**Sugestão WMPJ: O emprego de técnicas de computação bioinspirada na fase de identificação paramétrica de um modelo de dano para concreto**

**Sugestão prof. JJCP e GRF: Metodologia para a identificação paramétrica de modelos de dano aplicados a estruturas de concreto armado**

**Sugestão prof. RAB: Identificação Paramétrica e Análise de Sensibilidade Combinadas a um Modelo de Mecânica do Dano de Estruturas de Concreto Armado**

W. M. Pereira Junior, R. A. Borges, D. L. Araújo, G. R. Fernandes, J. J. C. Pituba

|  |
| --- |
| R E S U M O |
| A formulação de modelos constitutivos para materiais com alta complexidade de comportamento mecânico já apresentou um desenvolvimento formidável com a expansão da capacidade de processamento de dados, a melhor compreensão do comportamento de materiais e o desenvolvimento de novas técnicas numéricas. Porém, o emprego eficiente de modelos constitutivos depende de uma metodologia robusta para a identificação paramétrica e verificação da influência de parâmetros nas respostas esperadas de materiais, sendo esse um tema que ainda necessita de atenção. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta a proposta de uma metodologia de análise de sensibilidade paramétrica, assim como para a identificação de parâmetros de modelos constitutivos, baseadas em técnicas de otimização. Como exemplo, são apresentados os resultados obtidos para o emprego de um modelo de dano em análise de estruturas de concreto armado. As respostas apresentadas validam o emprego da metodologia e contribuem para o entendimento do comportamento do modelo constitutivo empregado. |
| Palavras-chave: Otimização, Análise de sensibilidade, Mecânica do dano, Concreto Armado |

1. INTRODUÇÃO

Desde o advento da criação do computador, os avanços da ciência da computação e dos algoritmos têm permitido grandes melhorias no entendimento do comportamento de materiais em geral [1], porém nos dias atuais as técnicas numéricas de simulação vêm se desenvolvendo cada vez mais, o que permite a aplicação de teorias analíticas com o intuito de reproduzir fênomenos da natureza, podendo ser utilizadas como ferramentas exploratórias para verificar o comportamento de materiais sob diversas situações de excitação [2], já que em certas ocasiões a realização de ensaios em laboratório tem alto custo ou até mesmo as condições são inviáveis [3]. Tais modelos numéricos normalmente utilizados na área das engenharias são denominados como modelos efetivos, pois estes assumem hipóteses e simplificações de forma a representar o comportamento físico de um sistema através de relações matemáticas especificas [2]. Contudo, o grande desafio de um modelo numérico está relacionado à proposição de parâmetros de forma que esses possam representar qualitativamente as observações experimentais [4]. Nesse cenário, um modelo mecânico efetivo para simulação do comportamento de um material qualquer tem como ums ods seus pilares a adequada identificação paramétrica o quanto possível, sendo, portanto, de papel crucial no emprego de qualquer modelo proposto

Dentro desse contexto de identificação paramétrica de modelos constitutivos, o emprego de técnicas de otimização ainda é pouco utilizada em modelos constitutivos que modelam o comportamento mecânico de materiais. Pode-se citar os trabalhos de [5–9] que utilizaram de técnicas inversa para solução de problemas em ciências aplicadas.

Outro ponto que merece atenção é o tipo de material que se está proporando analisar devido as suas características de complexidade de comportamento mecânico, objeto do presente trabalho. O material estudado aqui é o concreto, um material que apresenta um nível de complexidade alto, sendo considerado aqui como um compósito, pois possui mais de duas fases em sua composição, além de possuir características mecânicas diferentes aos materiais constituintes, como, por exemplo, resistência e rigidez [1,10]. Este material é bastante utilizado no projeto de estruturas civis [11], sendo este um compósito com três fases distintas: uma fase caracterizada pelos agregados graúdos da mistura, uma fase de pasta, ou também denominada de fase de argamassa, e uma zona de transição que liga as duas fases anteriores, sendo que cada uma delas tem impacto direto no comportamento global do material [12].

Sobre o comportamento mecânico do concreto, o mesmo tem uma característica não linear quase-frágil [13,14], caracterizado por deformações irreversíveis além da perda progressiva de rigidez do material [15–17]. Uma das dificuldades da modelagem do concreto está no fato de que o mesmo não apresenta simetria de comportamento em situação de tração e compressão [18]. Diversos modelos físico-matemáticos são desenvolvidos para simular esse comportamento característico do concreto [19], cabendo destaque para os modelos baseados em mecânica do dano.

Os modelos baseados em mecânica do dano admitem que o processo de danificação pode ser efetivamente representado por um número finito de variáveis termodinâmicas de estado, sendo que essas podem ser representadas por escalares ou tensores. A representação do comportamento global é feita em função de um tempo e é admitido como uma sucessão de estados de equilíbrio termodinamicamente irreversíveis, conforme prescrições da primeira e segunda lei da termodinâmica [20]. Os modelos de dano vêm sendo utilizados de forma satisfatória para simulação de diversos tipos de materiais, como materiais biológicos, metais [17,21–24] e compósitos [25]. Para aplicações em concreto, diversos trabalhos já foram realizados [13,15,19,26–39].

Diante da discussão apresentada, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de identificação de parâmetros de modelo de dano para o concreto baseada em técnicas de otimização, sendo esse um aspecto fundamental da modelagem a dano e, como tal, devem ser estudadas alternativas e novas propostas de modo a viabillizar a utilização eficiente de modelos de dano robustos. Contudo, esse é um campo de pesquisa que ainda merece ser ampliado de discussões e, portanto, justifica-se a proposição apresentada aqui.

Por fim, ressalta-se que a viabilidade da metodologia baseada em técnicas de otimização e proposta neste trabalho para a identificação paramétrica de modelos de danoserá verificada por meio de simulações do comportamento mecânico de estruturas de concreto utilizando o Método dos Elementos Fintitos e o Método dos Elementos de Contorno. Para tanto, a metodologia proposta será empregada na identificação paramétrica do modelo de dano desenvolvido por Mazars & Pijaudier-Cabot [40] por se tratar de um modelo já consagrado na literatura.

1. METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE DANO

Nesse item é apresentada a metodologia proposta para determinação dos parâmetros do modelo de dano de Mazars & Pijaudier-Cabot [40].

* 1. Análise de sensibilidade

Inicialmente, deve ser realizada uma análise de sensibilidade paramétrica do modelo de dano. Uma análise de sensibilidade consiste em quantificar as variações na saída do modelo por meio de perturbações nas variáveis de entrada [41,42], sendo essa uma ferramenta de suma importância no desenvolvimento de modelos físico-matemáticos [43] em diversos campos das ciências: [43–45].

