

Estado da arte de elementos de contacto para modelação de impactos estruturais entre edifícios sujeitos a acções sísmicas.

State-of-the-art of contact elements for modeling structural impacts between buildings under seismic actions.

P. L. Folhento¹ | R. C. Barros² | M. T. Braz-César³

¹Aluno de Doutoramento, FEUP – Universidade do Porto

²Professor Associado com Agregação, FEUP – Universidade do Porto

³Professor Adjunto, ESTIG – Instituto Politécnico de Bragança

resumo

Fenómenos naturais como sismos poderão induzir deslocamentos laterais excecionais. Impactos entre edifícios gerados pela ação de sismos é um fenómeno que tem vindo a ser reconhecido nas últimas três décadas ganhando cada vez mais importância na investigação. Quando os edifícios estão próximos uns dos outros, usual em grandes cidades, a probabilidade de ocorrência de colisões entre os edifícios aumenta, podendo causar danos substanciais ou levar ao colapso global das estruturas. Este fenómeno de contacto é extremamente difícil de modelar com alta precisão, pois depende de muitas variáveis e das suas inter-relações. Na modelação de impactos estruturais, é suficiente estimar com precisão a magnitude das forças de colisão para entender como irão influenciar o comportamento dinâmico global das estruturas intervenientes. Assim, neste trabalho apresentam-se diferentes modelos de impacto presentes na literatura com o objetivo de analisar as suas características e vantagens e desvantagens relativas. Verifica-se que existe um leque de possibilidades na modelação de impactos, e que os respetivos modelos estão mais precisos, colmatando limitações reconhecidas anteriormente. Contudo, é também reconhecida a falta de investigação e dados experimentais, sobretudo na análise deste problema em três-dimensões.

Palavras-chave:

abstract

Impacts between buildings generated by the action of earthquakes is a phenomenon that has been recognized in the last three decades, gaining research importance. When buildings are very close to each other, common in large cities, the likelihood of collisions between buildings increases, which can cause substantial damage or lead to the global collapse of the structures. This contact phenomenon is extremely difficult to model with high precision, as it depends on many variables and their interrelationships. When modeling structural pounding, it is sufficient to accurately estimate the magnitude of the pounding forces to understand how they will influence the overall dynamic behavior of the intervening structures. Thus, in this work different impact models in the literature are presented to analyze their characteristics and relative advantages and disadvantages. It appears that there is a range of possibilities in impact modeling, and that the respective models are more accurate, overcoming previously recognized limitations. However, the lack of research and experimental data is also recognized, especially in the analysis of this problem in three dimensions.

Keywords:

1- INTRODUÇÃO

Um fenómeno reconhecido nas últimas três décadas e que tem ganho cada vez mais importância na investigação, é o de impactos estruturais entre edifícios, gerados pela ação de sismos.

Quando há probabilidade de ocorrência de colisões entre edifícios, i.e., numa situação em que os edifícios estão muito próximos uns dos outros, ou mesmo, juntos, comum em cidades metropolitanas com elevada densidade populacional, grandes forças de impacto e picos de aceleração podem ser geradas nos andares dos edifícios, causando danos substanciais nos locais de impacto e, no pior dos cenários, pode causar o colapso global do sistema estrutural. Não obstante, e nestas condições, edifícios com propriedades dinâmicas muito diferentes e conseqüente comportamento dinâmico diferente, vibrando desfasadamente, aumenta as possibilidades de colisões entre edifícios sujeitos a cargas sísmicas.

Devido a grandes não linearidades neste fenómeno de contacto, o impacto é difícil de modelar com alta precisão, pois depende de muitas variáveis e das suas inter-relações. Este fenómeno insurgente envolve uma relação não-linear entre a área de contacto, pressão e deformações; deformações inelásticas locais; propagação de ondas de tensão nas estruturas durante o impacto; forças tangenciais e de fricção; vibrações que resultam em efeitos térmicos e acústicos; etc.

Na modelação impactos estruturais entre edifícios, é suficiente estimar com precisão a magnitude das forças de colisão para entender como estas irão influenciar o comportamento dinâmico global das estruturas intervenientes. Assim, na literatura existem duas formas possíveis de modelar estas forças: teoria clássica de impactos, e o uso de elementos/modelos de impacto ou de contacto (Jankowski e Mahmoud, 2015).

Neste trabalho apresentam-se diferentes modelos de impacto encontrados na literatura com o objetivo de analisar as suas características e vantagens e desvantagens relativas.

2- MODELAÇÃO DE IMPACTOS

2.1. Teoria clássica de impactos

A primeira abordagem limita-se à especificação das velocidades de impacto inicial e final dos corpos rígidos em colisão (Equação 1), bem como ao momento de impulso linear ou angular aplicado,

$$\begin{aligned}\dot{x}_{1,f} &= \dot{x}_{1,0} - (1 + CR) \frac{m_2 \dot{x}_{1,0} - m_2 \dot{x}_{2,0}}{m_1 + m_2} \\ \dot{x}_{2,f} &= \dot{x}_{2,0} + (1 + CR) \frac{m_1 \dot{x}_{1,0} - m_1 \dot{x}_{2,0}}{m_1 + m_2}\end{aligned}\tag{1}$$

