



Primeiro-Tenente (EN)) Julio Cesar Gonçalves da Silva

Ajudante da 3ª Seção de Arquitetura do Departamento de Projetos

Graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Mestre e Doutor em Engenharia Civil pelo Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, estágio Pós-Doutoral como Pesquisador Visitante no National Institute of Standards and Technology (NIST) nos Estados Unidos da América e no Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

ANÁLISE FLUIDO-TERMOMECÂNICA DO COMPORTAMENTO DE ESTRUTURAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, graves incêndios ocorridos em instalações industriais demonstram que mesmo em face da baixa probabilidade de ocorrência destes eventos, seu elevado grau de destruição é responsável por vastos prejuízos, sejam estes em perdas materiais, perdas humanas ou danos ambientais. Este tipo de acidente pode ser visto até mesmo em instalações de grande porte, que em geral possuem ambientes altamente controlados e onde os prejuízos financeiros podem atingir grandes escalas. Acidentes graves ocorridos nos últimos anos demonstram a fragilidade deste tipo de instalação, perante o poder de destruição de incêndios fora de controle.



Incêndio atinge tanques de combustível em Santos,
no litoral de São Paulo (fonte: g1.globo.com)

Um dos casos marcantes em nosso país foi o incêndio que causou o afundamento da plataforma P-36 da Petrobrás, no dia 15 de março de 2001. Além da perda da plataforma, estimada em 500 milhões de reais e das 11 vítimas fatais, os prejuízos foram largamente ampliados pela interrupção da produção. Na época do acidente, os 80 mil barris diários extraídos por esta plataforma correspondiam a 6% da produção nacional.



Incêndio causou o afundamento da Plataforma P-36 da Petrobrás
Fonte <https://dinamicaglobal.files.wordpress.com/2016/01/p-36.png>

Um grande incêndio, iniciado no dia 02 de abril de 2015, atingiu seis tanques de combustíveis no Porto de Santos/SP e demorou 192 horas para ser considerado extinto. Durante o combate foram utilizados 8 bilhões de litros de água que, em parte, foram escoados para o mar, provocando grande impacto ambiental. A interdição do acesso ao Porto de Santos também gerou graves prejuízos financeiros.

O comportamento de elementos estruturais em situação de incêndio é comumente avaliado através de procedimentos simplificados, disponíveis em normatização nacional e internacional, como por exemplo: ABNT NBR 15200: 2012, ABNT NBR 14323: 2013 e EN 1993-1-2: 2005. Entretanto, estas simplificações não são capazes de considerar efeitos de segunda ordem ou mesmo o comportamento global de estruturas, pois estão restritas a formulações analíticas para membros isolados e às teorias de pequenas deformações e pequenos deslocamentos.



Incêndio atinge tanques de combustível em Santos, no litoral de São Paulo (fonte: g1.globo.com)

Atualmente, modelos numéricos avançados baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF), permitem a avaliação do comportamento global de estruturas, considerando não linearidades geométricas e o regime inelástico dos materiais. Todavia, a aplicação destes modelos para situação de incêndio é realizada através de uma representação simplificada das condições de exposição térmica, como por exemplo, a curva de incêndio padrão, presente em ABNT NBR 14432: 2001 e EN 1991-1-2: 2002, com destaque para os seguintes trabalhos: Dotreppe e Franssen (1985), Franssen (2005), Landesmann e Batista (2005), Landesmann et al. (2005), Sarraj et al. (2007), Wang et al. (2010) e Dai et al. (2010). Vale ressaltar que estas simplificações não são capazes de representar as condições reais do incêndio, ou mesmo sua evolução ou duração (SILVA, 2014).

