

Intumescent paint as fire protection coating

Tinta intumescente como revestimento de proteção ao fogo

R. B. R.S. OLIVEIRA ^a
rodrigo_brso@yahoo.com.br

A. L. MORENO JUNIOR ^a
almoreno@fec.unicamp.br

L. C. M. VIEIRA ^a
vieira@fec.unicamp.br

Abstract

This paper is a compendium on intumescent paint and its main features regarding chemical composition, thermophysical properties and performance as a fire-retardant material. Some of the main technical publications and lines of research on the subject are presented herein. The purpose of this paper is to show the current stage of the technical research being conducted on the topic and enable a better understanding of this fire-retardant material.

Keywords: coatings, intumescence, fire-retardant material.

Resumo

O presente trabalho é um compêndio sobre tintas intumescentes, apresentando as principais características a respeito de sua composição química, propriedades termo físicas e desempenho como material de proteção contra incêndio. São apresentadas algumas das principais publicações técnicas e linhas de pesquisas sobre a intumescência. Objetiva-se, assim, elucidar o atual estágio técnico de pesquisas e possibilitar uma melhor compreensão sobre este material de proteção contra incêndio.

Palavras-chave: tintas, intumescência, materiais de proteção à incêndio.

^a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

1. Introdução

Os materiais de proteção térmica são concebidos para retardar o processo de transferência de calor da combustão para o elemento estrutural, protelando o efeito da variação de temperatura sobre a resistência do mesmo. De acordo com sua natureza, podem compor uma barreira isolante, diminuindo a taxa de transferência de calor para o elemento protegido. Há, também, materiais de proteção que desenvolvem reações químicas devido à elevação da temperatura. Estas reações podem absorver parte da energia que seria destinada ao componente estrutural e/ou originar um material com características isolantes.

A transferência de calor ocorre pelo meio material através da condução (meios estáticos) e da convecção (meios em movimento). Quando se prescinde do meio material, a transferência de calor ocorre por radiação, onde a energia é transportada por ondas eletromagnéticas. Um material de proteção de incêndio pode atuar como uma barreira física, diminuindo a taxa de transferência de energia. Como exemplo têm-se os materiais isolantes, como a alvenaria.

Outra possibilidade é a adoção de um material que, quando exposto a elevadas temperaturas, sofra reações químicas que absorvem uma parcela significativa da energia que seria destinada diretamente à estrutura e/ou levam a formação de uma nova interface de proteção térmica. Por exemplo, tem-se o gesso que, devido à sua capacidade de manter e liberar quimicamente água, é utilizado como material de proteção ao fogo. Quando aquecido, as ligações químicas existentes no gesso hidratado começam a se romper, liberando água de hidratação. Esta reação absorve a energia do fogo que seria conduzida ao elemento estrutural, formando assim uma barreira térmica. Através desta camada, o material protegido permanece a uma temperatura constante por volta de 100°C.

Já as tintas intumescentes, materiais de proteção alvo desta publicação, são compostos químicos que, quando submetidos a temperaturas elevadas, passam por diversas reações que originam uma espuma carbonizada com alto desempenho isolante.

Como vantagens desta proteção destacam-se:

- 1) Apresentam diversas das características desejáveis das tintas decorativas tradicionais como diferentes cores, bom acabamento superficial e durabilidade;
- 2) Não ocupam espaço e o acréscimo de carga é insignificante do ponto de vista estrutural;
- 3) Apesar de demandar experiência e rigoroso controle de qualidade, sua aplicação é simples e não requer fixação à estrutura, além da manutenção ser bastante facilitada;
- 4) Pode ser empregado na proteção das regiões de ligações estruturais;
- 5) Não modifica as propriedades intrínsecas do substrato (como as características mecânicas). Portanto, podem ser aplicada em estruturas existentes sem perda/alteração da capacidade estrutural.

No Brasil, o estudo de estruturas em situação de incêndio é relativamente recente. Os primeiros trabalhos na área datam de não mais do que vinte anos, como, por exemplo, Melhado [1], abordando a fundamentação do comportamento das estruturas de aço em situação de incêndio e apresentando critérios de proteção. Silva [2]

apresenta o estudo do comportamento de estruturas de aço submetidas a elevadas temperaturas. Apresentam-se, também, as expressões e curvas temperatura-tempo dos gases quentes que envolvem as chamas e a influência da ventilação, da carga de incêndio e da geometria da seção transversal na determinação da temperatura dos elementos metálicos. Comparam-se os critérios de segurança da norma brasileira e europeia para a situação de estruturas em situação de incêndio e são apresentadas considerações sobre o dimensionamento simplificado de elementos estruturais.

Dentre diversos e importantes trabalhos na área pode-se citar: Abreu e Fakury [3], no qual se avalia a elevação de temperatura em perfis de aço, desenvolvendo-se um programa para determinação da temperatura de elementos estruturais com e sem proteção; Fakury [4], cujo objetivo é divulgar e ilustrar a utilização da ABNT NBR 14323: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios em Situação de Incêndio, apresentando métodos de cálculo e aspectos relativos às propriedades do aço em situação de incêndio, às combinações de ações, proteção das estruturas de aço, elevação de temperatura e temperatura crítica; Martins [5], apresentando a determinação da temperatura crítica de barras submetidas à força normal de compressão e vigas sem a possibilidade de flambar lateralmente ou localmente e comparação da resistência resultante ao se dimensionar uma estrutura à temperatura ambiente e em situação de incêndio; Lopes Ribeiro [6], avaliando a precisão de procedimentos normativos para avaliação da distribuição de temperaturas atuantes na seção transversal de elementos estruturais em situação de incêndio, propondo-se um algoritmo computacional para a análise térmica transiente e não linear de modelos bidimensionais e tridimensionais.

Entretanto, poucos são os trabalhos nacionais dedicados especificamente à avaliação dos materiais de proteção térmica para elementos estruturais. Com esta abordagem, pode-se citar Guimarães [7], onde são apresentadas metodologias disponíveis para o dimensionamento do material de revestimento de estruturas de aço em situação de incêndio, e Andrade [8], no qual são apresentados os materiais de proteção térmica utilizados em edificações metálicas e a influência que exercem nos projetos de arquitetura. Nota-se, assim, uma lacuna de publicações nacionais avaliando a natureza e o desempenho de materiais específicos de proteção contra incêndio. Portanto, é foco e interesse do presente artigo apresentar os principais aspectos de tintas intumescentes como revestimento estrutural, trazendo à luz o atual estágio de pesquisas mundial sobre o assunto, abordando sua composição química, desempenho e comportamento termo físico.

2. Composição química

No campo da engenharia de estruturas, as tintas intumescentes, geralmente, são associadas como material de proteção à estrutura de aço em situação de incêndio, protelando a perda de resistência dos elementos estruturais. Entretanto, compostos intumescentes são empregados, também, na proteção de materiais inflamáveis e até de plásticos.

Independente do campo de utilização, os compostos intumescentes têm basicamente a mesma composição química. De acordo

com Troitzsch [9], a intumescência é obtida através dos seguintes componentes:

- **fonte de ácido:** trata-se, normalmente, do sal de um ácido inorgânico não volátil, tal como ácido bórico, sulfúrico ou fosfórico. Os mais empregados são os sais de ácido fosfórico, como por exemplo, o fosfato de amônio e polifosfato de amônio, que libertam o ácido em que se baseiam a temperaturas acima de 150°C. O ácido resultante desencadeia a primeira de uma série de reações químicas, iniciando com a desidratação dos compostos carbonáceos e sua carbonização subsequente.

- **composto carbonáceo:** trata-se de um composto com muitos radicais de hidroxila (-OH) que, quando submetido ao ataque ácido desidrata através de uma reação de esterificação e carboniza. Compostos utilizados com frequência são o pentaeritritol, amida e resinas fenólicas ou a base de ureia.

