

ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL DE UM PÓRTICO METÁLICO SUBMETIDO À CARGAS DE TERREMOTO

ARLINDO PIRES LOPES¹

¹Engenheiro Civil, Professor e Ph.D. em Engenharia de Estruturas, Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Manaus-AM, alopes@uea.edu.br

Apresentado no
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC'2018
21 a 24 de agosto de 2018 – Maceió-AL, Brasil

RESUMO: Este trabalho apresenta uma análise numérico-experimental, através de simulação híbrida, de um novo pórtico metálico, com ausência de contraventamentos, para resistir carregamentos oriundos de terremotos. O pórtico metálico em questão é mais resistente do que pórticos metálicos tradicionais com contraventamentos. O sistema estrutural consiste de uma combinação entre pórticos rígidos para cargas de gravidade e pilares duplos, conectados entre si através de dissipadores de energia, com o intuito de resistir cargas de terremoto. Os dissipadores de energia são vigas metálicas que podem ser substituídos após um determinado terremoto. O cerne deste trabalho consistiu de uma análise numérico-experimental utilizando a simulação híbrida: combinação de um experimento físico, de parte da edificação, com o modelo numérico do restante do prédio. A simulação híbrida permite a análise experimental da parte desconhecida do prédio, juntamente com a análise da parte do prédio onde o comportamento estrutural é bem conhecido, através de elementos finitos. A parte experimental consistiu de um pórtico metálico com dois andares e um vão, em escala real, enquanto que o restante do prédio foi modelado numericamente. Os resultados demonstraram a viabilidade de um novo sistema estrutural dúctil o suficiente para resistir cargas de terremoto.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação híbrida, pórtico metálico, terremoto, elementos finitos.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSES OF A STEEL FRAME SUBJECTED TO EARTHQUAKE LOADING

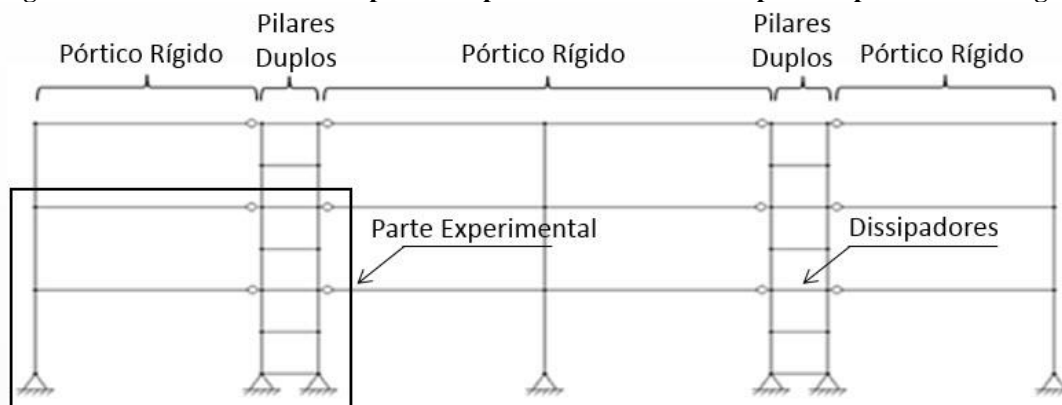
ABSTRACT: This work presents a new brace-free lateral structural steel system intended for rapid return to occupancy performance level. This frame is more resilient under a design level earthquake than the conventional approaches. The structural system consists of moment frames for gravity that combines with closely spaced dual columns interconnected with bolted links for the lateral system. The links are sacrificial and intended to be replaced following a design level earthquake. The centerpiece of this work was a unique full-scale experiment using hybrid testing; a combination of physical test of a critical subsystem tied to a numerical model of the building frame. Hybrid testing allows for full scale study at the system level accounting for the uncertainties via experimental component and having the ability to model more conventional behavior through numerical simulation. The experimental subsystem consisted of a two-story frame with a single bay while the remainder of the building was numerically modeled. Results demonstrated a viable system under cyclic and seismic loading, offering a ductile structural system with the ability to rapidly return to occupancy.

KEYWORDS: Hybrid simulation, steel frame, earthquake, finite elements.

