VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

UM MODELO CONSTITUTIVO DE DANO CONTÍNUO PARA SIMULAR O COMPORTAMENTO DE MATERIAIS QUASE-FRÁGEIS

Eduardo Alexandre Rodrigues[1], eduardoar@feb.unesp.br
Osvaldo Luis Manzoli[1], omanzoli@feb.unesp.br

[1]UNESP - Univ Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, Bauru, SP, Brasil.

***Resumo**: No presente trabalho desenvolve-se um modelo constitutivo baseado na mecânica do dano contínuo para representar o comportamento de materiais que apresentam diferentes respostas quando solicitados à tração ou à compressão. Obtém-se uma representação constitutiva através da composição de modelos simples e específicos para tratar cada tipo de solicitação. Este modelo combinado é capaz inclusive de lidar com carregamentos alternados (tração e compressão), envolvendo fechamento e reabertura de fissuras existentes. Para modelar o comportamento em compressão emprega-se o modelo constitutivo que tem como critério de degradação o segundo invariante do tensor de tensão desviador (critério de Von Mises ou J2). Para simular o aparecimento de fissuras de tração, usa-se o modelo de dano com critério de degradação baseado na energia de deformação da parte positiva do tensor de tensões efetivas. A integração dos modelos é feita com base em tensões efetivas associadas a duas escalas distintas (escala grosseira e refinada). O modelo é apto para representar a formação de descontinuidades no campo de deslocamento (descontinuidades fortes) em materiais quase-frágeis. Nesse caso, a região de localização de deformação (zona de processo da fratura) pode ser descrita pelo modelo de dano combinado, com lei de abrandamento de tensões (softening) exponencial, que estabelece dissipação compatível com a energia de fratura. A região contínua pode ser descrita pelo modelo de dano J2, com parâmetros ajustados com base no comportamento não linear à compressão. Para a validação do modelo proposto, analisam-se alguns testes básicos, focando a capacidade do modelo em representar os principais aspectos do comportamento de materiais quase-frágeis.*

***Palavras-chave:** Mecânica do dano, descontinuidades fortes, elementos finitos, materiais quase-frágeis, fratura.*

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos foram desenvolvidos diversos modelos constitutivos para simular os efeitos das alterações micro-estruturais no comportamento mecânico dos materiais. A mecânica do dano contínuo, segundo Lemaitre (1992), lida com a capacidade de carga de sólidos sem fissuras principais, mas onde o próprio material é danificado devido à presença de microdefeitos, tais como microfissuras e microvazios. Os microdefeitos contribuem para a resposta não-linear dos sólidos pós-pico, sendo evidenciado macroscopicamente por redução de rigidez e resistência do material.

Os modelos constitutivos de dano têm sido usados como uma importante ferramenta de análise da perda de rigidez de estruturas, com a finalidade de prever a degradação do material. Seu interesse consiste na simulação da degradação mecânica de materiais quase-frágeis, tais como concreto, cerâmicas e rochas, que depois de percorrido o regime elástico, ocorre descendência tensional (abrandamento) a cada incremento de deformação, delineando o comportamento não linear do material. Para o desenvolvimento de ferramentas apropriadas, é indispensável que a propriedade não linear desses materiais seja conhecida e modelada precisamente, especialmente o seu estado de danificação.

No presente trabalho desenvolve-se um modelo constitutivo de dano combinado, através de uma metodologia nova, buscando aperfeiçoar a representação do comportamento mecânico, em tração e em compressão, e de representar o comportamento diferenciado em tração e em compressão para materiais quase-frágeis. Embora originalmente desenvolvido para representar estados de fissuração difusos, os modelos de dano têm sido empregados para representar os fenômenos degradativos que precedem a formação de fraturas, na chamada zona de processo de fratura. Nesse contexto, a representação dos efeitos da formação das fissuras pode ser modelada através de elementos finitos com fissuras incorporadas, no contexto da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (ACDF), que já vêm sendo aplicados com êxito para casos nos quais a não linearidade estrutural provém predominantemente de estados de tração (Manzoli, 2006; Oliver et al., 1999). O presente trabalho estende tais formulações, para que, no mesmo contexto da ACDF, seja possível também representar o comportamento não linear do material sob estados tensionais de compressão, associados a diferentes mecanismos de degradação.

Esse objetivo de representar de maneira unificada ambos os tipos de comportamentos, conforme o tipo de solicitação, já vem sendo buscado por diferentes autores (Cervenka, 2008), usando distintos tipos de aproximações, principalmente através do emprego de modelos de fissuras distribuídas, combinadas com modelos baseados na teoria de plasticidade.

No presente trabalho a modelagem é baseada apenas na mecânica do dano contínuo, embora possa ser facilmente adaptada para envolver modelos de plasticidade para representar o comportamento compressivo.