Esta abordagem não pode descrever forças transitórias e não tem em conta as deformações locais no ponto de contacto dos corpos, assumindo que uma parte desprezável da energia cinética inicial do sistema é transformada em vibrações dos corpos em colisão (Goldsmith, 1960). As velocidades de impacto estão então relacionadas com o conhecido parâmetro, coeficiente de restituição (CR), dado pelo quociente entre o negativo da velocidade relativa final, e a velocidade relativa inicial. Este parâmetro mede as perdas de energia e o grau de plasticidade da colisão, estando relacionado com a dissipação da energia cinética durante o impacto da seguinte forma

$$-\Delta E_k = \frac{1}{2} \left(\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \right) (1 - CR^2) (\dot{x}_{1,0} - \dot{x}_{2,0})^2 \quad (2)$$

Quando o CR é igual à unidade, representa um impacto perfeitamente elástico e quando igual a zero representa um impacto perfeitamente plástico (Goldsmith, 1960, Jankowski, 2010).

A teoria clássica de impacto geralmente não é usada na modelação de impactos estruturais devido às limitações mencionadas, e sendo que negligencia a existência de um período de impacto, não avaliando a evolução das forças de impacto durante o contacto (Mahmoud et al., 2019).

2.2. Modelos de impacto unidimensionais (1D)

Na realidade, o período de impacto existe e é dividido em períodos de aproximação e restituição. Estes períodos são explicitamente considerados nos modelos de impacto que constituem a segunda abordagem disponível na modelação de impactos estruturais entre edifícios sujeitos a ações sísmicas.

Esta abordagem é essencialmente baseada num método de penalidade, i.e., quando os edifícios se interpenetram, o elemento de impacto é ativado, gerando as forças de impacto que separam as estruturas. Considerando os deslocamentos relativos unidimensionais das estruturas em colisão, o elemento de impacto torna-se ativo quando

$$\delta(t) > 0 \quad \text{onde} \quad \delta(t) = x_1(t) - x_2(t) - \text{Gap} \quad (3)$$

em que $\delta(t)$ é a distância de interpenetração das estruturas em colisão, e Gap a distância entre os edifícios. Estes modelos são elementos virtuais, que funcionam apenas à compressão e são compostos genericamente por uma mola e um amortecedor em paralelo. As estruturas que envolvem grandes massas podem ser consideradas como corpos rígidos, podendo as massas ser concentradas ao nível dos pisos.

O uso destes elementos é baseado na teoria de Hertz e em suposições simplificadas (Johnson, 1987), que apesar de tornarem a análise do problema mais simples a tornam menos precisa.

Durante o impacto, a mola controlará a força e a deformação elástica, e o amortecedor a energia devida à propagação das ondas geradas pelo impacto. Com estes modelos de impacto, é possível determinar com precisão razoável a magnitude das forças de impacto em qualquer instante durante o impacto estrutural entre edifícios, sendo a informação necessária para entender como os impactos influenciam a resposta dinâmica global das estruturas em colisão.

No entanto, e cumulativamente às suposições simplificadas, a eficácia dos modelos de impacto depende em grande parte de seus parâmetros, viz., a rigidez de impacto e o rácio de amortecimento de impacto. A rigidez de impacto (k_{imp}) depende, nomeadamente, das propriedades do material e das características geométricas do local de impacto e, por isso, apresenta elevados níveis de incerteza. O rácio de amortecimento de impacto (ξ_{imp}) depende principalmente do CR.

Com base nas relações entre estes parâmetros, diversos modelos de impacto foram desenvolvidos.

O modelo de impacto mais básico é o modelo linear elástico (Figura 1), composto apenas por uma mola e sem a capacidade de contabilizar a dissipação de energia durante os impactos, o que é inevitável neste tipo de fenómeno. A força de impacto, $f_p(t)$, pode então ser obtida da seguinte forma

$$f_p(t) = \begin{cases} k_{imp} \delta(t), & \text{para } \delta(t) > 0 \\ 0 & \text{para } \delta(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

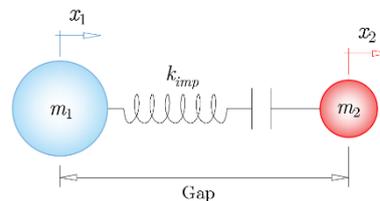


Fig. 1 | Modelo de impacto elástico linear.

O modelo elástico não linear (modelo de Hertz) segue a lei de contacto de Hertz (Hertz, 1882), que descreve a compressão estática entre dois corpos elásticos e isotrópicos. Consiste numa mola não linear (β_{imp}), conforme representado na Figura 2, capaz de modelar a relação força-deformação de forma mais realista, i.e., espera-se que a área de contacto entre as estruturas adjacentes aumente com o aumento da força de contacto, levando a uma rigidez de impacto não linear. A força de impacto aumenta assim, com a potência de 1.5 da distância de interpenetração (Johnson, 1987),

$$f_p(t) = \begin{cases} \beta_{imp} [\delta(t)]^{1.5} & \text{para } \delta(t) > 0 \\ 0 & \text{para } \delta(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

em que β_{imp} depende das propriedades do material e da geometria das estruturas em colisão. Fórmulas simplificadas foram desenvolvidas por Goldsmith (Goldsmith, 1960) para calcular os parâmetros de rigidez de impacto dependendo da forma dos corpos em colisão.