Por outro lado, modelos baseados na Fluidodinâmica Computacional (FDC) são capazes de fornecer uma descrição mais realística do desenvolvimento do incêndio, considerando a distribuição espacial da carga térmica, bem como sua influência na evolução do campo de temperaturas do meio (MCGRATTAN et al., 2013a; MCGRATTAN et al., 2013b). Embora seja possível observar um histórico avanço no desenvolvimento de cada uma destas áreas, apenas nos últimos anos foi possível observar esforços no sentido de realizar uma análise refinada capaz de considerar as contribuições de ambos os campos, podendo citar: Prasad e Baum (2005), Kumar et al. (2006), Duthinh et al. (2008); Baum (2011), Silva e Landesmann (2010a), Silva e Landesmann (2010b), Silva e Landesmann (2013), Silva et al. (2014), Silva (2014), Silva et al. (2016) e Zhang et al. (2016).

Recentemente, Silva (2014) apresentou uma metodologia capaz de extrair as variáveis necessárias dos resultados da simulação de incêndio (FDC) e prescrever a exposição térmica como condição de contorno da etapa termomecânica (MEF), realizando um acoplamento unidirecional entre estes dois campos de análise. O objetivo do presente artigo é oferecer uma breve introdução desta metodologia, que viabiliza uma forma direta de avaliar o estado de tensões, a degradação dos materiais e a estabilidade global de estruturas em cenários específicos de incêndio.

2. METODOLOGIA

A descrição do comportamento de estruturas em situação de incêndio, através de um modelo fluido-termomecânico, trata de um domínio que engloba os espaços abertos por onde o fogo e a fumaça escoam, somados à estrutura e seus componentes; através dos quais a energia térmica e os carregamentos mecânicos são distribuídos. Entretanto, as etapas envolvidas na solução do problema proposto requerem diferentes métodos de solução, e a realização desta tarefa através de um único domínio esbarra em diversas complicações, como por exemplo, as dimensões das células e ou elementos, assim como diferenças nos algoritmos e passos de tempo (SILVA, 2014; SILVA et al., 2016).

Sendo assim, este procedimento decompõe o domínio único descrito acima e ilustrado na Figura 2a, em duas partes: a primeira é utilizada para a simulação do incêndio e a segunda volta-se para a análise termomecânica das estruturas. Durante a simulação do incêndio, a estrutura é representada de forma simplificada e o domínio é ampliado para captar adequadamente a propagação do incêndio e o escoamento da fumaça e dos gases quentes, como pode ser observado na Figura 2b. Já na análise termomecânica, somente a estrutura é avaliada e a etapa anterior é representada apenas pela aplicação do fluxo de calor, como condição de contorno, nas superfícies expostas ao incêndio (Figura 2c). Com a finalidade de transferir as informações, entre as etapas da análise, ambos os domínios possuem o mesmo sistema de coordenadas espaciais (Figuras 2b e 2c).

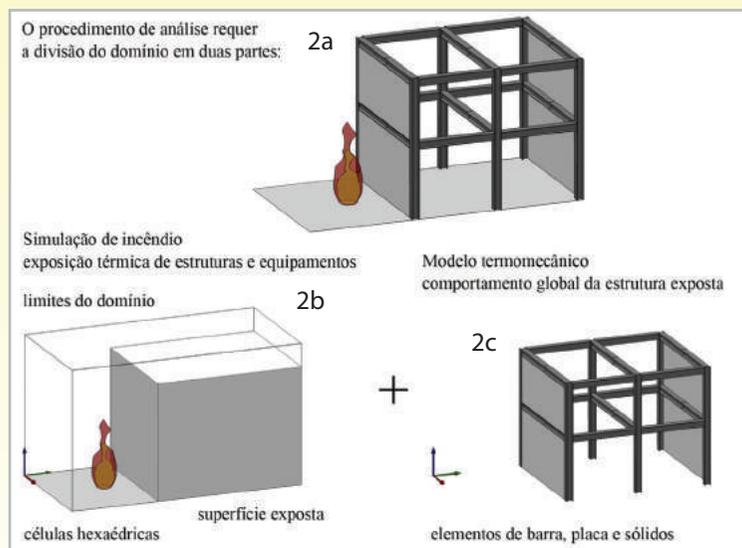


Figura 2 - Ilustração da divisão do domínio para o procedimento de análise:
 - 2a) descrição do problema;
 - 2b) representação para a simulação do incêndio;
 - 2c) discretização para a análise termomecânica (fonte: SILVA, 2014).

