

DESEMPENHO AO FOGO DE PILARES DE AÇO E MISTOS AÇO E CONCRETO PARA UTILIZAÇÃO EM REFINARIAS DE PETRÓLEO

Thiago da Cruz Colonese

RESUMO

Este artigo tem por objetivo avaliar o desempenho termomecânico sob incêndio de diferentes tipologias de pilares de aço e mistos visando aplicação em estruturas industriais de refinarias de petróleo. No caso dos pilares mistos, empregou-se, além do concreto convencional de cimento Portland, o concreto refratário de cimento aluminoso, por ser um material de elevado desempenho sob altas temperaturas (em comparação ao concreto convencional) e com o intuito de estimar o benefício quando da sua utilização. As análises numéricas realizadas, utilizando o programa computacional SAFIR, permitiram estimar a variação do campo de temperaturas nas seções transversais estudadas, o comportamento termomecânico dos pilares isolados durante o incêndio e o tempo de falha estrutural para um carregamento correspondente a 50% da resistência à temperatura ambiente. Para obter a variação dos esforços resistentes durante o incêndio, fez-se uso dos procedimentos analíticos de cálculo estabelecidos pela NBR 14323:2013. Os resultados obtidos indicaram que os pilares mistos totalmente revestidos por concreto refratário apresentaram melhor desempenho tanto durante o incêndio quanto nas resistências residuais.

Palavras-chaves: Pilares. Incêndio. Refinarias de Petróleo.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, nas refinarias nacionais, as estruturas de aço que suportam equipamentos e tubulações, quando situadas em áreas sujeitas a incêndio, têm seus elementos protegidos contra o fogo através da aplicação de argamassa de cimento *Portland* ou concreto refratário, sendo que em ambos os casos a espessura do revestimento deve ser de 50 mm.

A aplicação desses materiais requer a utilização de dispositivos de ancoragem, tais como telas e grampos, a fim de garantir tanto a aderência mecânica entre o aço e o revestimento como a integridade da proteção durante o incêndio.

Todavia, a sua aplicação é trabalhosa e demorada, pois os grampos devem ser soldados, as telas de ancoragem devem envolver todo o elemento a ser protegido e a moldagem do revestimento requer grandes quantidades de recortes das formas. O processo de desmoldagem requer cuidados especiais para evitar danos ao material de isolamento, como os mostrados na Figura 1.

Figura 1 - Exemplos de danos no *fireproofing* de estruturas industriais.



Fonte: CENTER, 2010.

Visando racionalizar o uso dos materiais existentes, a utilização de elementos mistos pode apresentar eficiência significativa. A ideia de associar o concreto ao aço tinha como objetivo proteger o aço contra a corrosão e fogo de forma simples e com baixo custo, sem levar em consideração a contribuição do concreto na capacidade resistente do elemento estrutural.

Todavia, os sistemas estruturais formados por elementos mistos de aço e concreto vêm sendo utilizados mundo afora nos projetos de edifícios residenciais e comerciais e, em função dos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas tanto no concreto quanto no aço, essa tendência deverá ser ampliada ainda mais nos diversos ramos da construção civil.

A utilização de elementos mistos, considerando a capacidade resistente tanto do concreto armado como do aço, possibilita a redução das dimensões da seção transversal e o aproveitamento das vantagens econômicas, construtivas e estruturais intrínsecas a cada um dos materiais.

Entre as vantagens dos elementos mistos, destacam-se a redução no consumo de aço estrutural, o aumento da rigidez global e a proteção contra a corrosão e fogo. Adicionalmente, caso o concreto seja de elevada performance a altas temperaturas, a integridade estrutural do aço poderá permanecer inalterada durante todo o incêndio.

Assim, a competitividade dos elementos mistos de aço e concreto em ambientes industriais está fundamentada na possibilidade de redução do prazo de execução, no desempenho satisfatório sob condições de incêndio e no tempo de reparo diminuto.

O presente artigo tem por finalidade avaliar o desempenho termomecânico sob incêndio de diferentes tipologias de pilares de aço e mistos (aço-concreto) para aplicação em estruturas de refinarias de petróleo, conforme as recomendações normativas vigentes sobre o tema.

Nos pilares mistos empregou-se, além do concreto convencional de cimento Portland, o concreto refratário de cimento aluminoso, por ser um material de elevada performance a altas temperaturas (em comparação ao concreto convencional) e com o intuito de estimar o benefício quando da sua utilização. A resistência estrutural dos pilares em situação de incêndio será determinada de acordo com a NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO, 2013).

O programa computacional SAFIR (FRANSSEN; KODUR; MASON, 2008) será utilizado para estimar a variação do campo de temperaturas nas seções transversais e o tempo de falha estrutural dos pilares isolados durante o incêndio.

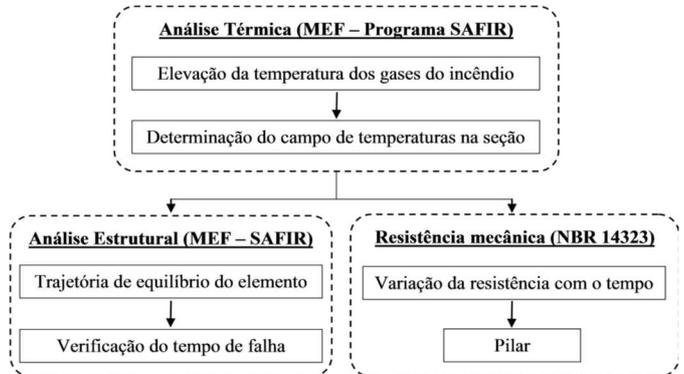
2 METODOLOGIA

2.1 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

A Figura 2 apresenta o procedimento empregado para avaliar o desempenho termomecânico dos pilares de aço e mistos em situação de incêndio. A primeira etapa consiste em obter a distribuição do campo de temperaturas nas seções transversais dos elementos (análise térmica transiente).

A etapa seguinte consiste em (i) obter o tempo de falha estrutural dos elementos isolados para um carregamento correspondente a 50% da resistência à temperatura ambiente (análise estrutural) e (ii) determinar a variação do esforço resistente com o tempo transcorrido de incêndio.

Figura 2 - Metodologia de análise termomecânica.



Fonte: O AUTOR, 2011.

As análises térmicas foram desenvolvidas considerando todas as faces da seção transversal dos pilares expostos ao incêndio de hidrocarbonetos (curva "H"), por se tratarem de elementos para aplicação em estruturas industriais de refinarias de petróleo. A Figura 3 contempla a curva de incêndio utilizada no estudo.

