

## **Robustez de Pórticos Metálicos com Ligações Semirrígidas**

**Vitor Rodrigues Gomes<sup>1</sup>, André Tenchini da Silva<sup>2</sup>, Luciano Rodrigues Ornelas de Lima<sup>2</sup>, Pedro Colmar Gonçalves da Silva Vellasco<sup>2</sup>.**

<sup>1</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / PGECIV – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / Mestre em Estruturas / E-mail: engvitorgomes@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ / Departamento de Estruturas e Fundações  
E-mails: tenchini@eng.uerj.br, luciano@eng.uerj.br, vellasco@eng.uerj.br

### **Resumo**

Nos últimos anos, os ataques terroristas destacaram a importância em se compreender o comportamento pós-crítico das estruturas e, na medida do possível, prover a elas robustez suficiente para resistir à um possível colapso progressivo. Em estruturas de aço, as ligações desempenham um papel importante, tanto no comportamento estrutural, como também na resistência final. Ligações com chapa de extremidade ajustada são um exemplo comum de ligações semirrígidas e têm sido extensivamente utilizadas devido à sua simplicidade e baixo custo de fabricação, entretanto, o comportamento semirrígido torna ainda mais difícil o entendimento dos mecanismos internos na ocasião de um evento crítico. O presente artigo tem por objetivo analisar o comportamento estrutural de um pórtico composto por ligações semirrígidas simulando a perda de um pilar através do uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) com implementação dos critérios de progressão do dano, através da avaliação da carga última e do desenvolvimento dos esforços internos nas ligações.

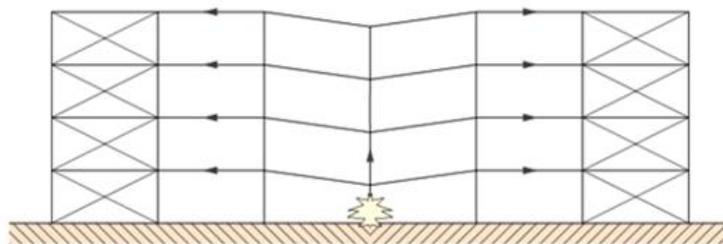
### **Palavras-chave**

Robustez estrutural; Ligação semirrígida; Colapso progressivo; Análise Não Linear.

### **Introdução**

Nos últimos anos, os ataques terroristas destacaram a importância do entendimento acerca do comportamento pós-crítico das estruturas e, na medida do possível, prover a elas robustez suficiente para resistir à um possível colapso progressivo.

Quando há a perda de uma coluna, é esperado o surgimento de esforços de tração nas ligações, pois sem a sustentação desta coluna, as vigas tenderão a apresentar um deslocamento vertical elevado, o que leva a um alongamento dos elementos, que por sua vez, irão ser tracionados. A este comportamento dá-se o nome de efeito de catenária. Este efeito é capaz de alterar a resposta global da estrutura e pode reduzir a resistência desta. A Figura 1 representa o surgimento desses esforços após a perda de uma coluna:



**Figura 1 – Efeito de catenária devido à perda de uma coluna (SCI, 2011)**

O Eurocode EN 1991-1-7 (2009), na sua seção de ações nas estruturas define o termo da seguinte maneira:

“Robustez é a habilidade que uma estrutura tem de resistir a eventos como fogo, explosões, impactos ou consequentes de erro humano, sem sofrer um dano desproporcional além daquele gerado pela sua causa de origem”.

Nos edifícios de aço, em geral, essa capacidade é proporcionada e limitada pelo dimensionamento e concepção das ligações, uma vez que é usual que as ligações não sejam dimensionadas como sendo completamente resistentes, ou seja, elas não apresentam uma capacidade igual ou superior àquelas apresentadas pelas vigas e colunas que a compõem, de forma que o critério crítico para evitar um colapso progressivo é baseado e controlado pela capacidade da ligação, pois ela é um ponto onde usualmente as rupturas ocorrem (Cassiano et. al, 2016).

A análise da robustez ganha uma importância ainda maior nas estruturas atuais, pois, apesar do desenvolvimento e utilização de técnicas de análises mais apuradas, o emprego de materiais de maior resistência, e um maior conhecimento dos mecanismos estruturais, as estruturas modernas têm alcançado soluções muito mais especializadas para um determinado uso, além da diminuição das incertezas de projeto, o que vem produzindo estruturas cada vez mais leves, e por consequência, menos robustas (Fülöp, 2015).