Modelos avançados voltados para simulação de incêndios - como por exemplo, o Fire Dynamics Simulator (FDS, MCGRATTAN et al., 2013) - são capazes de prover resultados que representam a descrição tridimensional da evolução do incêndio, a energia radiativa incidente em superfícies e a temperatura nos gases. Entretanto, não são capazes de obter a distribuição de temperatura em sólidos de forma precisa (SILVA, 2014). Conseqüentemente, o fluxo total de calor não pode ser calculado adequadamente ao final da simulação do incêndio. Deste modo, para transpor esta barreira torna-se necessário um tratamento adicional às superfícies expostas.

Para estabelecer a interface entre a simulação de incêndio e a análise termomecânica de maneira mais apurada, considera-se o conceito da temperatura da superfície adiabática (*Adiabatic Surface Temperature - TAST - WICKSTRÖM, 2004*). Diversos trabalhos de pesquisa consideram que esta variável é capaz de combinar a complexidade do fenômeno de transferência de calor, por radiação e convecção, em uma única variável escalar, podendo citar: Wickström et al. (2007), Sandström et al. (2009) e Wickström et al. (2010). Entretanto, a metodologia desenvolvida por Silva (2014) considera necessário transferir ainda o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) para uma definição correta do fluxo total de calor. A combinação destas duas variáveis (h e TAST - resultados da simulação do incêndio) gera a caracterização da exposição térmica das superfícies.

Com a finalidade de obter estas variáveis de forma automatizada, o código FDS2FTMI foi criado e incluído no repositório oficial do FDS (MCGRATTAN et al., 2013a). Esta ferramenta varre os resultados obtidos ao final da simulação do incêndio e obtém as variáveis necessárias para incluir as condições de contorno adequadas na análise termomecânica. Recentemente, o FDS2FTMI foi utilizado por diversos trabalhos, destacando: Silva et al. (2014), Silva (2014), Silva et al. (2016) e Zhang et al. (2016).

OANSYS(SAS,2009)éuma ferramenta computacional comercial baseada no Método dos Elementos Finitos (MEF), voltada para simulação numérica de diversos fenômenos físicos. Esta ferramenta é utilizada aqui para realizar uma análise termomecânica baseada no método da transferência de carregamentos. Neste método, as duas análises são resolvidas separadamente e os resultados obtidos são aplicados como carregamento na etapa seguinte. No caso da análise termomecânica, a distribuição de temperatura nos elementos estruturais é prescrita no modelo mecânico; e a análise mecânica permite determinar o comportamento estrutural global durante o tempo de evolução do incêndio. Os efeitos da expansão térmica não são considerados durante a análise térmica, uma vez que a mesma não inclui os deslocamentos como graus de liberdade em sua solução. Sendo assim, este efeito é considerado durante a análise mecânica. Através deste tipo de análise é possível obter os deslocamentos, tensões e deformações, durante o aquecimento e arrefecimento da estrutura.

Nas análises simplificadas, utilizadas comumente pela engenharia de estruturas, considera-se, até mesmo por critérios de utilização, que os deslocamentos e deformações sofridos pela estrutura são pequenos em relação às dimensões da mesma. Diferente do comportamento estrutural em temperatura ambiente, durante a ação de incêndios é possível admitir que a estrutura sofra deslocamentos e deformações desde que a estabilidade global seja mantida. Desta forma, a não linearidade geométrica deve ser incluída nas análises avançadas de estruturas submetidas à ação de incêndios, permitindo também a consideração de efeitos de segunda ordem, como efeitos de catenária e membrana. Tais efeitos podem levar a uma ampla modificação no comportamento destas estruturas, o que não é capturado por análises simplificadas ou procedimentos normativos.