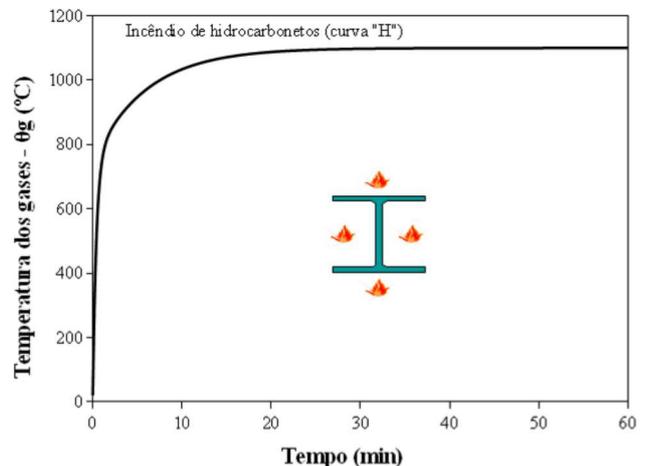


Figura 3 - Curva de incêndio de hidrocarbonetos.

Fonte: EUROPEAN, 2002.

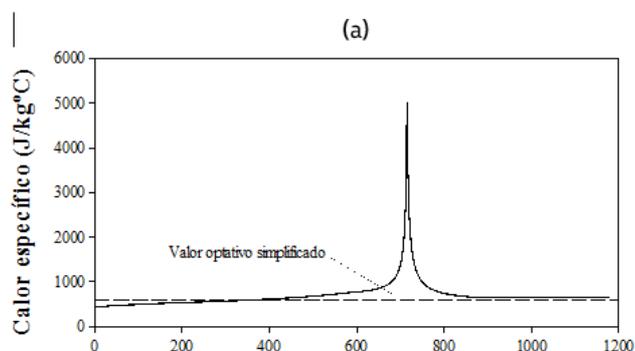
2.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DOS MATERIAIS

As propriedades térmicas e mecânicas não lineares do aço e concreto convencional (CC), em temperaturas elevadas, estão de acordo com os seguintes códigos normativos: NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO, 2013), EC-2/Parte 1-2 (EUROPEAN, 2003^a), EC-3/Parte 1-2 (EUROPEAN, 2003c) e EC-4/Parte 1-2 (EUROPEAN, 2003b).

Além disso, tais propriedades encontram-se incorporadas no programa computacional SAFIR (FRANSEN; KODUR; MASON, 2008) e, portanto, foram utilizadas de forma direta nas análises térmica e estrutural.

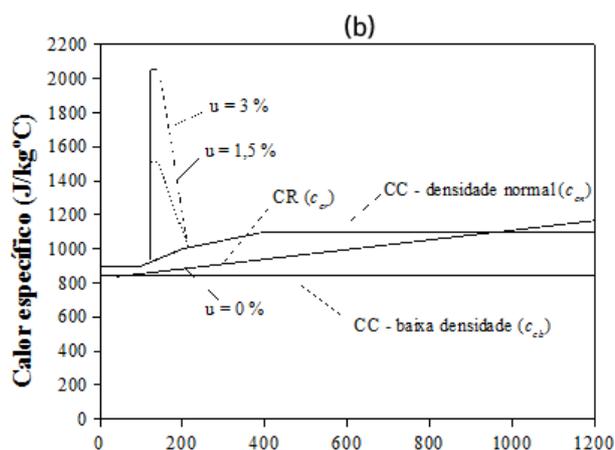
Entretanto, para o concreto refratário (CR), as propriedades adotadas foram as disponíveis em Bazant e Kaplan (1996) e, quando necessário, foram feitas interpolações lineares com os valores encontrados. Gráficos 1 (a) e (b) apresentam o calor específico do aço e dos concretos convencional e refratário em função da temperatura, enquanto os Gráficos 2 (a) e (b) ilustram a condutividade térmica.

Gráfico 1 - Calor específico em função da temperatura: (a) aço e



(b) CC e CR.

Fonte: EUROPEAN, 2003c.

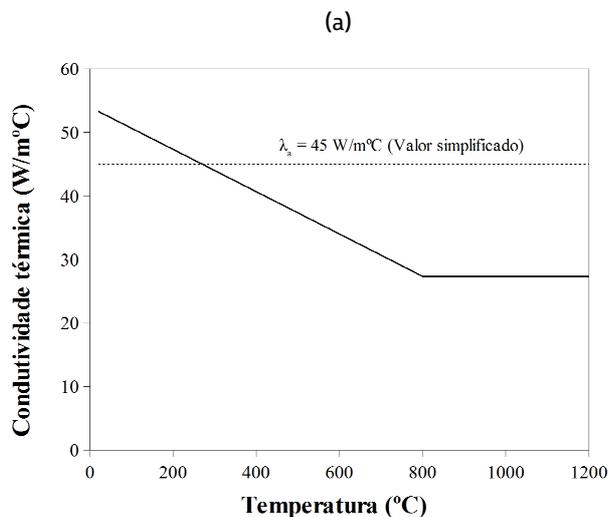


Fonte: O AUTOR, 2011.

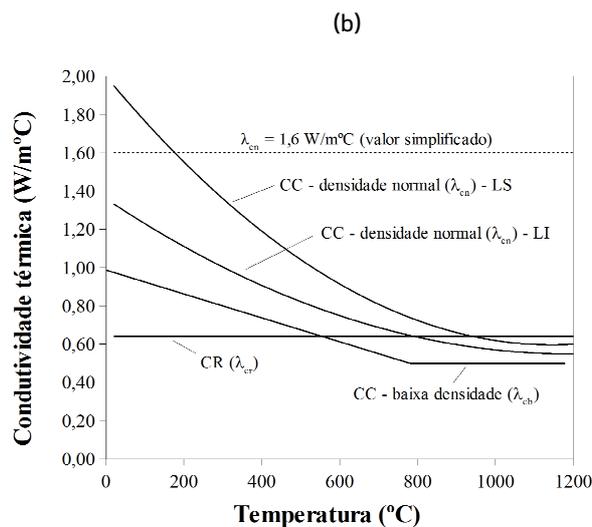
Em virtude de não se terem disponíveis as propriedades térmicas da argamassa (ARG), adotaram-se as propriedades do concreto de baixa densidade estabelecidas pelo Eurocódigo 4 (EUROPEAN, 2003b), embora a condutividade térmica da argamassa de cimento Portland seja maior que a do concreto de baixa densidade. Na prática, as elevações da

temperatura nas seções metálicas revestidas por argamassa serão maiores que as estimadas através desta consideração.

Gráfico 2 - Condutividade térmica em função da temperatura: (a) aço e (b) CC e CR.



Fonte: EUROPEAN, 2003c.



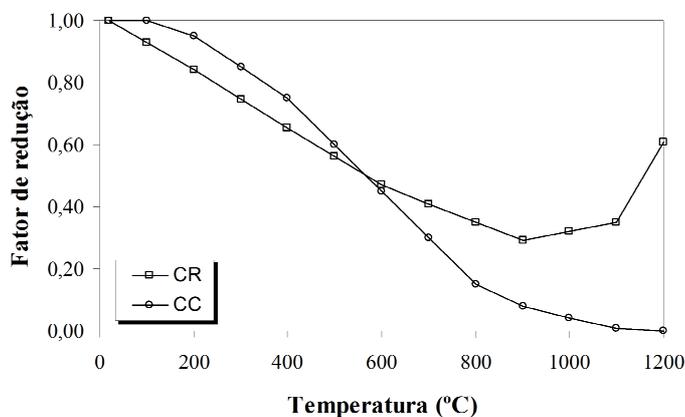
Fonte: O AUTOR, 2011.