A análise do comportamento último de ligações é de extremo interesse em aplicações como verificação em caso de incêndio, impactos e ações acidentais, explosões e outros. Este trabalho tem o objetivo de analisar o comportamento estrutural de um pórtico composto por ligações semirrígidas simulando a perda de um pilar através do uso do Método dos Elementos Finitos (MEF) com implementação dos critérios de progressão do dano, através da avaliação da carga última e do desenvolvimento dos esforços internos nas ligações.

### **Diretrizes normativas e filosofias de dimensionamento quanto à robustez**

O desenvolvimento de diretrizes de dimensionamento no que tange à robustez é fruto de diversos debates e estudos realizados pela necessidade de se entender o funcionamento de uma estrutura e garantir a segurança de uma determinada edificação.

Os principais documentos e normas atuais se atentam, na maioria das vezes, a fornecer filosofias em detrimento de critérios de dimensionamento propriamente ditos.

Os principais documentos que tratam do dimensionamento e que determinam requisitos que cada tipo de estrutura deve cumprir são o *The Building Regulations: Approved Document A* (ODPM, 2005), o Eurocode 1 (2009), a norma americana ASCE-7 (2010), o Código de Construção da Cidade de Nova York (2004) e o *Unified Facilities Criteria - UFC 4-023-03* (USDP, 2010). Esses documentos prescrevem algumas verificações que a estrutura deve satisfazer afim de alcançar um grau de robustez satisfatória. Os critérios se resumem, basicamente, a verificar se a estabilidade é garantida numa estrutura no caso da perda de um elemento crítico. Para isso, determinam algumas combinações de carregamento que devem ser observadas. A norma UFC-4-023-03 (USDP, 2010) apresenta-se de forma mais completa, diferenciando o nível da análise estrutural que será realizada.

Com relação aos estudos numéricos e experimentais, nos últimos anos, diversos deles têm sido realizados com o objetivo de entender o comportamento de estruturas após a

ocorrência de um determinado dano, seja um incêndio, uma colisão ou a perda de elemento.

Um estudo numérico baseado em análises do tipo *pushdown*, análises dinâmicas não lineares em pórticos formados por elementos de barra e análises numéricas em 3D via Método dos Elementos Finitos (MEF) realizado por Cassiano et al. (2016) verificou que a utilização de ligações capazes de resistir ao efeito catenária é crucial para melhorar o grau de robustez das estruturas e que as ligações completamente rígidas atendem bem à esse quesito, o que confirma a constatação de Formisano e Mazzolani (2010).

Por outro lado, um estudo experimental em escala real realizado por Alashker et. al. (2010) mostrou que as ligações são capazes de desenvolver resistência vertical significativa através da combinação das ações de flexão e catenária. Este desenvolveu também um modelo reduzido dessas ligações que foi validado pelos ensaios experimentais. Um outro estudo (Sadek, et al., 2010) baseado nesse modelo reduzido demonstrou que pórticos dimensionados para eventos sísmicos e com ligações resistentes a momento são aptos para resistir a perda de múltiplas colunas sem colapsar.

Um outro trabalho que aborda ligações do tipo placa de extremidade ajustada sob um cenário de perda de coluna foi desenvolvido por Cassiano et al. (2017). Este realizou um estudo paramétrico variando o número de linhas de parafusos, diâmetros dos parafusos, espessura das placas de extremidade, seção da viga e orientação dos eixos da coluna. A análise utilizada foi do tipo dinâmica não linear com implementação dos critérios de dano progressivo e simulação quase estática. Percebeu-se que o carregamento vertical nas colunas que não foram removidas não influencia no comportamento das ligações.

No caso específico de análise à robustez, em que as ligações cumprem um papel extremamente importante, e com o surgimento do efeito de catenária, é preciso entender a interação de resistência entre momento e esforço normal da ligação.

## Metodologia

A ligação base utilizada no desenvolvimento deste artigo é do tipo placa de extremidade ajustada composta por parafusos M20 CL10.9 e placa de extremidade com 15mm de espessura em aço S275. Os perfis de coluna e viga utilizados são indicados na Figura 2 e também são em aço S275.