Para o modelo de dano combinado proposto são consideradas duas variáveis escalares de dano, como proposto por Cervera et al. (1996), que irão representar o comportamento do material em tração e compressão. Conseqüentemente duas superfícies de dano são definidas, delimitando o regime elástico.

O modelo de dano J2 é formulado segundo o critério de Huber-von Mises, a partir da decomposição do tensor de tensões efetivas, em parte hidrostática e desviadora, tomando como critério de degradação segundo invariante (invariante J2) para delimitar a superfície de dano em compressão. As tensões nominais são então obtidas degradando-se apenas a parte desviadora das tensões efetivas (Cervera, 1996). O modelo de dano à tração, com sua própria variável de dano escalar, é formulado segundo o critério de energia de deformação (Simo e Ju, 1987; Cervera et al., 1996), aplicado somente à parte positiva (contendo apenas as tensões principais positivas) do tensor de tensões.

A composição de ambos os modelos independentes para representar o comportamento geral do material se faz através de uma associação em série, usando as tensões efetivas (inicialmente elásticas) já degradadas pelo modelo à compressão como tensões efetivas do modelo de dano à tração.

Esse tipo de composição poder ser associado a uma interpretação fenomenológica, na qual se representa o comportamento em dois níveis de escalas. Em uma escala mais refinada o comportamento é regido pelo modelo de dano à compressão, que, por sua vez, gera as tensões efetivas que são então tratadas pelo modelo de dano à tração, em uma escala mais grosseira.

2. MODELO DE DANO J2 (COMPRESSÃO)

O modelo é formulado segundo as condições de carga, descarga e recarga associadas ao critério de dano no campo das tensões efetivas, baseado no segundo invariante do tensor das tensões desviadoras.

O tensor das tensões efetivas, $\bar{\boldsymbol{\sigma}}^J$, pode ser dividido em parte volumétrica e desviadora,

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}}^J = \bar{\mathbf{S}}^J + \bar{\sigma}_m^J \cdot \mathbf{I} \tag{1}$$

onde $\bar{\mathbf{S}}$ é o tensor de tensão desviador, $\bar{\sigma}_m$ é a tensão média e $\mathbf{I}$ é o tensor identidade de segunda ordem.

O critério de dano ou critério de degradação pode ser expresso da seguinte forma:

$$F^J(\tau, r) = \tau^J - r_0^J \leq 0 \tag{2}$$

onde a variável escalar τ^J é uma função da norma do tensor de tensão desviador,

$$\tau^J = \sqrt{\frac{3}{2}} \left\| \bar{\mathbf{S}}^J \right\| \tag{3}$$

A variável r^J estabelece o limite de dano, controlando a dimensão do domínio elástico. A superfície limite de dano no espaço de tensões efetivas é expressa por $F^J\left(\tau^J, r^J\right) = 0$. Define-se um valor inicial ao limite de dano, r_0^J, em função da tensão limite de compressão, σ_c,

$$r_0^J = B\sigma_c \tag{4}$$

onde o parâmetro B estabelece o nível de tensão para qual tem início o processo de degradação.

A evolução do limite de dano pode ser expressa de forma fechada, tomando-se sempre o máximo valor atingido por τ^J durante o processo de carregamento, ou seja, $r^J = \max(r^J, \tau^J)$.

Define-se a variável de dano em função da variável limite de dano e do módulo de endurecimento/abrandamento, estabelecendo uma lei de endurecimento/abrandamento linear,

$$d^J = \frac{r^J - r_0^J}{r^J (1 + H)} \tag{5}$$

ou

$$D^J = 1 - \left[A^J \cdot e^{-\frac{1}{A^J}\left(1-\frac{r^J}{r_0^J}\right)} + \frac{1}{B} \right] \cdot \frac{r_0^J}{r^J} \tag{6}$$

que estabelece uma lei de abrandamento exponencial, com o parâmetro de abrandamento do modelo à compressão $A^J = 1 - 1/B$.

Então, aplicando-se o dano somente ao tensor de tensão desviador, a expressão final do tensor de tensão fica dada por:

$$\boldsymbol{\sigma}^J = \left(1 - d^J\right)\overline{\mathbf{S}}^J + \overline{\boldsymbol{\sigma}}_m^J \cdot \mathbf{I} \tag{7}$$

que também pode ser expressa como:

$$\boldsymbol{\sigma}^J = \overline{\boldsymbol{\sigma}} - d^J \cdot \overline{\mathbf{S}} \tag{8}$$

3. MODELO DE DANO À TRAÇÃO

Decompõe-se o tensor de tensões efetivas em partes positiva e negativa (componentes positivas e componentes negativas do tensor de tensões efetivas, respectivamente),

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^t = \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ + \overline{\boldsymbol{\sigma}}^- \tag{9}$$

onde $\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+$ e $\overline{\boldsymbol{\sigma}}^-$ são os tensores de tensão efetiva contendo as tensões principais de tração e de compressão, respectivamente:

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ = \langle \overline{\boldsymbol{\sigma}} \rangle = \sum_{i=1}^{3} \langle \sigma_i \rangle \mathbf{p_i} \otimes \mathbf{p_i} \tag{10}$$

onde $\overline{\sigma}_i$ denota o valor da *i-ésima* tensão principal do tensor $\overline{\boldsymbol{\sigma}}$, $\mathbf{p_i}$ representa o vetor unitário associado com a respectiva direção principal e o símbolo $\otimes$ denota o produto tensorial. O símbolo $\langle \cdot \rangle$ representa a função de Macaulay (retornando o valor da expressão quando positiva, e zero em caso contrário)

A componente negativa do tensor de tensão efetiva pode ser obtida fazendo-se:

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^- = \overline{\boldsymbol{\sigma}} - \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ \tag{11}$$

Para estabelecer as condições de carga, descarga e recarga, define-se o critério de dano, empregando-se o conceito de tensão efetiva para tração,

$$F^t\left(\overline{\tau}^t, r^t\right) = \overline{\tau}^t\left(\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+\right) - r^t \leq 0 \tag{12}$$

onde $\overline{\tau}^t$ retorna um valor escalar em função da componente positiva das tensões efetivas.

Adota-se a norma energética do tensor:

$$\overline{\tau}^t = \sqrt{\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ : \mathbf{C}^{-1} : \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+} = \overline{\tau}^t\left(\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+\right) \tag{13}$$

onde $\mathbf{C}^{-1}$ é o tensor constitutivo elástico isotrópico de quarta ordem.

A variável r^t estabelece o limite de dano, controlando a dimensão do domínio elástico no espaço das tensões efetivas. O limite de dano é delimitado pela superfície $F^t(\tau^t, r^t) = 0$. O valor inicial do limite de dano é expresso em termos da resistência à tração, σ_t,

$$r_0^t = \frac{\sigma_t}{\sqrt{E}}. \tag{14}$$

Define-se a variável de dano para tração em função da variável limite de dano,

$$d^t(r^t) = 1 - \frac{r_0^t}{r^t} e^{A\left(1 - \frac{r^t}{r_0^t}\right)} \tag{15}$$

que estabelece uma lei de abrandamento exponencial, em termos do parâmetro de abrandamento exponencial, A.

Portanto, a lei constitutiva finalmente pode ser expressa como:

$$\boldsymbol{\sigma}^{\mathbf{t}} = (1 - d^t)\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ + \overline{\boldsymbol{\sigma}}^- \tag{16}$$

ou

$$\boldsymbol{\sigma}^{\mathbf{t}} = \overline{\boldsymbol{\sigma}} - d^t \cdot \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ \tag{17}$$

4. MODELO DE DANO COMBINADO

Os modelos de dano foram expressos a partir das tensões efetivas, que até agora não foram definidas. A tabela (1) resume as etapas de cálculo dos dois modelos, em um processo incremental, no qual calculam-se as tensões e as variáveis do modelo constitutivo no passo de carga n+1, a partir das deformações desse passo e das variáveis do modelo no passo anterior, n.

A composição entre os modelos é feita em série, aplicando-se primeiramente o modelo de dano J2, empregando-se como tensões efetivas as tensões puramente elásticas, calculadas a partir das deformações, $\boldsymbol{\varepsilon}$,

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^J = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon} \tag{18}$$

Posteriormente aplica-se o modelo de dano à tração, admitindo-se que as tensões efetivas para esse modelo são as tensões degradadas pela aplicação do modelo de dano J2, ou seja:

$$\overline{\boldsymbol{\sigma}}^t = \boldsymbol{\sigma}^J \tag{19}$$

Esse tipo de combinação sugere uma interpretação física na qual o processo de degradação ocorre em duas escalas diferentes. Na escala mais refinada o processo de degradação é representado pelo modelo J2. O material degradado então é submetido a um modelo de dano à tração, que representará os efeitos não lineares em uma escala mais grosseira.

Assim, a tensão obtida pela lei constitutiva na escala refinada entra como tensão efetiva na lei constitutiva da escala grosseira, que está sujeita à processos de degradação segundo o modelo de dano somente à tração (ver fig. (1)).

