

## ABSTRACT

The work presented here was accomplished at the Department of Civil Engineering of University of Minho. This work involves detailed numerical studies intended to better understand the blast response of masonry structures, develops strain dependent constitutive material plasticity model for masonry, and addresses iso-damage curves for typical masonry infill walls in Portugal under blast with different loading conditions, which can be adopted for practical use in the case of enclosures.

A bomb explosion near a building, in addition to a great deal of casualties and losses, can cause serious effects on the building itself, such as noticeable damage on internal and external frames, collapsing walls or shutting down of critical life safety systems. Until Oklahoma City bombing in 1995, studies dealing with the blast behavior of structures were a field of limited interest in the civil engineering community. After this terrorist attack, a great deal of effort has been done to better understand the blast response of the structures and devise solutions to reduce destructive damages and casualties due to such devastating loads. Moreover, the studies on the influence of the high strain rate on mechanical characteristics of construction materials such as steel and concrete have been carried out intensively. Unfortunately, despite the high vulnerability of masonry structures against high strain rates, such investigations on masonry structures and material properties are still scarce. In this regard, conducting experiments and validating numerical models with field test data leads to a better understanding of the blast response of masonry walls and the relevance of the different masonry material properties, which, consequently, results in innovation of strengthening techniques and of assessment and design methods.

The framework of blast loading and its effect on structures is briefly revised and different expressions for prediction of blast pressure parameters are illustrated. A brief review of the recent characterization of the dynamic masonry properties, which resulted in derivation of dynamic increase factors (DIF) is presented. Performance of masonry walls against blast loading regarding experimental activities are addressed subsequently. Moreover, a series of numerical simulation of masonry structures subjected to blast loads were performed along with parametric studies to evaluate the effectiveness of most relevant parameters on the global blast response of the structures. The prominent parameters involved in parametric studies were distinguished and their effectiveness on the blast response of masonry walls is put forward. Different failure criteria have been proposed to estimate the damage level of masonry walls subjected to blast loading. The damage criteria utilized in both numerical and experimental studies are also introduced in detail.

The present study proposes a dynamic 3D interface model that includes non-associated flow rule and high strain rate effects, implemented in the finite element (FE) code ABAQUS as a user subroutine. The model capability is validated with numerical simulation of unreinforced block work masonry walls subjected to low velocity impact. The results obtained are compared with field test data and good agreement is found.

Subsequently, a comprehensive parametric analysis is accomplished with different joint tensile strengths and cohesion, and wall thickness to evaluate the effect of the parameter variations on the impact response of masonry walls.

Furthermore, a new strain rate dependent anisotropic constitutive material continuum model is developed for impact and blast applications in masonry, with validation using the high strain rate response of masonry walls. The present model, implemented in FE code ABAQUS as a user subroutine, adopted the usual approach of considering different yield criteria in tension and compression, given the different failure mechanisms. These criteria are plasticity based, obey a non-associated flow rule, are numerically stable and inexpensive, and are characterized by a few material input parameters. The analysis of two unreinforced block work masonry parapets and a masonry brick work infill wall subjected to high strain rate loads is carried out to validate the capability of the model. A comparison is done between the numerical predictions and test data, and good agreement is noticed. Next, a parametric study is conducted to evaluate the influence of the most likely dominant parameters along the three orthogonal directions and of the wall thickness on the global behavior of masonry walls.

Iso-damage curves are given for tested masonry infill walls according to three different types of typical Portuguese masonry infill walls, also with three different thicknesses. By performing multiple analyses, the pressure-impulse (P-I) diagrams are obtained under different loading conditions, which can be used for design purposes.

Finally, the new continuum plasticity model is taken into engineering applications to solve real problems. The full-scale numerical simulation of the blast response of Al-Askari holy shrine is considered to practice and validate the model capability. The numerical results including the failure of the dome, roof, minarets and side facades are well predicted compared with the reference data. Besides the real explosion, two different scenarios are also defined to estimate the most likely high strain rate response of the shrine under different explosions producing different pressure profiles.

**Keywords:** Blast loading; Block work masonry wall; High strain rate response; Interface model; Anisotropic continuum model; Out-of-plane behavior; Dynamic Increase Factor; Numerical simulation; Masonry infill wall; FE code ABAQUS; Pressure-Impulse diagrams; Al-Askari shrine; Engineering application.

## RESUMO

O trabalho aqui apresentado foi realizado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Este trabalho envolve estudos numéricos detalhados que pretendem entender melhor a resposta às explosões das estruturas de alvenaria, desenvolver modelos constitutivos para a alvenaria no âmbito da teoria da plasticidade, e abordar curvas de iso-dano para paredes típicas de alvenaria de enchimento em Portugal sob explosão com diferentes condições de carga, que possam ser usadas no projeto das ensolventes.