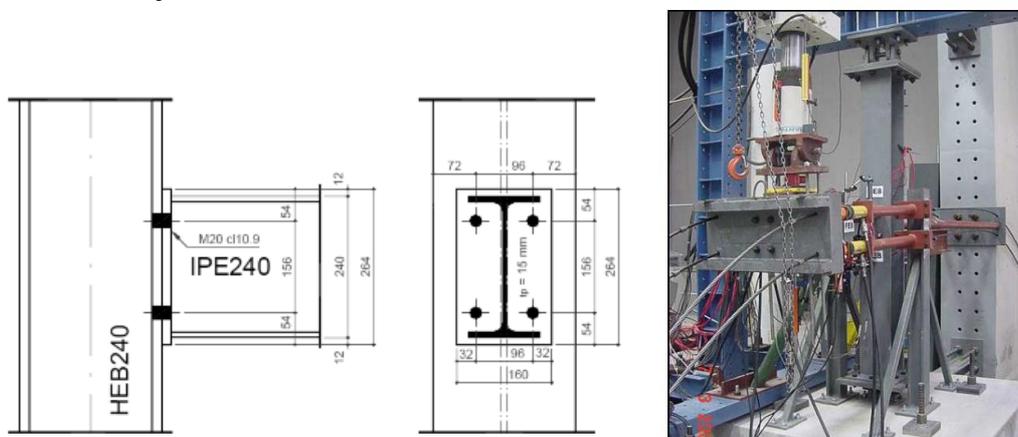
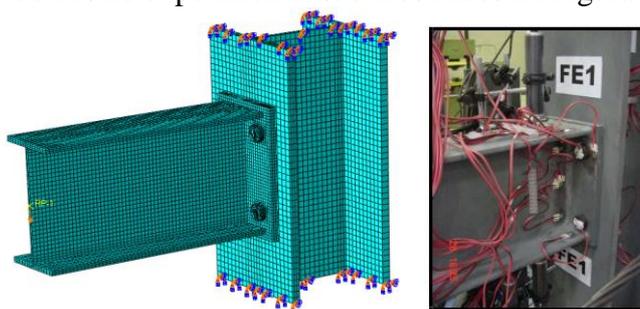


Figura 2 – Ligação semirrígida analisada (Lima, 2003)

Esta ligação foi estudada e ensaiada em laboratório por Lima (2003) e os parâmetros que servirão de base para as propriedades dos materiais e verificação da calibração foram provenientes destes ensaios.

Modelou-se esta ligação no software ABAQUS (SIMULIA, 2014) com utilização do elemento sólido do tipo C3D8R, que tem integração reduzida e oito nós com três graus de liberdade por nó, sendo as translações nas direções x, y e z. O modelo analisado com as respectivas condições de contorno, carregamento e malha de elementos finitos, bem como uma imagem do ensaio experimental são mostrados na Figura 3.

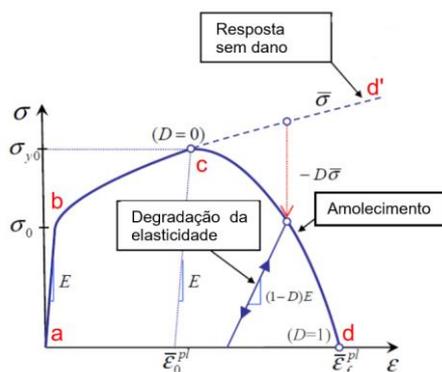


**Figura 3 – Modelo numérico e experimental**

Para que uma estrutura seja analisada no ABAQUS (SIMULIA, 2014) com a utilização da progressão do dano é necessário realizar uma análise dinâmica explícita. Este tipo de análise é um procedimento dinâmico, originalmente desenvolvido para eventos de impacto de alta velocidade. Simular uma análise quase estática através de uma análise explicit à um custo computacional viável e que produza resultados coerentes requer a utilização de algumas técnicas numéricas que ajudam na resolução do processo, como a utilização da técnica de *Mass Scaling* e redução do tempo de aplicação da carga. Os parâmetros utilizados atenderam aos critérios propostos na literatura que relacionam a qualidade da solução de uma análise quase estática através de uma análise explicit (SIMULIA, 2014; ABAQUS, 2005).

Para a simulação numérica da progressão do dano em estruturas de aço, estudos recentes de diversos autores tem feito uso de análises quase-estáticas utilizando os critérios propostos, tais como Guo et. al (2015), Tay et. al (2016), Forni et. al (2017), Li et. al (2017), Yang e Tan (2013) e Kang et. al (2017).

A curva utilizada que representa o comportamento dos materiais com dano progressivo é apresentada na Figura 4.