3. ESTUDO DE CASO

Neste estudo, um pilar em perfil H simplesmente apoiado é exposto a um incêndio localizado. O pilar possui 3 metros de altura e seção transversal com 0.3 m (mesa) x 0.4 m (alma) e 12.5 mm de espessura de alma e 16 mm de espessura das mesas. O cenário de incêndio é uma poça (pool fire) de 20 cm x 20 cm, localizada a 40 cm da alma (a partir do centro da poça), como apresentado na Figura 3. A tensão de escoamento do aço é 250 MPa e o módulo de elasticidade é 205 GPa, em temperatura ambiente (20°C). As propriedades térmicas e mecânicas são consideradas como dependentes da temperatura, como sugerido em EN 1993-1-2: 2005.

O pilar é discretizado através de elementos de placa (shell elements - MEF) e cada lado destes elementos planos estará exposta a uma condição de exposição térmica distinta, tanto radiação incidente como temperatura do gás ao redor da superfície serão diferentes. O código é projetado para incluir esta habilidade: de prescrever o fluxo de calor correspondente nas camadas superior e inferior dos elementos de placa de acordo com a exposição térmica. A distribuição da TAST aos 15 minutos de desenvolvimento de incêndio é apresentada na Figura 3. Como a fonte do incêndio está próxima à alma, a região da alma próxima ao incêndio alcançará as temperaturas mais elevadas e estará mais aquecida do que as demais partes da seção transversal (Figura 3a). O modelo discretizado através do MEF é apresentado na Figura 3b, onde alguns pontos seguem destacados para facilitar a leitura dos resultados, considera-se ainda a face exposta ao incêndio com o índice 1 e a outra face com o índice 2.

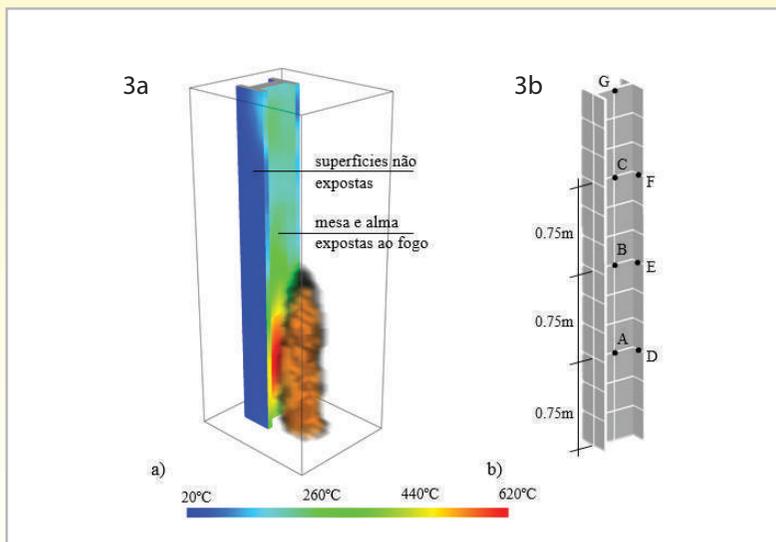


Figura 3 - Ilustração do cenário de incêndio com pilar em perfil H e distribuição da TAST em 15 min:
- 3a) modelo 3D;
- 3b) modelo MEF.

A distribuição da temperatura da superfície segue ilustrada na Figura 4 e sua evolução segue apresentada na Figura 5. As temperaturas máximas foram alcançadas nos pontos próximos à fonte do incêndio, A e D. No ponto A1, a temperatura está ao redor dos 430°C com 1 h de evolução do incêndio, e 425°C em A2 no mesmo instante. Nesta temperatura, o aço já apresenta redução na tensão de escoamento. Para os pontos D1 e D2, a temperatura é de aproximadamente, 369°C, e 363°C, respectivamente. A temperatura decresce de acordo com a distância da origem do incêndio (B, E – Figura 5) e estes pontos estão mais afetados pela condução térmica do que pela exposição ao incêndio (Figura 4).

