da “oferta” durante a fase de projeto do edifício; iii) definição do nível de esforço e recursos necessários para controlar os desvios durante as fases de projeto, construção e uso.

Tabela 3. Princípios de calibração para escalas de classificação (adaptado da ISO 11863)

Edifícios novos		Edifícios existentes	
Classe	Regras gerais de calibração	Escala	Regras gerais de calibração
A+	Excepcionalmente exigente	9	Excepcionalmente exigente ou não aplicável
A	Claramente acima da média, mas não excepcionalmente exigente	[7,9[Claramente acima da média, mas não excepcionalmente exigente
B	Média típica ou normal	[5,7[Média típica ou normal
C	Inaceitável em qualquer circunstância	[3,5[Claramente abaixo da média, mas aceitável em circunstâncias justificadas
D	Inaceitável em qualquer circunstância	[1,3[Excepcionalmente abaixo da média, mas aceitável em circunstâncias excepcionais e justificadas
N/A	Não aplicável	0	Inaceitável, sem requisito ou não aplicável

Para edifícios novos, as escalas de classificação devem ser calibradas com um limite inferior vinculado aos requisitos mínimos obrigatórios regulamentares (classe B). Abaixo desse limite, os utilizadores finais estão expostos a níveis de risco considerados inaceitáveis (para edifícios novos). Pode ser conveniente estabelecer um limite superior (por exemplo, classe A) quando for aconselhável tornar público que é impossível atingir o nível mais alto possível de desempenho técnico. Deve ser possível programar diferentes níveis de desempenho. Cada classe deve estar associada a valores dados para as variáveis de engenharia listadas anteriormente para segurança estrutural que se relacionam com o atributo do edifício (por exemplo, classe A para segurança estrutural se relaciona com edifícios que suportam cargas de vento iguais àsquelas geradas com um período de retorno maior que o mínimo legal, por exemplo, 2500 anos) [11].

4. COMENTÁRIOS SOBRE A DIFERENCIAÇÃO DA COMBINAÇÃO DE AÇÕES E RESPOSTA

4.1 Combinação de ações

A modelação das ações compreende um conjunto de valores de cálculo utilizados para verificar a fiabilidade estrutural de determinados estados limites, perante a influência simultânea de diferentes ações (ISO 15928-1; ISO 15928-2; ISO 2394 – 9.5). Deve-se garantir que a combinação adotada reflete uma atuação conjunta de ações verosímil, traduz realisticamente as condições dos estados limites em questão e produz os efeitos mais desfavoráveis no subsistema estrutural (ISO 22111 – 9; ISO 2394 – 9.5). Várias são as normas internacionais (ISO 22111; ISO 15928-1; ISO 15928-2; ISO 2394) e europeias (EN 1990) que apresentam regras e métodos para estabelecer e descrever combinações de ações. Na generalidade, essa descrição pode basear-se nos seguintes parâmetros básicos (parâmetros para a descrição do desempenho técnico): i) conjunto de situações de combinação de ações; ii) valores de cálculo das ações em situação de combinação; iii) conjunto de situações de carregamento.

O conjunto de situações de combinação de ações representa os perigos, condições e estados limites relevantes para um período de tempo específico (ISO 2394 – 5.2.2). Estas situações de combinação devem ser devidamente selecionadas, de modo a traduzir as variações que as ações, influências ambientais ou até mesmo as propriedades da estrutura apresentam ao longo do tempo (ISO 2394 – 5.2.2). Os valores de cálculo das ações em situação de combinação podem ser descritos recorrendo aos valores característicos das ações e a coeficientes com valores apropriados (γ , ψ e ξ). O valor destes coeficientes pode variar consoante, por exemplo, a ação em questão seja favorável ou desfavorável, seja uma ação de base ou não, etc. (ISO 22111 – 9.4). As situações de carregamento traduzem a distribuição espacial das ações livres que, conjuntamente com as ações fixas, são consideradas no cálculo estrutural (ISO 2394 – 9.5).