Em virtude de não se terem disponíveis as propriedades térmicas da argamassa (ARG), adotaram-se as propriedades do concreto de baixa densidade estabelecidas pelo Eurocódigo 4 (EUROPEAN, 2003b), embora a condutividade térmica da argamassa de cimento Portland seja maior que a do concreto de baixa densidade. Na prática, as elevações da temperatura nas seções metálicas revestidas por argamassa serão maiores que as estimadas através desta consideração.

Na avaliação do desempenho termomecânico empregaram-se os seguintes tipos de concreto: convencional de densidade normal com agregados silicosos (EUROPEAN, 2003a) e refratário aluminoso com agregados de chamotas (BAZANT; KAPLAN, 1996).

As variações da resistência à compressão com a temperatura, tanto do concreto refratário aluminoso (agregados de chamotas) como do convencional com agregados silicosos, encontram-se ilustradas no Gráfico 3 por meio dos fatores de redução.

Gráfico 3 - Fatores de redução da resistência à compressão do concreto convencional e refratário aluminoso.

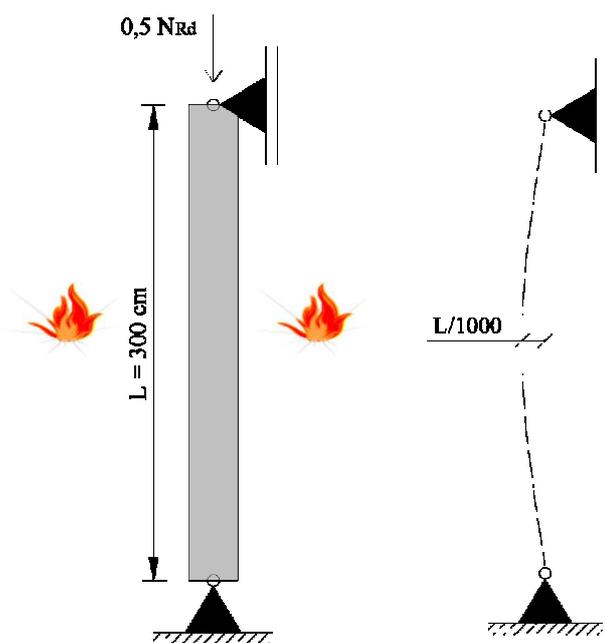


Fonte: O AUTOR, 2011.

2.3 MODELO ESTRUTURAL

O modelo estrutural adotado encontra-se ilustrado na Figura 4. Em todos os pilares, considerou-se uma imperfeição geométrica inicial, δ_0 , igual a $L/1000$. A carga aplicada no topo corresponde a 50% da força axial de compressão resistente de cálculo à temperatura ambiente ($0,5 N_{Rd}$). A simulação numérica dos pilares mistos e de aço foi feita discretizando-os em 10 elementos finitos de viga-coluna e considerando um intervalo de tempo, Δt , igual a 30 segundos.

Figura 4 - Modelo estrutural do pilar com imperfeição geométrica inicial sob ação de carga estática e do fogo.



Fonte: O AUTOR, 2011.

2.4 TIPOLOGIAS PROPOSTAS

A configuração da seção transversal dos pilares foi escolhida de forma que os valores das suas forças axiais resistentes de cálculo à plastificação total ($N_{pl,Rd}$) fossem similares, tomando como base uma seção transversal em aço (HP 250 x 85) usualmente empregada nas estruturas de refinarias de petróleo.

Além disso, a geometria da seção transversal foi definida de modo a atender os requisitos normativos estabelecidos pelas normas NBR 8800 (ASSOCIAÇÃO, 2008) e NBR 14323 (ASSOCIAÇÃO, 2013), as quais tratam do dimensionamento de pilares à temperatura ambiente e em situação de incêndio, respectivamente.

O módulo de elasticidade do aço estrutural e das barras da armadura, E_a , foi tomado igual a 205 GPa. Adotou-se, para as barras da armadura, o aço CA-50, cuja resistência ao escoamento, f_s , é igual a 500 MPa. Os aços estruturais adotados para os perfis são: (i) ASTM A36 ($f_s = 250$ MPa), (ii) ASTM A572 Gr 50 ($f_s = 345$ MPa), (iii) VMB 300 ($f_s = 300$ MPa) e (iv) VMB 350 ($f_s = 350$ MPa).

Em cada seção transversal mista foram adotados dois tipos de concreto: convencional de densidade normal com agregados silicosos (EUROPEAN, 2003a) e refratário aluminoso com agregados de chamotas (BAZANT; KAPLAN, 1996).

Para ambos os concretos, adotou-se uma única resistência característica à compressão (f_{ck}) de valor igual a 30 MPa e a massa específica, para o cálculo do peso próprio, foi tomada igual a 2300 kg/m^3 (EUROPEAN, 2003a). A massa específica do *fireproofing* foi tomada igual a 1800 kg/m^3 para a determinação do peso próprio dos pilares de aço protegidos.

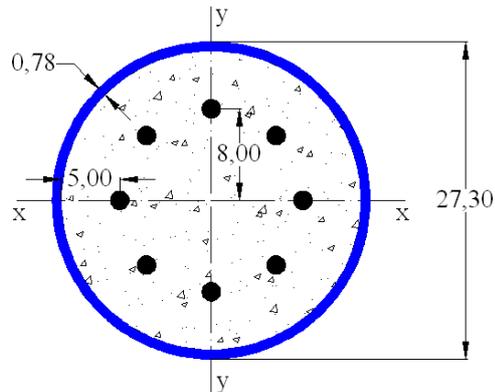
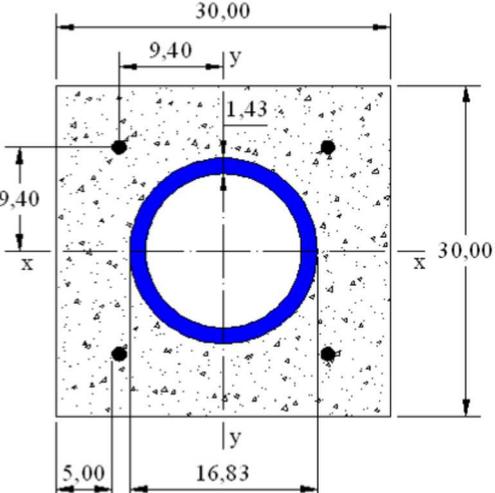
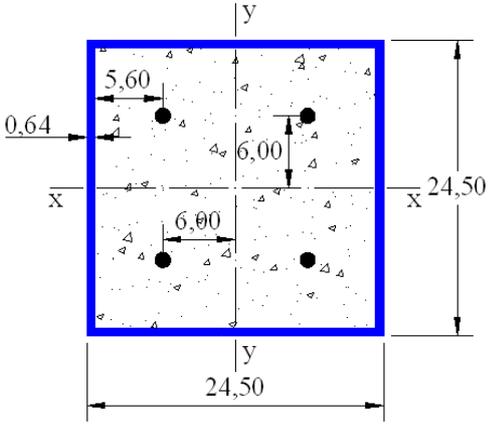
Os Quadros 1 e 2 apresentam, respectivamente, as características das seções transversais dos pilares formados por perfis H e dos formados por perfis tubulares.