INTRODUÇÃO

Pórticos metálicos sem contraventamentos são os sistemas estruturais escolhidos quando se deseja acomodar grandes aberturas impostas pelo projeto de arquitetura. Esses sistemas estruturais têm a finalidade de atingir uma ductilidade lateral quando submetidos a carregamentos de terremotos através do escoamento de vigas e pilares, e suas conexões devem ser capazes de permanecer intactas, quando submetidas à vários ciclos de rotação inelástica. O pórtico metálico apresentado neste trabalho é um novo sistema estrutural capaz de resistir a cargas dinâmicas, ou seja, cargas provenientes de terremotos. O mesmo foi desenvolvido pelo autor deste trabalho na *Portland State University*, nos Estados Unidos, e testado experimentalmente na *University of California at Berkeley*, também nos Estados Unidos. O objetivo do pórtico metálico consiste em resistir cargas de terremoto, com danos localizados nos dissipadores de energia, que são removíveis, e, posteriormente, ter um retorno rápido de ocupação do prédio, sem a necessidade de demolição total do mesmo. Ou seja, os pilares da edificação permanecem no regime linear elástico, sem dano algum. O sistema estrutural consiste de pórticos rígidos e pilares duplos conectados entre si através de dissipadores de energia, conforme mostrado na Figura 1. O pórtico metálico analisado possui as seguintes características: Pilares W14x132, Vigas W16x57, Dissipadores de energia W10x45, comprimento dos vãos 8m, comprimento dos dissipadores 1,5m e pé-direito 3m. Material utilizado foi o aço A992. Os pórticos rígidos têm a finalidade de garantir a resistência estrutural quando os carregamentos permanentes são aplicados na estrutura, enquanto que os pilares duplos, interligados através dos dissipadores, são responsáveis pela resistência lateral do sistema. Os dissipadores de energia são dimensionados para escoar, deformar plasticamente e serem removíveis. A habilidade deste sistema estrutural no que diz respeito ao retorno rápido de ocupação, depende do comportamento dos dissipadores de energia. Este sistema também oferece vantagens arquitetônicas, uma vez que pode vencer grandes vãos, ao contrário dos sistemas contraventados.

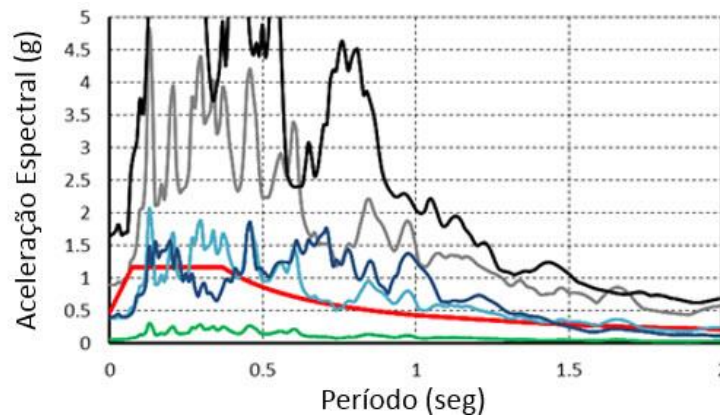
Figura 1 – Pórtico metálico com pilares duplos conectados entre si por dissipadores de energia.



ANÁLISE NUMÉRICA

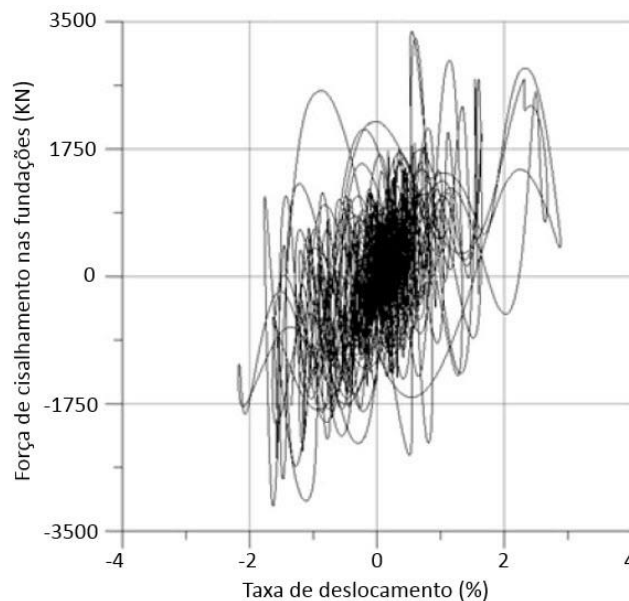
A análise numérica do sistema estrutural teve como objetivo obter os esforços internos da estrutura, tais como: momento fletor, esforço cortante e esforço axial, assim como suas respectivas velocidades, acelerações e deslocamentos, além de obter as frequências naturais e modos de vibração da estrutura. A análise numérica subsidiou a confecção do pórtico metálico que fora testado experimentalmente, no sentido de obter o conhecimento dos esforços e deslocamentos máximos que foram impostos nos atuadores hidráulicos. A análise numérica consistiu de quatro etapas: análise linear estática, análise não-linear estática, conhecida também como pushover, análise dinâmica de vibrações livres e análise dinâmica de vibrações forçadas. A Figura 2 mostra o gráfico aceleração espectral versus período dos terremotos utilizados na análise de vibrações forçadas. Evidentemente, que antes dessa etapa fora realizado uma análise preliminar considerando o método da carga equivalente com o objetivo de se obter os esforços de cisalhamento nas fundações do sistema estrutural.