- **compostos espumíficos:** para este fim, compostos como parafinas cloradas, melamina ou guanidina são empregados. Sob a influência de calor, liberam grandes quantidades de gases não inflamáveis, tais como cloreto de hidrogênio (HCl), gás amônia (NH₃) ou gás carbônico (CO₂), originando uma espuma com aspecto de material carbonizado sobre o substrato. Os produtos da decomposição destes materiais (por exemplo, resíduos de parafinas cloradas) muitas vezes contribuem adicionalmente para a carbonização do composto carbonáceo.

- **resinas aglomerantes:** são responsáveis por envolver os gases

formados, evitando sua dispersão. Não devem endurecer. Pelo contrário, para melhor desempenho devem ter características termoplásticas. Um exemplo de material altamente recomendado são borrachas a base de cloro que amolecem e se fundem quando expostas a altas temperaturas e, simultaneamente, auxiliam o agente expansivo formando HCl, além de contribuir para a carbonização. Camino *et al* [10] cita um registro de patente americana de 1948 para apresentar a composição química de um composto intumescente. Segundo o registro, na formulação da intumescência o composto carbonáceo é a fonte de carbono para a formação de espuma carbonizada que envolve os gases formados. Vandersall *apud* Camino *et al* [10] classificou os componentes químicos dos sistemas intumescentes em quatro categorias:

1. Ácido inorgânico, livre ou originado devido à elevação da temperatura para 100 a 250°C;
 2. Composto polihidrico rico em carbono;
 3. Amina ou amida orgânicas;
 4. Composto halogenado (geralmente formado por flúor ou cloro).
- Alguns dos componentes apresentados na Tabela 1 atuam em mais do que um dos grupos acima citados e, assim, desempenham mais do que uma única função na intumescência. Entretanto, a combinação de quatro elementos quaisquer que atendam às condições acima listadas não é garantia de que o comportamento intumescente será desenvolvido pela mistura.

Para que a intumescência desenvolva uma série de processos

Tabela 1

Exemplos de materiais que atendem à formulação da intumescência

(Fonte: Vandersall *apud* Camino *et al* (10))

1. Fonte de ácidos inorgânicos	2. Compostos polihidricos
A. Ácidos	Amido
Fosfório	Dextrina
Sulfúrico	Sorbitol
Bórico	Pentaeritritol
B. Sais de Amônio	Resinas de Fenol - Formaldeído
Fosfatos, Polifosfatos	Metilol Melamina
Sulfatos	3. Aminas/Amidas
Haletos	Ureia
C. Fosfatos de Amina/Amida	Resinas de Ureia- Formaldeído
Uréia	Poliamidas
Produto da reação de amônio e fosfato	4. Compostos Halogenados
Melamina	Parafinas Cloradas
D. Compostos Orgânicos de Fósforo	Resinas de TetracloroFtálico
Fosfato de Tricresilo	
Alquil Fosfatos	
Haloquil Fosfatos	

químicos e físicos devem ocorrer na sequência correta, conforme a temperatura é elevada. O composto carbonáceo não deve se decompor ou volatilizar antes que o ácido esteja disponível para desidrata-lo. Além disso, os gases responsáveis pela formação de espuma devem se desenvolver através de pequenas bolhas dispersas na massa carbonizada, resultando em um composto aerado. Este processo requer uma adequada taxa de desenvolvimento de gases e viscosidade da massa formada. A viscosidade de qualquer fluido vem de seu atrito interno, que se origina das forças de atração entre moléculas relativamente próximas. Assim, quanto menor forem as forças intermoleculares, menor será a viscosidade. Se a massa formada tiver baixa viscosidade, os gases formados irão escapar, resultando em uma espuma fraca cuja superfície está cheia de rupturas. Entretanto, se a viscosidade for muito elevada, a intumescência não se desenvolve.

Em geral, a espuma carbonizada apresenta bolhas de gases com diâmetros de 20 a 50 micrômetros e paredes com espessura de 6 a 8 micrômetros. Por vezes são adicionados finos agregados inertes, como dióxido de titânio e sílica, para possibilitar um maior controle sobre o tamanho das bolhas formadas. Outros elementos são adicionados aos compostos intumescentes para elevar seu desempenho mecânico e térmico. Por exemplo, a adição de agentes vitrificantes, como boratos e fibras minerais, eleva a resistência ao impacto físico de correntes de ar durante o incêndio.

Apesar da elevada quantidade de materiais apresentados na Tabela 1 para a formulação de compostos intumescentes, apenas alguns são utilizados na prática e, em geral, foram escolhido empiricamente. Os compostos usualmente empregados citados por Camino et al [10] coincidem com os apresentados por Troitzsch [9]. Para o ácido inorgânico, com alto ponto de ebulição e oxidação reduzida, normalmente é utilizado o ácido fosfórico, sob a forma de sais de amônio. Em tintas de proteção, os polifosfatos de amônio são os mais empregados uma vez que são pouco solúveis à água, característica interessante para um material que, dependendo da aplicação, pode ficar exposto às intempéries. Pentaeritritol e seus oligômeros são os tradicionais compostos polihídricos. A parafina clorada é o composto halogenado mais empregado. Entretanto, há uma tendência em se evitar o emprego de halogênios na formulação de materiais intumescentes, devido a sua escura e potencialmente tóxica e corrosiva fumaça. Camino et al [10] levanta, ainda, a hipótese de que o papel destes compostos na intumescência, a formação de gases que irão inflar a espuma carbonizada, é desempenhado principalmente por outros gases originados dos demais componentes do sistema intumescente.

3. Reações químicas dos sistemas intumescentes

Conforme visto anteriormente, nos sistemas intumescentes em geral, a carbonização ocorre pela interação entre o ácido inorgânico e um composto polihídrico. A celulose é o composto polihídrico cuja reação de carbonização através de ácidos inorgânicos tem sido mais estudada, uma vez que se trata do material orgânico naturalmente disponível mais abundante e, também, por ser uma das maiores fontes de combustível para incêndios. Estes estudos forneceram informações sobre o mecanismo de desidratação dos ácidos, que podem ser assumido como de forma semelhante

para outros compostos polihídricos de estrutura similar à celulose. Entretanto, a estrutura do Pentaeritritol é bastante diferente à da celulose e, assim, não é possível correlacionar os processos de carbonização.

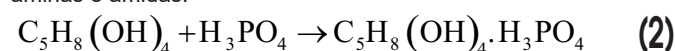
Vandersall apud Camino et al [10] relata que, com aumento progressivo da temperatura, dipentaeritritol – polifosfatos de amônio – amolecem e fundem a 215°C, permanecendo com aspecto claro até 238°C, quando o desenvolvimento dos gases é iniciado. Então, a massa escurece e endurece aos 360°C. Sugere-se, assim, a seguinte sequência:

1. Decomposição do fosfato a 215°C;
2. Subsequente esterificação do álcool, produzindo água;
3. Solidificação da espuma carbonizada de fósforo-carbono a 360°C.

A seguir, apresentam-se as reações químicas, conforme Troitzsch [9] para o mecanismo de intumescência do fosfato dihidrogenado de amônio, Pentaeritritol e parafinas cloradas. O primeiro passo ocorre a temperaturas entre 150 e 215°C – a decomposição do sal inorgânico produzindo gás amônia e ácido fosfórico, conforme Equação 1.



À temperatura um pouco superior, o ácido formado reage com o composto carbonáceo, esterificando o composto polihídrico. Esta reação é apresentada na Equação 2 e pode ser catalisada por aminas e amidas.



Com temperaturas entre aquelas apresentadas no primeiro passo e durante a esterificação o aglomerante derrete parcialmente.

Entre 280 e 350°C ocorre a decomposição do éster fosfórico, conforme Equação 3 – a mistura se funde e as ligações são quebradas, formando-se ácido, água e resíduo de carbono.



Ao mesmo tempo ocorre a reação da Equação 4, onde o composto responsável por fornecer os gases que irão inflar a mistura se decompõe, liberando gases (como o cloreto de hidrogênio ou ácido clorídrico) que inflam a massa fundida.