Quadro 1 - Características das seções transversais dos pilares formados por perfis H.

Seção	Geometria (dimensões: cm)	Propriedades
<p>Pilar misto formado por perfil de aço totalmente revestido com concreto (PM_PTR)</p>		<p>Perfil: W 150 x 37,1 $\Phi_{\text{barra}} = 16 \text{ mm}$ ASTM A572 Gr 50 $N_{\text{pl,Rd}} = 3386 \text{ kN}$ $P_{\text{linear}} = 2,31 \text{ kN/m}$</p>
<p>Pilar misto formado por perfil de aço parcialmente revestido com concreto (PM_PPR)</p>		<p>Perfil: W 250 x 73 $\Phi_{\text{barra}} = 16 \text{ mm}$ ASTM A36 $N_{\text{pl,Rd}} = 3443 \text{ kN}$ $P_{\text{linear}} = 2,0 \text{ kN/m}$</p>
<p>Pilar de aço formado por perfil revestido com fire-proofing (PA_PRF)</p>	<p>(dimensões em cm)</p>	<p>Perfil: HP 250 x 85 ASTM A572 Gr 50 $N_{\text{pl,Rd}} = 3403 \text{ kN}$ $P_{\text{linear}} = 2,40 \text{ kN/m}$</p>

Fonte: O AUTOR, 2011.

Quadro 2 - Características das seções transversais dos pilares formados por perfis tubulares.

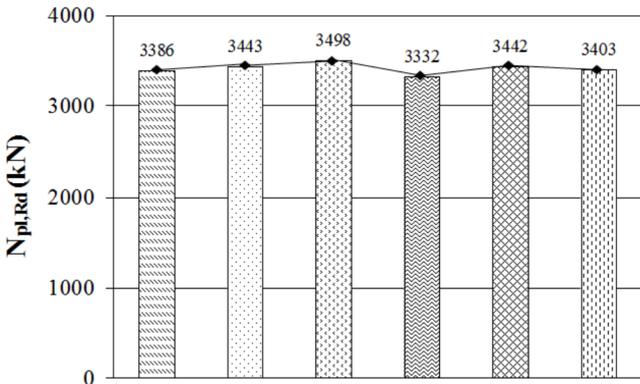
Seção	Geometria (dimensões: cm)	Propriedades
<p>Pilar misto formado por perfil tubular circular de aço preenchido com concreto (PM_PTCP)</p>		<p>Perfil: D = 27,3 cm $\Phi_{\text{barra}} = 16 \text{ mm}$ VMB 300 $N_{\text{pl,Rd}} = 3498 \text{ kN}$ $P_{\text{linear}} = 1,67 \text{ kN/m}$</p>
<p>Pilar misto formado por perfil tubular circular de aço revestido com concreto (PM_PTCR)</p>		<p>Perfil: D = 16,83 cm $\Phi_{\text{barra}} = 12,5 \text{ mm}$ VMB 300 $N_{\text{pl,Rd}} = 3332 \text{ kN}$ $P_{\text{linear}} = 2,1 \text{ kN/m}$</p>
<p>Pilar misto formado por perfil tubular quadrado de aço preenchido com concreto (PM_PTQP)</p>		<p>Perfil: b = 24,5 cm $\Phi_{\text{barra}} = 12,5 \text{ mm}$ VMB 350 $N_{\text{pl,Rd}} = 3442 \text{ kN}$ $P_{\text{linear}} = 1,8 \text{ kN/m}$</p>

Fonte: O AUTOR, 2011.

O Gráfico 4 contempla os valores das forças axiais resistentes de cálculo à plastificação total das seções transversais propostas. Observa-se que as forças de cada tipologia possuem a mesma ordem de grandeza.

As maiores variações encontradas, tomando como base o pilar de aço revestido com *fireproofing* (PA_PRF), são da ordem de +2,8% para o pilar PM_PTCP e -2,1% para o pilar PM_PTCR.

Gráfico 4 - Forças axiais resistentes à plastificação total das seções transversais.



Fonte: O AUTOR, 2011.

Cabe ressaltar que a resistência mecânica do *fireproofing* não é considerada na determinação da capacidade resistente do elemento protegido, assumindo somente a função de isolamento térmico.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 DOMÍNIO DA TEMPERATURA

As distribuições do campo de temperaturas nas seções transversais formadas por perfis H e tubulares estão presentes nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

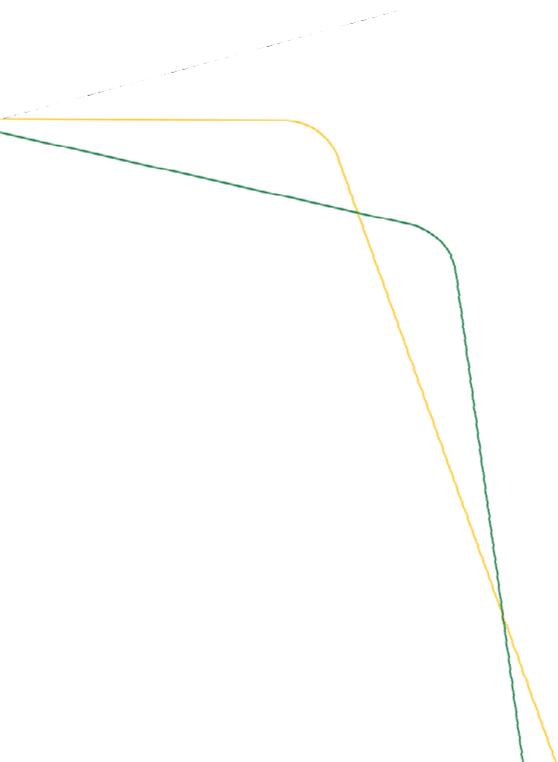
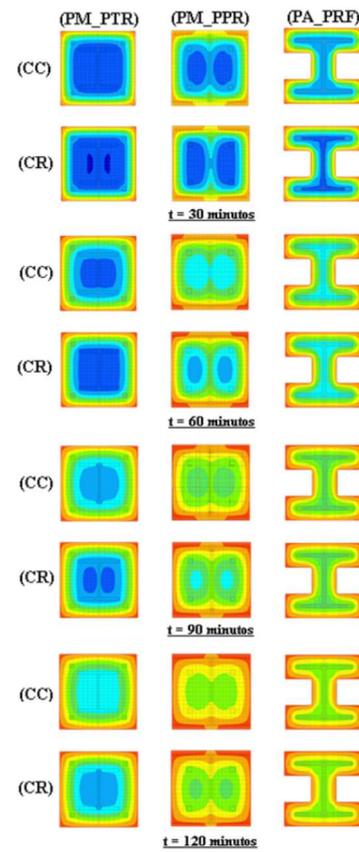
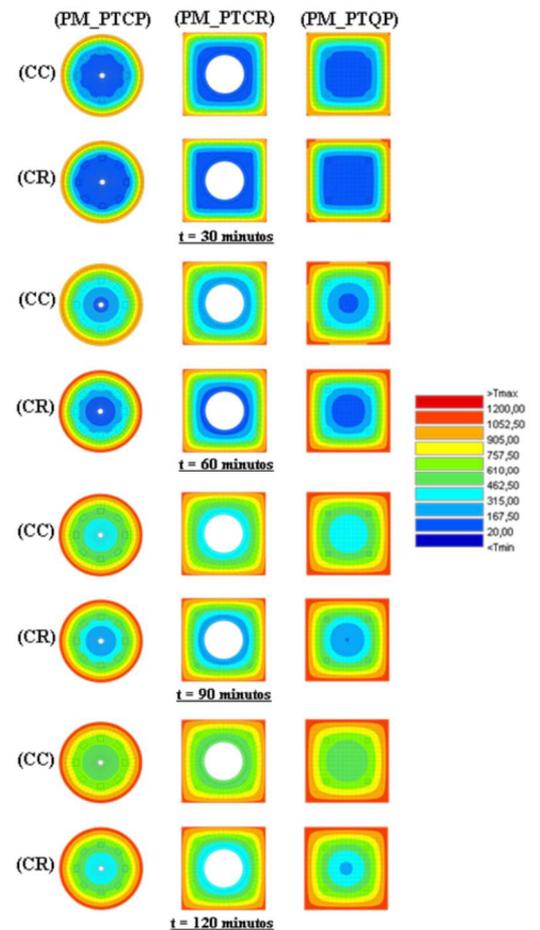