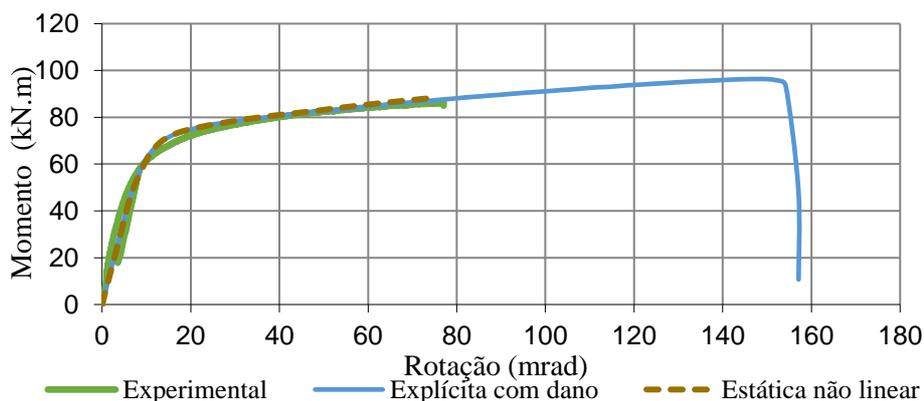
**Figura 4 - Representação esquemática da comportamento elastoplástico do material com dano progressivo (ABAQUS, 2005)**

O valor de  $D$  corresponde a variável de dano geral ( $D=0...1$ ). Após o início do dano, o tensor de tensões no material é dado pela equação de dano

$$\sigma = (1 - D)\bar{\sigma} \quad (1)$$

onde  $\bar{\sigma}$  é a tensão teórica do material na ausência de dano. Mais detalhes sobre o processo de calibração, como propriedades dos materiais utilizadas, os critérios de iniciação do dano e da progressão deste, bem como o ponto de fratura podem ser encontrados em Gomes (2017).

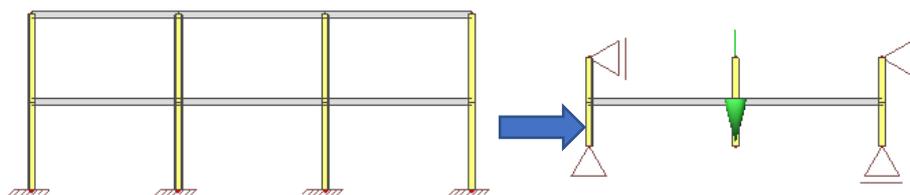
Com os materiais calibrados, realizou-se uma verificação e comparação com os resultados experimentais de Lima (2003). Os resultados encontrados são mostrados na Figura 5. Percebe-se que com a utilização dos parâmetros apresentados em Gomes (2017) para transformar a análise em uma análise quase estática, a estrutura comportou-se de maneira satisfatória, e que o resultado apresentado pela ligação em uma análise explícita com dano progressivo implementado é coincidente com aquele da análise estática não linear sem implementação do dano. Ambos os resultados estão de acordo com aqueles provenientes do ensaio experimental.



**Figura 5– Comparação entre análise estática e explícita com dano da ligação sujeita apenas a momento fletor**

### Modelos numéricos

Para a avaliação da robustez, simulou-se uma estrutura composta de três colunas e duas vigas ligando as mesmas, onde a coluna central tem seu apoio removido e um deslocamento prescrito é aplicado em sua base. O esquema reduzido da estrutura modelada é mostrado na Figura 6.