A abordagem utilizada para análise de sensibilidade foi do tipo *One Factor At a Time* (OFAT) ou *One At a Time* (OAT) que consiste em variar independentemente os parâmetros de entrada, um de cada vez, mantendo todos os outros constantes de acordo com um cenário padrão pré-estabelecido [46]. Para isso, utiliza-se do conceito de diferenciação [47] da função teste conforme proposto na equação (7.1), em que equivale a função de sensibilidade normalizada; é a variável n-dimensional de interesse do problema; e é a função teste representativa do modelo físico-matemático.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.1) |

No caso desse trabalho, a função a ser analisada é a função de tensão para descrever o comportamento do concreto sobre estados uniaxiais de carregamento, dado conforme equação (7.2).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.2) |

A variável escalar de dano () é dada pela equação (7.7), sendo que a equação (7.3) representa a lei de evolução do dano em situação de tração uniaxial e a equação (7.5) representa a lei de evolução para dano em compressão uniaxial. A variável representa a deformação limite para início da danificação no sistema, representa a deformação equivalente para verificação da danificação e a deformação axial, seja ela de tração ou compressão. Em situação de tração uniaxial a deformação equivalente é dada pela equação (7.4) e em caso de compressão uniaxial a deformação equivalente é dada pela equação (7.6).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.3) |
|  | (7.4) |
|  | (7.5) |
|  | (7.6) |
|  | (7.7) |

Os valores de e representam as parcelas contribuintes no dano escalar para os efeitos de tração e compressão, respectivamente. Em situações mais complexas de carregamento como por exemplo a flexão os valores combinados de e somam 1. Em tração uniaxial e compressão uniaxial .

Para as equações (7.3) e (7.5), os parâmetros do modelo são representadas por e. Para esse conjunto de variáveis deseja-se saber a sua influência no valor do dano escalar, representado por e .

Na equação (7.6) representa o coeficiente de Poisson do concreto, que nesse caso foi adotado como 0,20 para todas as análises. Já representa o módulo de elasticidade incial do concreto. Para as análises de sensibilidade descritas no item 3.1 deste trabalho, foi estabelecido um concreto de 30 MPa de resistência média à compressão () e para esse determinou-se seu módulo e deformação do limite elástico na tração utilizando as equações (7.8) e (7.10). Tal formulação também é encontrada em [48,49].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.8) |
|  | (7.9) |
|  | (7.10) |

Para verificar a influência dos parâmetros na modelagem de dano aplicou-se uma perturbação de 50% nas variáveis do modelo. A faixa referencial de variação dos parâmetros foram estabelecidas por Mazars [50], sendo portanto: ; ; e .

A Tabela 7.1 apresenta o padrão de simulação adotado para o estudo da sensibilidade paramétrica de cada umas das variáveis em função do tipo de esforço aplicado e respeitanto a faixa de variação definida por Mazars [50]. do tipo de esforço aplicado e respeitanto a faixa de variação definida por Mazars [50]. Para geração da curva completa tensão-deformação, na análise de sensibilidade, foram aplicadas como deformações uniaxiais máximas 0,060% nas situações de tração e 0,60% em situações de compressão.

|  |
| --- |
| **Tabela 7.1 – Valores das variáveis para análise de sensibilidade das variáveis e .** |
| |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **Análise** | **A** | **B** | **Estado de carregamento** | **Deformação (%)** | **Deformação máxima (%)** | |  | 0,70 | 10000,00 | Tração uniaxial | 0,0127 | 0,060 | |  | 0,85 | 10000,00 | 0,0127 | 0,060 | |  | 0,70 | 55000,00 | 0,0127 | 0,060 | |  | 1,00 | 1000,00 | Compressão uniaxial | 0,0127 | 0,60 | |  | 1,25 | 1000,00 | 0,0127 | 0,60 | |  | 1,00 | 1500,00 | 0,0127 | 0,60 | |

* 1. Determinação dos parâmetros constitutivos via análise inversa

Para a determinação dos parâmetros constitutivos, é utilizada a técnica de problema inverso baseada nos conceitos de otimização. Tal técnica consiste na determinação das causas, aqui tratadas como as variáveis do modelo de dano de Mazars & Pijaudier-Cabot [36], a partir de efeitos observados. O resultado obtido é a curva completa tensão-deformação em situação de tração ou compressão uniaxial.

A técnica inversa relacionada à determinação de parâmetros pode ser entendida como um problema de ajuste. Tais técnicas têm ganhado bastante espaço em função da sua versatilidade. Diversas aplicações, como por exemplo na área de mecânica dos sólidos [51–53], termodinâmica [54] e mecânica dos solos [55,56], tem detectado a sua eficiência. Nesse estudo, a otimização é tratada como um problema de minimização do desvio entre a resposta numérica e a resposta observada. A Função Objetivo () é dada pela equação (7.11). Tal equação também foi utilizada em [57,58].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.11) |
|  | (7.12) |

Nessas equações representa as tensões experimentais ou observadas; representa as tensões produzidas pelo modelo numérico de dano devido a um conjunto de variáveis ; representa o número de pontos da amostra experimental ou observada; são as variáveis de projeto do problema; e são os limites inferior e superior dessas variáveis.

O algoritmo otimizador utilizado no problema inverso foi o algoritmo de Colônia de Abelhas Artificiais (ABC). Tal algoritmo foi desenvolvido por [59] e é inspirado no comportamento das abelhas na busca por alimentos. Esse algoritmo se caracteriza por ser uma inteligência computacional do tipo enxame, no qual o espaço de solução é explorado por uma população de partículas que compartilham informações entre si. O algoritmo otimizador ABC é apresentado na Figura 7.1 e maiores detalhes do algoritmo otimizador podem ser encontrados em [59–62].

O algoritmo em questão possui duas fases: a fase 1 de inicialização de processos onde são informadas variáveis como: a população total de abelhas (*Npop*); total de abelhas empregadas (*NEB*); total de abelhas assistentes (*NOB*); Limite para ativação das abelhas escoteiras que nesse caso foi estabelecido conforme equação (7.13). Informa-se também o número de dimensões do problema (*D*); quantidade de iterações (Ngen); e a população incial do enxame. O variável foi fixada em para cada simulação realizada com o algoritmo de Colônia de Abelhas.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.13) |

Já a fase 2 contempla o processo iterativo, que por sua vez é dividido entre etapas internas, sendo essas as etapas: (a) Busca das abelhas empregadas; (b) Busca das abelhas assistentes; e (c) Busca das abelhas escoteiras.