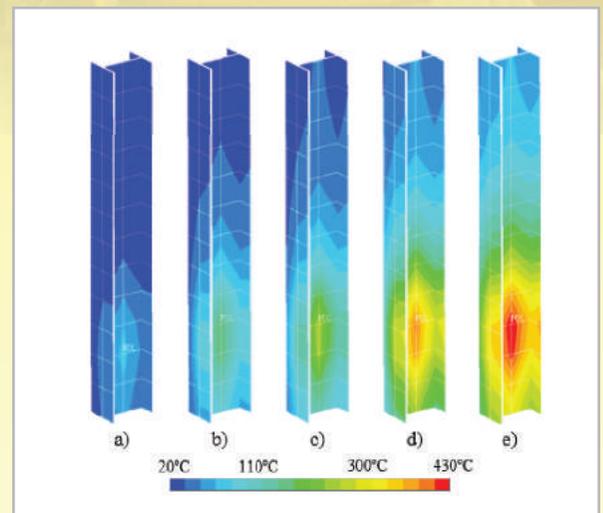


Figura 4 - Distribuição da temperatura na superfície do pilar:
4a) 5 min; 4b) 10 min; 4c) 15 min; 4d) 30 min; 4e) 60 min.

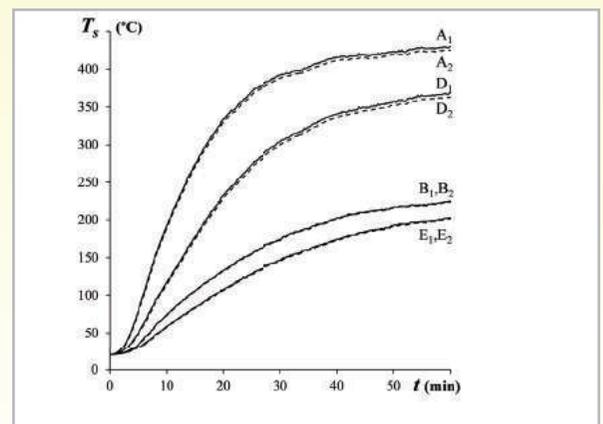


Figura 5 - Evolução da temperatura na superfície em função do tempo de desenvolvimento do incêndio.

Este pilar simplesmente apoiado está submetido à carga vertical de 325 kN, o que corresponde a 1/50 da carga crítica de flambagem de Euler. Nestas condições, o pilar estaria próximo ao estado de tensão uniforme e os deslocamentos horizontais gerados seriam relacionados ao gradiente térmico aplicado pelo incêndio localizado.

A distribuição das tensões de von Mises (S) segue ilustrada na Figura 6, e a evolução da tensão de von Mises e dos deslocamentos (δ) nos pontos do pilar (Figura 3) seguem na Figura 7a e 7b. No início do incêndio, as tensões estão mais altas nas áreas próximas a origem do incêndio (que também possuem as temperaturas mais altas – Figura 4). A expansão das áreas mais aquecidas das mesas cria um momento fletor devido ao gradiente de temperaturas (Figura 4c), o que gera deslocamentos horizontais (A, D – Figura 6d,e; Figura 7b). O módulo de elasticidade e o limite de proporcionalidade começam a regredir a partir dos 100 °C (EN 1993-1-2: 2005). Estas modificações nas propriedades mecânicas do material reduzem o estado de tensões e aumentam as deformações em alguns pontos da estrutura (Figura 6d,e,f; Figura 7a). Como um exemplo, no ponto A, um pico na tensão de von Mises é observado aos 12 minutos de evolução do incêndio (Figura 7a) quando a temperatura está ao redor dos 220 °C. Esta mudança abrupta é motivada pela redução do limite de proporcionalidade e do módulo de elasticidade, que afetam o comportamento da estrutura mesmo antes de redução na tensão de escoamento (o que se inicia aos 400 °C, ou 34 minutos para o ponto A – Figura 5). Como este pilar é simplesmente apoiado, o deslocamento vertical não é restringido e a expansão térmica faz com que o pilar aumente seu tamanho. O deslocamento vertical no topo do pilar atinge os 7 mm após 1 h de desenvolvimento de incêndio (G – Figura 3) como exposto na Figura 7a e 7b.

