

EFEITO PARAMÉTRICO DA ARMADURA EM PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO UTILIZANDO MECÂNICA DO DANO

Felipe Andraus Vieira Schmaltz¹
Wanderlei Malaquias Pereira Júnior²
Charles Myller Pereira Batista³
Marcel Willian Reis Sales⁴

RESUMO

O trabalho consiste no estudo das consequências que a redução de armadura dos elementos estruturais que compõem um pórtico pré-definido. Esta análise será feita através de situações onde se propõe uma redução de 25%, 45%, 50% e/ou 75% na armadura dos elementos estruturais. Estes dados por sua vez serão simulados no código de elementos finitos que apresentará respostas tanto em forma de valores quanto em forma gráfica dos efeitos causados no pórtico como um todo devido a escolhida redução de armadura.

Palavras-chaves: Concreto Armado, mecânica do dano, carga ultima.

ABSTRACT

The work consists in the study of the consequences that the armor reduction of structural elements that comprise a pre-defined portico. This analysis will be made through situations where it proposes a reduction of 25%, 45%, 50% and 75% or in the armor of the structural elements. This data in turn will be simulated in the finite element code that submit responses both in the form of values as in graphic form the effects caused on the porch as a whole due to chosen reducing armor.

Keywords: Reinforced concrete, mechanical damage, loads last.

¹ Graduado - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil.

² Professor - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil

³ Graduando - Universidade Paulista, Goiânia, Goiás, Brasil.

⁴ Professor - Faculdade Araguaia, Goiânia, Goiás, Brasil

INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos na engenharia vêm tornando cada vez mais necessária à previsão e a precisão de resultados obtidos a partir de experimentos em sistemas mecânicos, sejam eles submetidos a carregamentos estáticos, dinâmicos ou de natureza térmica. Tendo essa busca em mente foram criadas várias ferramentas numéricas que pudessem prever o comportamento de estruturas e sistemas mecânicos em geral.

Mesmo o concreto sendo um material com características particulares, tais como a não homogeneidade, ruptura frágil, relação tensão versus deformação não linear, diferentes resistências e comportamentos à tração e compressão, assim como efeitos dependentes do tempo tais como retração e fluência, os modelos matemáticos se mostram extremamente eficientes no estudo e na compreensão do comportamento de um determinado elemento, já que apresentam resultados satisfatórios de sistemas mecânicos complexos como o concreto, levando em consideração uma série de variações em que a peça pode estar submetida.

Podem-se citar alguns modelos mecânicos como modelo de Plasticidade, modelo de fratura, modelo de fissuração distribuída e finalmente o modelo de dano que é alvo de estudo desse trabalho.

Kachanov (1958 apud PITUBA, 1998) foi pioneiro na formalização da Mecânica do Dano Contínuo e buscou formular modelos de ruptura para metais durante um período de deformação.

A Mecânica do Dano é uma ferramenta que analisa a evolução contínua do deterioramento de um material na sua microestrutura, quando submetida a um determinado esforço.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Análise Linear e não Linear

Um comportamento linear em uma estrutura se apresenta de tal forma que a deformação na peça ocorre de forma proporcional ao acréscimo de carga. Por exemplo, se aplicarmos um carregamento de $2Q$ na estrutura ela irá responder com uma deformação $2L$, gerando uma reta no diagrama tensão versus deformação (Figura 1).

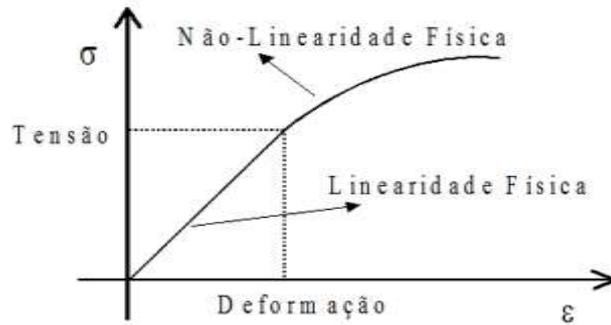


Figura 1 - Diagrama tensão versus deformação de linearidade e não linearidade.