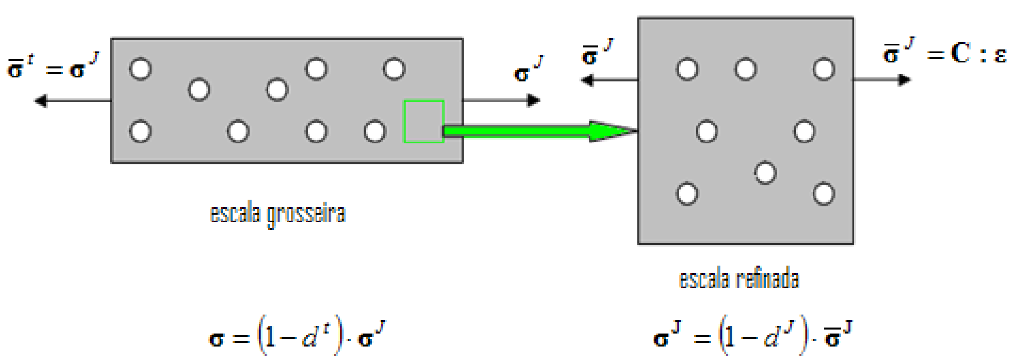

Figura 1. Escala grosseira e refinada

Portanto, a lei constitutiva para o modelo combinado, pode ser expressa da seguinte forma:

$$\boldsymbol{\sigma} = \Sigma^t\left(\Sigma^J\left(\overline{\boldsymbol{\sigma}}^J\right)\right) \tag{20}$$

onde Σ^J e Σ^t representam a relação constitutiva para o modelo de dano J2 e a relação constitutiva somente à tração, respectivamente.

O modelo resultante é capaz de representar as principais características do comportamento de materiais quase-frágeis, submetidos a diferentes estados tensionais.

Tabela 1. Algoritmos para o modelo de dano combinado

Modelo de dano J_2 $\left(\Sigma^J\right)$	**Modelo de dano somente à tração $\left(\Sigma^t\right)$**
Entrada: $\mathbf{C}, \sigma_c, H, d_n^J, r_n^J, \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ Saída: $d_{n+1}^J, r_{n+1}^J, \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^J$ (1) Calcular $\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^J = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ (2) Calcular $\tau_{n+1}^J = \sqrt{\frac{3}{2}}\left\Vert \overline{\mathbf{S}}^J \right\Vert$ (3) Verificar se $\tau_{n+1}^J > r_n^J$ VERDADEIRO: $r_{n+1}^J = \tau_{n+1}^J$ FALSO: $r_{n+1}^J = r_n^J$ (4) Calcular $d_{n+1}^J = \dfrac{r^J - r_0^J}{r^J(1+H)}$ (5) Calcular a tensão final: $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^J = \left(1 - d_{n+1}^J\right) \cdot \overline{\mathbf{S}}_{n+1}^J + \overline{\mathbf{P}}^J \cdot \mathbf{I}$	Entrada: $\mathbf{C}, \sigma_t, d_n^t, r_n^t, A, \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ Saída: $d_{n+1}^t, r_{n+1}^t, \boldsymbol{\sigma}_{n+1}^t$ (1) Calcular $\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^t = \mathbf{C} : \boldsymbol{\varepsilon}_{n+1}$ (2) Calcular $\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^+ = \dfrac{\left(\left\vert\overline{\boldsymbol{\sigma}}^t\right\vert + \overline{\boldsymbol{\sigma}}^t\right)}{2}$ (3) Calcular $\overline{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^- = \overline{\boldsymbol{\sigma}}^t - \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+$ (4) Calcular $\tau_{n+1}^t = \sqrt{\overline{\boldsymbol{\sigma}}^+ : \mathbf{C}^{-1} : \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+}$ (5) Verificar se $\tau_{n+1}^t > r_n^t$ VERDADEIRO: $r^t{}_{n+1} = \tau_{n+1}^t$ FALSO: $r_{n+1}^t = r_n^t$ (6) Calcular $d_{n+1}^t = 1 - \left(\dfrac{r_0^t e^{A\left(1 - \frac{r_0^t}{r^t}\right)}}{r^t}\right)$ (7) Calcular a tensão final: $\boldsymbol{\sigma}_{n+1}^t = \overline{\boldsymbol{\sigma}}_{n+1}^t - d_{n+1}^t \cdot \overline{\boldsymbol{\sigma}}^+{}_{n+1}$

5. RESUTADOS

5.1 Testes Unidimensionais

A fim de visualizar o comportamento do modelo, segundo o algoritmo apresentado na tab. (1), simulou-se estados uniaxiais de tração, de compressão e alternados, impondo-se incrementos de deformação constantes. Assumiu-se o módulo de endurecimento/abrandamento nulo para o modelo J2, $H = 0{,}0$, $B = 1{,}0$, e o parâmetro de abrandamento do modelo à tração A = 0,4. As propriedades do material usadas foram: módulo de elasticidade E = 10 GPa, resistência à tração σ_t = 2.45 MPa e resistência à compressão, σ_c = 30 MPa.

Os resultados são apresentados na fig. (2), com o material submetido à compressão uniaxial (fig. (2a)) e à tração uniaxial (fig. (2b)), assim como com solicitações alternadas (fig. (2c) e fig. (2d)).