Na etapa da abelha empregada, soluções vizinhas são geradas a partir da equação (7.14) onde o valor de é dado por um escalar randômico [-1, +1]. O valor corresponde a um vetor que varia de 1 até NEB; e são escalares escolhidos randômicamente para melhoria da solução sendo que [1, 2, ..., NEB] e deve ser diferente e [1, 2, ..., D].

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.14) |

Nessa etapa a solução vizinha será incorporada como nova solução a partir de um critério de seleção gulosa comparando a aptidão () da solução conforme equação (7.15), sendo que a variável representa o valor da função objetivo para a partícula selecionada.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.15) |

Percorrida a fase das abelhas empregadas inicia-se a fase das abelhas assistentes que vão melhorar localmente as soluções selecionadas via processo de seleção por roleta. O processo de roleta é baseado nas probabilidade de seleção das partículas conforme equação (7.16). Portanto a etapa das abelhas assistentes tem como função melhorar as soluções já encontradas na fase anterior das abelhas empregadas.

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.16) |

Portanto a solução adotada para melhoria é escolhida randomicamente via processo de seleção por roleta e então aplica-se a equação (7.14) para todas as movimentações e o critério de solução gulosa também é adotado nessa etapa.

Ao fim da etapa das abelhas assistentes armazena-se a melhor solução encontrada e entra em ação a fase da abelha escoteira que irá substituir uma única partícula que tenha ultrapassado o limite estabelecido equação (7.13). Deve-se salientar que a variável trial (Vista na Figura 7.1) é quem armazena o contador de soluções que não foram melhoradas no critério de solução gulosa. Portanto ao se detectar que uma solução não foi melhorada armzena-se uma unidade e na etapa de abelha escoteira a solução que estiver com contador trial maior que o limte estabelecido será substituído pela equação (7.17).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.17) |

Onde e e correspondem ao intervalo das possíveis soluções e é um vetor de números aleatórios que pode variar entre 0 a 1.

|  |
| --- |
| **Passo 1: Inicialização**  Inicialização das variáveis do algoritmo (Npop = NEB + NOB), Ngen, trial = 0, D e Limite), população inicial e aptidão das abelhas empregadas  **Passo 2: Processo iterativo**  **for k =1 até Ngen (Número máximo de gerações ou iterações)**  **for i = 1 até NEB**  Fase da abelha empregada com movimentação conforme a eq. (7.14). Armazena o movimento e trial = 0 se Aptidão ( +1) > Aptidão ()  Caso não armazene faça trial = trial +1  **fim for**  Cálculo da probabilidade de cada abelha empregada conforme eq. (7.16).  **for ii = 1 até NOB**  Fase da abelha assistente com movimentação conforme a eq. (7.14). Armazena o movimento e trial = 0 se Aptidão ( +1) > Aptidão ()  Caso não armazene faça trial = trial +1  **fim for**  Armazenar a melhor solução do processo iterativo.  **if trial > Limite eq.** (7.13)  Fase da abelha escoteira com movimentação randômica conforme eq. (7.17).  **Break !!!** (Caso a abelha escoteira seja necessária, substituir solução na abelha empregada e passar a próxima iteração)  **fim if**  **fim for** |
| **Figura 7.1 – Esquema genérico do algoritmo ABC** |

Para o algoritmo de Colônia de Abelhas utilizado nesse trabalho o número de população do enxame foi adotado conforme orientação de [59] sendo de 50% de abelhas empregadas e 50% de abelhas assistentes. O número de iterações foi estabelecido em 250 para cada repetição.

Para os testes relativos à identificação paramétrica a rotina de otimização foi executada por 1000 vezes com população fixada em 48 indivíduos (24 abelhas empregadas e 24 abelhas assistentes), pois em testes iniciais foi constatado que esse número de população apresentava resultados satisfatórios do ponto de vista da equivalência do modelo numérico. A Figura 7.2 apresenta como foi feito o acoplamento do modelo de dano ao algoritmo otimizador.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.2 - Esquema genérico do acoplamento entre a otimização e o modelo numérico.** |

Como referências observáveis são adotados dados encontrados na literatura, conforme Pituba e Fernandes [32]. As curvas de referência em compressão e tração uniaxial são apresentadas na Figura 7.3. As características mecânicas, do concreto analisado, são apresentadas na Tabela 7.2.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Figura 7.3 – Curva completa tensão-deformação (a) para situação de tração e (b) situação de compressão** [32]**.** | |

As variáveis e correspondem à tensão de pico em situação de compressão e tração uniaxial, respectivamente. e correspondem as deformações referentes ~~a~~ à tensão de pico em situação de compressão e tração uniaxial.

|  |
| --- |
| **Tabela 7.2 - Propriedades mecânicas das curvas tensão-deformação para utilização no algoritmo otimizador.** |
| |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **Concreto** | **(MPa)** | **(MPa)** | **(MPa)** | **υ** | **(%)** | | C30 | 30,00 | 2,29 | 29200,00 | 0,20 | 0,0070 | |

É válido salientar que a identificação paramétrica será feita para esses um concreto de forma a verificar as variáveis de dano em tração e compressão uniaxial. A variável é identificada de forma direta através do ensaio de tração uniaxial conforme informado anteriormente.

1. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados referentes à análise de sensibilidade, identificação paramétrica e simulações numéricas desse trabalho.

* 1. Análise de sensibilidade do modelo de Mazars & Pijaudier-Cabot

Para as análises da presente seção, o concreto tomado como referência é aquele descrito na Tabela 7.1 da seção 2.1. A Figura 7.4 apresenta o resultado da análise da função de sensibilidade , para as variáveis de dano sob efeito de tração uniaxial. Além da análise de sensibilidade foi representada nessa figura o comportamento normalizado tensão *versus* deformação.

Avaliando os valores obtidos na Figura 7.4 é possível afirmar que ambas as variáveis e provocam alterações no comportamento mecânico da curva tensão-deformação alterando o formato do seu trecho não linear visto que em deformações inferiores a as variáveis de dano não influenciam em nada o comportamento da estrutura visto que esse é elástico linear. Também é possível verificar que nos trechos iniciais de amolecimento (*softening*), a variável tem uma influência maior que a variável e que a partir do valor de deformação de 3.10-4 a variável passa a ser mais influente que a variável .