Figura 2 – Aceleração espectral versus Período dos terremotos utilizados durante a análise estrutural.



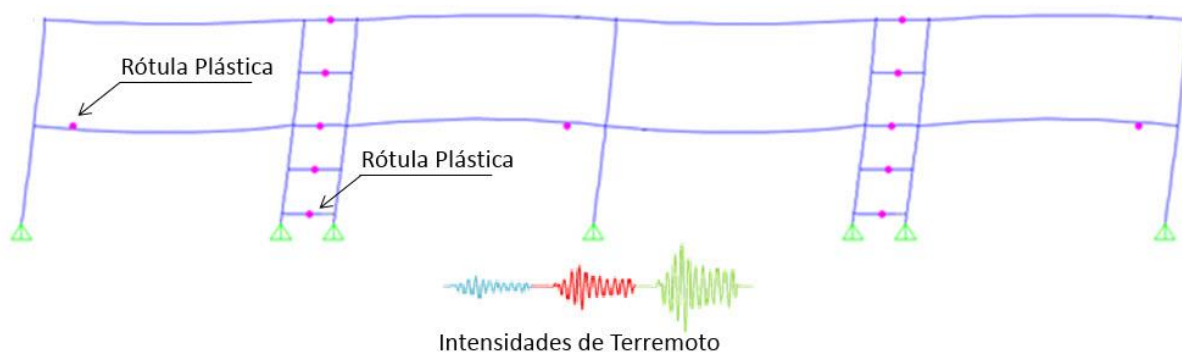
Uma vez obtido as respostas do sistema estrutural, tornou-se necessário dimensionar o pórtico metálico, de acordo com as normas vigentes, com o intuito de se ter uma estrutura a ser testada experimentalmente. As limitações do laboratório foram levadas em consideração assim como o número de canais com o fito de instalar os sensores de deformações, deslocamentos e esforços. A Figura 3 indica o esforço de cisalhamento esperado, nas fundações, para a última intensidade de terremoto.

Figura 3 – Força de cisalhamento versus taxa de deslocamento para a última intensidade de terremoto.



O sistema estrutural aqui apresentado fora dimensionado para formar rótulas plásticas, primeiramente, nos dissipadores de energia, com a primeira rótula plástica sendo a mais próxima às fundações, sendo propagada ao longo da altura do pórtico metálico, onde a quinta rótula plástica encontra-se na altura do segundo andar do pórtico. Após todos os dissipadores de energia terem formado suas respectivas rotas plásticas, as vigas metálicas dos vãos sofrerão algum dano dependendo da intensidade do terremoto. Observe que durante a análise numérica, os pilares metálicos foram dimensionados para não sofrerem danos durante o terremoto, ou seja, os pilares permaneceram no regime linear elástico. A formação de rótulas plásticas pode ser visualizada de acordo com a Figura 4. A formação de rótulas de plásticas indica que, inicialmente, os dissipadores sofrerão os danos estruturais do terremoto e, dependendo da intensidade do terremoto, as vigas metálicas também atuarão como dissipadores de energia, evitando, assim, danos nos pilares.

Figura 4 – Formação de rótulas plásticas durante a análise estrutural.