Na fig. (2a), o seguimento $\overline{OA}$ corresponde ao regime elástico linear, com a tensão proporcional à deformação, sem evolução das variáveis de dano ($\dot{d}^J = 0, \dot{d}^t = 0$). No seguimento $\overline{AB}$, o material está no regime elastodegradável perfeito, já que H = 0, com evolução somente da variável de dano J2, ($\dot{d}^t = 0, \dot{d}^J \neq 0$). Na figura (2b) tem-se a curva tensão versus deformação, para o material em processo de carregamento em tração uniaxial, com as tensões proporcionais às deformações (regime elástico) no seguimento $\overline{OA}$ ($\dot{d}^J = 0, \dot{d}^t = 0$). No seguimento $\overline{AB}$, tem-se o regime elastodegradável com abrandamento exponencial e evolução da variável de dano à tração ($\dot{d}^J = 0, \dot{d}^t \neq 0$).

A curva tensão versus deformação mostrada na fig. (2c), corresponde à resposta quando o material é submetido primeiramente à tração e posteriormente à compressão. No processo de carregamento em tração, o material está no regime elástico no trecho $\overline{OA}$ e em processo de degradação no trecho $\overline{AB}$, com abrandamento exponencial. No trecho $\overline{BO}$, o processo é de descarregamento com dano à tração não nulo e sem evolução das variáveis de dano. Na transição do processo de tração para compressão, observa-se uma recuperação da rigidez do material, caracterizando o regime elástico até o material atingir a resistência à compressão, trecho $\overline{OC}$. No trecho "pós-pico", tem-se o processo elastodegradável perfeito ($\overline{CD}$), com evolução da variável de dano do modelo J2, promovendo a perda de rigidez do material, que pode ser observado no processo de descarregamento mostrado no seguimento $\overline{DO}$. Quando o processo passa de compressão para tração, o comportamento de material reflete a perda de rigidez em tração e em compressão (seguimento $\overline{OE}$).