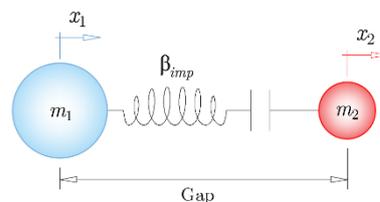


Fig. 2 | Modelo de impacto elástico não-linear.

Em alternativa é possível usar um modelo de impacto linear viscoelástico (também designado de modelo Kelvin-Voigt) conforme representado na Figura 3. Este modelo tem em conta a dissipação de energia durante o impacto (Wolf e Skrikerud, 1980, Anagnostopoulos, 1988), podendo a força de impacto ser calculada usando o seguinte sistema de equações

$$f_p(t) = \begin{cases} k_{imp} \delta(t) + c_{imp} \dot{\delta}(t), & \text{para } \delta(t) > 0 \\ 0 & \text{para } \delta(t) \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

onde c_{imp} é calculado pela seguinte expressão (Anagnostopoulos, 1988, 2004)

$$c_{imp} = 2 \xi_{imp} \sqrt{k_{imp} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad \text{onde} \quad \xi_{imp} = \frac{-\ln(CR)}{\sqrt{\pi^2 + [\ln(CR)]^2}} \quad (7)$$

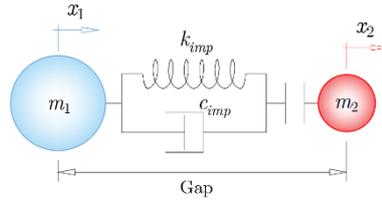


Fig. 3 | Modelo de impacto linear viscoelástico (Kelvin-Voigt).

A desvantagem deste modelo é a força de tração verificada no final do período de restituição, i.e., uma força de impacto negativa que tende a juntar os corpos, não possuindo significado físico. Isto é justificado pela associação paralela da mola e do amortecedor, em que as tensões totais são obtidas como a soma das tensões na mola e no amortecedor, i.e., todos os elementos sofrerão a mesma deformação, o que significa que ambos os períodos de impacto terão o mesmo coeficiente de amortecimento. Isso irá produzir uma dissipação uniforme de energia nos dois períodos de impacto, o que na realidade não acontece (Jankowski, 2015). Observa-se que a energia de deformação elástica armazenada no primeiro período de impacto é libertada no segundo período sem grandes efeitos plásticos. Assim, grande parte da energia dissipada é verificada no período de aproximação.

Para contrariar estas desvantagens, diversas modificações do modelo Kelvin-Voigt foram propostas na literatura. Komodromos et al. (Komodromos et al., 2007a) propuseram que o modelo de impacto linear viscoelástico estará só ativo quando a força de impacto for positiva.

Valles e Reinhorn (Valles e Reinhorn, 1997) modificaram o modelo Kelvin-Voigt considerando o termo de amortecimento como ficando ativo apenas para velocidades positivas durante o impacto, o que significa que está ativo apenas durante o período de aproximação (Figura 4).

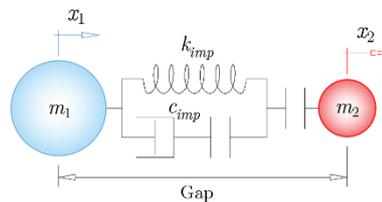


Fig. 4 | Modelo de impacto linear viscoelástico modificado.

Mahmoud (Mahmoud, 2008) procedeu de forma semelhante a Valles e Reinhorn (Figura 4) considerando uma expressão equivalente para calcular a força de impacto

$$f_p(t) = \begin{cases} k_{imp} \delta(t) + c_{imp} \dot{\delta}(t), & \delta(t) > 0, \dot{\delta}(t) > 0 \\ k_{imp} \delta(t), & \delta(t) > 0, \dot{\delta}(t) \leq 0 \\ 0, & \delta(t) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

A relação entre a razão de amortecimento e o CR foi reavaliada, uma vez que as propriedades de dissipação de energia dependem do termo de amortecimento, que agora só está ativo no primeiro período de impacto, chegando assim, à seguinte expressão

$$\xi_{imp} = \frac{1 - CR^2}{\pi CR} \quad (9)$$

Ye et al. (Ye et al., 2009a) propôs a seguinte modificação do modelo Kelvin-Voigt (Figura 4)

$$c_{imp} = \xi_{imp} \delta(t) \quad \text{onde} \quad \xi_{imp} = \frac{3k_{imp}(1 - CR)}{2CR(\dot{x}_{1,0} - \dot{x}_{2,0})} \quad (10)$$

De forma semelhante, Pant et al. (Pant et al., 2010a, 2010b) desenvolveram a seguinte modificação ao modelo de Kelvin-Voigt

$$\xi_{imp} = \frac{3k_{imp}(1 - CR^2)}{2CR^2(\dot{x}_{1,0} - \dot{x}_{2,0})} \quad (11)$$