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.4 - Análise de sensibilidade da variável e .** |

Verificando as simulações e , conforme apresentado na Figura 7.5, a variação em acentuou o fenômeno de perda de rigidez nos trechos inciais de deformação não linear estando de acordo com a análise de sensibilidade apresentada na Figura 7.4. Outro fato identificado foi que para situações de tração uniaxial os valores de e utilizados não apresentaram nenhum fenômeno de endurecimento (*hardening*) na amostra. Na análise de sensibilidade é possível identificar tal fato visto que nenhuma valores de sensibilidade () foram positivos, vide Figura 7.4. Como o processo é baseado em derivadas, a inclinação do início do trecho não linear da curva terá concavidade voltada para cima representando assim o fenômeno de amolecimento na amostra.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.5 – Curva tensão-deformação para variações nos parâmetros de dano em tração uniaxial.** |

O mesmo processo foi repetido para a situação de compressão uniaxial de forma a verificar a influência das variáveis e na resposta tensão-deformação do material. Para isso apresenta-se a Figura 7.6.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.6 - Análise de sensibilidade da variável e .** |

A primeira conclusão ao se observar a Figura 7.6 é que o dano e suas variáveis somente têm influência após a deformação de 0,045%. Em termos qualitativos de sensibilidade é possível afirmar que ambas as variáveis e podem afetar o trecho não linear das amostras de concreto. No caso a variável tem influencia verificada em toda a curva tensão-deformação enquanto a variável tem sua influência estabilizada em regiões próximas a tensão de pico da amostra estudada. Logo é possível inferir que perturbações em podem ser mais significativas para alteração da tensão de pico do material.

Verificando a influência quantitativa dos parâmetros e , a Figura 7.7 apresenta os resultados para as simulações a . Nesse caso é possível afirmar que um aumento do parâmetro influencia o comportamento tensão-deformação no sentido de aumentar a tensão de pico do material. Nesse caso, para a simulação a tensão de pico é de -40,89 MPa enquanto que na simulação a tensão de pico é de -48,01 MPa proporcionando um aumento de 17,41%. Para a simulação a tensão de pico é alterada no sentido de fragilização da amostra para a situação de compressão. Nesse caso a tensão foi reduzida para -29,05 MPa, ou seja, uma redução de 28,96%, confirmando a análise qualitativa da Figura 7.6, ou seja, a variação do parâmetro tem importante influência na resposta do material em compressão.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.7 – Curva tensão-deformação para variações nos parâmetros de dano em compressão uniaxial.** |

Também foram realizadas simulações paramétricas em placas de concreto com intuito de verificar a influência dessas configurações em uma estrutura submetida à flexão, caso esse que é bastante comum em aplicações reais de estruturas de concreto. A técnica numérica adotada para essa análise foi o Método dos Elementos de Contorno (MEC), sendo que essa pode ser vista em diversas produções cientificas da área [63–65].

Para o presente estudo, a estrutura utilizada para a simulação foi a mesma ~~utilizada~~ analisada por Fernandes *et al.* [66]. A placa de concreto simples é considerada totalmente apoiada nos 4 bordos com carregamento distribuído de 0,40 kN/cm2. Sua geometria é de 100x100x4 cm e a discretização utilizada foi de 24 elementos de contorno e uma malha interna de 72 células para representação do domínio. A Figura 7.8 apresenta o modelo estrutural da peça.

Os dados referentes ao concreto seguiram as prescrições estabelecidas na seção 2.1 e Tabela 7.1.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.8 - Esquema estrutural da placa biapoiada.** |

A Tabela 7.3 apresenta os valores de parâmetros de dano e a Figura 7.9a apresenta o comportamento global carga-deslocamento da placa. Já a Figura 7.9b apresenta o detalhe das diferentes respostas quando o processo de danificação já é intenso na placa.

|  |
| --- |
| **Tabela 7.3 - Valores dos parâmetros de Mazars & Pijaudier-Cabot [40] para as comparações.** |
| |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | **Simulação** |  |  |  |  | | MEC1 | 0,70 | 10000,00 | 1,00 | 1000,00 | | MEC2 | 0,85 | 10000,00 | 1,00 | 1000,00 | | MEC3 | 0,70 | 55000,00 | 1,00 | 1000,00 | | MEC4 | 0,70 | 10000,00 | 1,25 | 1000,00 | | MEC5 | 0,70 | 10000,00 | 1,00 | 1500,00 | |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **(a)** |  | **(b)** |
| **Figura 7.9 – Comportamento mecânico carga-deslocamento no ponto médio da placa biapoiada utilizando Método dos Elementos de Contorno. (a) Visão completa da trajetória de equilíbrio; e (b) Visão ampliada a partir de 5,50 mm de deslocamento.** | | | |

Comparando a situação MEC4 com a situação MEC1 e MEC 5 é possível afirmar que o parâmetro da compressão não gerou mudanças significativas na rigidez da estrutura. Já comparando a situação controle (MEC1) com as alterações propostas em MEC 2 e MEC 3 é visível que alterações nos parâmetros e implicam em alterações na rigidez da peça. Comparando o efeito das situações MEC2 e MEC3 foi possível confirmar a resposta da análise de sensibilidade das Figuras 7.4 e 7.5. Um aumento nas variáveis e implicaram em uma redução da rigidez, sendo que a variável provocou a mudança mais acentuada como na simulação MEC3.

Os fatos acima podem ser explicados pelo fato de que a placa não possui armadura e, sendo o concreto em situação de tração um material que apresenta uma resistência inferior (cerca de 10% da resistência a compressão [67]) ao concreto comprimido, logo em simulações sem a presença de armadura, os fatores que regulam o modelo em tração são preponderantes.

* 1. Aplicação da Metodologia Proposta para a análise de estruturas de concreto armado

Para as simulações de estruturas de concreto armado que seguem nesta seção, um código de cálculo baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) foi empregado por Pituba e Fernandes [32]. Esse código de cálculo adota ~~dos~~ elementos de barra com seção transversal discretizada em camadas (Figura 7.10), assumindo como hipótese a desconsideração da deformação distorcional. Nas análises foram utilizados resultados experimentais obtidos em [68]

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.10 – Modelo de elementos finitos com seção estratificada** |

Como o modelo experimental utilizado se trata de concreto armado, o comportamento mecânico das camadas de concreto foi governado pelo modelo de dano de Mazars & Pijaudier-Cabot [40], enquanto que as camadas que continham aço foram governadas por um modelo elastoplástico perfeito. Tal modelo mecânico para as armaduras é amplamente difundido para uso em simulações de concreto armado, conforme exemplificado em [19,69].