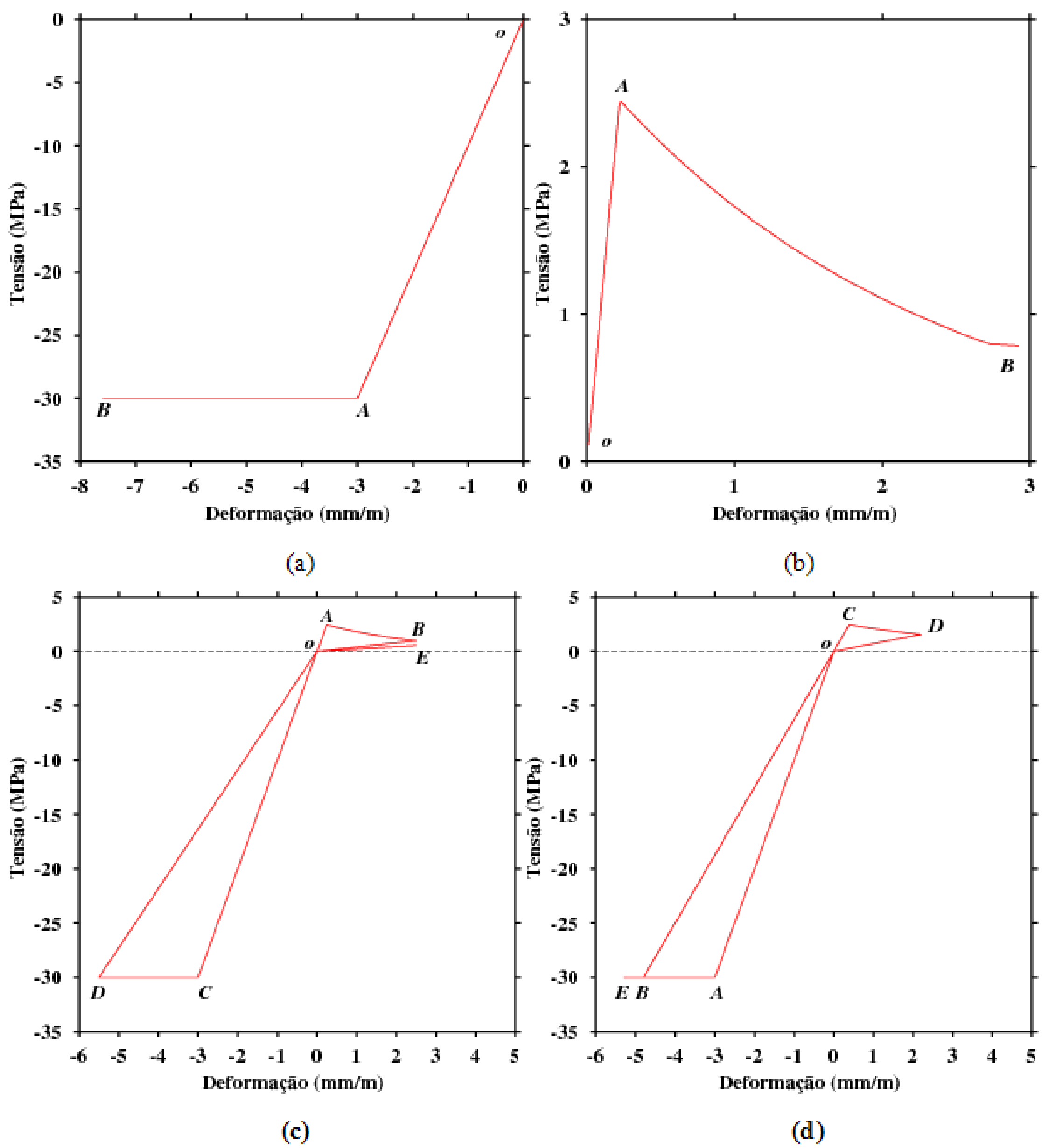

Figura 2. Curva tensão *versus* deformação: (a) compressão, (b) tração, (C) tração compressão e (d) compressão tração

Na figura (2d) mostra-se a resposta quando o material é primeiramente submetido à compressão e posteriormente à tração (carregamento alternado inverso), apresentando compatibilidade com o carregamento alternado da fig. (2c). O regime é elástico linear no seguimento $\overline{OA}$, em processo de degradação (regime elastodegradável perfeito) no seguimento $\overline{AB}$, com evolução da variável de dano do modelo J2, e em processo de descarregamento no seguimento $\overline{BO}$. Na transição do processo de compressão para tração o material não recupera totalmente a rigidez, seguimento $\overline{OC}$, já que este traz a perda de rigidez devido à degradação em compressão. No trecho $\overline{CD}$, o processo é de degradação, abrandamento exponencial, com evolução do dano à tração. Novamente, tem-se o descarregamento, seguimento $\overline{DO}$, passando para o processo de carregamento em compressão, trecho $\overline{OB}$, no qual recupera-se a rigidez correspondente ao estado de compressão. O material volta novamente a danificar em compressão quando é atingida a resistência à compressão.

A recuperação da rigidez do material na passagem do processo de tração para compressão representa os efeitos decorrentes do fechamento das falhas e microfissuras, fazendo com que o material readquira suas propriedades mecânicas.

5.2 Testes Tridimensionais

Para investigar o comportamento do modelo constitutivo de dano combinado, para o material com região de localização de deformações (zona de processo da fratura), apresenta-se uma análise numérica do processo de fissuração de um elemento cúbico, seguido por aplicação de compressão na direção do plano de fissura, registrando-se as respostas tensão-deslocamento para diferentes direções.

Empregando-se o Método dos Elementos Finitos, analisou-se um cubo de aresta L=200 mm, com uma potencial banda de localização plana de largura 0.5 mm, seccionando transversalmente o cubo em sua região central, como mostra a fig. (4). Empregou-se uma malha de 86 elementos finitos tetraédricos de 4 nós, como ilustra a fig. (3). Os elementos finitos permitem simular os efeitos de uma banda de localização plana em seu interior, de acordo com formulação de elementos finitos com descontinuidades incorporadas proposta por Manzoli e Shing (2006), estendida para casos tridimensionais.

É importante salientar que nesse caso a abertura de fissura de tração é simulada mediante o processo de localização de deformações inelásticas no interior da banda de localização. A redução das tensões com o acréscimo das deformações, descrita pela lei de abrandamento, estabelece a interação do tipo coesiva entre as faces da fissura, associada à energia de fratura do material. A relação existente entre as deformações na banda de localização e os modos de descontinuidade na fissura (abertura de deslizamentos) é dada pela cinemática da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (Oliver et al., 1999).

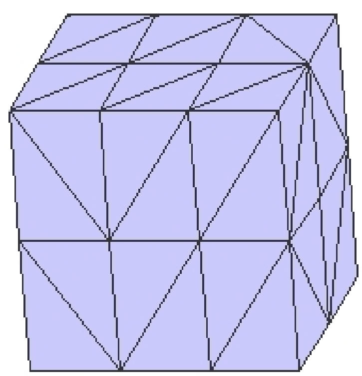

Figura 3. Cubo com malha de elementos finitos tetraédricos

As propriedades do modelo constitutivo assumidas são: módulo de Young E = 30 GPa, coeficiente de Poisson ν = 0,2 resistência à tração σ_t = 2.0 MPa; resistência à compressão σ_c = 20 MPa; variável de dano com abrandamento de compressão exponencial da Eq. (6), com B = 0.25; e parâmetro de abrandamento exponencial de tração A = 0.015.

Primeiramente, o cubo é submetido ao estado de tração uniaxial na direção 1, abrindo-se a fissura ortogonal, após percorrer-se o regime elástico, atingindo uma abertura de 0.1 mm, como mostra curva 1 da fig. (4). Em seguida é aplicada compressão na direção 3, impedindo-se os deslocamentos das faces na direção 1. O processo é de compressão uniaxial na direção 3, acompanhado de movimentos da direção 1, no sentido de fechamento da fissura. Após o fechamento da fissura, o cubo passa a estado biaxial em compressão (confinado), com ganho de rigidez proporcionado pela compressão na direção 1, devido às reações nas faces vinculas, como ilustra a curva 2da fig. (4).