A resina aglomerante, amolecida, forma uma fina camada sobre a mistura, impedindo que os gases se dissipem. Conforme a temperatura é elevada, a viscosidade da espuma aumenta. Devido à reticulação e carbonização, a espuma formada se solidifica, formando um material altamente poroso. A temperaturas superiores a 600°C, ocorre a decomposição térmica e/ou oxidação da massa carbonizada.

Quando comparada à espessura original, a camada intumescida é cerca de 50 a 100 vezes maior, formando uma barreira térmica que protegerá o substrato da influência do calor e de se decompor.

4. Tintas intumescentes

Em geral, existem dois tipos de tintas que desempenham papel

de proteção contra incêndio: as antichamas e as intumescentes. As tintas antichamas contribuem para controlar a propagação do fogo a uma pequena região ou, mesmo, dirimir a propagação. Entretanto, este tipo de tinta não fornece proteção ao substrato onde é aplicada contra o fogo. Normalmente é destinada à proteção de estruturas ou componentes de navios e embarcações.

Já as tintas intumescentes são, em geral, empregadas para a proteção de estruturas metálicas e de madeiras, além de substratos plásticos e tecidos. À sua composição química, acima descrita, adicionam-se corantes e/ou outros componentes para elevar sua resistência química e mecânica.

Um aspecto a ser avaliado nas tintas intumescentes é sua relativa solubilidade em água. Se utilizadas em superfícies suscetíveis ao contato com água ou ambientes úmidos, o desempenho da proteção ao substrato é reduzido devido à possível lixiviação dos compostos responsáveis pela intumescência. Uma solução é a adoção de um revestimento impermeável sobre a tinta intumescente. Segundo Troitzsch [9], formulações com polifosfato de amônio ou fosfato de melamina apresentam melhor desempenho na resistência à água.

Por vezes, o revestimento intumescente é reforçado com resinas epóxis com misturas de ácido bórico ou boratos, vidros e cal. Durante a combustão, a resina epóxi fica presa aos radicais de hidroxila contidos no vidro; isso resulta em uma espuma inflada de alta resistência mecânica.

Em estruturas metálicas, a interação da tinta intumescente com o *primer* subjacente é, também, muito importante, apesar de poucas publicações destinadas ao assunto. O *primer* garante uma boa adesão entre o substrato metálico e a tinta, além de propiciar o aumento da resistência à corrosão. Ullah et al apud Norgaard et al [11] realizou estudos com perfis metálicos com *primer* a base de zinco, protegidos por tinta intumescente composta por grafite expansível, polifosfato de amônio, melamina, ácido bórico, resina epóxi Bisfenol-A e poliamido solidificador. Os efeitos da variação da formulação química da tinta no sistema aço-*primer*-tinta foram analisados através de microscópio eletrônico de varredura antes e após o aquecimento do conjunto em forno a 500°C. Os estudos demonstraram que a composição de melhor desempenho apresentava porcentagens, em peso, de 25% de polifosfato de amônio e 15% de ácido bórico. Segundo a diretriz europeia para ensaios de tintas intumescentes – ETAG 018 – a importância do *primer* é enfatizada: quando uma tinta intumescente é aprovada, devem ser especificados quais *primers* podem ser empregados junto ao revestimento. Além disto, são propostas correlações entre os ensaios realizados no sistema *primer*-intumescente, a espessura do *primer* e presença de gases (oxigênio) durante a intumescência. O motivo desta avaliação é que a concentração de oxigênio próximo ao *primer*, cujo desempenho relaciona-se à espessura do filme ao qual foi aplicado, pode variar devido à espuma carbonizada formada pela tinta intumescente.

O desempenho desejado para um elemento metálico exposto ao fogo é que seja capaz de manter-se estruturalmente funcional durante um determinado período de tempo. De acordo com a norma americana AISI (American Institute of Steel Construction) – Design Guide 19, é possível prever, razoavelmente, a temperatura limite para a qual ocorrerá o colapso estrutural. Segundo resultados de ensaios, enquanto nenhuma seção transversal ao

longo do elemento metálico apresente temperaturas superiores a 1000°F (538°C) observa-se que o mesmo continua sendo apto a ser submetido a carregamentos externos. Ainda segundo testes, outra temperatura limite foi observada: 1200°F (649°C) em qualquer ponto da barra – quando ocorre a perda de 50% da capacidade de resistência. Admite-se, portanto, que estas temperaturas são limites para análises de transferência de calor e representam um critério de capacidade de carga para ensaios com materiais de proteção em estruturas metálicas. A norma ASTM (American Society for Testing and Materials) E-119 regulamenta os procedimentos para ensaios com carregamentos. Para este tipo de avaliação, emprega-se a carga máxima de projeto ou uma porcentagem (carga de utilização). Desta forma, a proteção é avaliada como aceitável se a coluna suportar o carregamento imposto pelo tempo regulamentado, sendo a temperatura elevada conforme as taxas padronizadas.

É comum a distinção entre tintas intumescentes destinadas à proteção de elementos submetidos a incêndios de celulósicos e hidrocarbonetos. Para cada situação de incêndio a taxa de elevação da temperatura se altera. Convencionou-se adotar o incêndio padrão por um modelo de incêndio idealizado para análises experimentais de estruturas ou materiais de proteção no qual se admite que a temperatura dos gases no compartimento obedeça as curvas padronizadas. Estas curvas padrões apresentam, como similaridade, apenas o ramo ascendente, com a temperatura crescendo em relação ao tempo, independente da influência da carga de incêndio, do grau de ventilação e das propriedades térmicas dos materiais da compartimentação. As curvas mais conhecidas descrevem o incêndio cujo material combustível é composto por materiais celulósicos. As curvas de hidrocarbonetos apresentam uma taxa de elevação de temperatura superior à de celulose.

O desempenho das tintas intumescentes é avaliado com base em numerosos e dispendiosos ensaios padronizados. Um estudo com o objetivo de prever o desempenho de tintas submetidas a incêndios de hidrocarbonetos foi realizado por Jimenez et al [12], correlacionando os resultados dos ensaios realizados em laboratório com os resultados dos ensaios padronizados. Verificou-se que um dos parâmetros essenciais era a resistência mecânica à compressão do composto intumescido após ser exposto a 500°C com uma taxa de elevação de temperatura de 10°C/min. Em Reshetnikov et al [13] diversos métodos para medir a resistência mecânica da tinta intumescida são descritos. Um dos métodos propostos é obter a mínima força necessária para destruir o composto intumescido inserindo uma haste através da amostra aquecida a temperaturas superiores a 1200°C.

Em casos especiais que podem surgir durante o incêndio, tintas destinadas a incêndios de celulósicos podem estar expostas a taxas superiores de aumento da temperatura. Por exemplo, no caso de o composto intumescente encontrar-se a elevadas temperaturas e ser danificado por objetos desprendidos da edificação ou, até mesmo, projetados na direção do elemento revestido, por decorrência do incêndio. A camada subjacente residual, ainda não inflada, estará instantaneamente exposta a uma taxa de elevação de temperatura muito maior. Ensaios realizados por Noorgard et al [14], avaliaram o desempenho da resistência do composto intumescido e das propriedades de expansão (grau de expansão e perda de massa) de tintas intumescentes destinadas a incêndio

celulósico submetidas a elevadas taxas de aumento de temperatura. Previa-se inicialmente que a energia necessária para romper a tinta intumescida seria maior para as amostras de menor espessura, o que não se confirmou nos ensaios.

5. Propriedades termofísicas das tintas intumescentes

Existem na literatura diferentes modelos para tratar o comportamento de intumescência como um problema de transferência de calor. Há modelos que descrevem a intumescência e a formação da espuma carbonosa com bases nos modelos cinéticos de degradação térmica, considerando as reações químicas ocorridas, fenômenos térmicos e de transporte. Face à complexidade da decomposição térmica dos compostos responsáveis pela intumescência, os modelos existentes baseiam-se em algumas simplificações, como a consideração do modelo unidimensional de transferência de calor, propriedades térmicas independentes da temperatura e do espaço e a incidência de fluxo de calor constante, onde as perdas de calor por radiação e convecção são ignoradas. Em geral, considera-se, também, que os processos termoquímicos da intumescência ocorrem sem liberação ou absorção de calor.