Fonte: Elaborado pelos autores

Já a análise não linear considerou que a estrutura não apresenta uma resposta proporcional ao carregamento em que a peça está submetida (Figura 1). A análise linear se divide em dois tipos: a geométrica e a física. Segundo Pinto e Ramalho (2002) a análise não linear geométrica se mostra presente no estudo do comportamento da peça em equilíbrio deslocada. Enquanto o efeito de fissuração, o escoamento da armadura, a fluência do concreto configuram uma não linearidade física na estrutura.

Introdução a Mecânica do dano Contínuo

Como dito anteriormente a mecânica do dano trata-se de uma ferramenta que analisa a deterioração da microestrutura do concreto através do processo de fissuração. Nos itens abaixo são descritos alguns conceitos necessários para o entendimento do mesmo.

Definições da variável de dano em meios contínuos

Considerando um sistema que irá se comportar de forma homogênea, com comprimento inicial L e seção transversal com área S_1 . Quando submetido à ação de uma força F o sólido sofre um alongamento δ . Definindo então as equações (1) e (2) de tensão e deformação nominais.

$$\sigma = \frac{F}{S_1} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

Levando agora em consideração que o material sólido apresenta um estado de fissuração, deve-se considerar que essas fissuras irão contribuir para a variação inicial do alongamento em um valor Δd . Para tanto as equações (1) e (2) descritas acima deverão ser

alteradas, adicionando essa variação devido ao processo de fissuração. Logo as novas equações de tensão e deformação efetivas são descritas por:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_e} \quad (3)$$

$$\varepsilon_e = \frac{\delta - \Delta_d}{L} \quad (4)$$

Sendo:

σ_e -tensão efetiva

ε_e - deslocamento efetivo

s_e - área efetiva

Sendo S a área das faces do elemento ela é determinada por um versor normal e tem a direção n conforme a figura 2. Tais defeitos como os de microfissuração contribuem para o dano existente nesse elemento e possuem formas e direções aleatórias. Para a situação em questão, temos apenas a área s_e que contribui efetivamente para a resistência da peça.

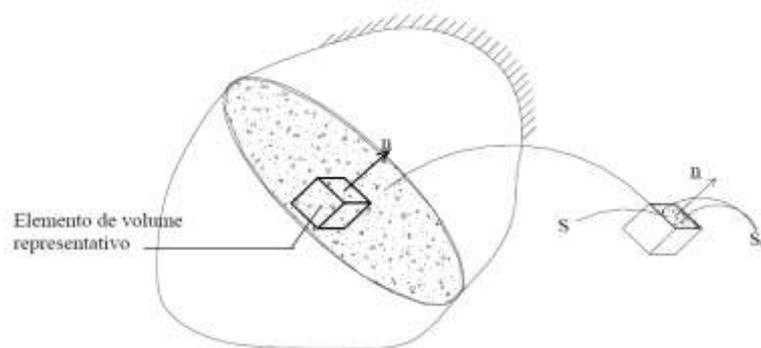


Figura 2 - Elemento sólido representativo

Fonte: PITUBA, 1998

Desta forma, podemos definir a área de defeitos, como:

$$S_0 = S - S_e \quad (5)$$

Sendo:

S_0 : Área de Defeito

S_e : Área da Matriz

S : Área de uma das faces do elemento

Por definição, Lemaitre e Chaboche (1984) e Lemaitre (1985 apud PITUBA, 1988) chegar-se na definição da variável escalar de dano:

$$D_n = \lim_{S \rightarrow \infty} \frac{S}{S_0} \quad (6)$$

Este modelo representa uma medida local de dano sendo que D_n assume valores em um intervalo de $0 \leq D_n \leq 1$, onde $D_n = 0$ para situações em que o material se encontra íntegro e $D_n = 1$ nas situações em que se tem uma danificação completa do elemento.

Para serem considerados anisotrópicos (suas propriedades físicas dependem da direção em que são medidas) os valores de D_n devem variar de acordo com a direção do versor n . Já para considerações de dano isotrópico (suas propriedades físicas são as mesmas independente da direção considerada) a variável D_n deve também possuir valores equivalente e independente da direção do versor n , representando uma distribuição uniforme de microfissuras e microdefeitos ao longo do elemento em análise.

Definições da variável de dano pelo princípio da equivalência

As leis construtivas podem ser escritas em três diferentes princípios, o princípio da equivalência de deformações, o princípio de tensões e o princípio de energia. Estes princípios existem para descrever os modelos de dano em um meio íntegro que seja equivalente ao meio danificado pelas microfissuras e microdefeitos.