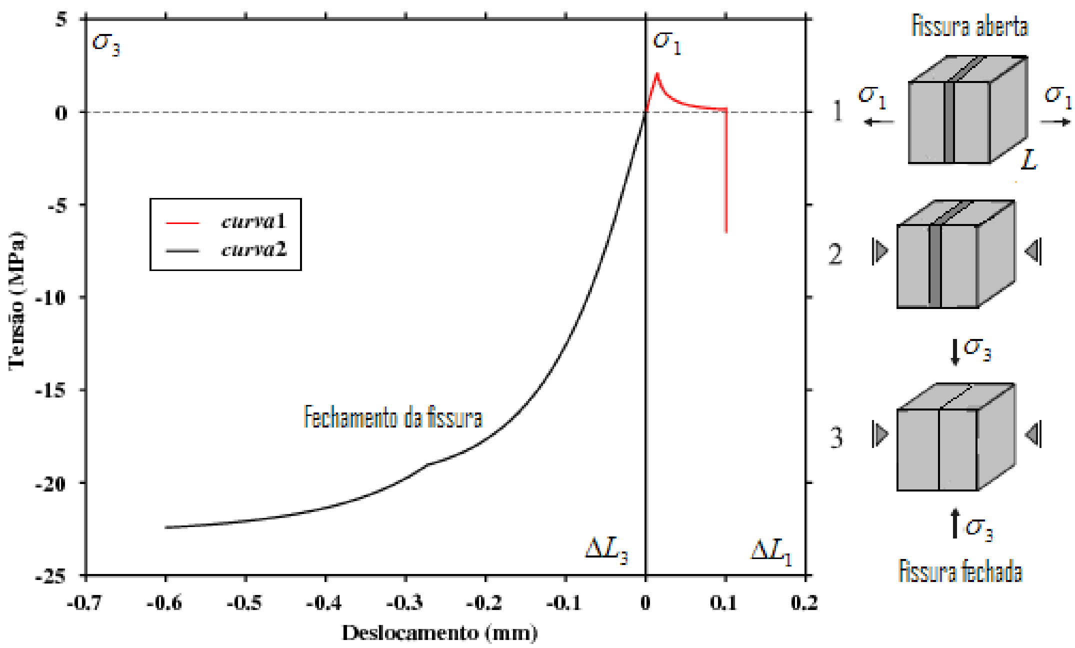

Figura 4. Curva tensão versus deslocamento com fissura localizada para o estado de tensão biaxial

Para efeito de comparação com a curva 2 da fig. (4) é apresentados a curva 2 na fig. (5), obtida para o cubo sem fissura em processo de compressão simples na direção 3, e a curva 3 da mesma figura para o cubo submetido à compressão biaxial , com os movimentos das faces impedidas na direção 1 (situação confinada).

Como se pode observar, o comportamento à compressão do cubo fissurado é similar ao correspondente à compressão simples até que a fissura se feche. A partir de então o comportamento tende progressivamente ao correspondente à situação de compressão biaxial confinada.

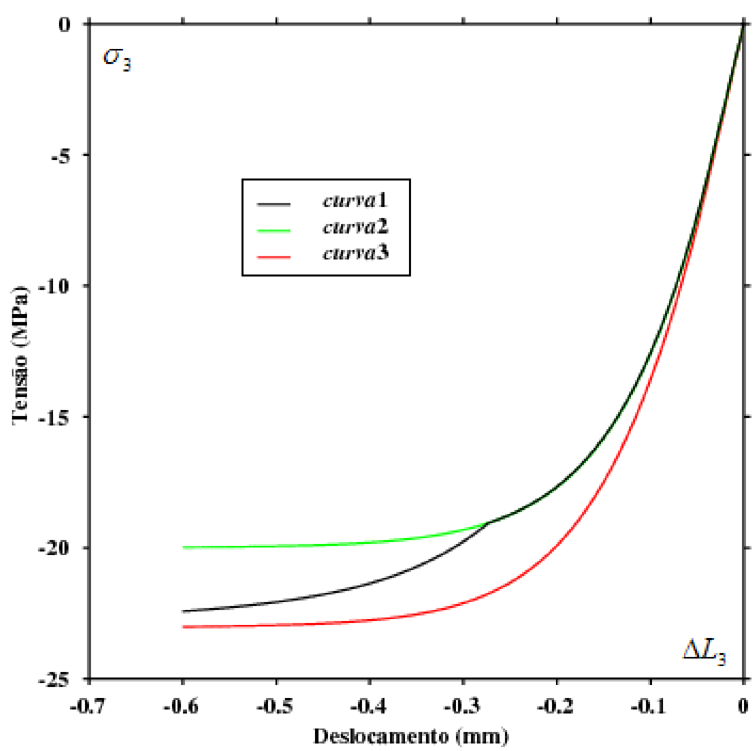

Figura 5. Curva tensão deslocamento para o estado de tensão em compressão

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho apresentou-se um modelo constitutivo de dano combinado capaz de representar o comportamento diferenciado de materiais quase-frágeis, quando solicitados à tração ou compressão, inclusive para cargas alternadas, tração-compressão ou compressão-tração.