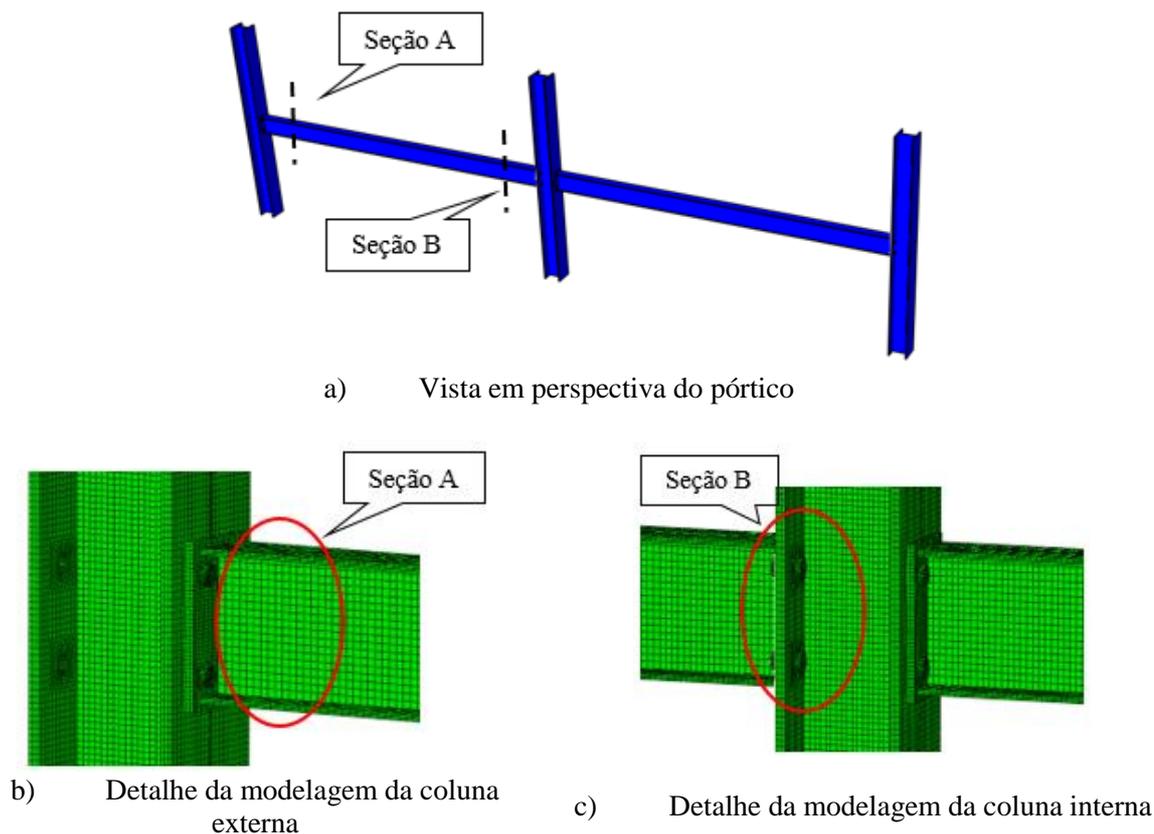
**Figura 6 – Redução da estrutura modelada**

As colunas modeladas possuíam 3m de altura no total e foram rotuladas em suas extremidades. Ligadas ao ponto médio das colunas foram modeladas as respectivas ligações e as vigas possuíam comprimento variável devido às diferentes espessuras de placa de extremidade utilizadas em alguns modelos, entretanto, o entre eixos das colunas foi mantido em 5m.

Realizou-se uma análise explícita, com implementação do dano. O carregamento foi aplicado como um deslocamento prescrito para baixo na coluna central utilizando uma amplitude de passos suaves no carregamento.

O deslocamento máximo aplicado foi de 1600mm em um intervalo de carregamento total de 15 segundos. Além disso, o deslocamento foi restringido para fora do plano, simulando a existência de outras vigas que chegariam no eixo de menor inércia da coluna e impedindo a torção das vigas modeladas proveniente de um possível desaprumo das colunas.

Detalhes da estrutura modelada são mostradas nas Figura 7.



**Figura 7 – Detalhes da estrutura do pórtico modelada**

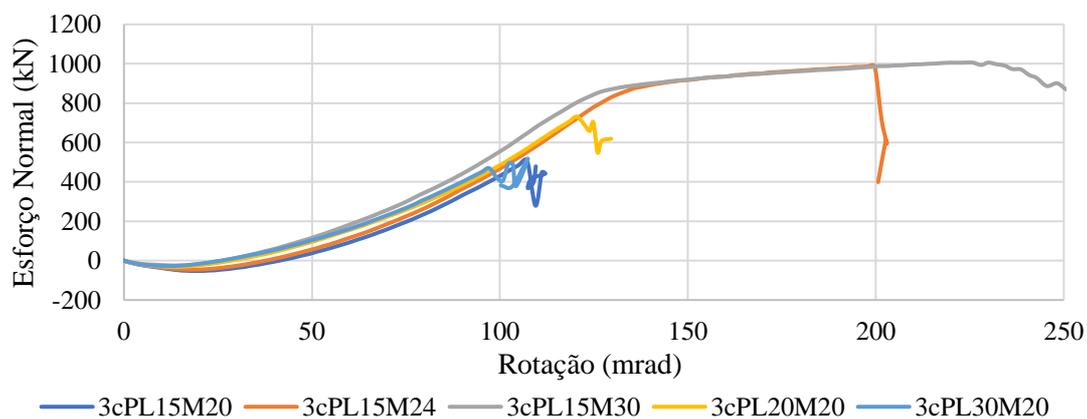
Realizou-se uma análise paramétrica deste modelo com 3 colunas afim de investigar a robustez de um pórtico formado por ligações semirrígidas de placa de extremidade ajustada. Os modelos analisados são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Modelos do estudo paramétrico**