O presente trabalho propõem uma análise de dano isotrópico, portando para a consideração da mesma área efetiva do volume representativo é dado pela Equação 6.

$$S_e = S - S_0 = S (1-D) \quad (7)$$

Aplicando os conceitos de tensão na equação 2.3.2 o conceito de área efetiva, tem-se:

$$\sigma_e = \frac{\sigma}{(1-D)} \quad (8)$$

Em outro tipo de modelagem de dano, em que consideraremos a proporção de alongamento relativa aos defeitos e o alongamento total, temos a equação a seguir na qual D

representa a variável do dano que leva em consideração a proporção de alongamento relativa aos defeitos e o alongamento total:

$$D^* = \frac{\Delta d}{\delta} \quad (9)$$

Levando em conta a nova variável, pode-se deduzir a equação da deformação dada por:

$$\varepsilon_e = (1 - D^*)\varepsilon \quad (10)$$

Sabendo que o volume do elemento danificado é o mesmo tanto para situações de deformação equivalente tanto quanto para as de tensão equivalente, podemos definir a variável de dano como $D = D^*$, obtendo-se uma nova equação de tensão efetiva:

$$\sigma_e = E\varepsilon_e \quad (11)$$

Equivalências de deformação efetiva e nominal

Segundo Lemaitre e Chaboche (1990), pela a hipótese da equivalência de deformações “o estado de deformação de um material com dano é obtido da lei de comportamento do material íntegro onde a tensão nominal é substituída pela tensão efetiva.”.

Igualando a tensão efetiva e nominal teremos:

$$\sigma_e = \sigma \quad (12)$$

$$\sigma = E\varepsilon_e \quad (13)$$

Substituindo:

$$\sigma_e = E\varepsilon \rightarrow \frac{\sigma}{(1-D)} = E\varepsilon \therefore \sigma = (1 - D)E\varepsilon \quad (14)$$

Da expressão acima iremos caracterizar o módulo secante de rigidez elástica E para um meio contínuo de resposta equivalente ao meio danificado.

$$E_e = (1 - D)E \quad (15)$$

Esta relação nos permite determinar os valores de dano (Figura 3) a partir dos valores do módulo de elasticidade relativo a sucessivos carregamentos elásticos.

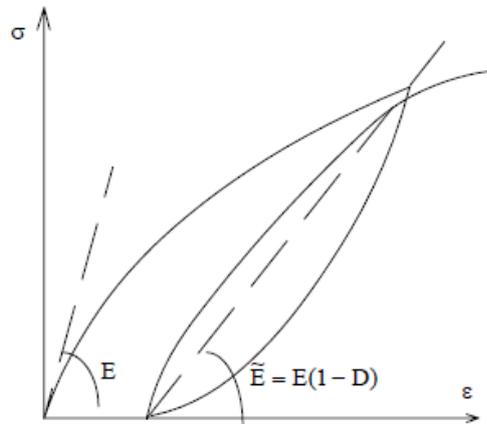


Figura 3 - Curva do comportamento a compressão do concreto
 Fonte: Elaborado pelos autores

Onde este novo valor E_e representa o módulo de elasticidade do elemento danificado.
 Por fim teremos uma nova configuração para a equação da variável de dano:

$$D = 1 - \frac{E_e}{E} \quad (16)$$

Outro tipo de equivalência é o princípio de tensão efetiva e nominal que de acordo com Lemaitre e Chaboche (1990), a hipótese de equivalência de tensões é definida da seguinte maneira estado de tensão associado a um meio danificado é obtido da lei de comportamento do material íntegro em que a deformação nominal é substituída pela deformação efetiva.

Substituindo a deformação nominal pela efetiva temos:

$$\begin{aligned} \sigma_e = E \varepsilon_e \rightarrow \frac{\sigma}{(1-D)} &= E \varepsilon (1 - D) \\ \therefore \sigma &= (1-D) E \varepsilon \end{aligned} \quad (17)$$

Observando as equações de tensão dos métodos de equivalência de tensão e equivalência de deformação percebeu-se que ambas chegam à mesma definição variável de danificação escalar.