Mahmoud e Jankowski (Mahmoud e Jankowski, 2011) sugeriram uma modificação adicional ao modelo Kelvin-Voigt (Figura 4) usando uma abordagem diferente para chegar a uma fórmula melhorada do razão de amortecimento de impacto

$$\xi_{imp} = \frac{1 - CR^2}{CR[CR(\pi - 2) + 2]} \quad (12)$$

Assim como para o modelo de impacto de Kelvin-Voigt, as modificações ao modelo de contacto Hertz foram focadas nas propriedades de dissipação de energia. A adição de amortecimento não linear ao modelo de impacto Hertz, tornam-no agora num modelo viscoelástico não linear. Lankarani e Nikraves (Lankarani e Nikraves, 1990, 1994) propuseram um modelo de contacto considerando uma mola não linear usando a lei de Hertz, em paralelo com amortecimento não linear (Figura 5), para melhor representarem os impactos entre sistemas mecânicos. Assim, a força de impacto é calculada da seguinte forma

$$f_p(t) = \beta_{imp} [\delta(t)]^n + c_H \dot{\delta}(t) \quad (13)$$

em que c_H é o amortecimento não-linear dado por

$$c_H = \mu_d [\delta(t)]^n \quad \text{onde} \quad \mu_d = \frac{3\beta_{imp}(1 - CR^2)}{4(\dot{x}_{1,0} - \dot{x}_{2,0})} \dot{\delta}(t) \quad (14)$$

em que μ_d é o fator de amortecimento de histerese e $n=1.5$ para representar a lei de Hertz. Muthukumar e DesRoches (Muthukumar e DesRoches, 2003, 2006) propuseram um modelo de impacto, designado por "Hertzdamp", representado na Figura 5, usando as considerações anteriores, mas aplicadas a estruturas de engenharia civil,

$$f_p(t) = \begin{cases} \beta_{imp} [\delta(t)]^{1.5} + c_H \dot{\delta}(t) & \text{para } \delta(t) \geq 0 \\ 0 & \text{para } \delta(t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

onde

$$\xi_{imp} = \frac{3\beta_{imp}(1 - CR^2)}{4(\dot{x}_{1,0} - \dot{x}_{2,0})} \dot{\delta}(t) \quad (16)$$

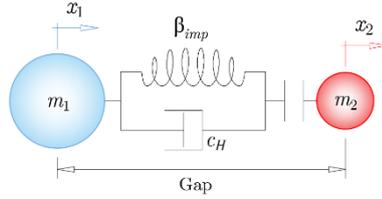


Fig. 5 | Modelo de impacto não-linear viscoelástico modificado.

Jankowski (Jankowski, 2005) propôs uma modificação ao modelo de impacto não linear de Hertz, considerando que a componente de amortecimento não linear só está ativa no período de aproximação (Figura 6), onde a maior parte da energia é dissipada. Assim, a força de impacto é obtida usando a seguinte função por partes

$$f_p(t) = \begin{cases} \beta_{imp} [\delta(t)]^{1.5} + c_H(t) \dot{\delta}(t), & \text{para } \delta(t) > 0, \dot{\delta}(t) > 0 \\ \beta_{imp} [\delta(t)]^{1.5}, & \text{para } \delta(t) > 0, \dot{\delta}(t) \leq 0 \\ 0, & \text{para } \delta(t) \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

onde

$$c_H(t) = 2\xi_{imp} \sqrt{k_{imp} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad \text{com} \quad k_{imp} = \beta_{imp} \sqrt{\delta(t)} \quad (18)$$

Jankowski (Jankowski, 2005, 2006) desenvolveu duas expressões algébricas para o rácio de amortecimento de impacto e comparou-as com resultados numéricos para verificar a sua validade,

$$\xi_{imp} = \frac{\sqrt{5} (1 - CR^2)}{2\pi CR} \quad (19)$$

$$\xi_{imp} = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1 - CR^2}{CR [CR (9\pi - 16) + 16]}$$

onde a segunda mostrou melhores resultados. Os resultados relativos à relação entre o rácio de amortecimento de impacto e o CR nos modelos de impacto, chamaram à atenção para o facto de que quando o CR é nulo, o rácio de amortecimento de impacto deve tender para infinito. Ye et al. (Ye et al., 2009a) abordou este facto para a modificação do modelo Kelvin-Voigt que fornece o valor unitário do rácio de amortecimento de impacto para o valor nulo do CR, e pelos mesmos autores Ye et al. (Ye et al., 2009b) para a modificação do modelo de *Hertzdamp* que devolve um valor finito do rácio de amortecimento de impacto para colisões perfeitamente plásticas. Contudo, todos os modelos corroboraram o facto de que um CR unitário corresponde ao valor nulo do rácio de amortecimento de impacto.

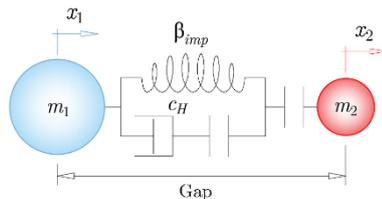


Fig. 6 | Modelo de impacto não-linear viscoelástico modificado.

Assim, Ye et al. (Ye et al., 2009b) chegaram a uma expressão mais precisa da constante de amortecimento de impacto, que é dada por

$$\xi_{imp} = \frac{8\beta_{imp}(1-CR)}{5CR(\dot{x}_{1,0} - \dot{x}_{2,0})} \quad (20)$$

que confirma as premissas mencionadas por Jankowski (Jankowski, 2006).