Figura 5 - Distribuição do campo de temperaturas nas seções dos pilares formados por perfis H.



Fonte: O AUTOR, 2013.

Figura 6 - Distribuição do campo de temperaturas nas seções dos pilares formados por perfis tubulares.



Fonte: O AUTOR, 2013.

A partir da observação dos resultados apresentados acima, destaca-se que: (i) os núcleos das seções dos pilares mistos compostos por CR apresentam temperaturas inferiores aos dos pilares compostos por CC, visto que as propriedades térmicas do CR são melhores quando comparadas com as do CC; (ii) em relação ao pilar de aço revestido por fireproofing (PA_PRF), as variações dos campos de temperaturas da seção revestida por ARG e CR não apresentam diferenças significativas, uma vez que as propriedades

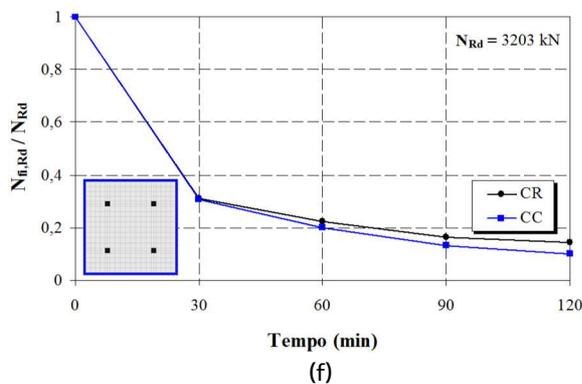
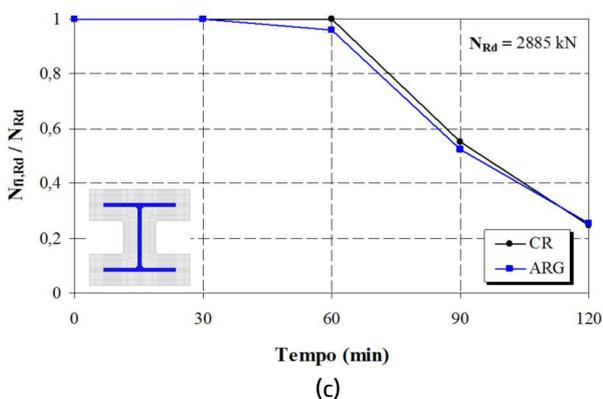
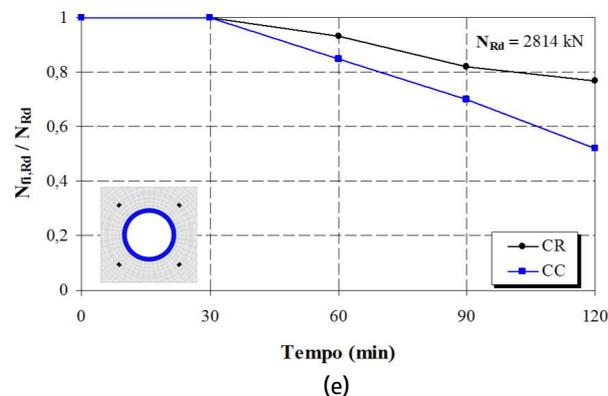
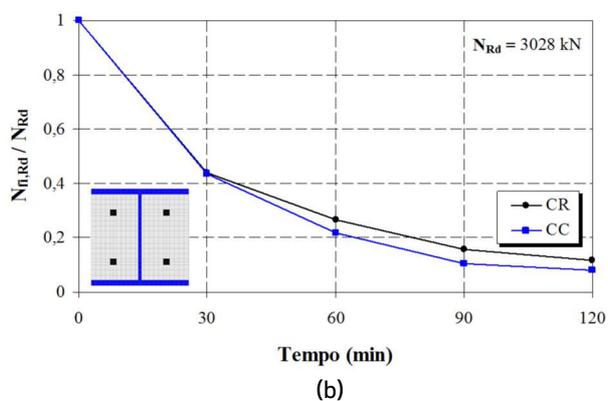
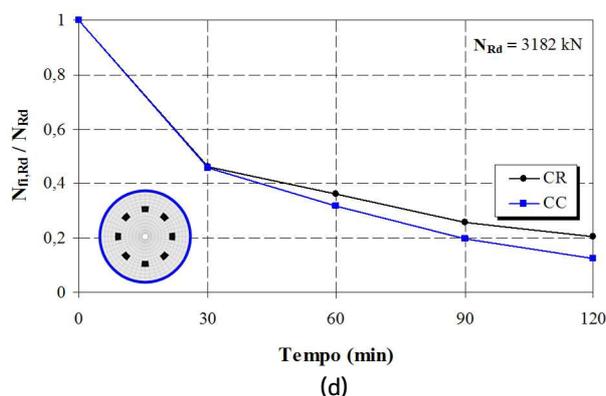
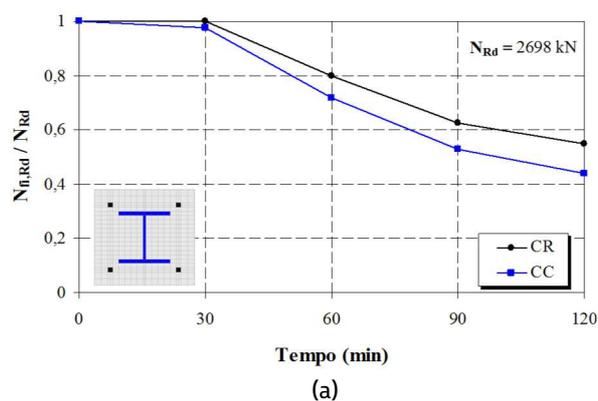
térmicas adotadas para estes dois materiais são similares.