Em estudo desenvolvido para a NASA – National Aeronautics and Space Administration – Clark et al [15] propôs um modelo analítico para tintas intumescentes destinadas à proteção de tanques metálicos de armazenamento de combustíveis à base de querosene. A divisão de pesquisas químicas da NASA foi uma das pioneiras

no desenvolvimento de tintas intumescentes e espumas rígidas e semirrígidas empregadas como sistemas de proteção térmica. Por ocasião do estudo, consideravam-se duas formas de utilização para a tinta intumescente avaliada: aplicação direta ou sobre uma camada isolante inerte intermediária aderida ao substrato metálico. O objetivo do estudo era desenvolver mecanismos analíticos para estudar e prever a resposta termodinâmica da tinta quando exposta à situação de incêndio e, assim, obter a combinação de espessuras de tinta e isolante (se utilizado) que resultariam no melhor desempenho de proteção térmica. A análise foi desenvolvida em três etapas, como pode ser observado na Figura 1:

1. Determinação das condições térmicas:
 - a. Temperatura, pressão e composição química da tinta;
 - b. Coeficiente de transferência térmica e de massa;
 - c. Fluxo de calor por radiação;
2. Cálculo de uma matriz de soluções para as condições da superfície de controle do volume que satisfaçam, simultaneamente, as restrições do balanço de massa e do equilíbrio químico;
3. Determinação das equações de balanço de massa e energia do material utilizando as soluções acima obtidas e o equilíbrio de energia da superfície de controle do volume.

Adotando-se a mesma simbologia, Clark et al [15] propõe que a primeira etapa da análise seja baseada no equilíbrio de massa. Assim, relacionam-se o fluxo de massa por difusão total (j_{k_w}), a densidade e velocidade convectiva normais à superfície de controle da tinta ($(\rho \cdot v) w$) e a fração de massa total na superfície da tinta (k_w) com as taxas de fluxo de massa de gases da pirólise (m_g

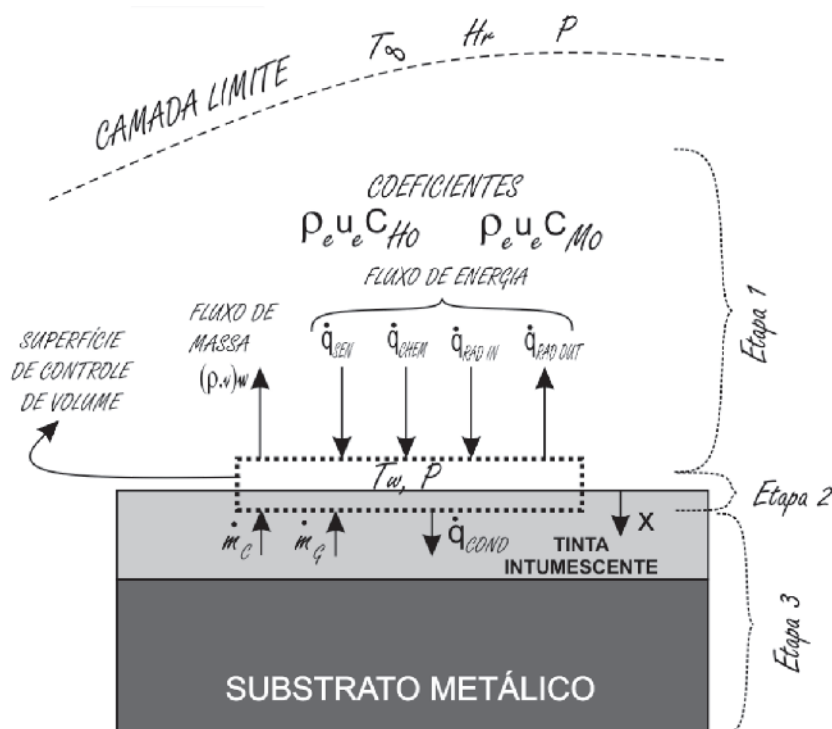


Figura 1

Esquema do procedimento adotado para prever o comportamento termoquímico da tinta

(Fonte: Adaptado de Clark et al (15))

) e carbonizada (m_c) e as frações de massa carbonizada (k_{k_c}) e gases liberados na intumescência (k_{k_g}), conforme equação abaixo.

$$j_{k_w} + (\rho \cdot v)_w \cdot k_{k_w} = m_g \cdot k_{k_g} + m_c \cdot k_{k_c} \quad (5)$$

O fluxo de massa por difusão através da superfície da tinta é explicitado pela densidade da tinta (ρ_e), velocidade dos gases através de sua superfície (u_e), número de Stanton para transferência de massa (C_M) e diferença entre a fração de massa na superfície (k_{k_w}) e externa à tinta (k_{k_c}).

$$j_{k_w} = \rho_e \cdot u_e \cdot C_M (k_{k_w} - k_{k_c}) \quad (6)$$

Combinando-se as duas equações acima e normalizando-as com o coeficiente de transferência de massa, tem-se:

$$(k_{k_w} - k_{k_c}) + \frac{(\rho \cdot v)_w}{\rho_e \cdot u_e \cdot C_M} \cdot k_{k_w} = B'_g \cdot k_{k_g} + B'_c \cdot k_{k_c} \quad (7)$$

Onde:

$$B'_g = \frac{m_g}{\rho_e \cdot u_e \cdot C_M}; B'_c = \frac{m_c}{\rho_e \cdot u_e \cdot C_M} \quad (8)$$

O equilíbrio de massa da superfície é obtido pelo sistema:

$$(\rho \cdot v)_w = m_g + m_c \quad (9)$$

Que pode ser linearizado para obter-se:

$$B' = \frac{(\rho \cdot v)_w}{\rho_e \cdot u_e \cdot C_M} = B'_g + B'_c \quad (10)$$

Segundo Clark et al [15], o primeiro passo do processo de cálculo – a determinação das condições térmicas – fornece a fração de massa na superfície externa da tinta, (k_{k_c}), e a pressão estática. Se B'_g e B'_c estão especificados e os dados termoquímicos de todas as possíveis composições estão disponíveis, as equações acima podem ser resolvidas, em conjunto com as equações de equilíbrio da lei de ação das massas, possibilitando obter a fração de massa (k_{k_w}) e todas as propriedades termodinâmicas da mistura para o gás adjacente à superfície. Com isto feito para uma gama de valores de B'_g e B'_c , o segundo passo está completo. O resultado é uma matriz de soluções para as condições da superfície, que será utilizada no último passo de cálculo.

As características termodinâmicas intrínsecas da tinta intumescente foram assumidas pela média das propriedades para o material puro e totalmente carbonizado. Foram avaliados modelos com diferentes espessuras de tinta intumescente, além de modelos com camada isolante inerte intermediária de espessuras variáveis. O desempenho da relação tinta intumescente e camada isolante é dado em função do tempo necessário para que o substrato metálico atinja uma determinada temperatura, de forma que esta relação é tomada como ótima para o maior tempo obtido.