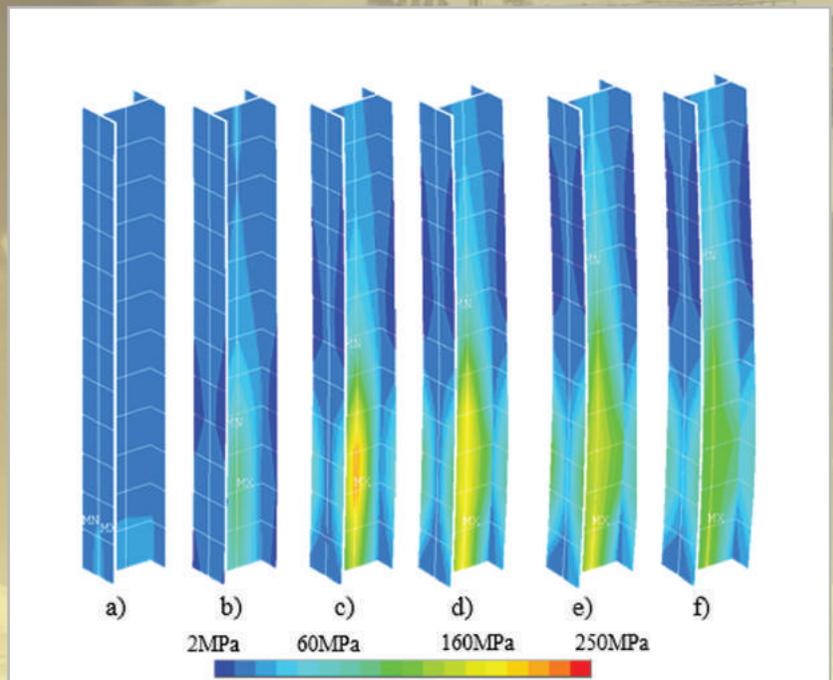


Figura 6 – Distribuição das tensões de von Mises (deslocamentos amplificados em 15x): 6a) início; 6b) 5 min; 6c) 10 min; 6d) 15 min; 6e) 30 min; 6f) 60 min.