Equivalências de energia

Quando igualamos a energia equivalente efetiva elástica à energia equivalente nominal elástica, a tensão nominal passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$\begin{aligned}\sigma_e &= E\varepsilon_e \rightarrow \frac{\sigma}{(1-D)} = E\varepsilon(1-D) \\ \therefore \sigma &= (1-D)^2 E\varepsilon\end{aligned}\quad (18)$$

Obtendo assim um novo valor para a variável de Dano (equação 18).

$$D = 1 - \left(\frac{E_e}{E}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

As hipóteses apresentadas acima e suas consequências sobre relações constitutivas resultantes no caso axial podem ser generalizadas para os casos multiaxiais, permitindo relacionar tensores de segunda ordem de tensão e de deformação por meio de um tensor constitutivo de rigidez secante elástica com dano (PITUBA, 2003). Obtendo assim o tensor geral de rigidez em um meio danificado.

$$E = (II - D) \cdot E_0 \cdot (II - D)^T$$

(20)

Nota-se, finalmente, que as formas gerais que permitem contemplar a anisotropia induzida pela danificação podem ser consideradas (PITUBA, 2003).

Modelos de plasticidade

Utilizou-se neste trabalho um modelo uniaxial para a descrição do comportamento mecânico da armadura presente nas estruturas do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA). O aço, representado em seu modelo elasto-plástico, possui comportamento equivalente em regime de tração e compressão. Adota-se então um diagrama que representa o regime de tensão versus deformação, ou seja, um diagrama bi linear.

METODOLOGIA

Primeiramente foram retirados da pesquisa os valores das variáveis de dano referenciais que são descritas na Tabela (1). A base de dados veio da pesquisa de Pituba e Pereira Junior (2015).

Tabela 1 - Parâmetros propostos para modelo de dano.

	Tensão	Compressão
Y _o (MPa)	0,72x10 ⁻⁴	0,17x10 ⁻²
A	49	0,3
B (mm ² /N)	6560	5,13
β (MPa)	1x10 ⁻⁶	1x10 ⁻³

Fonte: Elaborado pelos autores

O modelo numérico embasado foi o pórtico originalmente ensaiado em Vecchio e Emara (1992). O concreto utilizado na confecção do mesmo tem módulo de elasticidade $E_c = 30400$ MPa. O aço possui $E_a = 192500$ MPa, tensão de início de plastificação de 418 MPa e tensão última de 596 MPa. Ainda para o aço, adotou-se um modelo elastoplástico-bilinear com um módulo de elasticidade reduzido no segundo trecho: $E_{a2} = 0,009 E_a$.

No ensaio experimental proposto por Vecchio e Emara (1992) inicialmente aplica-se uma força axial total de 700 KN em cada coluna, mantida então constante durante toda a aplicação da força lateral. Esta força foi aplicada em estágios até a capacidade última do pórtico ser atingida, maiores detalhes encontram-se em Vecchio e Emara (1992). As características geométricas do pórtico, assim como a distribuição das armaduras estão ilustradas na figura 3.

Foram elaborados quarenta blocos de notas com as especificações dos materiais utilizados na estrutura a serem estudados, os elementos estruturais presentes no pórtico e os possíveis defeitos que seriam atribuídos em cada um dos elementos em forma de dados de entrada para o código de elementos finitos denominados EFICOS.

Foi montada uma série de situações, onde se propõem um percentual de perda de armadura para cada elemento estrutural em separado e em conjunto. Somente para questão de orientação apenas as armaduras longitudinais forma reduzidas.

Por fim os arquivos foram simulados numericamente no código de elementos finitos, foram retirados arquivos de saída, que correspondem aos dados de dano nas camadas, à carga versus deslocamento no nó 11 da estrutura, onde é aplicado o deslocamento da estrutura. O controle de deslocamentos adotado foi apenas para situações de carga. As situações de carga e descarga não foram analisadas, pois exigiriam uma análise mais avançada e detalhada em relação à mecânica do dano.

A Figura 4 apresenta os elementos estruturais que serão analisados neste trabalho. São eles: Pilar 1 (nó 1 ao 11), Pilar 2 (nó 26 ao 16), Viga 1 (nó 11 ao 16) e Viga 2 (nó 6 ao 21).