PROGRAMA EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO HÍBRIDA

O programa experimental fora realizado na *University of California at Berkeley* e durou dois anos para ser executado. A Figura 5 mostra a estrutura na qual fora submetida à cargas de terremoto. Dois atuadores hidráulicos por andar foram conectados à parte experimental. Os dissipadores de energia foram dimensionados para formar rótulas plásticas de cisalhamento e o sistema estrutural foi capaz de resistir os deslocamentos máximos previstos em norma. Para a avaliação do comportamento estrutural do sistema, três intensidades de terremotos foram utilizadas na simulação híbrida: 50%, 10% e 2% de ocorrer em 50 anos na cidade de Seattle, Washington, Estados Unidos. O sistema estrutural exibiu três tipos de níveis de performance: linear elástico, retorno rápido de ocupação, onde apenas os dissipadores de energia sofreram danos, e colapso progressivo, onde as vigas dos vãos também sofreram danos. O sistema estrutural foi dimensionado tanto com conexões rígidas quanto com conexões rotuladas. O apoio das fundações fora considerado como do segundo gênero para evitar a formação de rótulas plásticas nos pilares. A simulação híbrida fora utilizada uma vez que a escala real da estrutura foi mantida. O modelo numérico serviu de entrada de dados para os atuadores hidráulicos e a resposta experimental da estrutura (modelo experimental), em termos de esforços e deslocamentos, servia de entrada de dados para o modelo numérico, fazendo um loop conforme indicado na Figura 6. O primeiro experimento consistiu em testar o pórtico metálico com 05 (cinco) dissipadores os quais foram removidos após a finalização do experimento. Para o segundo experimento, o pórtico foi testado com 03 (três) novos dissipadores.

Figura 5 – Pórtico metálico testado experimentalmente na *University of California at Berkeley*.

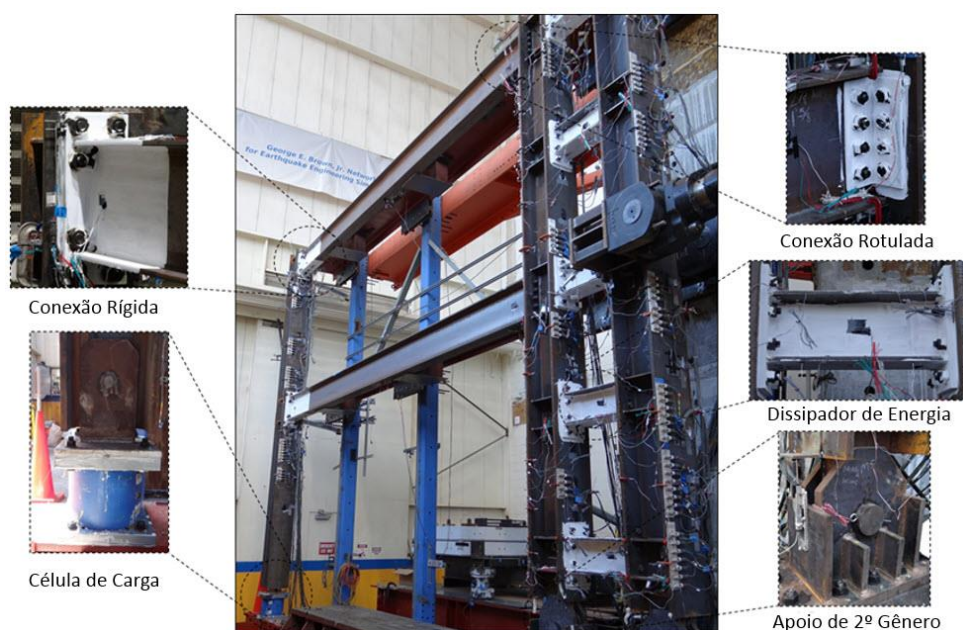
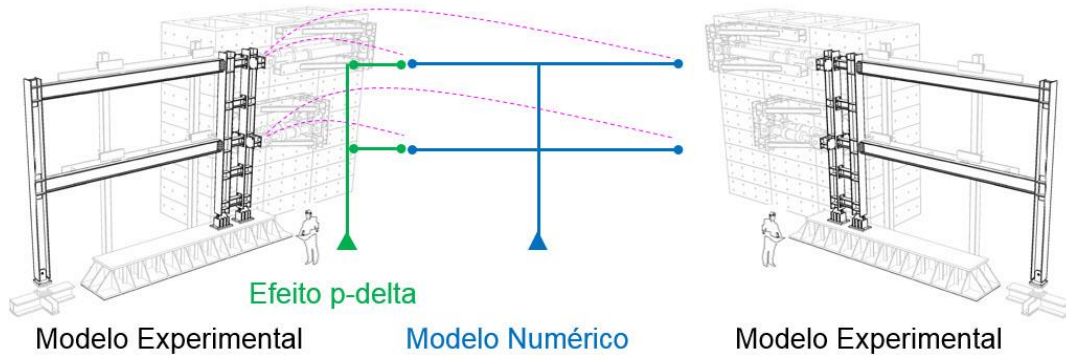