Avaliando-se os resultados apresentados por Clark et al [15] é

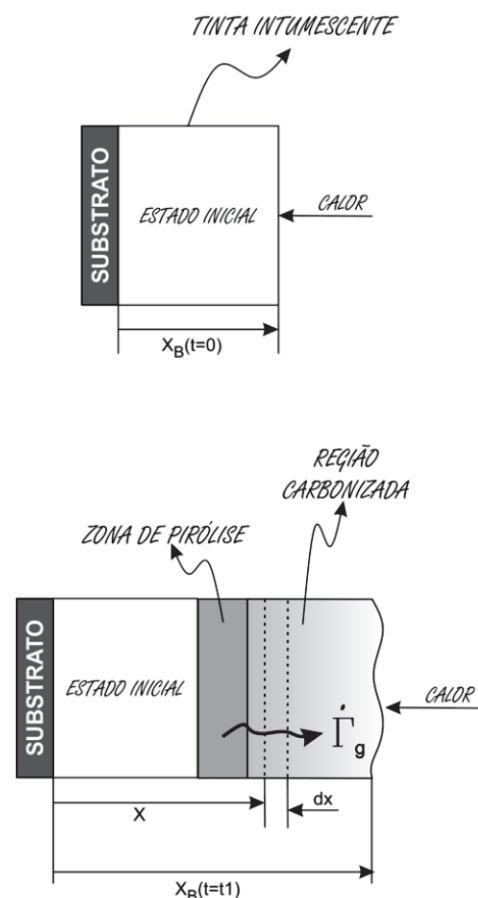


Figura 2 Representação do modelo unidimensional (Fonte: Adaptado de Anderson et al (16))

possível notar que expondo-se uma placa de aço de 1,52 milímetros, sem nenhuma proteção térmica, a um fluxo de calor de 17,03 W/cm² (15 Btu/ft².sec) a temperatura na face oposta à incidência do calor atingirá 1250°C em 30 segundos. Para as mesmas condições, aplicando-se uma camada de 1,02 milímetros da tinta intumescente avaliada, este tempo sobe para dois minutos. Não houve grandes conclusões quanto à determinação da melhor relação entre as espessuras de tinta e isolante, uma vez que varia em função do fluxo de calor e da temperatura limitante do substrato metálico. Entretanto, conforme esperado, evidencia-se que a utilização de uma camada isolante inerte intermediária eleva ainda mais o desempenho da proteção térmica.

Anderson et al [16] propõe também um modelo matemático para descrever os diversos processos físicos de um sistema intumescente considerando o controle de massa e energia. O processo de expansão durante a intumescência é retratado em função da perda de massa. Os dados experimentais foram obtidos através de análises termogravimétricas – mensurando a perda de massa conforme a evolução da temperatura – e de varredura diferencial de calorimetria – avaliando a energia necessária para manter o equilíbrio térmico da amostra analisada em relação a uma deter-

minada referência. A composição química da tinta utilizada nos ensaios foi proposta pela marinha americana, cujo interesse em tintas intumescentes foi despertado após dois grandes incêndios que ocorreram em porta aviões (USS Forrestal em julho de 1967 e USS Enterprise em janeiro de 1969) vitimando cerca de 150 pessoas e totalizando um prejuízo de mais de 130 milhões de dólares. Propôs-se o modelo termodinâmico unidimensional apresentado na figura [2]. No tempo $t=0$ a tinta encontra-se com sua composição pura, inicial. No tempo t_1 , o calor leva à intumescência o sistema, que se encontra expandido e, em parte, carbonizado. Eventualmente, sendo o calor aplicado por tempo suficiente, toda a tinta estará carbonizada. Novamente, mantendo-se a nomenclatura utilizada por Anderson et al [16], aplicando-se a conservação de massa e energia ao controle de volume diferencial tem-se as equações abaixo.

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\delta v}{\delta x} = -\Gamma_g \quad (11)$$

$$\rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = \frac{\delta}{\delta x} k \frac{\delta T}{\delta x} - (h_g - h) \quad (12)$$

$$\Gamma_g - v \cdot \rho \cdot C_p \frac{dT}{dx} - \rho \cdot q_{chem}$$

A densidade do material é expressa por ρ . Conforme a tinta se expande através da intumescência, a massa total diminui em função de formação/liberação de gases (Γ_g). Esses gases, presos no material fundido, são responsáveis pela expansão do material, que ocorre com velocidade V . Na Equação 12, T é a temperatura, k é a condutividade térmica, C_p é o calor específico, h e h_g são as entalpias específicas do sólido e do gás e q_{chem} é taxa de calor por unidade de massa gerada pelas reações químicas. Analogamente à Clark et al [15], propõe-se a relação entre a perda de massa (onde m_0 é a massa original, m_c é a massa final – ou carbonizada – e m é a massa no instante avaliado) e a expansão (expressa pelo fator de expansão atual E_f em relação ao máximo $(E_f)_{m\acute{a}x}$) na equação 13.

$$E_f = 1 + \left[\frac{(E_f)_{m\acute{a}x} - 1}{\left[\frac{m_0 - m}{m_0 - m_c} \right]^n} \right] \quad (13)$$

O expoente n da equação acima descreve a dependência do fator de expansão com a alteração de massa inicial. Se a expansão se inicia rapidamente na fase de liberação de gases, o que significa que pequenas mudanças na massa inicial resultam em significativa expansão, o valor do expoente n está entre 0 e 1 – a taxa de expansão é próxima à taxa máxima. Se a expansão ocorre depois de decorrido grande parte da fase de liberação de gases, o fator é maior do que 1. Se n é igual a 1, tem-se uma relação direta entre a produção de gases e a expansão.

Anderson et al [16] propõe, ainda, que a velocidade V de uma partícula pode ser expressa diferenciando-se a expressão que apresenta o movimento da partícula, em termos de sua coordenada inicial. A equação 14, na qual y é a coordenada de expansão (ou intumescência) da partícula em movimento, demonstra que a velocidade em uma locação X depende do efeito cumulativo daquilo que ocorre no interior do ponto.

$$v(x, t) = \frac{dy}{dt} = \int_0^x \frac{-n}{m_0 - m} \left[E_f(m) - 1 \right] \frac{dm}{dt} dt \quad (14)$$

A condição de contorno externa ao sistema é que o fluxo de calor seja contínuo em $x = x_\beta$, a partir da qual se pode determinar a temperatura da superfície. A condição de contorno na interface da tinta com o substrato é, também, que o fluxo de calor seja contínuo. Entretanto, devido ao elevado valor da condutividade térmica do substrato considerado (aço) e pequena espessura assumida, da ordem de 1 a 2 milímetros, admite-se não existir gradiente de temperatura através da espessura do substrato. Esta condição permite determinar a temperatura do substrato que é, também, a temperatura na interface com a tinta.

Desta forma, o modelo analítico proposto por Anderson et al [16] para tintas intumescentes inclui a variação de massa e a expansão da tinta, relacionando-as com a evolução da temperatura do substrato metálico. Para solução numérica das equações diferenciais propostas, a tinta foi dividida em incrementos (zonas). Sendo o modelo proposto unidimensional, cada incremento pode ser aproximado a um ponto, simplificando a solução geral. Avaliando-se os resultados obtidos é possível notar que, a despeito das simplificações realizadas, o modelo proposto é bastante razoável sendo que a relação temperatura-tempo do substrato varia em função do fluxo de calor aplicado à superfície da tinta, de sua composição química e das características físicas desenvolvidas durante o processo de intumescência.

Segundo o modelo unidimensional proposto por Buckmaster et al [17] apud Deogon et al [18], quando o calor é aplicado a uma superfície protegida com tinta intumescente, assume-se que não há reações ocorrendo até que a temperatura crítica seja atingida. Subsequentemente, uma camada infinitesimal, na qual se desenvolve a intumescência, se move ao longo da espessura da tinta. A temperatura nesta fina camada mantém-se constantemente igual à temperatura crítica. Na região por onde esta camada já passou a temperatura é maior que a crítica e a porção restante tem temperatura inferior à crítica.

O comportamento da tinta intumescente, quando exposta à elevação de temperatura, pode ser dividido em três estágios:

1. A temperatura da superfície externa da tinta é elevada desde a temperatura inicial até a temperatura crítica. Os parâmetros térmicos envolvidos nesta fase são os característicos da tinta intumescente.
2. A camada infinitesimal com temperatura constante igual à crítica se move ao longo da espessura da tinta, até o substrato. Desta forma, esta fase termina quando a camada chega ao substrato. Os parâmetros térmicos deste período são dependentes das características térmicas da tinta e da espuma carbonizada desenvolvida, havendo um salto destas propriedades na camada infinitesimal.
3. Os parâmetros térmicos são contínuos, porém, agora, retratando as características da espuma intumescente.