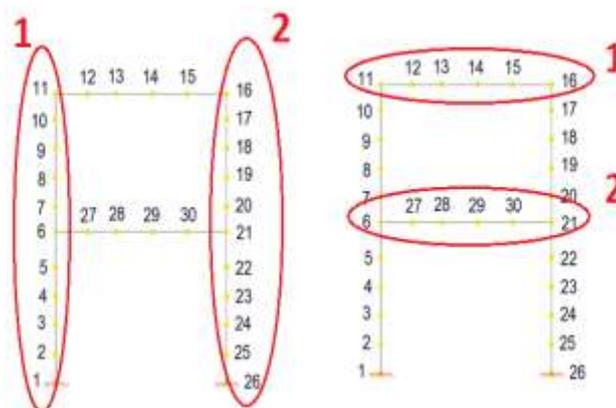


Figura 4 - Identificação dos elementos estruturais do pórtico escolhido.

Fonte: Elaborado pelos autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Verificações da aplicabilidade do modelo de dano

Primeiramente foi testada a aplicabilidade do modelo de dano, onde verificou se o mesmo consegue representar o comportamento esperado de perda de resistência à medida que se reduz a armadura.

Foi possível constatar, de forma numérica, que o comportamento do pórtico ao diminuirmos a quantidade de aço em seus elementos (vigas e pilares). Sabendo que a retirada de aço destes elementos resulta na perda de capacidade de carga ou resistência é possível representar as situações propostas através de um gráfico carga *versus* deslocamento. Levou-se em conta neste trabalho que quando a palavra defeito for utilizada ela estará se referindo a redução de armadura em um ou dois elemento (s) pré-determinado(s).

Para confirmar o texto acima se pode verificar através das Figuras (5 a 6) a redução da carga à medida que a redução de armadura era implementada.

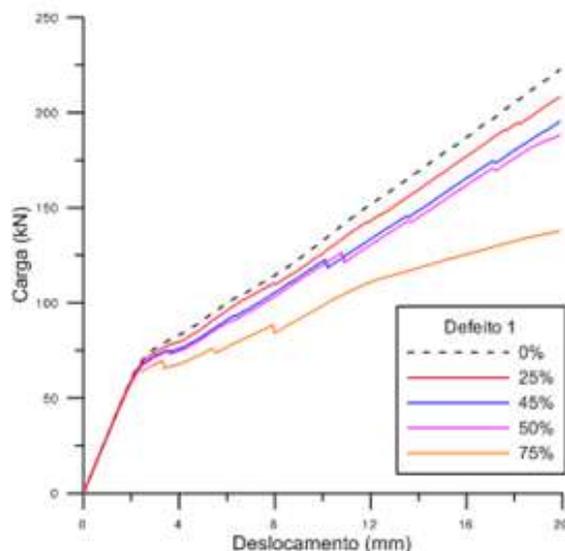


Figura 5 - Gráfico da curva carga versus deslocamento representando a redução gradativa da armadura da pilar 1.

Fonte: Elaborado pelos autores

Através da análise do gráfico carga *versus* deslocamento podemos concluir que, o pórtico com a menor redução de aço (25%) tem uma capacidade, portanto superior de absorção de carga em relação ao pórtico com a maior redução de aço (75%) e inferior ao pórtico sem redução de aço. Como prova da aplicabilidade do modelo de dano neste tipo de situação observamos que os resultados obtidos assemelham-se ao que se espera em situações reais.

Analisando a Figura 6 para um deslocamento de 10 mm a redução da capacidade de absorção de carga dos pilares com redução de 25% e 75% foi de 5,2% e 34,6% respectivamente em relação ao deslocamento de referência da situação sem redução de armadura. Na tabela 2 pode-se conferir o valor das demais situações.

Analisando situações de defeito em vigas pode-se notar pela Figura 6 que, assim como ocorreu no Pilar 1, a Viga 1 mostrou uma redução na carga última de acordo com a redução da armadura do elemento, confirmando mais uma vez a aplicabilidade do modelo de dano para situações práticas.