A norma ISO 22111 contém recomendações sobre formatos e métodos para apresentar as situações de combinações de ações e os valores de cálculo das ações em cada uma dessas situações. A norma ISO 2394, por seu turno, menciona o princípio básico de estabelecer combinações considerando uma ou algumas ações como dominantes e as restantes como não dominantes. Segundo este princípio, as primeiras são introduzidas na combinação com valores de cálculo extremos e as restantes com valores de cálculo mais prováveis (ISO 2394 – 9.5, F.3.1, G-2). Estas duas normas internacionais salientam a importância associada ao conjunto de situações de carregamento. Por exemplo, os efeitos da não atuação de uma ou mais ações variáveis devem ser considerados no conjunto de situações de carregamento caso produzam condições desfavoráveis (ISO 22111 - 9). Outro exemplo é a eventual importância de omitir as partes das ações permanentes que correspondam a elementos amovíveis (ISO 22111 – B.3). Os Eurocódigos Estruturais (EN 1990:2002) e as normas da série ISO 15928 (ISO 15928-1 e ISO 15928-2) apresentam várias alternativas e recomendações para combinar ações, mas não contêm nenhuma recomendação particular relativamente à escolha entre alternativas.

Em termos gerais, a avaliação dos valores das várias ações que se podem enquadrar em diversos tipos de situação de carregamento e de combinação é um problema muito complexo (ISO 2394 – F.1). Atendendo à extrema variedade de possibilidades, o problema não é objetivamente tratado no âmbito do exercício de aplicação do modelo proposto (não se sugerem critérios de avaliação para este aspeto concreto). Importa, contudo, salientar que as opções tomadas em termos de combinações podem afetar significativamente a fiabilidade estrutural, já que os efeitos resultantes dessas combinações de ações podem diferir consideravelmente em função dessas regras e critérios de conceção adotados [12]. As regras e critérios de conceção que influenciam diretamente as combinações de ações (ISO 15928-1 – A.5.1.7) devem ser objeto de um controlo técnico efetivo. Por exemplo, deve controlar-se se as combinações são suficientes para permitir a avaliação realista das condições dos estados limites (ISO 22111 – 9.2.1), tendo em consideração que a combinação ideal deve ter em conta aspetos económicos e comerciais, bem como a exaustividade da análise estrutural [13].

4.2 Resistência estrutural

Os estados limites últimos são estados associados com o colapso ou outras formas similares de falha estrutural. Estes estados correspondem, geralmente, à capacidade máxima de carga de uma estrutura ou de um elemento estrutural, mas em alguns casos também à máxima tensão ou deformação aplicável (ISO 22111 – 3.30). No caso dos estados limites últimos, as situações de combinações de ações podem incluir situações persistentes ou transitórias e situações de acidente (ISO 22111:2007).

Subjacente aos estados limites últimos está a verificação da segurança estrutural, que inclui tanto a verificação da resistência como a verificação do equilíbrio estático (ISO 15928-3 – A.6.2).

Os valores de cálculo dos efeitos das ações (E_d), tanto desfavoráveis como favoráveis, que se combinam para efeitos de verificação da resistência (e deformação, caso se aplique), devem incluir (ISO 22111 – 9.2.1): i) o valor de cálculo de todas as ações permanentes $\Sigma (\xi_j \gamma_{Gi} G_{k,i})$; ii) o valor de cálculo de uma ação de base variável ($\gamma_j Q_{k,1}$) ou de acidente (A_d); iii) o valor de cálculo das ações variáveis distintas da ação de base $\Sigma (\gamma_i \psi_i Q_{k,i})$. Os valores de cálculo dos efeitos das ações (E_d), que se combinam para efeitos da verificação do equilíbrio estático, devem ser separados em duas componentes (ISO 22111 – 9.2.2): i) os efeitos das ações determinados através da combinação dos valores de cálculo das ações permanentes que estabilizam a estrutura ($E_{d,estab}$); ii) os efeitos das ações determinadas através da combinação dos valores das ações que destabilizam a estrutura ($E_{d,destab}$). Os valores de cálculo dos efeitos das ações (E_d) podem, genericamente, ser expressos através da combinação $\{ \Sigma (\xi_j \gamma_{Gi} G_{k,i}) ; (\gamma_j Q_{k,1}) \text{ ou } (A_d) ; \Sigma (\gamma_i \psi_i Q_{k,i}) \}$. Existem, contudo, diferentes formas de considerar e combinar estes valores (ISO 22111 – Anexo B; ISO 2394 – Anexo G; EN 1990).