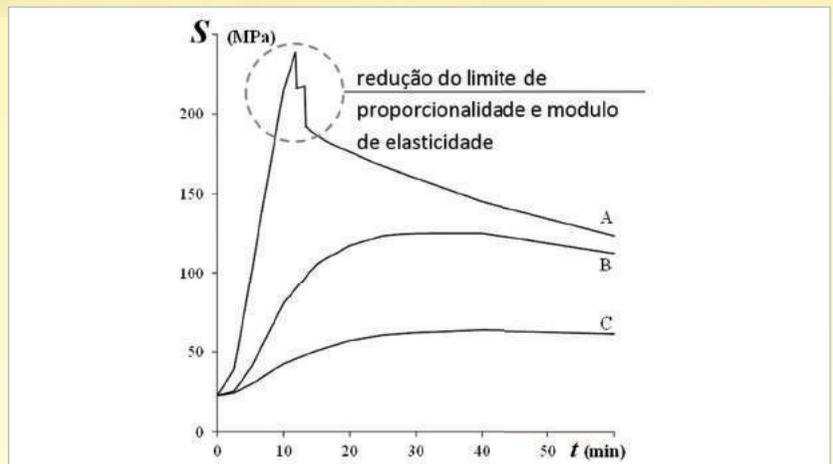


Figura 7a - Evolução do comportamento termomecânico: tensões de von Mises

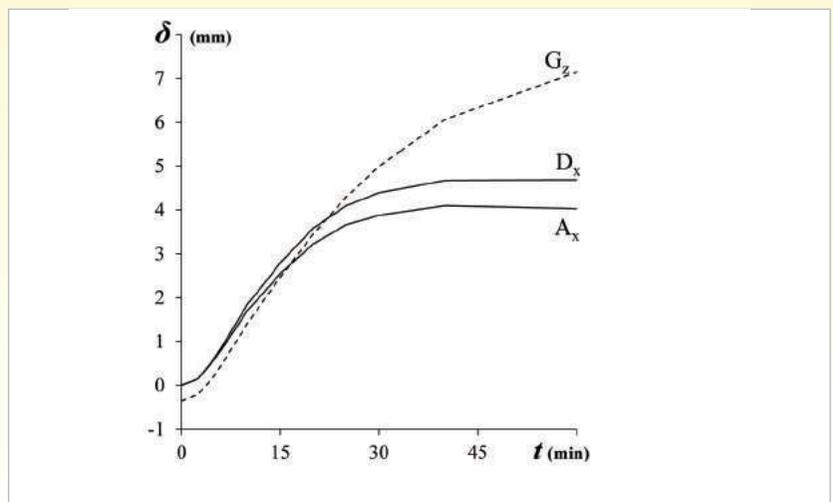


Figura 7b - Evolução do comportamento termomecânico: deslocamentos.

4. CONCLUSÕES

Este exercício demonstra a aplicabilidade desta metodologia para analisar o comportamento de estruturas em situações de incêndio. O código e as rotinas criadas para automatizar o procedimento desta metodologia permitem a aplicação desta metodologia a estruturas de grandes dimensões, como instalações industriais de alto nível (plataformas e refinarias de petróleo, estruturas de contenção em instalações nucleares, isolamento de rotas de fuga etc.). Um estudo de validação deste procedimento foi apresentado ainda em Zhang et al. (2016), com boa correlação entre os resultados.

A metodologia de análise baseia-se em um acoplamento unidirecional, pois a etapa termomecânica utiliza os resultados obtidos pela simulação do incêndio. Desta forma, pequenas modificações na estrutura, modificações na malha de elementos finitos e/ou redimensionamentos, não requerem que todo o procedimento seja reiniciado. Além desta, outra vantagem do acoplamento unidirecional é permitir que cada etapa da análise seja realizada por um grupo de pesquisa, cada um com suas respectivas expertises.

5. BIBLIOGRAFIA

ABNT NBR 14323: 2013, Dimensionamento de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios em situação de incêndio, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

ABNT NBR 14432: 2001, Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 15200: 2012, Dimensionamento de pilares em situação de incêndio, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012.

BAUM, H., 2011, "Simulating fire effects on complex building structures", *Mechanics Research Communications*, v. 38, pp. 1-11.

DAI, X.H., WANG, Y.C., BAILEY, C.G., 2010, "Numerical modelling of structural fire behaviour of restrained steel beam-column assemblies using typical joint types", *Engineering Structures*, v. 32, pp. 2337-2351.

DOTREPPE, J. e FRANSSSEN, J., 1985, "The Use of Numerical Models for the Fire Analysis of Reinforced Concrete and Composite Structures", *Engineering Analysis*, v. 2 (2), pp. 67-74.

DUTHINH, D., MCGRATTAN, K., KHASKIAC, A., 2008, "Recent advances in fire-structure analysis", *Fire Safety Journal*, v. 43, pp. 161-167.

EN 1991-1-2, 2002, EUROCODE 1 - Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures exposed to fire, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

EN 1993-1-2, 2005, EUROCODE 3 - Design of steel structures - Part 1.2: Structural fire design, Comité Européen de Normalisation, Brussels.

FRANSSSEN, J., 2005, "SAFIR. A Thermal/Structural Program Modelling Structures under Fire", *Engineering Journal*, v. 42 (3), pp. 143-158.

KUMAR, S., MILES, S., WELCH, S., VASSART, O., ZHAO, B., LEMAIRE, A., NOORDIJK, L., FELLINGER, J., FRANSSSEN, J., 2006, FIRESTRUC

- Integrating advanced three-dimensional modelling methodologies for predicting thermo-mechanical behavior of steel and composite structures subjected to natural fires, Research Programme of the Research Fund for Coal and Steel.

LANDESMANN, A. e BATISTA, E., 2005, "Inelastic analysis of cylindrical steel containment vessels under internal accident conditions", *Nuclear Engineering and Design*, v. 235, pp. 541-555.