A Figura 7.11 apresenta o modelo estrutural da viga de referência com vão entre apoios de 240,00 cm, com forças aplicadas nos terços do vão (nesse caso 80 cm dos apoios). A Figura 7.11 também ilustra as seções transversais utilizadas nos ensaios experimentais, que nesse caso contempla um grupo de 3 composições diferentes para as armaduras. Maiores detalhes podem ser encontrados em [32].

O modelo numérico utilizado foi discretizado em 20 elementos finitos de barra e as seções foram divididas em 15 camadas. Os dados relativos aos modelos numéricos são determinados em etapas diferentes. Para as armaduras com modelo elastoplástico perfeito foram adotados os dados da Tabela 7.4 conforme [19,32]. Já os dados relativos ao concreto foram extraídos do processo de identificação paramétrica com a utilização de modelos de otimização via problema inverso.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| **Figura 7.11 - Representação esquemática da viga ensaiada** | |

|  |
| --- |
| **Tabela 7.4 - Valores dos parâmetros do modelo elastoplástico para aço CA-50 para armadura** [19,32]**.** |
| |  |  |  | | --- | --- | --- | | **Propriedade do modelo** | **Valor** | **Unidade** | | Módulo de elasticidade do aço | 196.000,00 | MPa | | Tensão de escoamento viga de 3 | 500,00 | MPa | | Tensão de escoamento viga de 5 e 7 | 420,00 | MPa | | Massa específica | 7.850,00 | kg/m³ | | Deformação de ruptura | 1,086 | % | |

Com o objetivo de verificar a representatividade das respostas numéricas fornecidas pelo modelo de dano em relação às respostas experimentais em ensaios de tensão uniaxial qunado da realização da identificação paramétrica, testes de Willmort e Pearson foram executados conforme as equações (7.18) e (7.19).

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7.18) |
|  | (7.19) |
|  | (7.20) |

Para classificação qualitativa das respostas foi utilizada a proposta de Camargo e Centelhas [70] conforme descrito na Tabela 7.5.

|  |
| --- |
| **Tabela 7.5 - Classificação do índice de desempenho do modelo**  [70]**.** |
| |  |  | | --- | --- | | **Valor de** | **Desempenho** | | > 0,85 | Ótimo | | 0,75 0,85 | Muito Bom | | 0,65 0,75 | Bom | | 0,60 0,65 | Mediano | | 0,50 0,60 | Sofrível | | 0,40 0,50 | Mau | | 0,40 | Péssimo | |

3.2.1 Identificação paramétrica do modelo de dano utilizando inteligêncial computacional

Para o concreto especificado em [32] e descrito na seção 2.2 na Figura 7.3 e tabela 7.2, foram adotados os critérios de otimização via procedimento inverso. O intervalo das variáveis de projeto, nesse caso as variáveis de dano, foi de ; ; e .

A Figura 7.12 apresenta os resultados para situação de tração uniaxial. Os valores de e foram de 0,9831 e 7985,25, com valor de FO de 0,6367. Para Figura 7.12 o índice de desempenho foi igual a 0,9979, o coeficiente foi igual a 0,9930 e o coeficiente foi igual a 0,9944.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.12 - Representação da identificação paramétrica da curva tensão-deformação para situação de tração uniaxial.** |

Conforme verificado na Figura 7.13 para a situação dessa identificação paramétrica, a convergência global ocorreu após 50 iterações do algoritmo otimizador.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.13 – Estudo de convergência do algoritmo otimizador para tração uniaxial.** |

Para a situação de compressão uniaxial (Figura 7.14), o resultado da FO foi de 1,6020 e o valor encontrado para as variáveis de projeto foram: = 0,7003 e = 935,51.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.14 - Representação da identificação paramétrica da curva tensão-deformação para situação de compressão uniaxial.** |

Em relação aos coeficientes de correlação e desempenho de modelo para compressão uniaxial, os valores foram: (a) = 0,9886; (b) = 0,9589; e (c) = 0,9681. Sobre a convergência do sistema (Figura 7.15) de partículas do algoritmo é possível perceber que o padrão de convergência global se deu antes das 50 iterações.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.15 – Estudo de convergência do algoritmo otimizador para compressão uniaxial.** |

3.2.2 Simulação de vigas de concreto armado

Nessa seção são apresentados os resultados relativos a aplicações do modelo de dano em estruturas de vigas de concreto armado. Os parâmetros identificados para representar o comportamento do material utilizadas nessa simulação foram os mesmos obtidas através do processo de problema inverso conforme apresentado na seção 3.2.1. A Tabela 7.6 apresenta os valores desses parâmetros assim como de valores encontrados por Pituba e Fernandes [32] utilizando a técnica de mínimos quadrados.

Em relação aos valores encontrados no presente trabalho verificou-se uma maior dispersão para os resultados em compressão. Foi notada uma diferença de cerca de 17,60% em relação ao parâmetro e de 10,90% em relação ao parâmetro .

|  |
| --- |
| Tabela . - Variáveis do modelo de dano para concreto classe C30 |
| |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **Concreto** | **(MPa)** | **(%)** |  |  | **(MPa-1)** | **(MPa-1)** |  | | C30 | 29200,00 | 0,0700 | 0,9831 | 0,7003 | 7985,25 | 935,51 | 0,20 | | Pituba e Fernandes [32] | 29200,00 | 0,0700 | 0,9950 | 0,8500 | 8000,00 | 1050,00 | |

As Figuras 7.16, .7.17 e 7.18 apresentam os resultados carga versus deslocamento para as vigas descritas na Figura 7.4. Primeiramente é possível perceber que o modelo de dano conseguiu representar a mudança brusca de rigidez que ocorre nos modelos experimentais das vigas em questão (Figura 7.16 a Figura 7.18), podendo então afirmar~~-se~~ que essa é uma modelagem numérica capaz de representar o fenômeno de não linearidade causado em grande parte pela fissuração do concreto armado.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.16 – Comportamento carga-deslocamento da viga com 3ϕ10 mm.** |

Avaliando as Figuras Figura 7.16 a Figura 7.18 fica evidente que até aproximadamente 1 mm de deslocamento o sistema permanece elástico e praticamente sem danificação (), visto que independente das quantidades utilizadas em e o sistema não modificou bruscamente sua resposta carga-deslocamento. Porém, em regiões próximas ao fim da carga de serviço (cerca de 40% da carga limite), o sistema já apresenta elevada danificação e os parâmetros do modelo constitutivo influenciam mais acentuadamente na perda de rigidez do material. Em todos os modelos, a capacidade máxima da viga é alcançada quando a armadutra longitudinal atinge a tensão de escoamento do aço.