3.2 RESPOSTA TERMOMECÂNICA

3.2.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO

As variações da resistência à compressão axial dos pilares formados por perfis H e tubulares estão ilustradas nos Gráficos 5 (a - f).

Gráfico 5 - Variação da resistência à compressão axial normalizada dos pilares: (a) PM_PTR, (b) PM_PPR, (c) PA_PRF, (d) PM_PTCP, (e) PM_PTCR e (f) PM_PTQP.



Fonte: O AUTOR, 2013.

No instante de tempo igual a 120 minutos, a resistência do pilar PM_PTR é da ordem de 44%, para o CC, e 55%, para o CR, da sua resistência à temperatura ambiente, conforme ilustrado no Gráfico 5 (a).

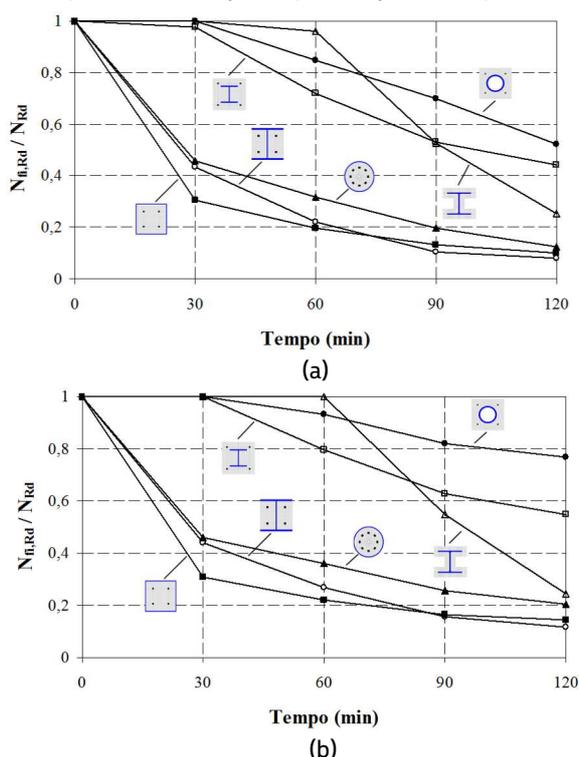
O pilar de aço revestido por fireproofing (PA_PRF), embora preserve a sua resistência à temperatura ambiente durante 60 minutos (Gráfico 5(c)), apresenta, para o tempo de 120 minutos, 25% da resistência à temperatura ambiente (para ambos os revestimentos).

Os pilares mistos PM_PPR, PM_PTCP e PM_PTQP (Figuras 11 (b), (d) e (f)) sofrem perda de resistência e rigidez de forma severa nos instantes iniciais (30 min.) e as suas resistências, depois de transcorrido 120 minutos, são inferiores, tanto para o CC como o CR, a 20% da estabelecida em temperatura ambiente.

Observando o Gráfico 5(e), nota-se que o pilar PM_PTCR composto por CR apresenta melhor desempenho tanto durante o incêndio quanto na resistência aos 120 minutos, pois a redução ocorre de forma gradual e conserva 77% da resistência à temperatura ambiente. De modo geral, os Gráficos 5 (a - f) mostram que o emprego do CR proporcionou ganho de resistência.

O Gráfico 6 (a) e (b) ilustram, de forma resumida, as curvas de redução da resistência à compressão axial dos pilares mistos de aço-CC e do pilar de aço revestido por ARG, bem como dos pilares mistos de aço-CR e do pilar de aço revestido por CR, respectivamente.

Gráfico 6 - Comparação entre os valores da resistência à compressão axial normalizada: (a) pilares mistos de aço-CC e pilar de aço revestido por ARG e (b) pilares mistos de aço-CR e pilar de aço revestido por CR.



Fonte: O AUTOR, 2013.

Observa-se que a redução da resistência à compressão axial dos pilares - cujos perfis de aço estão diretamente expostos ao fogo (PM_PPR, PM_PTCP e PM_PTQP) - ocorre de forma severa durante os 30 minutos iniciais do incêndio postulado ($t = 30$ min.), tanto para o CC como para o CR, pois a seção metálica exposta ao fogo perde resistência e rigidez de forma rápida.

Entretanto, a redução da resistência dos pilares mistos - cujos perfis de aço estão totalmente revestidos por concreto (PM_PTCCR e PM_PTR) - se inicia a partir do instante de tempo igual a 30 minutos, porém, a partir desse período, ela ocorre de forma atenuada durante todo o incêndio.

Com relação ao pilar de aço (PA_PRF) revestido com *fireproofing*, a redução da resistência à compressão axial inicia-se a partir do instante de tempo igual a 60 minutos, quando da utilização do CR. Por outro lado, a partir desse instante, a curva de redução do esforço resistente apresenta, independente do tipo de revestimento, maior inclinação em relação às curvas dos pilares mistos totalmente revestidos por concreto (PM_PTCCR e PM_PTR).

3.2.2 TRAJETÓRIAS DE EQUILÍBRIO

Os Gráficos 7 (a - f) apresentam as trajetórias de equilíbrio do deslocamento transversal (vs. tempo transcorrido de incêndio) a meia altura do vão dos pilares formados por perfis H e tubulares.

De acordo com os Gráficos 7 (a) e (e), observa-se que, depois de transcorridos 90 minutos desde o início do incêndio postulado, ocorre, para o nível de carregamento definido ($0,5 N_{rd}$), a formação de um mecanismo plástico de colapso na região estudada dos pilares PM_PTR e PM_PTCCR compostos por CC, respectivamente.

Entretanto, quando compostos por CR, não ocorre falha estrutural durante os 120 minutos de incêndio. Além disso, nota-se, através dos gráficos dos Gráficos 7 (b) e (c), que nos instantes de tempo iguais a 25 e 70 minutos ocorre falha estrutural nos pilares PM_PPR e PA_PRF, respectivamente.