Mais recentemente, Naderpour et al. (Naderpour et al., 2015) desenvolveu uma nova expressão para a razão de amortecimento de impacto para o modelo não-linear viscoelástico (Figura 6) relacionada com o CR. Foi, portanto, obtida por um procedimento iterativo que equaciona a energia dissipada pelo amortecimento não-linear no período de aproximação (traduzido pela área do ciclo de histerese de impacto) com a perda de energia cinética resultando em

$$\xi_{imp} = \left[\frac{2}{CR\sqrt{\pi}}(1-CR^2) \right]^2 \quad (21)$$

Posteriormente, Naderpour et al. (Naderpour et al., 2016) sugeriu uma nova expressão (ver Equação 22) para o rácio de amortecimento de impacto que depende da velocidade pré-impacto e do CR.

$$c_{imp}(t) = \alpha \frac{CR^{\beta} \dot{\delta}_{imp}(1-CR)}{\ddot{\delta}(t)} k_{imp} \delta^n(t) \quad (22)$$

Geralmente na formulação dos modelos de impacto considera-se que o local de impacto permanece inalterado. Na realidade, e como é evidente, a superfície de contacto sofre danos e dissipação de material causado pelos inúmeros impactos. Assim, Bamer (Bamer, 2018) e Bamer e Markert (Bamer e Markert, 2018), respetivamente, propuseram uma extensão do modelo não-linear viscoelástico de *Hertzdamp* e Jankowski, incluindo um elemento de atrito seco em série com a mola não linear (Figura 7a e 7b).

Os autores modificaram a condição de colisão (Equação 3), primeiro considerando uma condição equivalente de colisão quando $\delta < 0$ e, em seguida, incluindo um aumento na distância de separação devido a danos, perda de material ou deformação plástica,

$$\delta_T(t) = \delta(t) + \delta_s(t) < 0 \quad \text{onde} \quad \delta(t) = x_1(t) - x_2(t) + \text{Gap} \quad (23)$$

em que o parâmetro positivo, δ_s , é o deslocamento adicional para a posição da superfície de impacto inicial.

Três estados foram então considerados dentro dos períodos de impacto: o estado O re-

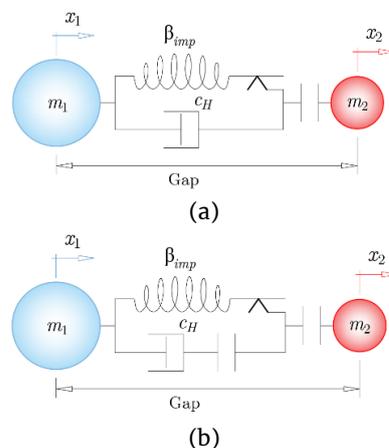


Fig. 7 | Modelo de impacto não-linear viscoelástico com um elemento de atrito seco.

fere-se ao caso sem impacto; o estado I corresponde à ativação do modelo de impacto satisfazendo a condição na equação 23; estado II quando um valor limite da força elástica de contacto Hertz é excedida (deslizamento). Uma força de atrito constante R que obedece à lei de atrito de Coulomb é considerada com base no material e nas propriedades geométricas das superfícies de colisão, juntamente com o termo de amortecimento não linear.

Um estado adicional, estado III considerado na extensão do modelo não-linear viscoelástico de Jankowski. As equações 24 representam os modelos modificados de acordo com os estados referidos.

$$f_p(t) = \begin{cases} f_k + f_c, & \text{(Estado I) para } \delta_T(t) < 0, \dot{\delta}_T(t) < 0, f_k < f_R, \\ f_R + f_c, & \text{(Estado II) para } \delta_T(t) < 0, \dot{\delta}_T(t) < 0, f_k \geq f_R, \\ f_k, & \text{(Estado III) para } \delta_T(t) < 0, \dot{\delta}_T(t) \geq 0, \\ 0, & \delta_T(t) \geq 0 \text{ (Estado 0)} \end{cases} \quad \text{com } \begin{cases} f_k = \beta_{imp} [|\delta(t)| - \delta_s(t)]^{1.5}, \\ f_c = c_H(t) \dot{\delta}_T(t), f_R = -\text{sgn}(\delta_T(t)) R \end{cases} \quad (24)$$

Posteriormente, Bamer et al. (Bamer et al., 2019) incluíram no modelo anterior uma diminuição da rigidez em função da distância de deslizamento agora atribuída a cada estrutura. O modelo pode então ser representado pelas Figuras 8a e 8b, respetivamente, para o modelo não-linear viscoelástico de Hertzdamp e Jankowski.

Khatami et al. (Khatami et al., 2019) propuseram uma fórmula eficaz para o amortecimento de impacto para o modelo de impacto não-linear viscoelástico (Figura 6). A sua precisão foi avaliada com base em abordagens que incluem considerações baseadas na energia do impacto, simulações numéricas e comparações com resultados experimentais,

$$\xi_{imp} = \frac{(1 - CR)}{CR^{(\alpha+0.204)} + 3.351\pi CR} CR^{0.204} \quad \text{onde } \alpha = 1.05 CR^{0.653} \quad (25)$$

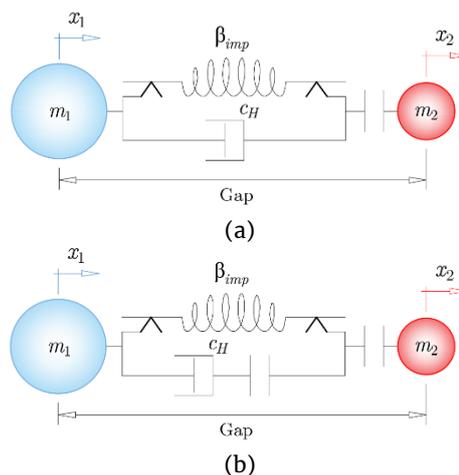


Fig. 8 | Modelo de impacto não-linear viscoelástico com dois elementos de atrito seco.