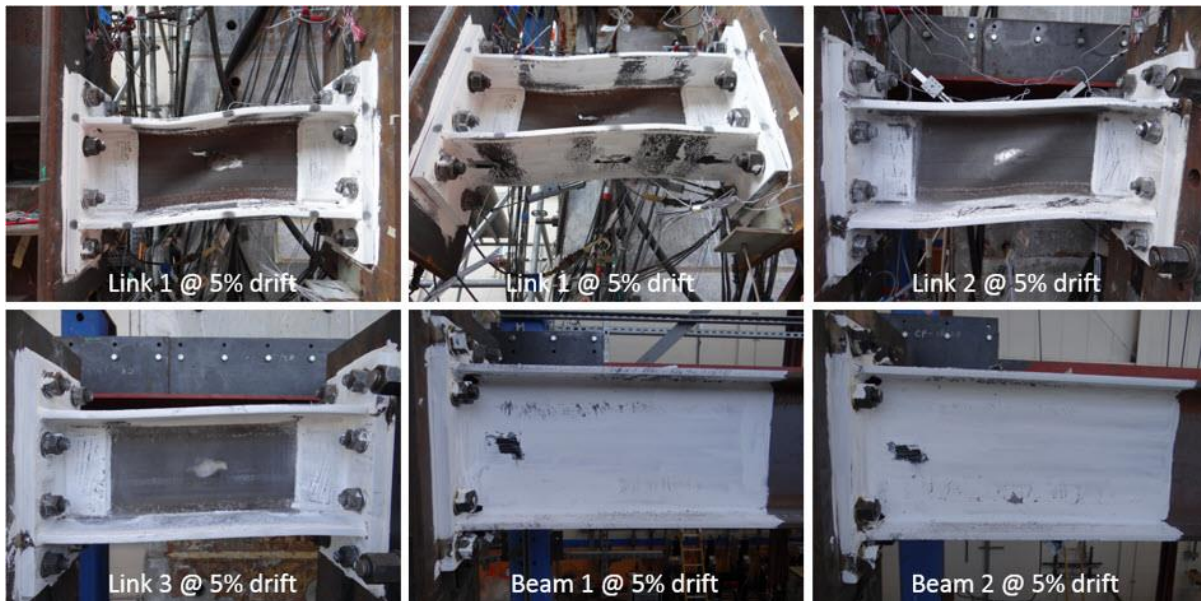
Figura 6 – Simulação híbrida considerando os efeitos de não-linearidade (p-delta).



RESULTADOS

Os danos causados tanto nos dissipadores de energia quanto nas vigas metálicas, mostrados na Figura 7, seguiram a sequência de rótulas plásticas mostrada na Figura 4, o que validou o sistema estrutural, uma vez que os resultados numérico-experimentais foram os mesmos. Os dissipadores puderam ser removidos facilitando, assim, o retorno rápido de ocupação da edificação. Foi observado tanto nos resultados numéricos quanto nos experimentais, três tipos de performance: linear elástico, retorno rápido de ocupação, onde apenas os dissipadores de energia sofreram danos, e colapso progressivo, onde as vigas dos vãos também sofreram danos.

Figura 7 – Danos causados nos dissipadores de energia e vigas metálicas.



CONCLUSÕES

Os resultados mostraram, ainda, que os pilares não sofreram danos e permaneceram no regime linear elástico. Devido aos esforços internos nas conexões rígidas, propõe-se conexões semi-rígidas na conexão pilar-viga, haja vista que não houve dano algum nas referidas conexões. As conexões pilar-dissipadores fizeram com que a deformação de cisalhamento migrasse para a região central do dissipador, formando, assim, a rótula plástica de cisalhamento. Não foi observado fissuras nas soldas das conexões.

REFERÊNCIA

LOPES, A. P. “Seismic Behavior and Design of the Linked Column Steel Frame System for Rapid Return to Occupancy”. In Ph.D. Dissertation, Portland State University, Portland-Oregon, USA, 2016.