Modelo	Espessura da placa de extremidade (mm)	Tamanho do parafuso
3cPL15M20	15	M20
3cPL15M24	15	M24
3cPL15M30	15	M30
3cPL20M20	20	M20
3cPL30M20	30	M20

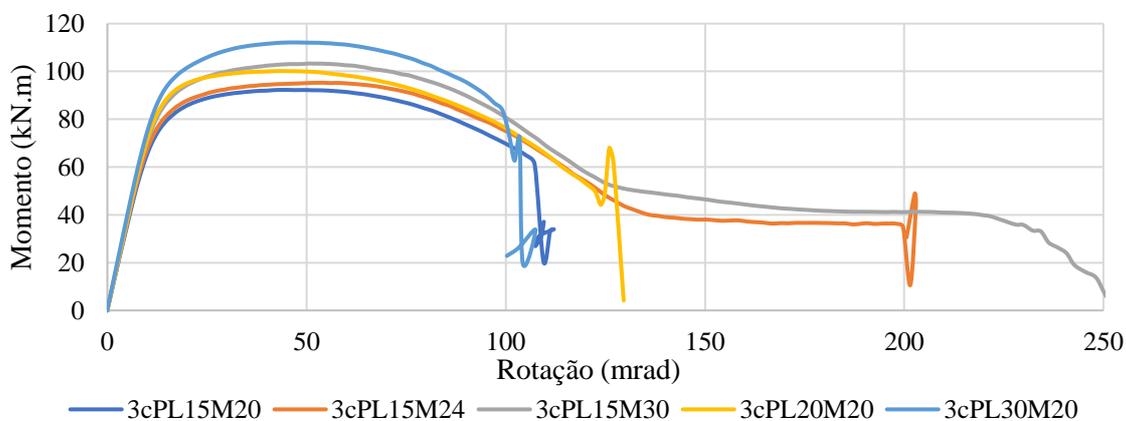
## Resultados

Os esforços de tração nas ligações provenientes do carregamento e definidos a partir da utilização do método de *Free Body* do ABAQUS (2005) são mostrados na **Figura 8**



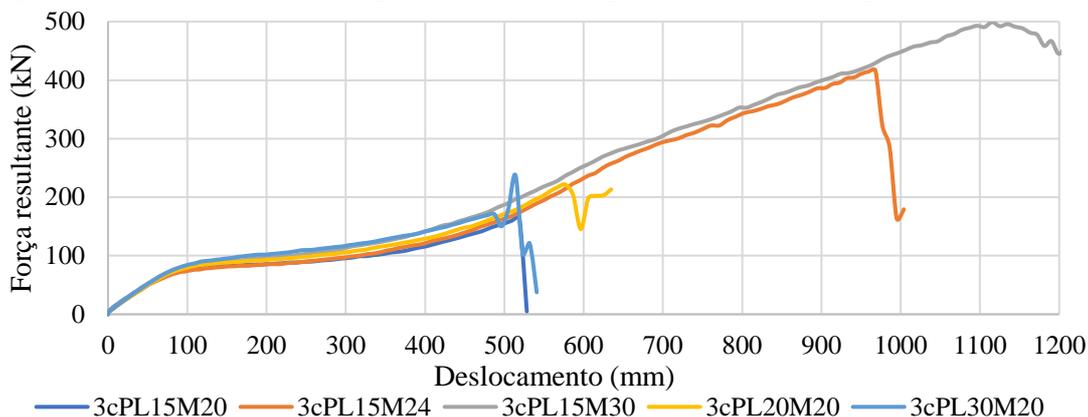
**Figura 8 – Esforço axial *versus* rotação nos modelos com três colunas**

A Figura 9 apresenta o desenvolvimento do momento fletor *versus* rotação nas ligações.



**Figura 9 – Gráfico momento *versus* rotação dos modelos com 3 colunas**

A Figura 10 apresenta o gráfico das forças verticais resultantes equivalentes ao deslocamento prescrito aplicado na base da coluna central *versus* este mesmo deslocamento, simulando a perda do apoio de todas as estruturas. Esta força resultante é equivalente à reação de apoio da coluna removida e expressa a capacidade que as duas ligações têm de resistir ao carregamento vertical aplicado no nível do pavimento.