LANDESMANN, A., BATISTA, E., ALVES, J., 2005, "Implementation of advanced analysis for steel-framed structures under fire conditions", *Fire Safety Journal*, v. 40 (4), pp. 339-366.

MCGRATTAN, K., HOSTIKKA, S., MCDERMOTT, R., FLOYD, J., WEINSCHENK, C., OVERHOLT, K., 2013a, *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST Special Publication 1019 (sixth edition), National Institute of Standards and Technology, Maryland, EUA.

MCGRATTAN, K., HOSTIKKA, S., MCDERMOTT, R., FLOYD, J., WEINSCHENK, C., OVERHOLT, K., 2013b, *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical Model*, NIST Special Publication 1018 (sixth edition), National Institute of Standards and Technology, Maryland, EUA.

PRASAD, K. e BAUM, H. R., 2005, "Coupled fire dynamics and thermal response of complex building structures", In: *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 30, pp. 2255-2262.

SANDSTRÖM, J., WICKSTRÖM, U., VELJKOVIC, M., 2009, "Adiabatic Surface Temperature: A sufficient Input Data for a Thermal Model", In: *Proceedings of Application of Structural Fire Engineering*, pp. 102-107, Prague, Czech Republic.

SARRAJ, M., BURGESS, I.W., DAVISON, J., PLANK, R., 2007, "Finite element modelling of steel fin plate connections in fire", *Fire Safety Journal*, v. 42, pp. 408-415.

SAS, 2009, *ANSYS Reference Manual - version 12*, Swanson Analysis Systems Inc.

SILVA, J.C. e LANDESMANN, A., 2010a, "Application of a 3D Fluid-Thermal-Mechanical Model for Performance-Based Analysis of Composite Structures under Fire", In: *Proceedings of SSRC Annual Stability Conference*, Orlando, EUA.

SILVA, J.C. e LANDESMANN, A., 2010b, "A coupled Fluid-Thermal-Mechanical Analysis of Composite Structures under Fire Conditions", In: *Proceedings of SDSS'Rio 2010 - Stability and Ductility of Steel Structures*, Rio de Janeiro, Brasil.

SILVA, J.C. e LANDESMANN, A., 2013, "Performance-based analysis of steel concrete composite floor exposed to fire", *Journal of Constructional Steel Research*, v. 83, pp. 117-126.

SILVA, J.C., 2014, *Modelo Tridimensional de Interface para Análise Fluido-Termomecânica de Estruturas em Situação de Incêndio*, Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro.

SILVA, J.C., LANDESMANN, A., RIBEIRO, F.L., 2014, "Performance-based analysis of cylindrical steel containment Vessels exposed to fire", *Fire Safety Journal*, v. 69, pp. 126-135.

SILVA, J.C., LANDESMANN, A., RIBEIRO, F.L., 2016, "Fire-thermomechanical interface model for performance-based analysis of structures exposed to fire", *Fire Safety Journal*, v. 83, pp. 66-78.

WANG, P., WANG, Y., LI, G., 2010, "A new design method for calculating critical temperatures of restrained steel column in fire", *Fire Safety Journal*, v. 45, pp. 349-360.

WICKSTRÖM, U., 2004, "Heat transfer by radiation and convection in fire testing", *Fire and Materials*, v. 28, pp. 411-415.

WICKSTRÖM, U., DUTHINH, D., MCGRATTAN, K., 2007, "Adiabatic Surface Temperature for Calculating Heat Transfer to Fire Exposed Structures", In: *Proceedings of The Eleventh Interflam Conference*, Londres, Reino Unido.

WICKSTRÖM, U., ROBBINS, A., BAKER, G., 2010, "The Use of Adiabatic Surface Temperature to Design Structures for Fire", In: *Proceedings of Structures in Fire (SIF)*, pp. 951-958, Michigan, EUA.

ZHANG, C., SILVA, J.C., WEINSCHENK, C., KAMIKAWA, D., HASEMI, Y., 2016, "Simulation Methodology for Coupled Fire-Structure Analysis: Modeling Localized Fire Tests on a Steel Column", *Fire Technology*, v. 52, pp. 239-262.