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.17 – Comportamento carga-deslocamento da viga com 5ϕ10 mm.** |

|  |
| --- |
|  |
| **Figura 7.18 – Comportamento carga-deslocamento da viga com 7ϕ10 mm.** |

Em relação à dispersão dos resultados numéricos em torno da média experimental, apresenta-se na Tabela 7.7 os valores de Erro Quadrático Médio () e a Raiz do Erro Quadrático Médio (), sendo que esse último faz uma estimativa no erro na própria unidade de medidada da variável [71]. Analisando os coeficientes de correlação é possível afirmar que todos as simulações numéricas apresentaram correlação satisfatória em relação ~~a~~ à média experimental. Observa-se que a metodologia proposta no presente trabalho apresenta resultados carga-deslocamento similares àqueles encontrados em [59] como descrito nas Figuras 7.16, 7.17 e 7.18. Analisando a Tabela 7.7, os resultados demonstram a proximidade das duas soluções validando, portanto, a metodologia proposta no presente trabalho. Contudo, vale ressaltar que a metodologia proposta é robusta e eficiente mostrando como alternativa a identificação paramétrica de modelos realizadas de forma intervencionista pelo usuário, como ocorre em [59]. A formulação apresentada aqui tem a vantagem de não necessitar de interferências durante seu processamento, além de baixo custo de processamento.

|  |
| --- |
| **Tabela 7.7 – Análise métrica para correlação do modelo com ensaio experimental das vigas.** |
| |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | **Experimental** | **Numérico** |  |  |  |  | | **Viga 3** | [59] | 6,9533 | 2,6369 | 0,9831 | 0,9769 | | presente trabalho | 8,5357 | 2,9216 | 0,9789 | 0,9719 | | **Viga 5** | [59] | 30,6360 | 5,5350 | 0,9635 | 0,9578 | | presente trabalho | 36,5297 | 6,0440 | 0,9554 | 0,9496 | | **Viga 7** | [59] | 28,9784 | 5,3832 | 0,9709 | 0,9657 | | presente trabalho | 37,1036 | 6,0913 | 0,9621 | 0,9584 | |

1. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada uma metodologia baseada em técnicas de otimização para a identificação paramétrica de modelos constitutivos para materiais com comportamento mecânico complexo devido a sua constituição heterogênea, como é o caso do concreto. Para tanto, um modelo de dano bem difundido na literatura foi utilizado como exemplo de emprego.

Os modelos de dano têm bastante utilização em diversas áreas da ciência e no campo da Engenharia Civil voltado ao estudo do concreto. Contudo, a identificação paramétrica de modelos inda é um assunto que requer atenção e desenvolvimento de alternativas, pois ferramentas robustas e eficientes de identificação são necessárias para que o modelo constitutivo seja representativo da resposta experimental esperada. É válido ressaltar aqui a importância da análise de sensilidade paramétrica e identificação paramétrica bem elaboradas, pois tais estratégias quando bem executadas permitem obter boas correlações com respostas experimentais quando o modelo é utilizado. Ainda sobre a identificação paramétrica, nesse artigo foi apresentado um modelo de identificação com ferramentas estocásticas, no caso um modelo de otimização bio-inspirada. O uso de tais ferramentas ainda é novo para este tipo de aplicação e pode se tornar uma ferramenta interessante para simulações mais complexas que envolvam uma número maior de varáveis ou até mesmo modelos diferentes para simulação do concreto.

As respostas obtidas com a análise de sensibilidade mostraram como e em que grau os parâmetros influenciam a reposta do material através do modelo constitutivo. Com isso é possível prever qual parâmetro deve ser manuseado para a verificação da resposta global de uma estrutura, por exemplo. Por outro lado, o presente trabalho mostrou o emprego da metodologia proposta e sua validação no uso da simulação do comportamento mecânico de estruturas em concreto armado, evidenciando sua robustez e eficiência sem a necessidade de interferência do usuário.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a cooperação financeira dos agentes de fomento CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás).

Referências

[1] Liu T, Zhang X, He N, Jia G. Numerical Material Model for Composite Laminates in High-Velocity Impact Simulation. Lat Am j Solids Struct 2017;14:1912–31. https://doi.org/10.1590/1679-78253750.

[2] Sirois F, Grilli F. Potential and limits of numerical modelling for supporting the development of HTS devices. Supercond Sci Technol 2015;28:043002. https://doi.org/10.1088/0953-2048/28/4/043002.

[3] Steinhauser M, Hiermaier S. A Review of Computational Methods in Materials Science: Examples from Shock-Wave and Polymer Physics. IJMS 2009;10:5135–216. https://doi.org/10.3390/ijms10125135.

[4] Vlcek L, Vasudevan RK, Jesse S, Kalinin SV. Consistent Integration of Experimental and Ab Initio Data into Effective Physical Models. J Chem Theory Comput 2017;13:5179–94. https://doi.org/10.1021/acs.jctc.7b00114.

[5] Khalfallah A, Bel Hadj Salah H, Dogui A. Anisotropic parameter identification using inhomogeneous tensile test. European Journal of Mechanics - A/Solids 2002;21:927–42. https://doi.org/10.1016/S0997-7538(02)01246-9.

[6] Barabasz B, Gajda-Zagórska E, Migórski S, Paszyński M, Schaefer R, Smołka M. A hybrid algorithm for solving inverse problems in elasticity. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science 2014;24:865–86. https://doi.org/10.2478/amcs-2014-0064.

[7] Murray-Smith DJ. The inverse simulation approach: a focused review of methods and applications. Mathematics and Computers in Simulation 2000;53:239–47. https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00210-X.

[8] Wardeh MA, Toutanji HA. Parameter estimation of an anisotropic damage model for concrete using genetic algorithms. International Journal of Damage Mechanics 2017;26:801–25. https://doi.org/10.1177/1056789515622803.

[9] Rechenmacher AL, Medina-Cetina Z. Calibration of Soil Constitutive Models with Spatially Varying Parameters. J Geotech Geoenviron Eng 2007;133:1567–76. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1567).

[10] Zagho M, Hussein E, Elzatahry A. Recent Overviews in Functional Polymer Composites for Biomedical Applications. Polymers 2018;10:739. https://doi.org/10.3390/polym10070739.