A explosão de uma bomba perto de um edifício, além de uma grande quantidade de vítimas e perdas materiais, pode causar efeitos graves sobre o edifício em si, tais como danos visíveis nos pórticos internos e externos, colapso de paredes ou encerramento de sistemas críticos de apoio à vida. Até ao atentado de Oklahoma City, em 1995, os estudos sobre o comportamento á explosão de estruturas eram um tema de interesse limitado na comunidade de engenharia civil. Após este ataque terrorista, um grande esforço tem sido feito para entender melhor a resposta das estruturas a explosões e para criar soluções para reduzir os danos e perdas humanas devido a essas ações devastadoras. Além disso, estudos sobre a influência da velocidade de deformação sobre as características mecânicas dos materiais de construção tais como aço e betão foram levados a cabo com grande desenvolvimento. Infelizmente, apesar da alta vulnerabilidade das estruturas de alvenaria contra as elevadas velocidades de deformação, a investigação sobre as estruturas de alvenaria e as propriedades dos seus materiais são ainda escassos. Neste sentido, a realização de experiências e a validação de modelos numéricos com os resultados de ensaios levam a uma melhor compreensão da resposta de paredes de alvenaria a explosões e permitem identificar a relevância das diferentes propriedades dos materiais de alvenaria, o que, conseqüentemente, resulta em inovação de técnicas de reforço e de avaliação de segurança e ferramentas de projeto.

O estado da arte sobre ações de explosão e o seu efeito sobre as estruturas é brevemente revisto, incluindo diferentes expressões para definição dos parâmetros de pressão de explosão. Uma breve revisão da recente caracterização das propriedades dinâmicas de alvenaria resultou na caracterização do fator de aumento dinâmico (DIF). Em seguida, aborda-se o desempenho de paredes de alvenaria contra ações de explosão de um ponto de vista da atividade experimental. Além disso, foi realizada uma série de simulações numéricas de estruturas de alvenaria sujeitas a ações de explosão, juntamente com estudos paramétricos, para avaliar a eficácia dos principais parâmetros sobre a resposta da explosão global das estruturas. Os parâmetros mais relevantes envolvidos em estudos paramétricos foram distinguidos e o seu efeito na resposta de paredes de alvenaria a explosões é apresentada. Vários critérios de rotura têm sido propostos para estimar o nível de dano de paredes de alvenaria sujeitas a carregamento de explosões. Os critérios utilizados nos estudos de danos, tanto numéricos quanto experimentais, são apresentados em detalhe.

O presente estudo propõe um modelo de interface 3D dinâmica que inclui regra de escoamento não-associado e efeitos da velocidade de deformação, implementado no código de elementos finitos (FE) ABAQUS como uma sub-rotina do utilizador. A capacidade do modelo é validado com simulações numéricas de paredes de alvenaria não armada submetidos a impacto a baixa velocidade. Os resultados obtidos são comparados com os dados de ensaios e boa concordância é encontrada. Subsequentemente, uma análise paramétrica abrangente é realizado com diferentes resistências à tração comum e coesão, e espessura da parede, para avaliar o efeito das variações de parâmetros em resposta a impactos nas paredes de alvenaria.

Além disso, um modelo constitutiva contínuo do material dependendo da velocidade de deformação é desenvolvido para aplicações de impacto e explosão em alvenaria, com validação usando a resposta de paredes de alvenaria a velocidades elevadas de deformação. No presente modelo, implementado no código FE ABAQUS como uma sub-rotina do utilizador, foi adotado o método habitual de considerar diferentes critérios de rotura em tração e compressão, tendo em conta os diferentes mecanismos de falha. Estes critérios são baseados na teoria da plasticidade, obedecem a uma regra de escoamento não-associado, são numericamente estáveis e de baixo custo, e são caracterizados por pouco parâmetros de entrada do material. A análise de dois parapeitos não armados de alvenaria e uma parede de enchimento de alvenaria de tijolo submetidos a cargas de alta velocidade de deformação é realizado para validar a capacidade do modelo. A comparação é feita entre as previsões numéricas e ensaios, com bons resultados. Em seguida, é realizado um estudo paramétrico para avaliar a influência dos parâmetros dominantes mais suscetíveis ao longo das três direções ortogonais, e da espessura da parede sobre o comportamento global das paredes de alvenaria.

As curvas de iso-danos são obtidas para três tipos típicos de parede de alvenaria de enchimento em Portugal, com três espessuras diferentes. Com recurso a várias análises, os diagramas pressão-impulso (PI) são obtidos para diferentes paredes de enchimentos de alvenaria sob diferentes condições de carga, o que permite o dimensionamento em projeto corrente.

Finalmente, o novo modelo de plasticidade contínuo é utilizado em aplicações de engenharia para resolver problemas reais. A simulação numérica em escala real da resposta à explosão do santuário sagrado de Al- Askari é considerado para a prática e validação da capacidade do modelo. Os resultados numéricos, incluindo o colapso da cúpula, telhado, minaretes e fachadas laterais estão a prever bem em comparação com os dados de referência. Para além da explosão real, dois diferentes cenários são também definidos para estimar a resposta mais provável da alta taxa de deformação do santuário sob diferentes explosões, a produzir perfis de pressão diferentes.

**Palavras-chave:** Ações de explosão; Paredes de alvenaria; Elevada velocidade de deformação; Modelo contínuo anisotrópico; Comportamento fora do plano; Fator de aumento dinâmico; Simulação numérica; Programe MEF ABAQUS; Diagramas de pressão-impulso; Santuário Al-Askari; aplicação Engenharia.