Buckmaster et al [17] diferencia-se dos trabalhos anteriores pela forma como aborda a intumescência. Segundo o autor, aquecendo-se a tinta de forma controlada em um forno, é possível notar uma significativa perda de massa apenas a partir de uma determinada (e relativamente elevada) temperatura. Até que esta tempe-

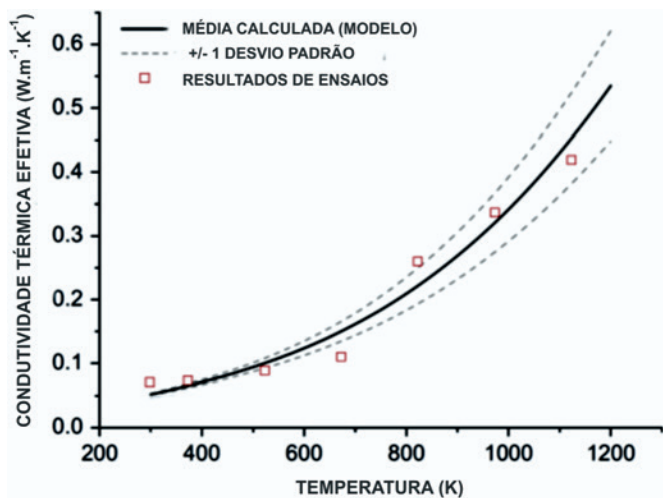


Figura 3
 Comparação da condutividade térmica entre o método numérico e ensaios de laboratório
 (Fonte: Adpatado de Staggs (19))

ratura seja atingida, a massa permanece relativamente constante. Assim, uma vez que os modelos anteriores propõem a correlação direta com a perda de massa, a intumescência ocorreria apenas a partir de um considerável intervalo de temperatura. Conforme acima apresentado, o modelo proposto parte da premissa de que a intumescência se desenvolve ao longo da camada da tinta.

Como vantagem, além dos resultados consistentes com os dados experimentais, elimina-se as adoções sobre a parcela mais difícil de caracterizar do problema – o processo de intumescência. Outra conclusão relevante deste trabalho é que a intumescência é um processo endotérmico, ou seja, absorve energia do sistema. Apesar de, em geral, esta característica ser desprezada, eleva-se consideravelmente a proteção fornecida pela tinta intumescente. Staggs [19] propõe a estimativa, através de simulações numéricas, da condutividade térmica da tinta intumescente. Seu trabalho tem por objetivo usar imagens altamente segmentadas, monocromáticas, de uma seção intumescida para construir um modelo em elementos finitos. O fato de uma imagem plana ser utilizada para estimar características intrinsecamente tridimensionais faz com que seja necessária a adoção de suposições em relação à estrutura 3D. Por exemplo, admite-se que a porosidade no plano, definida pela relação de área de vazios pela área total, é igual à porosidade espacial.

O modelo em elementos finitos proposto consiste de elementos quadrados, onde um elemento corresponde a um pixel da imagem digital. A imagem, originalmente em escala de cinza, é segmentada em preto e branco. Cada pixel é classificado como sólido ou vazio, de acordo com sua coloração (preto são sólidos e brancos vazios). Desta forma, a macroestrutura intumescida é retratada de forma bastante realista. Para cada elemento é atribuído uma condutividade térmica, conforme coloração. Pixels correspondendo a vazios recebem a condutividade térmica do ar. Ensaio através do método da placa quente foram utilizados para estimar a condutividade térmica dos elementos sólidos (porção intumescida). Entretanto, a condutividade térmica de um elemento que não é vazio é

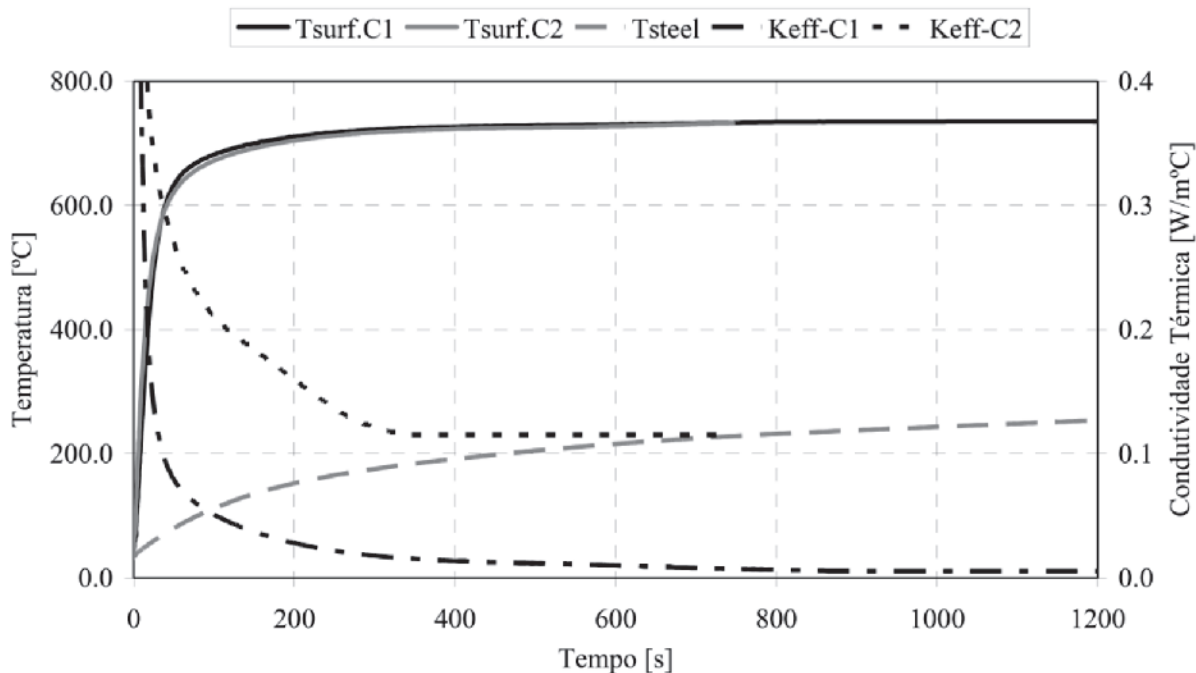


Figura 4
 Condutividade térmica segundo o modelo numérico proposto por Mesquita et (20)
 (Fonte: Mesquita et (20))

mais complexa. Verifica-se que a macro porosidade corresponde a somente um terço da porosidade total. Assim, a micro porosidade deve ser incluída na avaliação da condutividade térmica. Um submodelo foi empregado para determinar a condutividade térmica dos elementos não vazios, por análise através de microscópio eletrônico de transmissão.

Uma vez que a condutividade térmica de cada elemento é atribuída, é possível calcular a condutividade térmica global do modelo bidimensional. Impostas as condições de contorno de temperatura constante no topo e base da camada de tinta e condições adiabáticas nas demais camadas, calcula-se a temperatura no interior do domínio e o fluxo de calor da malha de elementos. A figura [3] compara o resultado do método numérico proposto por Staggs [19] com três amostras de tintas intumescentes ensaiadas através do método da placa quente para estimativa da condutividade térmica.

Alguns aspectos devem ser observados sobre o modelo acima proposto. O primeiro relaciona-se à dependência da condutividade térmica com a temperatura. Staggs [19] elucida que, na ocorrência de elevadas temperaturas, a radiação através dos poros aumenta significativamente a condutividade térmica aparente. Para esta questão, são propostas aproximações numéricas, em função do tamanho dos poros, retratando o fluxo de calor adicional por radiação. Outro aspecto relaciona-se à evolução da condutividade térmica efetiva ao longo do desenvolvimento da intumescência. Os resultados apresentados retratam, com considerável precisão, o comportamento de uma seção completamente intumescida, prescindindo de sua relação com as propriedades térmicas desenvolvidas ao longo do processo químico.