[11] Brünig M, Michalski A. Numerical analysis of damage and failure behavior of concrete. International Journal of Damage Mechanics 2019:105678951986600. https://doi.org/10.1177/1056789519866005.

[12] Marie I, Mahdi M. Numerical Simulation of Concrete Mix Structure and Detection of its Elastic Stiffness. Journal of Computational Engineering and Physical Modeling 2018;1. https://doi.org/10.22115/cepm.2018.54011.

[13] Ožbolt J, Sharma A. Numerical simulation of reinforced concrete beams with different shear reinforcements under dynamic impact loads. International Journal of Impact Engineering 2011;38:940–50. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.08.003.

[14] Jin L, Zhang S, Li D, Xu H, Du X, Li Z. A combined experimental and numerical analysis on the seismic behavior of short reinforced concrete columns with different structural sizes and axial compression ratios. International Journal of Damage Mechanics 2018;27:1416–47. https://doi.org/10.1177/1056789517735679.

[15] Grassl P, Jirásek M. Damage-plastic model for concrete failure. International Journal of Solids and Structures 2006;43:7166–96. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032.

[16] Peng Y, Chu H, Pu J. Numerical Simulation of Recycled Concrete Using Convex Aggregate Model and Base Force Element Method. Advances in Materials Science and Engineering 2016;2016:1–10. https://doi.org/10.1155/2016/5075109.

[17] Holzapfel GA, Fereidoonnezhad B. Modeling of Damage in Soft Biological Tissues. Biomechanics of Living Organs, Elsevier; 2017, p. 101–23. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804009-6.00005-5.

[18] Ožbolt J, Ananiev S. Scalar damage model for concrete without explicit evolution law n.d.:8.

[19] Pereira Junior WM, Araújo DL, Pituba JJC. Numerical analysis of steel-fiber-reinforced concrete beams using damage mechanics. Rev IBRACON Estrut Mater 2016;9:153–91. https://doi.org/10.1590/S1983-41952016000200002.

[20] Sawangikar MMS, Burande DCS, Burande DBC. Irreversible Thermodynamics, A Review 2016;02:7.

[21] Alastrué V, Rodríguez JF, Calvo B, Doblaré M. Structural damage models for fibrous biological soft tissues. International Journal of Solids and Structures 2007;44:5894–911. https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.02.004.

[22] Malcher L, Mamiya EN. An improved damage evolution law based on continuum damage mechanics and its dependence on both stress triaxiality and the third invariant. International Journal of Plasticity 2014;56:232–61. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.01.002.

[23] Li W. Damage Models for Soft Tissues: A Survey. J Med Biol Eng 2016;36:285–307. https://doi.org/10.1007/s40846-016-0132-1.

[24] Bai Q, Mohamed M, Shi Z, Lin J, Dean T. Application of a continuum damage mechanics (CDM)-based model for predicting formability of warm formed aluminium alloy. Int J Adv Manuf Technol 2017;88:3437–46. https://doi.org/10.1007/s00170-016-8853-4.

[25] Williams KV, Vaziri R. Application of a damage mechanics model for predicting the impact response of composite materials q. Computers and Structures 2001:15.

[26] Cipollina A, Flórez-López J. Modelos simplificados de daño en pórticos de concreto armado. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingenierí 1995;11:3–22.

[27] Comi C. A non-local model with tension and compression damage mechanisms. European Journal of Mechanics - A/Solids 2001;20:1–22. https://doi.org/10.1016/S0997-7538(00)01111-6.

[28] Comi C, Perego U. Fracture energy based bi-dissipative damage model for concrete. International Journal of Solids and Structures 2001;38:6427–54. https://doi.org/10.1016/S0020-7683(01)00066-X.

[29] Juárez-Luna G, Méndez-Martínez H, Ruiz-Sandoval ME. An isotropic damage model to simulate collapse in reinforced concrete elements. Lat Am j Solids Struct 2014;11:2444–59. https://doi.org/10.1590/S1679-78252014001300007.

[30] Wang Z, Jin X, Jin N, Shah AA, Li B. Damage based constitutive model for predicting the performance degradation of concrete. Lat Am j Solids Struct 2014;11:907–24. https://doi.org/10.1590/S1679-78252014000600001.

[31] Pituba JJC, Pereira Júnior WM. A bi-dissipative damage model for concrete. Rev IBRACON Estrut Mater 2015;8:49–65. https://doi.org/10.1590/S1983-41952015000100006.

[32] Pituba JJC, Fernandes GR. Anisotropic Damage Model for Concrete. J Eng Mech 2011;137:610–24. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000260.

[33] Pituba JJC, Lacerda MMS. Simplified damage models applied in the numerical analysis of reinforced concrete structures. Rev IBRACON Estrut Mater 2012;5:26–37. https://doi.org/10.1590/S1983-41952012000100004.

[34] Cicekli U, Voyiadjis GZ, Abu Al-Rub RK. A plasticity and anisotropic damage model for plain concrete. International Journal of Plasticity 2007;23:1874–900. https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2007.03.006.

[35] Zhou F, Cheng G. A Coupled Plastic Damage Model for Concrete considering the Effect of Damage on Plastic Flow. Mathematical Problems in Engineering 2015;2015:1–13. https://doi.org/10.1155/2015/867979.

[36] Mazars J, Hamon F, Grange S. A new 3D damage model for concrete under monotonic, cyclic and dynamic loadings. Mater Struct 2015;48:3779–93. https://doi.org/10.1617/s11527-014-0439-8.

[37] Omidi O, Lotfi V. Finite Element Analysis of Concrete Structures Using PlasticDamage Model in 3-D Implementation 2010;8:17.

[38] Pituba JJC, Neto EAS. Modeling of unilateral effect in brittle materials by a mesoscopic scale approach. Computers and Concrete 2015;15:735–58. https://doi.org/10.12989/CAC.2015.15.5.735.

[39] Pituba JJC. A damage model formulation: unilateral effect and RC structures analysis. Computers and Concrete 2015;15:709–33. https://doi.org/10.12989/CAC.2015.15.5.709.

[40] Mazars J, Pijaudier‐Cabot G. Continuum Damage Theory—Application to Concrete. Journal of Engineering Mechanics 1989;115:345–65. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1989)115:2(345).

[41] Morio J. Global and local sensitivity analysis methods for a physical system. Eur J Phys 2011;32:1577–83. https://doi.org/10.1088/0143-0807/32/6/011.

[42] Link KG, Stobb MT, Di Paola J, Neeves KB, Fogelson AL, Sindi SS, et al. A local and global sensitivity analysis of a mathematical model of coagulation and platelet deposition under flow. PLoS ONE 2018;13:e0200917. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200917.