**Figura 10 – Gráfico força resultante *versus* deslocamento aplicado na coluna**

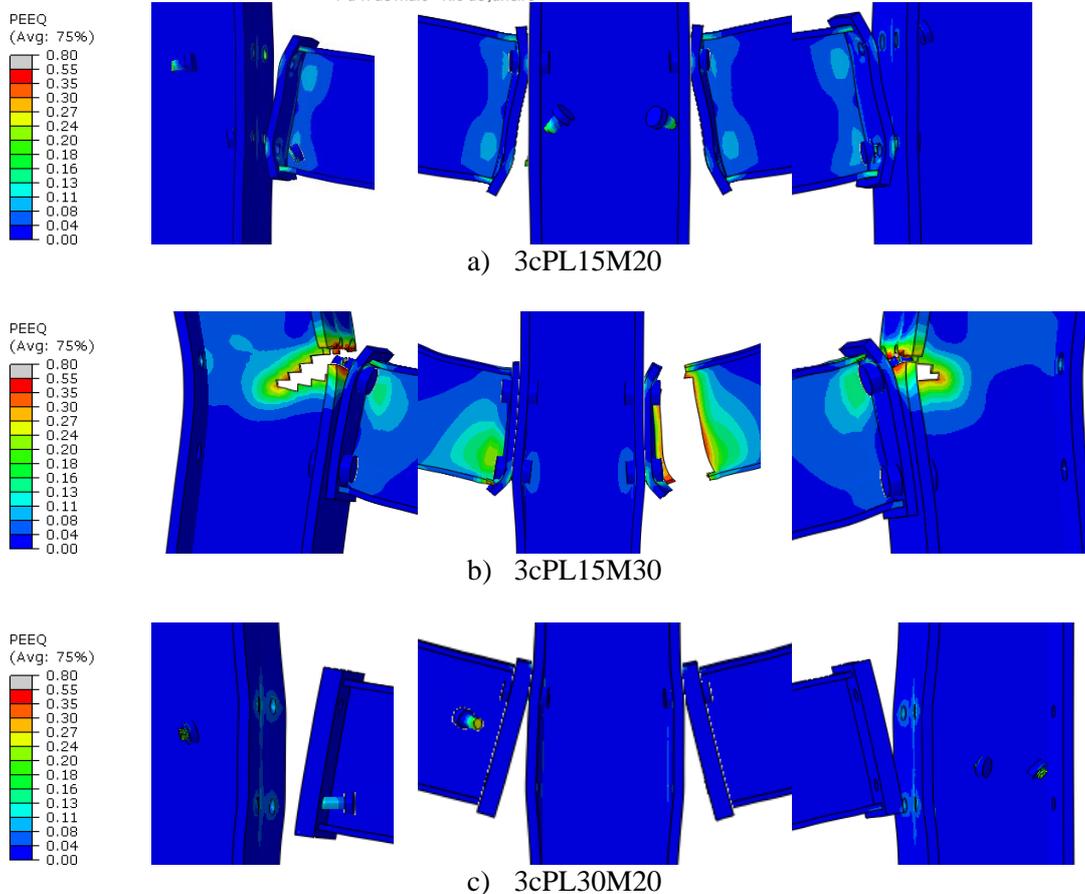
A análise dos modelos numéricos com implementação do dano trouxe alguns resultados interessantes no que diz respeito à distribuição de tensões e nos modos de ruptura. A Figura 11 apresenta o modo de ruptura de três dos modelos estudados, bem como a deformação plástica equivalente, a saber aquele ensaiado por Lima (2003), um em que utilizou-se o parafuso de maior diâmetro e outro com a utilização da placa de extremidade mais espessa.

## Conclusões

Os modelos calibrados apresentaram uma boa concordância com a resposta estrutural de um ensaio experimental (Lima, 2003) sem ruptura.

Com a simulação da estrutura sob a perda de uma coluna, constatou-se que os esforços normais mostraram que, inicialmente, a ligação está sujeita a uma força de compressão, o chamado arqueamento compressivo. Posteriormente, a estrutura desenvolve esforços de tração rapidamente, caracterizando o efeito catenária e a capacidade ao momento é reduzida.

Constatou-se que os momentos fletores nas ligações desenvolvem-se com baixas rotações, alcançando uma resistência máxima no instante inicial, tendendo a diminuir logo depois. Para os casos onde os parafusos são mais resistentes, a ligação é capaz de desenvolver maiores rotações e não rompe de maneira brusca, apresentando até mesmo um patamar após a queda da resistência ao momento fletor.