Segundo Mesquita et al [20] a determinação de temperaturas do material intumescente envolve uma transformação de fase com duas ou mais fronteiras móveis: composição inicial, camada pastosa e camada carbonizada. Afirma-se, ainda, que o desempenho da proteção intumescente relaciona-se diretamente com a temperatura ou tempo em que a intumescência se inicia e o período durante o qual atua como barreira térmica. O modelo proposto analisa o desenvolvimento da intumescência como um problema unidimensional, onde o fluxo de calor se propaga através da tinta. Admite-se que a transição de estado inicial para carbonizado se dá em uma camada muito fina, ativa a uma temperatura crítica. Após a fase de aquecimento, a superfície atinge a temperatura de transição e a proteção pode ser dividida em duas camadas. Entretanto, visando-se a determinação de um valor estimado de condutividade térmica da porção intumescente, admite-se que esta é constituída por uma única camada de massa específica e calor específico constantes.

A condição de contorno na superfície externa da tinta determina que o fluxo de calor que passa pela camada intumescente é igual a fluxo de calor proveniente do incêndio (ou do ensaio avaliado), excetuando-se as perdas de calor por convecção e radiação. À exemplo de Anderson et al [16], considera-se não haver gradiente de temperatura na placa metálica avaliada, devido à reduzida espessura e elevada difusividade. Assume-se, também, que a base do substrato apresenta características adiabáticas, não havendo trocas de calor com o meio externo.

A figura [4] apresenta o resultado numérico da condutividade térmica efetiva admitindo-se as mesmas condições de ensaio experimental realizado com placa de aço quadrada com dez centíme-

tros de lado, quatro milímetros de espessura e pintada em uma face com tinta intumescente à espessura de 3010 micrômetros. Foram tomadas duas hipóteses: massa específica do material e espessura constantes, ambas iguais à condição inicial da tinta não intumescida (caso C1); massa específica e espessura dependentes do tempo (caso C2). São apresentadas, também, as temperaturas na face da camada intumescente e no aço. É possível notar que, durante a fase de aquecimento, a condutividade térmica diminuiu, até o instante onde a temperatura da superfície da tinta e do aço são aproximadamente constantes. Apesar de similares para os dois casos avaliados, a condutividade térmica do caso C2 é superior.

De acordo com o Eurocode 3 apud Mesquita et al [21], o aumento da temperatura de perfis de aço com proteção ao fogo, nT_s , pode ser calculado pela Equação 15, conforme formulação proposta por Wickström.

$$nT_s = \frac{(T_g - T_s)}{\left(\frac{c_s \rho_s}{A_p / V}\right) \cdot \left(\frac{d_p}{k_p}\right) \cdot \left(1 - \frac{\emptyset}{3}\right)} nt - (e^{\emptyset/10} - 1)nT_g \quad (15)$$

Sendo que $\emptyset = c_p \rho_p d_p / [c_s \rho_s (A_p / V)]$, c_s e ρ_s representam o calor específico e a densidade do aço, respectivamente; nT_g o aumento da temperatura ambiente ocorrido no intervalo nt ; T_g e T_s as temperaturas no ambiente no aço; A_p / V o fator de massividade (relação entre a área exposta ao fogo e o volume aquecido); c_p , k_p e ρ_p o calor específico, a condutividade térmica e a massa volumétrica da proteção, respectivamente, e d_p a espessura da camada de proteção.

A inversão da Equação 15 possibilita obter, de forma direta, a condutividade térmica do material de proteção e determinar a variação desta propriedade com a temperatura da proteção – conforme a temperatura do ambiente e do substrato metálico. Entretanto, admite-se que a espessura da tinta intumescente é constante e igual à espessura inicial.

$$k_p = \left[\frac{c_s \rho_s \cdot \left(1 - \frac{\emptyset}{3}\right) \cdot d_p}{(T_g - T_s) \cdot nt \cdot A_p / V} \right] \cdot [nT_s + (e^{\emptyset/10} - 1)nT_g] \quad (16)$$

Mesquita et al [21] afirma que a tinta intumescente pode ser considerada como material de proteção leve uma vez que, em geral, para as espessuras de proteção aplicadas a parcela $c_p \rho_p d_p / A_p$ é inferior à metade da capacidade térmica do aço. Quando isto ocorre, pode ser assumido que $\emptyset = 0$.

A principal diferença entre os trabalhos propostos por Mesquita et al [21] e Mesquita et al [20] com os demais apresentados neste artigo é o foco: a estrutura metálica. Assim, não se objetiva uma descrição precisa do desenvolvimento das propriedades físicas durante a intumescência, mas sim uma aproximação suficientemente adequada que possibilite uma abordagem qualitativa sobre a temperatura no substrato metálico protegido. Assim, a condutividade térmica proposta é uma aproximação, com bases teóricas e normativas, que possibilite a comparação com modelos computacionais dos ensaios experimentais realizados, prevendo o comportamento estrutural dos elementos metálicos.

6. Conclusões

Apesar de comercializadas por mais de 40 anos e utilização bastante difundida até a década de 1980, a maior parte das publicações sobre tintas intumescentes eram oriundas da literatura de patentes, onde pouco era apresentado sobre o mecanismo físico-químico da intumescência. O atual conhecimento sobre a composição química e reações da intumescência é relativamente amplo e bem fundamentado. Entretanto, ainda que se disponha de uma considerável quantidade de componentes químicos que atendem às características necessárias ao comportamento intumescente, apenas alguns poucos são utilizados na prática e, em geral, sua escolha dá-se empiricamente.

A disseminação da abordagem química possibilitou, também, uma evolução dos modelos que retratam as propriedades físicas dos intumescentes. Em um primeiro momento, o desenvolvimento da intumescência era retratado através da perda e equilíbrio de massa. Propostas mais atuais tendem a segmentar o processo, mostrando-se um caminho mais aproximado ao comportamento real da intumescência. Por outro lado, mantendo-se o foco no substrato, é possível notar que modelos simplificados, apesar de menos realistas do ponto de vista físico-químico, retratam com relativa precisão a evolução da temperatura na superfície protegida. É latente, entretanto, a diferença do estágio atual de pesquisas no Brasil em relação ao restante do mundo. Poucas publicações nacionais são destinadas aos elementos de proteção térmicos e ainda mais raros são os trabalhos dedicados em retratar um material específico como, neste caso, as tintas intumescentes. Possivelmente, parte deste pouco interesse no desenvolvimento tecnológico de intumescentes deve-se ao fato de, via de regra, ser um produto importado, fabricado em outros países e, no Brasil, com aplicações ainda bastante específicas – por exemplo utilizados em refinarias e plataformas *off-shore*. Além disso, não há uma normalização nacional abordando ensaios e desempenho de intumescentes ou sequer de outros materiais de proteção.

Este cenário tende a ser alterado em um futuro próximo. Além da chegada de fabricantes ao país, as ocorrências recentes de incêndios têm trazidos à luz da sociedade, dentre outras, questões sobre a regulamentação de elementos de proteção ao fogo. Desta forma, o presente artigo busca contextualizar as diferentes abordagens teóricas sobre os intumescentes no restante do mundo e, assim, possibilitar um início de pesquisas nacionais no mesmo patamar internacional.

7. Agradecimentos

Agradeço e dedico este trabalho ao meu orientador, prof. Dr. Armando Lopes Moreno Junior, e co-orientador prof. Dr. Luiz Carlos Marcos Vieira Junior, pelo apoio e conhecimento compartilhado. Aos engenheiros Celso Vaz Santiago, Rafael Mesquita Chavez e prof. Dr. Antonio Wanderley Terni. À Projectus Consultoria Ltda. pelo incentivo em minha constante qualificação. À minha família, pelo carinho e incentivo.