2.3. Modelos de impacto bidimensionais (2D)

A maioria dos modelos de impacto na literatura são 1D e, portanto, não têm a capacidade de simular de forma eficaz os impactos estruturais entre estruturas tridimensionais (Figura 9), que poderão possuir assimetrias de massa ou de rigidez e/ou estarem sujeitas a excitações sísmicas bidirecionais.

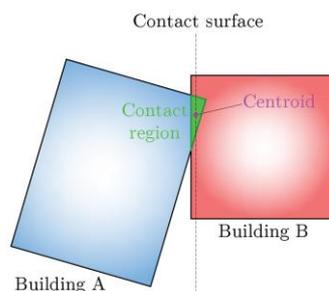


Fig. 9 | Vista em planta de um impacto entre dois edifícios 3D.

Uma modelação eficiente de impactos entre estruturas 3D terá que ser capaz de ter em conta, além das forças normais (impacto central - 1D), as forças tangenciais (impacto oblíquo - 2D), considerando as condições de aderência e deslizamento relacionadas com as forças de atrito. Adicionalmente, as características espaciais das estruturas deverão ser consideradas de modo a obter a localização do impacto e a geometria do local da colisão, característica que não é considerada nos modelos anteriores e é dada como pré-determinada. Isto revela-se importante, pois além das assimetrias inerentes em planta, as forças de impacto serão geralmente excêntricas (não coincidentes com a linha de ação do centro de massa) e, portanto, suscetíveis de causar esforços de torção e corte excepcionais e não contabilizados em projeto.

Quando uma abordagem 3D é usada na investigação de impactos de edifícios sujeitos a sismos, surge a ideia de um elemento de contacto 2D, conforme representado na Figura 10, considerando a presença de uma componente normal e tangencial de uma força de contacto (Komodromos et al., 2007b, Polycarpou et al., 2012, 2013, 2014).

A complexidade na modelação de colisões em edifícios 3D aliada ao excessivo esforço computacional, dificulta o uso deste tipo de abordagem, resultando na quantidade limitada de material de investigação na literatura, particularmente, em termos experimentais.

No entanto, alguns estudos foram realizados tendo em conta a modelação de impactos entre estruturas 3D sujeitas a ações sísmicas, considerando todas ou algumas das características intrínsecas

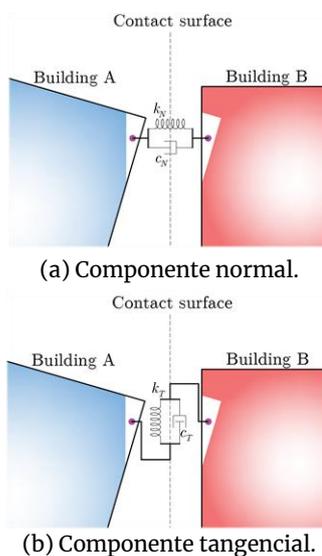


Fig. 10 | Modelo de impacto 2D entre estruturas 3D.

a este problema e mencionadas anteriormente (e.g., Leibovich et al., 1996, Papadrakakis et al., 1996, Zhu et al., 2002, Mouzakis et al., 2004, Wang et al., 2008, 2009, Wei et al., 2009, Karayannis e Naoum, 2017a, 2017b, 2018, Ambili et al., 2020).

Também foram realizados estudos recorrendo ao método de elementos finitos (MEF) para o estudo de impacto entre modelos 3D analisando a resposta lateral e à torção de estruturas sujeitas a excitações sísmicas (Jankowski, 2008, 2012, Pant e Wijeyewickrema, 2012).

Todavia, é possível verificar que o uso dos modelos de impacto 1D apresentados, são usados de uma forma ou de outra para modelar os impactos em 2D centrais ou excêntricos (Figura 10), entre estruturas 3D sujeitas a ações uni- ou bidirecionais.

Polycarpou et al. (Polycarpou et al., 2012, 2013, 2014) propôs uma forma eficiente de simular impactos 3D entre edifícios induzidos por sismos com base no trabalho de Komodromos et al. (Komodromos et al., 2007b), que utilizou a capacidade única do método discreto de elementos (MED) capaz de reconhecer contactos entre corpos considerados infinitamente rígidos e cuja deformação se deve mais a deslocamentos relativos do que a deformações de corpos distintos. Os autores consideraram as forças tangenciais e de atrito durante o impacto, as propriedades do material e a geometria da área de contacto sem a necessidade de determinar previamente a localização do impacto. A interpenetração dos edifícios constitui agora uma área em vez de uma distância. As forças de impacto serão aplicadas no centroide dessa região de intersecção e o plano de contacto é definido como ortogonal ao piso dos edifícios (assumidos como rígidos) e a direção depende da geometria do polígono de intersecção. O modelo provou fornecer bons resultados e próximos de resultados obtidos com softwares comerciais.