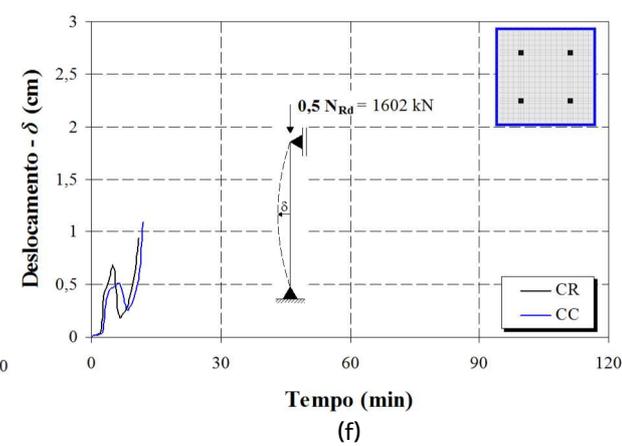
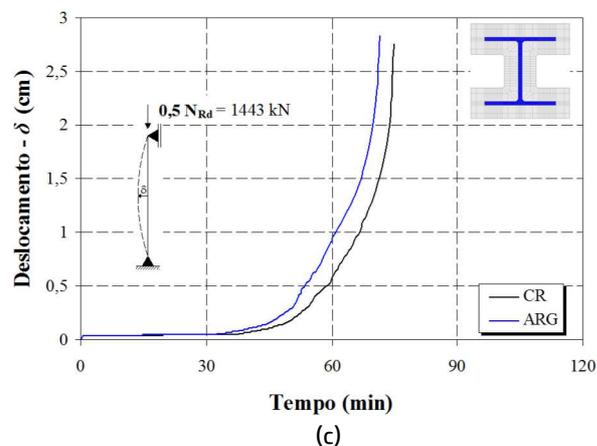
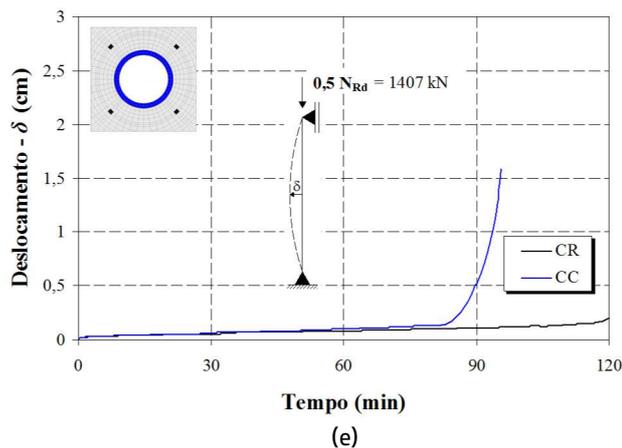
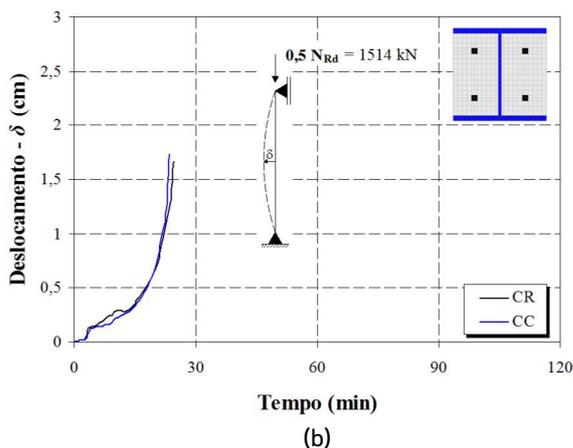
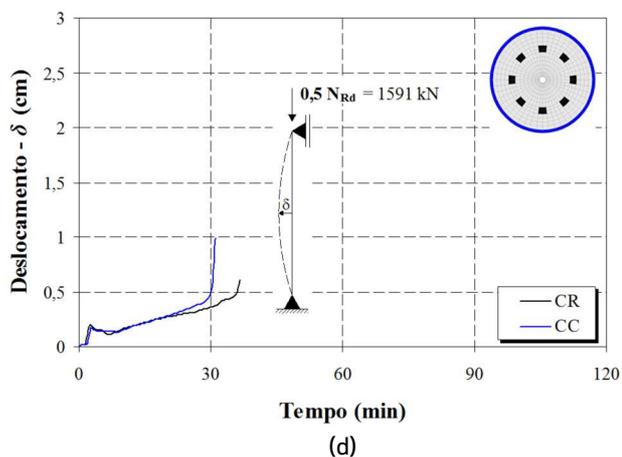
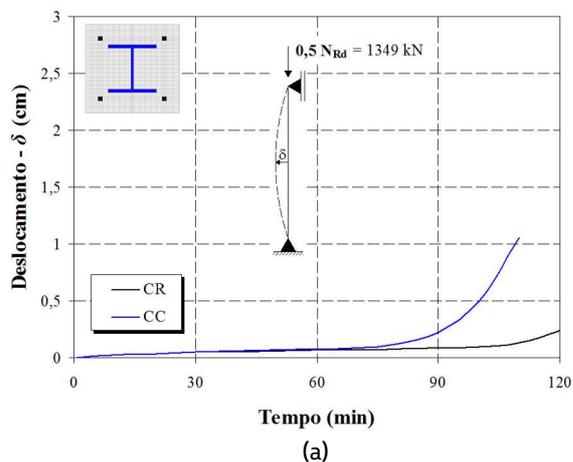
Para os pilares PM_PTCP e PM_PTQP, nos instantes iniciais do incêndio (i.e, até 3 e 5 minutos, respectivamente), a trajetória de equilíbrio é caracterizada pela expansão térmica dos materiais, ocasionando um significativo alongamento axial longitudinal das seções em virtude da exposição direta ao fogo.

Porém, no instante onde o aço atinge temperaturas superiores a 400°C (10 minutos), ocorre uma significativa erosão de suas propriedades mecânicas (resistência e rigidez), resultando na inversão da trajetória original que permanece por um curto intervalo de tempo (cerca de 6 e 3 minutos).

Com a recuperação da trajetória original, isto é, com a progressiva redução das propriedades mecânicas dos materiais, o colapso é observado na região estudada nos instantes de

tempo iguais a 30 e 12 minutos, respectivamente, conforme apresentado nos Gráficos 7 (d) e (f).

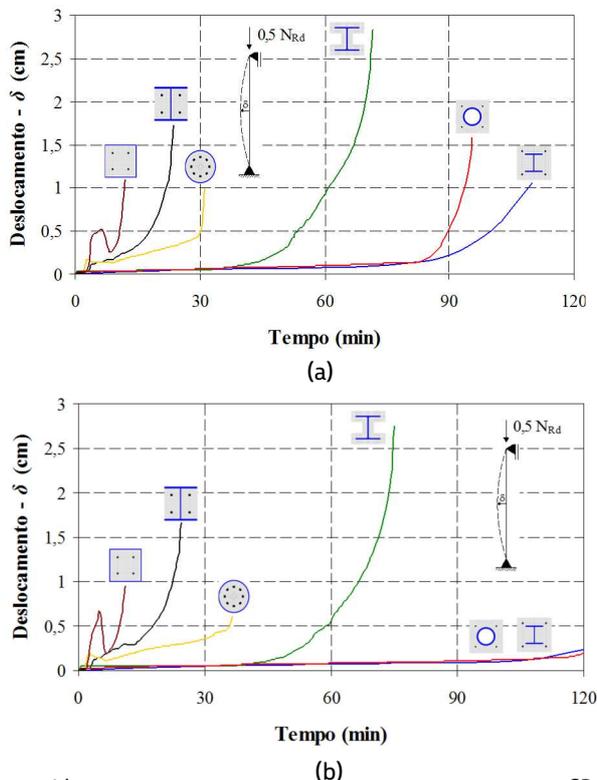
Gráfico 7 - Trajetória de equilíbrio do deslocamento transversal a meia altura do vão dos pilares: (a) PM_PTR, (b) PM_PPR, (c) PA_PRF, (d) PM_PTCP, (e) PM_PTCT e (f) PM_PTQP.