8. Referências bibliográficas

- [1] MELHADO, S. B. Edifícios de Estruturas de Aço – Segurança Contra Incêndios e Critérios de Proteção de Estruturas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.
- [2] SILVA, V. P. Estruturas de Aço em Situação de Incêndio. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- [3] ABREU, L. M. P.; FAKURY, R. H. Elevação de Temperatura em Elementos Estruturais de Aço de Edifícios em Incêndio. In: VII SEMANA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFMG, Minas Gerais, 1998.
- [4] FAKURY, R. H. Dimensionamento de estruturas de aço de edifícios em situação de incêndio. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL “O USO DE ESTRUTURAS METÁLICAS NA CONSTRUÇÃO CIVIL”, 2., Belo Horizonte: SME, 1999.
- [5] MARTINS, M. M. Dimensionamento de Estruturas de Aço em Situação de Incêndio. 2000. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2000.
- [6] LOPES RIBEIRO, J. C., Simulação via método dos elementos finitos da distribuição tridimensional de temperatura em estruturas em situação de incêndio. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais 2004.
- [7] GUIMARÃES, P. P. O. Sobre o Dimensionamento do Revestimento Contra Fogo em Estruturas de Aço. 2007. 265 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [8] Andrade, C. C. Proteção térmica em elementos estruturais de aço. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina. - Florianópolis, SC, 2010.
- [9] TROITZSCH, J. H. Methods for the Fire Protection of Plastics and Coatings by Flame Retardant and Intumescent Systems. Marl, 1983.
- [10] CAMINO, G., COSTA, L., MARTINASSO, G. Intumescent Fire-Retardant Systems. Torino, 1988.
- [11] NØRGAARD, K. P., DAM-JOHANSEN, K., CATALÀ, P. KIIL, S. Laboratory and Gas-Fired Furnace Performance Tests of Epoxy Primers for Intumescent Coatings. Lyngby, 2014.
- [12] JIMENEZ, M, DUQUESNE, S., BOURBIGOT, S. Characterization of the Performance of an Intumescent Fire Protective Coating. Villeneuve d’Ascq, 2006.
- [13] RESHETNIKOV, I. S., GARASHCHENKO, A. N., STRAKHOV, V. L. Experimental investigation into mechanical destruction of intumescent chars. 2000.
- [14] NØRGAARD, K. P., DAM-JOHANSEN, K., CATALÀ, P. KIIL, S. Investigation of Char Strength and Expansion Properties of an Intumescent Coating Exposed to Rapid Heating Rates. Lyngby, 2013.
- [15] CLARK, K. J., SHIMIZU, A. B., SUCHSLAND, K. E., MOYER, C. B. Aerotherm Final Report 74-101 – Analytical Modeling of Intumescent Coating Thermal Protection System in a JP-5 Fuel Fire Environment. Califórnia, 1974.
- [16] ANDERSON, C. E., WAUTERS, K. D.A Thermodynamic Heat Transfer Model for Intumescent Systems. San Antonio, 1984.
- [17] BUCKMASTER, J., ANDERSON, C., NACHMAN, A. A Model for Intumescent Paints. Illinois/San Antonio, 1986.

- [18] DEOGON, M., HALL, R., SOCRATES, G. A Simple Theoretical Model for Intumescent Paints. Londres, 1988.
- [19] STAGGS, J. E. J. Thermal Conductivity Estimates of Intumescent Chars by Direct Numerical Simulation. Leeds, 2010
- [20] MESQUITA, L. M. R.; PILOTO, P. A. G.; VAZ, M. A. P., PINTO, T. Determinação da Condutividade Térmica Efectiva de Tintas Intumescentes. In: 7º CONGRESSO NACIONAL DE MECÂNICA EXPERIMENTAL, Vila Real, 2008.
- [21] MESQUITA, L. M. R.; PILOTO, P. A. G.; VAZ, M. A. P.; VILA REAL, P. M. M.; RAMOS, F. Comportamento de Vigas em Aço Protegidas com Tinta Intumescente. In: V CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, Lisboa, 2005.
- [22] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E-736 Standard Test Method for Cohesion/Adhesion of Sprayed Fire-Resistive Materials Applied to Structural Members. Filadélfia, 2011.
- [23] AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. AISC Desing Guide 19 Fire Resistance of Structural Steel Framing. Chicago, 2003.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.
- [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.
- [26] 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.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. Rio de Janeiro, 2000.
- [28] BERTELLI, G., CAMINO, G., MARCHETTI, E., COSTA, L., CASORATI, E., LOCATELLI, R. Parameters Affecting Fire Retardant Effectiveness in Intumescent Systems. Torino, 1988.
- [29] CHEN, C. K, ZENG, J. W., SHEN, B. Y. Experimental Investigation on Fire Response of Steel Plate with Ultrathin Intumescent Coatings. Changsha, 2013.
- [30] COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. Eurocode1: Acções em estruturas. Bruxelas, 2009
- [31] COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. Eurocode2Projecto de estruturas de betão. Bruxelas, 2007.
- [32] COMITE EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. Eurocode3Projecto de estruturas de aço. Bruxelas, 2010.
- [33] CORTEZ, I. M. M. Contribuição ao Estudo dos Sistemas de Revestimento à Base de Argamassa com Incorporação de Fibras Sintéticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 1999.
- [34] DAI, X. H., WANG, Y. C., BAILEY, C. G..Effects of Partial Fire Protection on Temperature Developments in Steel Joints Protected by Intumescent Coating.Manchester, 2008.
- [35] DRYSDALE, D.An Introduction to Fire Dynamics. 2nd ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2000. 451p.
- [36] EUROPEAN ORGANIZATION FOR TECHNICAL APPROVALS.ETAG No 018 – Guideline for European Technical Approval of Fire Protective Products.Bruxelas, 2011.
- [37] GERARD, C., FONTAINE, G., BELLAYER, S., BOURBIGOT, S. Reaction to Fire of an Intumescent Epoxy Resin: Protection Mechanisms and Synergy. Lille, 2012.
- [38] GOMES-MARES, M., TUGNOLI, A., LANDUCCI, G., BARTONTINI, F., COZZANI, V. Behavior of Intumescent Epoxy Resins in Fireproofing Applications.Pisa, 2012.
- [39] JIMENEZ, M, DUQUESNE, S., BOURBIGOT, S. Intumescent Fire Protective Coating: Toward a Better Understanding of Their Mechanism of Action. Villeneuve d’Ascq, 2006.
- [40] LIANG, H., SHI, W., GONG, M. Expansion Behavior and Thermal Degradation of Tri(acryloyloxyethyl) Phosphate/Methacrylated Phenolic Melamine Intumescent Flame Retardant System. Hefei, 2005.
- [41] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. PINI, São Paulo, 1994.
- [42] MESQUITA, L. M. R.; PILOTO, P. A. G.; VAZ, M. A. P. Caracterização do Comportamento e das Propriedades Termofísicas de Tintas Intumescentes. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO METÁLICA E MISTA, Lisboa, 2006.
- [43] PANNONI, F. D. Coletânea do Uso de Aço: Princípios da Proteção de Estrutura Metálicas em Situação de Corrosão e Incêndio, 4ª edição. Perfis Gerdaul Açominas. 2007
- [44] PEREIRA, A. A. Estudo Experimental e Simulação Numérica do Comportamento de Tintas Intumescentes na Protecção de Elementos Estruturais em Condição de Incêndio. Bragança, 2009.
- [45] SILVA, V. P. Estruturas de Aço em Situação de Incêndio. Zigate Editora, São Paulo, 2001. 249p.
- [46] STAGGS, J. E. J., CREWE, R. J., BUTLER, R.A Theoretical and Experimental Investigation of Intumecent Behavior in Protective Coatings for Structural Steel.Leeds, 2011.
- [47] VEIGA, M. R. S.; ABRANTES, V. Improving the Cracking Resistance of Rendering Mortars – Influence of Composition Factors. In: XXV IAHS World Housing Congress, Lisboa, 1998.
- [48] ZHANG, Y., WANG, .Y C., BAILEY, C. G., TAYLOR, A. P. Global Modelling of Fire Protection Performance of Intumescent Coating Under Different Cone Calorimeter Heating Conditions. Bolton, 2012.