3- CONCLUSÕES

Com base nos estudos apresentados é possível verificar a evolução dos modelos de impacto, cujas principais modificações são focadas nos parâmetros de rigidez e rácio de amortecimento de impacto, conduzindo a modelos de impacto, que apesar de serem simples estão cada vez mais precisos. Contudo, a modelação de um impacto estrutural é bastante complexa e mais investigação e estudos experimentais são necessários, para obter resultados mais fiáveis e adaptados às diferentes condições das estruturas envolvidas nas colisões.

O estudo de impactos 3D é um campo de investigação relevante e ainda pouco estudado. Apesar de existirem modelações eficazes e coerentes dos impactos entre estruturas 3D, poucos estudos paramétricos e experimentais foram realizados.

O presente estudo apresenta, portanto, um leque de possibilidades de modelação de impactos estruturais, tendo em conta as suas características e as diversas condições das estruturas intervenientes e sujeitas a ações sísmicas.

AGRADECIMENTOS

Este artigo foi desenvolvido no âmbito do doutoramento, em curso, do primeiro autor, e financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através da bolsa de doutoramento SFRH/BD / 139570/2018 no âmbito do programa POCH (N2020 - P2020), e financiado pelo Fundo Social Europeu (FSE) e fundos nacionais do MCTES. Este trabalho também está integrado nas atividades de I&D do Instituto de I&D em Estruturas e Construções (*CONSTRUCT*), apoiado financeiramente pelo Fundo Base UIDB/04708/2020 através de fundos nacionais da FCT/MCTES (PIDDAC).

REFERÊNCIAS

- R. Jankowski, e S. Mahmoud, *Earthquake-Induced Structural Pounding*, Switzerland: Springer, 2015.
- Goldsmith, W. *Impact: The Theory and Physical Behaviour of Colliding Solids*. Edward Arnold (Publishers) LTD: London. 1960.
- R. Jankowski, "Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 39, pp. 349-354, 2010.
- M. Mahmoud, K. Choong, e R. Jankowski, "Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 121, pp. 135-150, 2019.
- K. Johnson, "Contact Mechanics," Cambridge university press, 1987.
- H. Hertz, "Über die Berührung fester elastischer Körper (On the contact of elastic solids)," *J. für die Reine und Angewandte Mathematik*, vol. 29, pp. 156-171, 1881. (in German)
- J. Wolf, e P. Skrikerud, "Mutual pounding of adjacent structures during earthquakes," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 57, pp. 253-275, 1980.
- S. Anagnostopoulos, "Pounding of buildings in series during earthquakes," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 16, pp. 443-456, 1988.
- S. Anagnostopoulos, "Equivalent viscous damping for modeling inelastic impacts in earthquake pounding problems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 33, pp. 897-902, 2004.

- P. Komodromos, P. Polycarpou, L. Papaloizo, e M. Phocas, "Response of seismically isolated buildings considering poundings," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 36, pp. 1605-1622, 2007a.
- R. Valles, e A. Reinhorn, "Evaluation, prevention and mitigation of pounding effects in building structures," Technical Report NCEER-97-0001, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, USA, 1997.
- S. Mahmoud, "Modified linear viscoelastic model for elimination of the tension force in the linear viscoelastic," in *The Fourteenth World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China, 2008.
- K. Ye, L. Li, e H. Zhu, "A modified Kelvin impact model for pounding simulation of base-isolated building with adjacent structures," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 8, pp. 433-446, 2009a.
- D. Pant, A. Wijeyewickrema, e T. Ohmachi, "Three dimensional nonlinear analysis of seismic pounding between multi-story reinforced concrete buildings," in *Proceedings of the Seventh International Conference on Urban Earthquake Engineering (7CUEE) and Fifth International Conference on Earthquake Engineering (5ICEE)*, Vol II: 1829-1840, 2010a.
- D. Pant, A. Wijeyewickrema, e T. Ohmachi, "Seismic Pounding between Reinforced Concrete Buildings: A Study using two recently proposed Contact Element Models," in *Proceeding of the 14th European Conference on Earthquake Engineering*, European Conference on Earthquake Engineering, Republic of Macedonia, 2010b.
- S. Mahmoud, e R. Jankowski, "Modified linear viscoelastic model of earthquake-induced structural pounding," *Iranian Journal of Science and Technology*, vol. 35, no. C1, pp. 51-62, 2011.
- H. Lankarani, e P. Nikraves, "A Contact Force Model With Hysteresis Damping for Impact Analysis of Multibody Systems," *Journal of Mechanical Design*, vol. 112, pp. 369-376, 1990.
- H. Lankarani, e P. Nikraves, "Continuous Contact Force Models for Impact Analysis in Multibody Systems," *Nonlinear Dynamics*, vol. 5, pp. 193-207, 1994.
- S. Muthukumar, "A contact element approach with hysteresis damping for the analysis and design of pounding in bridges," Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, EUA, 2003.
- S. Muthukumar, e R. DesRoches, "A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 35, pp. 811-829, 2006.
- R. Jankowski, "Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 34, pp. 595-611, 2005.
- R. Jankowski, "Analytical expression between the impact damping ratio and the coefficient of restitution in the non-linear viscoelastic model of structural pounding," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 35, pp. 517-524, 2006.
- K. Ye, L. Li, e H. Zhu, "A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 38, pp. 1135-1142, 2009b.
- H. Naderpour, R. Barros, e S. Khatami, "A new model for calculating impact force and energy dissipation based on the CR-factor and impact velocity," *Scientia Iranica A*, vol. 22, pp. 59-68, 2015.