Os estados limites de utilização correspondem às condições a partir das quais os requisitos específicos de aptidão para uma estrutura ou um elemento estrutural já não são cumpridos (ISO 22111 – 3.27). Estes requisitos estão relacionados com o conforto do utilizador, a funcionalidade da estrutura ou dos elementos estruturais, o risco de deterioração ou a manutenção espectável e podem incluir deformações, abertura de fendas, tensões locais ou acelerações admissíveis [13]. No caso dos estados limites de utilização aplicam-se, no essencial, as considerações relativas à combinação de ações para os estados limites últimos. Deve, contudo, fazer-se a distinção entre os efeitos relativos aos valores característicos, de combinação, frequentes e quase permanentes das ações isoladas e em combinação (ISO 22111:2007 – 9.3; ISO 2394:1998 – 9.2). Esta distinção assente sobretudo no facto de que, nos estados limites últimos, as situações de projeto relevantes para efeitos da combinação de ações são a persistente (correspondente a condições normais de utilização) e transitória (correspondente a condições temporárias), e a acidental (correspondente a condições excecionais) enquanto, no caso dos estados limites de utilização, as situações de projeto a considerar são a característica, a frequente e a quase permanente.

No caso dos Eurocódigos Estruturais, os valores de combinação $\psi_0 Q_k$ são utilizados na verificação de estados limites últimos permanentes e transitórios, por um lado, e na verificação de estados limites de utilização irreversíveis, por outro [4]. Um outro exemplo de distinção, também relativo ao formato A apresentado, consiste no facto dos valores frequentes $\psi_1 Q_k$ e dos valores quase permanentes $\psi_2 Q_k$ serem utilizados na verificação de estados limites últimos que envolvem ações de acidente, por um lado, e na verificação de estados limites de utilização reversíveis, por outro [4]. Tal como no caso dos estados limites últimos, os exemplos apresentados baseiam-se na norma ISO 22111. Podem encontrar-se outros exemplos nas normas internacionais ISO 15928-2 e ISO 2394 ou ainda nos regulamentos técnicos que seguem as recomendações destas normas. Os valores apresentados são meramente ilustrativos e devem ser aferidos em função do tipo de estado limite de utilização (por exemplo deformação, vibração ou perda de aparência) e dos mecanismos de falha (dependentes do material utilizado) e dos tipos de ação, combinação e nível de fiabilidade em questão (ISO 22111 – B.1 e B.2).

Usualmente, a verificação dos estados limites últimos inclui a utilização de parâmetros tais como valores característicos para as resistências (parâmetros para a descrição do desempenho técnico) e

coeficientes de segurança parciais (parâmetros para a descrição do risco técnico) (ISO 15928-1:2003). O valor característico da resistência estrutural pode ser determinado a partir do valor característico da resistência dos materiais, daí ser importante especificar os métodos de ensaio que produzem os valores característicos da resistência dos materiais (ISO 15928-1:2003). Os valores de cálculo para as propriedades dos materiais (X_d) podem ser obtidos a partir dos respetivos valores característicos, nomeadamente a partir da expressão genérica

$$X_d = \eta \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (\text{EN 1990 – 6.3.3-5; ISO 2394 – 9.1}) \quad (1)$$

em que (EN 1990 – 6.3.1): i) X_k é o valor característico para a propriedade do material (EN 1990 – 4.2.3); ii) η é o valor médio para o fator de conversão que tem em consideração os efeitos de volume e de escala, os efeitos da humidade e da temperatura e outros; iii) γ_m é o coeficiente de segurança parcial que tem em consideração a possibilidade de desvios desfavoráveis no valor característico das propriedades do material e a parte aleatória do fator de conversão η . O valor de cálculo da resistência estrutural (R_d), por seu turno, pode ser obtido a partir da expressão (EN 1990 – 6.3.5; ISO 2394 – E.7.1)

$$R_d = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R \{X_{d,i}; a_d\} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} R \left\{ \eta \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\}, i \geq 1 \quad (2)$$

em que: i) a_d é o valor de cálculo dos dados geométricos determinado com base em valores nominais (a_{nom}) e, eventualmente, em possíveis variações desses valores nominais (Δ_a) e; γ_{Rd} é o coeficiente de segurança parcial que cobre as incertezas do modelo de cálculo da resistência, bem como as imperfeições geométricas nos casos em que os desvios geométricos não são explicitamente modelados.