O modelo é obtido mediante a composição de modelos independentes projetados para representar fenômenos de degradação distintos, associados à estados compressivos ou de tração, mediante um interpretação envolvendo comportamentos em distintas escalas . A forma de composição proposta se mostrou adequada para representar as principais características mecânicas de materiais quase-frágeis, refletindo as mudanças comportamentais conforme o tipo de solicitação.

Embora as análises tenham focado os aspectos qualitativos da simulação, a modelagem pode ser aperfeiçoada mediante definições de leis de endurecimento/abrandamento que reflitam com mais realismo o comportamento não linear de materiais quase-frágeis. Também é possível estender o modelo de compressão para representar efeitos associados ao atrito interno do material, através da introdução da dependência do critério de dano com relação à tensão média, como é o caso do modelo de Drucker-Prager.

A principal motivação para esse tipo de composição proposta é sua aplicação futura na simulação de processos de fraturamento, usando elementos finitos com fissuras incorporadas, no contexto da Aproximação Contínua de Descontinuidades Fortes (Manzoli e Shing, 2006). Essas extensões permitirão a análise de casos mais complexos, envolvendo comportamentos não lineares proporcionados, simultaneamente, pelo aparecimento de fissuras de tração e por processos de esmagamentos em compressão, que podem ocorrer em elementos estruturais reforçados, como os de concreto armado.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES).

8. REFERÊNCIAS

J. Cervenka and V. K. Papanikolaou, December 2008, Three dimensional combined fracture-plastic material model for concrete. International Journal of Plasticity, 24(12):2192 2220.

J. C. Simo and J. W. Ju, 1987, ‘Strain- and stress-based continuum damage models – I. Formulation’, Int. j. solids struct. V. 23, p. 821-840.

J. Lemaitre, 1992, A course on damage mechanics. Springer-Verlag.

J. Oliver, 1995, ‘continuum modeling of strong discontinuities in solid mechanics’, Proc. IV Int. conf. on computational plasticity, CMNE, p. 455-479.

J. Oliver, M. Cervera, and O. Manzoli, 1999, Strong discontinuities and continuum plasticity model: The strong. discontinuity approach. International journal of plasticity, v. 15, n. 3, p. 319-351.

M. Cervera, J. Oliver, and O. Manzoli, 1996, A rate-dependent isotropic damage model for the seismic analysis of concrete dams. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25(9): 987-1010.

O. L. Manzoli, P. B. Shing, 2006, A general technique to embed non-uniform discontinuities into standard solid finite elements. Computers and Structures, v. 84, p. 742-757.

9. DIREITOS AUTORAIS

A CONTITUTIVE CONTINUUM DAMAGE MODEL TO SIMULATE THE BEHAVIOR OF QUASE-BRITTLE MATERIAL

Eduardo Alexandre Rodrigues[1], eduardoar@feb.unesp.br
Osvaldo Luis Manzoli[1], omanzoli@feb.unesp.br

[1]UNESP - Univ Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Av. Eng. Luiz Edmundo C. Coube, 14-01, Bauru, SP, Brasil.

Abstract: *A combined constitutive model based on the Continuum Damage Mechanics (CDM) is presented to represent the nonlinear behavior of quasi-brittle materials, which present different response when subjected to tension or compression. The constitutive model is a composition of two simple and specific models designed to treat each type of behavior. The combined model is able to deal with alternating load (tension- compression), involving formation, closure and reopening of cracks. To model the compressive behavior, a degradation criterion based on the second invariant of the deviatoric part of the effective stress tensor (Von Mises or J2 criterion) is used. To simulate cracking, a damage model with degradation criterion based on the strain energy associated to the positive part the effective stress tensor is adopted. The combination of the models is made on the basis of the effective stresses associated to two distinct scales (coarse and fine scales). The model is able to represent the formation of discontinuities in the displacement field (strong discontinuities) for quasi-brittle materials. The region of strain localization (fracture process zone) is described by a softening law which establishes dissipation energy compatible with the fracture energy. The continuous region is described by the J2 damage model, with parameters adjusted to describe the nonlinear behavior in compression. Some basic tests are performed to assess the ability of the model to represent the main aspects of the behavior of quasi-brittle materials.*

Keywords*: Continuum damage mechanics, strong discontinuities, finite elements, quasi-brittle materials.*