- H. Naderpour, R. Barros, R. Khatami, e R. Jankowski, "Numerical Study on Pounding between Two Adjacent Buildings under Earthquake Excitation," Hindawi Publishing Corporation: Shock and Vibration, vol. 2016, 2016.
- F. Bamer, "A Hertz-pounding formulation with a nonlinear damping and a dry friction element," Acta Mechanica, vol. 229, pp. 4485-4494, 2018.
- F. Bamer, e B. Markert, "A nonlinear visco-elastoplastic model for structural pounding," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 47(12), pp. 2490-2495, 2018.
- F. Bamer, N. Strubel, J. Shi, e B. Markert, "A visco-elastoplastic pounding damage formulation," Engineering Structures, vol. 197, 2019.
- S. Khatami, H. Naderpour, R. C. Barros, A. Jakubczyk-Galczyńska, e R. Jankowski, "Effective Formula for Impact Damping Ratio for Simulation of Earthquake-induced Structural Pounding," Geosciences, MDPI, vol. 9, no. 8: 347, 2019.
- P. Komodromos, L. Papaloizou, e P. Polycarpou, "Simulation of the response of ancient columns under harmonic and earthquake excitations", Engineering Structures, vol. 30, pp. 2154-2164, 2007b.
- P. Polycarpou, e P. Komodromos, "A methodology for an efficient three-dimensional (3D) numerical simulation of earthquake-induced pounding of buildings", Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE), Lisbon, Portugal, 2012.
- P. Polycarpou, e P. Komodromos, "On the numerical simulation of impacts for the investigation of earthquake-induced pounding of buildings", The Tenth International Conference on Computational Structures Technology (CST2010), Valenthia, Spain, 2013.
- P. Polycarpou, L. Papaloizou, e P. Komodromos, "An efficient methodology for simulating earthquake-induced 3D pounding of buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 43, pp. 985-1003, 2014.
- E. Leibovich, A. Rijtenberg, e DZ. Yankelevsky, "On eccentric seismic pounding of symmetric buildings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 25, pp. 219-233, 1996.
- M. Papadrakakis, C. Apostolopoulou, A. Zacharopoulos, e S. Bitzarakis, "Three-dimensional simulation of structural pounding during earthquakes", Journal of Engineering Mechanics, vol. 122, pp. 423-431, 1996.
- P. Zhu, M. Abe, e Y. Fujino, "Modelling three-dimensional non-linear seismic performance of elevated bridges with emphasis on pounding of girders", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vo. 31, pp. 1891-1913, 2002.
- H. Mouzakis, e M. Papadrakakis, "Three dimensional nonlinear building pounding with friction during earthquakes", Journal of Earthquake Engineering, vol. 8(1), pp. 107-132, 2004.
- LX. Wang, e KT. Chau, "Chaotic Seismic Torsional Pounding between two Single-story Asymmetric Towers", The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, Beijing, China, 2008.
- LX. Wang, e KT. Chau, XX. Wei, "Numerical simulations of nonlinear seismic torsional pounding between two singlestory structures", Advances in Structural Engineering; vol. 12(1), pp. 87-101, 2009.

- XX. Wei, LX. Wang, e KT. Chau, “Nonlinear seismic torsional pounding between an asymmetric tower and a barrier”, *Earthquake Spectra*; vol. 25(4), pp. 899–925.
- CG, Karayannis, e MC. Naoum, “Inter-story pounding and torsional effect due to interaction between adjacent multistory RC buildings”, In: *COMPDYN, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece, 15–17 June, 2017a*.
- CG, Karayannis, e MC. Naoum, “Torsion effect due to asymmetric pounding between multistory RC buildings”, In: *COMPDYN, 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Greece, 15–17 June, 2017b*.
- CG, Karayannis, e MC. Naoum, “Torsional behavior of multistory RC frame structures due to asymmetric seismic interaction”, *Engineering Structures*, vol. 163, pp. 93–111, 2018.
- P. Ambili, VN. Krishnachandran, e Katta Venkataramana, “Seismic pounding between adjacent RC buildings with asymmetric alignment”, In: Dasgupta K., Sudheesh T.K., Praseeda K.I., Unni Kartha G., Kavitha P.E., Jawahar Saud S. (eds) *Proceedings of SECON 2020. SECON 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 97. Springer, 2020.
- R. Jankowski, “Non-linear FEM analysis of earthquake-induced pounding between the main building and the stairwaytower of the Olive View Hospital”, *Engineering Structures*; vol. 31(8), pp. 1851–1864, 2009.
- R. Jankowski, “Non-linear FEM analysis of pounding-involved response of buildings under nonuniform earthquake excitation”, *Engineering Structures*; vol. 37, pp. 99–105, 2012.
- DR. Pant, e AC. Wijeyewickrema, “Structural performance of a base-isolated reinforced concrete building subjected to seismic pounding”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 41(12), pp. 1709–1716, 2012.