Para efeitos de simplificação (ISO 2394 – E.7.1), pode-se utilizar um coeficiente de segurança parcial $\gamma_M = \gamma_{Rd} \gamma_m$, o qual pode ainda incluir o fator de conversão η . Assim, alternativamente, o valor de cálculo da resistência estrutural (R_d) pode ser obtido a partir das normas EN 1990 – 6.3.5, ISO 2394 – E.7.1 e de [13].

$$R_d \approx R \left\{ \eta \frac{X_{k,i}}{\gamma_{M,i}}; a_d \right\}, i \geq 1 \text{ ou } R_d \approx \frac{R_k}{\gamma_R} (\gamma_M = \gamma_R \text{ se } i=1) \quad (3)$$

O coeficiente de segurança parcial γ_R (ou γ_M) reflete o nível de fiabilidade, e, por conseguinte, o nível do desempenho estrutural dos edifícios, tal como acontece para o caso dos coeficientes de segurança parciais aplicáveis às várias ações estruturais (ISO 15928-1 – A.5.2.1). Este coeficiente de segurança parcial pode ser deduzido a partir da expressão [13]

$$\gamma_R = \exp(-1,645 \times V_R) / \exp(-0,8 \times \beta_a \times V_R) \quad (4)$$

em que: i) - 0,8 é o valor normalizado do fator de sensibilidade α_R para parâmetros de resistência dominantes (ISO 2394 – Tabela E.3); β_a é o índice de fiabilidade e; V_R é o coeficiente de variação.

A Figura 1 evidencia que o aumento do coeficiente de segurança parcial γ_R é diretamente proporcional ao aumento do índice de fiabilidade [13].

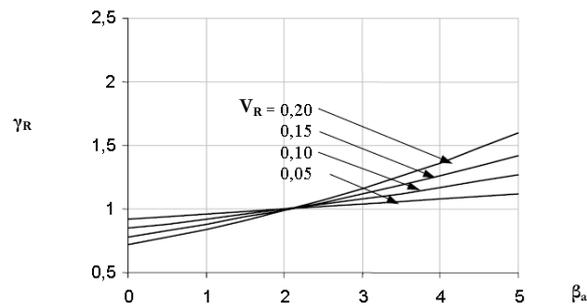


Figura1: Variação de γ_R em relação ao índice de fiabilidade β_a , para diferentes coeficientes de variação V_R [13]

Embora não seja usual (são exceção as situações que envolvam fadiga), a diferenciação de fiabilidade pode ser introduzida ao nível dos coeficientes de segurança parciais aplicáveis à resistência (EN 1990 – B.3.3).

É assim possível, à semelhança do procedimento adotado para o caso das ações, utilizar fatores multiplicativos de agravamento K (parâmetro para descrição do risco técnico inerente) para modificar os coeficientes de segurança parciais γ_R . Ou seja, por exemplo, podem ser desenvolvido critérios de avaliação para a classe de desempenho A+ (ou A) que consistem na utilização de um valor para o coeficiente de segurança parcial $\gamma_{R,A+}$ (ou $\gamma_{R,A}$) superior ao valor para o coeficiente de segurança $\gamma_{R,B}$ parcial estabelecido regulamentarmente (isto é, $\gamma_{R,A+} = \gamma_{R,B} \times K_{A+}$, em que $K_{A+} > 1,0$). Pelo contrário, também existe a possibilidade de reduzir o valor destes mesmos coeficientes de segurança γ_R quando se admite um nível de inspeção superior ao requerido e/ou requisitos mais exigentes que os regulamentados (EN 1990 – B6). Ou seja, neste caso, pode-se considerar um $\gamma_{R,A+} < \gamma_{R,B}$ desde que a classe de inspeção durante a execução seja mais exigente (por exemplo, a classe de inspeção IL3 correspondente à classe de fiabilidade RC3 estabelecida nos Eurocódigos Estruturais) do que aquela para a qual os coeficientes de segurança parciais estabelecidos regulamentarmente estão calibrados (a classe de inspeção IL2 correspondente à classe de fiabilidade RC2 estabelecida nos Eurocódigos Estruturais). Face a esta dupla possibilidade de modificação dos coeficientes de segurança parciais, e por motivos de simplificação e de aplicabilidade prática, desconsiderou-se o desenvolvimento de critérios de avaliação relativos à resistência da estrutura.