[43] Razavi S, Gupta HV. What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models: A Critical Look at Sensitivity Analysis. Water Resour Res 2015;51:3070–92. https://doi.org/10.1002/2014WR016527.

[44] Felmlee MA, Krzyzanski W, Morse BL, Morris ME. Use of a Local Sensitivity Analysis to Inform Study Design Based on a Mechanistic Toxicokinetic Model for γ-Hydroxybutyric Acid. AAPS J 2011;13:240–54. https://doi.org/10.1208/s12248-011-9264-y.

[45] Dong Z, Xie L, Yang Y, Bridgwater AV, Cai J. Local Sensitivity Analysis of Kinetic Models for Cellulose Pyrolysis. Waste Biomass Valor 2019;10:975–84. https://doi.org/10.1007/s12649-017-0097-5.

[46] Czitrom V. One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments. The American Statistician 1999;53:126–31. https://doi.org/10.1080/00031305.1999.10474445.

[47] Saltelli A. Sensitivity analysis: Could better methods be used? J Geophys Res 1999;104:3789–93. https://doi.org/10.1029/1998JD100042.

[48] Attard MM, Setunge S. Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete. MJ 1996;93. https://doi.org/10.14359/9847.

[49] Zhen-hai G, Xiu-qin Z. Investigation of Complete Stress-Deformation Curves for Concrete in Tension. MJ 1987;84. https://doi.org/10.14359/1616.

[50] Mazars J. APPLICATION DE LA MECANIQUE DE L’ENDOMMAGEMENT AU COMPORTEMENT NON LINEAIRE ET A LA RUPTURE DU BETON DE STRUCTURE. UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE - LABORATOIRE DE MECANIQUE ET TECHNOLOGIE, 1984.

[51] Gelim J-C, Ghouati O. An inverse method for material parameters estimation in the inelastic range. Computational Mechanics 1995;16:143–50.

[52] Viola E, Bocchini P. Non-destructive parametric system identification and damage detection in truss structures by static tests. Structure and Infrastructure Engineering 2013;9:384–402. https://doi.org/10.1080/15732479.2011.560164.

[53] Andersson DC, Lindskog P, Larsson P-L. Inverse Modeling Applied for Material Characterization of Powder Materials. J Test Eval 2015;43:20130266. https://doi.org/10.1520/JTE20130266.

[54] Meraghni F, Chemisky Y, Piotrowski B, Echchorfi R, Bourgeois N, Patoor E. Parameter identification of a thermodynamic model for superelastic shape memory alloys using analytical calculation of the sensitivity matrix. European Journal of Mechanics - A/Solids 2014;45:226–37. https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2013.12.010.

[55] Ritter A, Hupet F, Muñoz-Carpena R, Lambot S, Vanclooster M. Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. Agricultural Water Management 2003;59:77–96. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00160-9.

[56] Levasseur S, Malecot Y, Boulon M, Flavigny E. Statistical inverse analysis based on genetic algorithm and principal component analysis: Applications to excavation problems and pressuremeter tests. Int J Numer Anal Meth Geomech 2010;34:471–91. https://doi.org/10.1002/nag.813.

[57] Pottier T, Vacher P, Toussaint F, Louche H, Coudert T. Out-of-plane Testing Procedure for Inverse Identification Purpose: Application in Sheet Metal Plasticity. Exp Mech 2012;52:951–63. https://doi.org/10.1007/s11340-011-9555-3.

[58] Sun G, Xu F, Li G, Huang X, Li Q. Determination of mechanical properties of the weld line by combining micro-indentation with inverse modeling. Computational Materials Science 2014;85:347–62. https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.01.006.

[59] Karaboga D. AN IDEA BASED ON HONEY BEE SWARM FOR NUMERICAL OPTIMIZATION 2005:10.

[60] Karaboga D, Basturk B. Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Solving Constrained Optimization Problems. In: Melin P, Castillo O, Aguilar LT, Kacprzyk J, Pedrycz W, editors. Foundations of Fuzzy Logic and Soft Computing, vol. 4529, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2007, p. 789–98. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72950-1\_77.

[61] Bacanin N, Tuba M. Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm for Constrained Optimization Improved with Genetic Operators. SIC 2012;21. https://doi.org/10.24846/v21i2y201203.

[62] Xu Y, Fan P, Yuan L. A Simple and Efficient Artificial Bee Colony Algorithm. Mathematical Problems in Engineering 2013;2013:1–9. https://doi.org/10.1155/2013/526315.

[63] Fernandes GR, Crozariol LHR, Furtado AS, Santos MC. A 2D boundary element formulation to model the constitutive behavior of heterogeneous microstructures considering dissipative phenomena. Engineering Analysis with Boundary Elements 2019;99:1–22. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2018.10.018.

[64] Fernandes GR, Marques Silva MJ, Vieira JF, Pituba JJC. A 2D RVE formulation by the boundary element method considering phase debonding. Engineering Analysis with Boundary Elements 2019;104:259–76. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.03.018.

[65] Yuuki R, Cao G. Shape optimization for stress concentration problems in orthotropic materials by using Boundary Element method. Boundary Element Methods, Elsevier; 1990, p. 307–17. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040200-0.50036-4.

[66] Fernandes GR, Pituba JJC, de Souza Neto EA. Multi-scale modelling for bending analysis of heterogeneous plates by coupling BEM and FEM. Engineering Analysis with Boundary Elements 2015;51:1–13. https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2014.10.005.

[67] Mehta PK, Monteiro PJM. Concrete: microstructure, properties, and materials. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education; 2014.

[68] Álvares M da S. Estudo de um modelo de dano para o concreto: Formulação, identificação paramétrica e aplicação com o emprego do método dos elementos finitos. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, 1993.

[69] Rodrigues EA, Manzoli OL, Bitencourt Jr. LAG, Prazeres PGC dos, Bittencourt TN. Failure behavior modeling of slender reinforced concrete columns subjected to eccentric load. Lat Am j Solids Struct 2015;12:520–41. https://doi.org/10.1590/1679-78251224.

[70] Melo GL de, Fernandes ALT. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, State of Minas Gerais, Brazil. Eng Agríc 2012;32:875–88. https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000500007.

[71] Perin V, Sentelhas PC, Dias HB, Santos EA. Sugarcane irrigation potential in Northwestern São Paulo, Brazil, by integrating Agrometeorological and GIS tools. Agricultural Water Management 2019;220:50–8. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.012.