**Figura 11 – Deformação plástica e modo de ruptura das ligações paramétricas**

Com relação à curva da força resultante aplicada na coluna *versus* o deslocamento vertical, esta apresenta uma fase inicial com comportamento elástico, onde o deslocamento é proporcional à força resultante, seguido por um patamar que tem início juntamente à fase de comportamento plástico do momento resistente da ligação. Posteriormente, a força resultante cresce quase que linearmente até o momento da ruptura. É possível concluir que, apesar do aumento da espessura da placa de extremidade elevar o momento resistente da ligação, esse acréscimo não se traduz no aumento da capacidade de rotação e no aumento da resistência aos carregamentos verticais, e que o aumento do diâmetro dos parafusos é capaz de garantir rotações e capacidade resistente aos carregamentos gravitacionais mais elevadas.

Também em concordância com Guo et al. (2015), o estudo aqui desenvolvido constatou que o dimensionamento para robustez requer um dimensionamento muito maior para os parafusos devido a fratura a que estão sujeitos, e que aumentar o diâmetro dos parafusos ou a tensão de ruptura dos mesmos pode auxiliar na resistência ao dano progressivo da estrutura.

## Referências

ABAQUS, Inc. ABAQUS/Explicit:Advanced Topics. Quasi-Static Analyses. Dassault Systèmes, 2005.

- ALASHKER, Yasser; EL-TAWIL, Sherif; SADEK, Fahim. Progressive collapse resistance of steel-concrete composite floors. *Journal of Structural Engineering*, v. 136, n. 10, p. 1187-1196, 2010.
- ASCE, A. S. O. C. E. ASCE/ANSI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. 2010.
- CASSIANO, David et al. Influence of seismic design rules on the robustness of steel moment resisting frames. *Steel and Composite Structures*, v. 21, n. 3, p. 479-500, 2016.
- CASSIANO, David; D'ANIELLO, Mario; REBELO, Carlos. Parametric finite element analyses on flush end-plate joints under column removal. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 137, p. 77-92, 2017.
- Código de Construção da Cidade de Nova York. Rules and Regulations of the Building Code of the City of New York. Chapter 18 – Resistance to Progressive Collapse under Extreme Local Loads. 2004.
- EUROCODE 1, ENV - 1991-1-7, Actions on structures – Part 1-7: General actions – Accidental Actions. CEN, European Committee for Standardisation, Brussels, 2009.
- FORMISANO, A.; MAZZOLANI, F. M. On the catenary effect of steel buildings. In: Proc. of the COST Action C26 Final Conference “Urban Habitat Constructions under Catastrophic Events”, Naples. 2010. p. 619-624.
- FORNI, Daniele; CHIAIA, Bernardino; CADONI, Ezio. Blast effects on steel columns under fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 136, p. 1-10, 2017.
- FÜLÖP, L. Robustness Safety Security. VTT Technical Research Centre of Finland. , p. 7. 2015.
- GOMES, Vitor Rodrigues. Análise da influência de ligações semirrígidas na robustez de pórticos metálicos. 150 p. Rio de Janeiro: PGECIV- Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2017. (Dissertação de mestrado).
- GUO, Lanhui; GAO, Shan; FU, Feng. Structural performance of semi-rigid composite frame under column loss. *Engineering Structures*, v. 95, p. 112-126, 2015.
- KANG, Shao-Bo et al. Effect of boundary conditions on the behaviour of composite frames against progressive collapse. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 138, p. 150-167, 2017.
- LI, Ling et al. A basis for comparing progressive collapse resistance of moment frames and connections. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 139, p. 1-5, 2017
- LIMA, L. R. O. Comportamento de ligações com placa de extremidade em estruturas de aço submetidas a momento fletor e força axial. 269 p. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 2003. (Tese de doutorado).
- ODPM. The Building Regulations 2000 - Structure; Approved Document A. Office of the Deputy Prime Minister. Londres. 2005.
- SADEK, Fahim et al. An experimental and computational study of steel moment connections under a column removal scenario. NIST Technical Note, v. 1669, 2010.
- SCI, Steel Construction Institute. Structural Robustness of Steel Framed Buildings. Ascot, Reino Unido 2011.
- SIMULIA. ABAQUS Unified FEA (6.14). Dassault Systèmes, 2014.
- TAY, C. G.; KOH, C. G.; LIEW, J. Y. R. Efficient progressive collapse analysis for robustness evaluation of buildings experiencing column removal. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 122, p. 395-408, 2016.
- USDP, UNITED STATES DEPARTMENT OF DEFENSE. Unified Facilities Criteria UFC 4-023-03: Design of Buildings to Resist Progressive Collapse. Washington, D.C. 2010.
- YANG, Bo; TAN, Kang Hai. Experimental tests of different types of bolted steel beam-column joints under a central-column-removal scenario. *Engineering Structures*, v. 54, p. 112-130, 2013.