Fonte: O AUTOR, 2013.

Os Gráficos 8 (a) e (b) apresentam, de forma resumida, as trajetórias de equilíbrio do deslocamento transversal (vs. tempo transcorrido de incêndio) a meia altura do vão dos pilares mistos de aço-CC e do pilar de aço revestido por ARG, assim como dos pilares mistos de aço-CR e do pilar de aço revestido por CR, respectivamente.

Gráfico 8 - Trajetórias de equilíbrio do deslocamento transversal a meia altura do vão: (a) pilares mistos de aço-CC e pilar de aço revestido por ARG e (b) pilares mistos de aço-CR e pilar de aço



revestido por CR. Fonte: O AUTOR, 2013.

Constata-se que, nos pilares cujos perfis de aço estão diretamente expostos ao fogo (PM_PPR, PM_PTCP e PM_PTQP), ocorre, para ambos os concretos, falha estrutural logo nos instantes iniciais do incêndio postulado ($t \leq 30$ min.). Além disso, apenas nos pilares mistos revestidos por CR (PM_PTCR e PM_PTR) não ocorre falha estrutural durante os 120 minutos de incêndio.

4 CONCLUSÕES

Com relação às análises térmicas, como esperado, observou-se que a variação do campo de temperaturas (em função do tempo transcorrido de incêndio) nas seções transversais dos pilares mistos compostos por concreto refratário ocorreu de forma mais lenta em relação às dos compostos por concreto convencional, devido à condutividade térmica do primeiro concreto ser menor que a do segundo. Entretanto, nas seções de aço revestidas por

fireproofing, os campos de temperaturas variaram de forma similar, uma vez que as propriedades térmicas adotadas para os dois materiais de proteção térmica (argamassa e concreto refratário) possuem a mesma ordem de grandeza.

A camada de concreto refratário das seções dos pilares PM_PTR e PM_PTCR protegeu o perfil metálico de temperaturas superiores a 400°C durante 120 minutos de incêndio e, conseqüentemente, retardou a degradação das propriedades mecânicas do aço.

O *fireproofing* do pilar metálico (PA_PRF) retardou a perda de resistência do aço até o instante de tempo igual a 60 minutos ($T < 400^{\circ}\text{C}$). As temperaturas máximas atingidas pelas seções metálicas diretamente expostas ao fogo (PM_PTCP, PM_PTQP, PM_PPR) foram iguais à temperatura máxima dos gases do incêndio postulado ($T = 1100^{\circ}\text{C}$).

No que diz respeito à análise estrutural, os pilares de aço e mistos sofreram perda progressiva de resistência durante o incêndio, pois, com a elevação da temperatura, ocorrem variações na estrutura física e química dos materiais.

Assim, a resistência à compressão axial dos pilares mistos - cujos perfis de aço estão diretamente expostos ao fogo - foi reduzida de forma severa durante os instantes iniciais do incêndio postulado, em virtude da parcela de resistência do aço praticamente se anular.

Portanto, a resistência estrutural desses pilares durante o incêndio foi governada pela parcela de resistência do concreto. Todavia, nos pilares mistos - cujos perfis de aço estão totalmente revestidos por concreto - as curvas de redução da resistência estrutural apresentaram inclinação suave durante os 120 minutos de incêndio, devido à proteção proporcionada pela camada de concreto ao perfil de aço.

Além disso, nos pilares de aço revestidos com *fireproofing*, a redução do esforço resistente iniciou-se somente depois de transcorrido 60 minutos desde o início do incêndio. Em contrapartida, a partir desse período de tempo, a redução da resistência estrutural ocorreu de forma mais severa em relação às tipologias revestidas por concreto.

No instante de tempo igual a 120 minutos, os pilares PM_PTR e PM_PTCR compostos por concreto refratário conservaram, respectivamente, 55 e 77% da resistência estabelecida à temperatura ambiente.

Nos pilares onde as seções metálicas estão diretamente expostas ao incêndio (PM_PPR, PM_PTCP e PM_PTQP), a resistência à compressão reduziu-se em 80% da estabelecida à temperatura ambiente para ambos os concretos, ao passo que no pilar de aço (PA_PRF) reduziu-se em 75%.

Dessa forma, conclui-se que os pilares mistos, além de proporcionarem diversas vantagens econômicas, construtivas e estruturais, apresentaram, de modo geral, desempenho termomecânico sob incêndio satisfatório.

A utilização do concreto refratário proporcionou benefícios ao desempenho a fogo dos pilares mistos e, portanto, o seu uso poderia ser de grande importância nos projetos cujos requisitos de segurança sejam mais rigorosos.

Dentre os pilares formados por perfis H, o pilar PM_PTR apresenta o melhor desempenho termomecânico sob condições de incêndio, ao passo que o pilar PM_PTCR apresenta o melhor desempenho dentre todas as tipologias propostas.

ABSTRACT

This paper evaluates the thermo-mechanical performance under fire of different types of steel and composite columns for application in industrial structures of oil refineries. In the evaluation of composite columns were used in addition to conventional Portland cement concrete, the aluminous refractory concrete, as a material of high performance at elevated temperatures (compared to conventional concrete) and in order to estimate the benefit to use it. The numerical analysis performed using the computer program SAFIR, allowed to estimate the variation of the temperature field in the cross-sections studied, the thermo-mechanical behavior of the isolated elements during fire and the time of structural failure for a loading equal to 50% of the resistance at room temperature. The variation of the structural resistance of the columns, during fire, was calculated according to analytical procedures presented in NBR 14323:2013. The results indicated that the composite columns covered by refractory concrete presented better performance both during fire as residual resistance.

Keywords: Columns. Fire. Oil Refineries.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14323**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 8800**: projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BAZANT, Z. P.; KAPLAN, M. F. **Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models**. 1Th. London: Longman, 1996.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Process safety beacon**. Disponível em: <<http://www.aiche.org/CCPS/Publications/Beacon/index.aspx>>. Acesso em: 6 maio 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EC-2/Parte 1-2: actions design of concrete structures: structural fire design**. Brussels, 2003a.

_____. **EC-1/Parte 1-2: actions on structures: actions on structures exposed to fire**. Brussels, 2002b.

_____. **EC-4/Parte 1-2: design of composite steel and concrete structures: structural fire design**. Brussels, 2003c.

_____. **EC-3/Parte 1-2: design of steel structures: structural fire design**. Brussels, 2003d.

FRANSEN, J. M.; KODUR, V. K. R.; MASON, J. **User's manual for SAFIR 2007: a computer program for analysis of structures subjected to fire**. Belgium: University of Liège, 2008.



Thiago da Cruz Colonese

Graduação (2007) em Engenharia Civil, ênfase em Estruturas, pela UFRJ. Mestrado (2011) em Engenharia Civil, área de Estruturas e Materiais, pela COPPE/UFRJ. Petrobras. REDUC/EM - Duque de Caxias, RJ
E-mail: thiagocolonese@petrobras.com.br