5. CONCLUSOES

Este artigo apresenta considerações que suportam a avaliação do desempenho estrutural dos edifícios que permitem graduar (e.g. classes A+, A, B, etc.) o nível de cumprimento do 1.º requisito do RPC (resistência mecânica e estabilidade). Podem por exemplo consideram-se pertencentes à classe de desempenho A+ as estruturas que consistem na utilização de um valor para o coeficiente de segurança parcial $\gamma_{R,A+}$ (ou $\gamma_{R,A}$) superior ao valor para o coeficiente de segurança $\gamma_{R,B}$ parcial estabelecido regulamentarmente (isto é, $\gamma_{R,A+} = \gamma_{R,B} \times K_{A+}$, em que $K_{A+} > 1,0$). Pelo contrário, também poderá desenvolver-se a possibilidade de reduzir o valor destes mesmos coeficientes de segurança γ_R quando se admite um nível de inspeção superior ao requerido e/ou requisitos mais exigentes que os regulamentados. Os critérios de avaliação sugeridos são meras orientações genéricas que devem ser aferidas e detalhadas por consenso técnico nacional.

REFERÊNCIAS

- [1] Duarte, M. (2021). Indicadores de resiliência sísmica para edifícios e obras de engenharia, Dissertação de Mestrado.
- [2] Arteaga, A. (2004). Chapter 6: Classification of Actions. Handbook 1 - Basis of structural design: Guide to interpretative documents for essential requirements, to EN 1990 and to application and use of Eurocodes. Watford : Leonardo Da Vinco Pilot Project CZ/02/B/f/PP-134007.
- [3] Francis, R., Bekera, B. (2014). A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 121, 90–103. <https://doi.org/10.1016/J.RESS.2013.07.004>.
- [4] Duarte, M., Almeida, N., Falcão Silva, M.J., Resilience rating system for buildings and civil engineering works, 15WCEAM, Brasil (aceite para publicação).
- [5] Almeida, N. (2011). Technical model of building management performance and risk based: Design, development, and example of application to structures. Tese de Doutoramento, IST-ULisboa.
- [6] Falcão Silva, M,J, Almeida, N., Salvado, F., Rodrigues, H. (2020). Modelling structural performance and risk for enhanced building resilience and reliability. *Innovative Infrastructure Solutions*. <https://10.1007/s41062-020-0277-1>
- [7] Meacham, B. (2004). Performance Based-Building Regulatory System: Structure, Hierarchy and Linkages. *Journal of the Structural Engineer Society of New Zealand*. Vol. 17, 1, pp. 37-51.
- [8] Fujitani, H., Teshigawara, M., Gojo, W., Hirano, Y., Saito, T. & Fukuyama, H. (2005). Framework for Performance-Based Design of Building Structures. In *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* (Vol. 20). Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1467-8667.2005.00377.x>.
- [9] Solomos, G., Pinto, A. e Dimova, S. 2008. A Review of the Seismic Hazard Zonation in National Buildign Codes in the Context of Eurocode 8 - Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. JRC Scientific and Technical Reports. Ispra : European Commission Joint Research Centre.
- [10] Almeida, N., Sousa, V., Alves Dias, L. & Branco, F. (2015). Managing the technical risk of performance-based building structures. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(3), 384–394. <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.893921>.
- [11] Almeida, N., Sousa, V., Alves Dias, L. & Branco, F. (2015b). Engineering risk management in performance-based building environments. *Journal of Civil Engineering and Management*, 21(2), 218–230. <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802740>.
- [12] Gulvanessian, H., Calgaro, J., Holický, M. (2002). *Eurocode: Basis of Structural Design. Designer's Guide to EN 1990*. London: Thomas Telford.
- [13] Holický, M., Vrouwenvelder, T. (2005). *Chapter 1 - Basic Concepts of Structural Reliability. Handbook 2 -Reliability Backgrounds: Guide to the basis of structural reliability and risk*

engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples. s.l.: Leonardo Da
Vinco Pilot Project CZ/02/B/f/PP-134007.