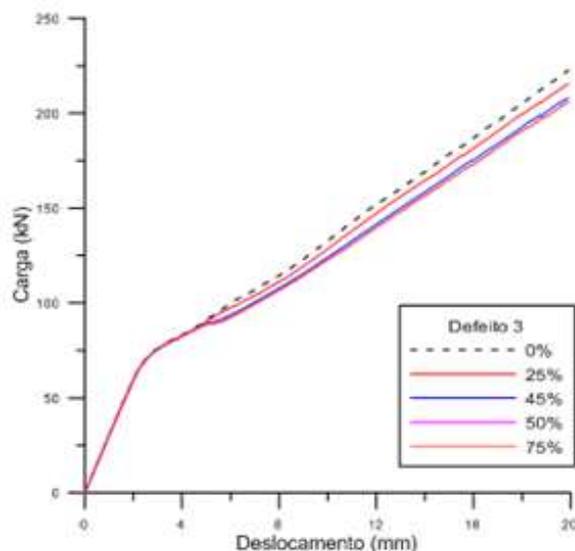


Figura 6 - Gráfico da curva carga *versus* deslocamento representando a redução gradativa da armadura da Viga 1

Fonte: Elaborado pelos autores

Para os mesmos 10 mm de deslocamentos de referência, a redução da capacidade de absorção de carga das vigas com redução de 25% e 75% foi de 4,97% e 3,77% respectivamente.

Após fazer a análise de ambos os gráficos podemos concluir que a redução de armadura nas vigas gera uma redução da capacidade de carga última muito mais tímida do que os pilares, ou seja, a redução da armadura dos pilares é gera um impacto muito maior na redução de carga do pórtico do que a redução de armadura nas vigas, sendo assim comprovada a grande importância dos elementos de pilares nas estruturas usuais de concreto armado.

Comparativos da redução de aço nos elementos estruturais em separado

Nesta etapa analisou-se o impacto da redução do aço de determinadas peças em relação ao pórtico original sem nenhuma redução de aço. Utilizou-se como parâmetro para a análise dois pontos de deslocamento no gráfico (10 mm e 19,9 mm) a fim de expor melhor a diferença de capacidade de absorção de carga de acordo com as reduções de armaduras propostas.

A primeira análise é efetivada através da comparação dos defeitos em pilares, nesse caso pilares 1 e 2. Como representado na Tabela 2 a diferença entre a carga última do pórtico sem defeito e o pórtico com redução de 25% nos Pilares 1 e 2 são praticamente insignificantes. Pode-se observar também que a importância dos pilares para a estrutura como um todo é praticamente a mesma, já que os resultados de carga absorvida foram bem próximos. A fim de expor melhor os resultados a Figura 7 é apresentada.

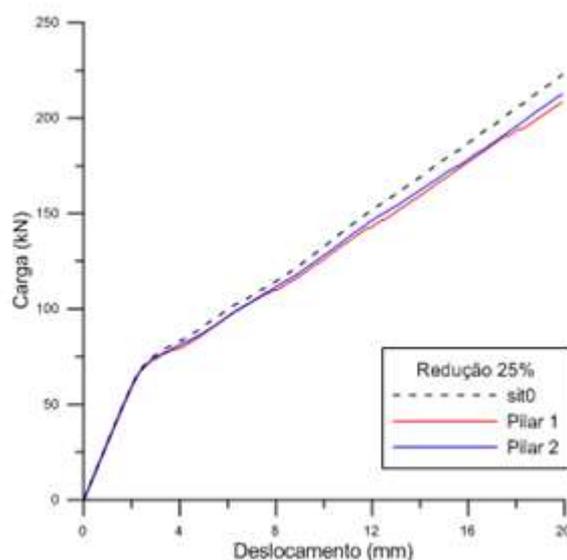


Figura 7 - Gráfico da curva carga versus deslocamento dos pilares 1 e 2 com redução de armadura de 25%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 2 - Carga e redução da carga última dos pilares 1 e 2 submetidos a uma redução de 25% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Pilar 1	10	126,1	4,97%
	19,9	208,3	6,47%
Pilar 2	10	128,2	3,39%
	19,9	212,4	4,63%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Verificaram-se as mesmas situações para reduções de 50% e 75% da armadura e foi possível notar que os pilares começam a obter importâncias diferenciadas em relação à situação 0 (situação sem redução da armadura). É notável que o “Pilar 1” tem um impacto muito maior na sua capacidade de absorção de carga do que o “Pilar 2”. Podemos concluir então que nesta configuração o Pilar 1 possui uma importância muito maior que o Pilar 2 em relação a resistência deste pórtico como um todo. Conclui-se também que reduções muito abruptas na armadura devem levar a um cuidado maior com cada peça em separado, pois as mesmas passam a influenciar a estrutura de maneira diferenciada.

De maneira gráfica é possível observar as Figuras 8 e 9 que apresentam a resposta numérica. Nas Tabelas 2 e 3 foi verificada uma diferenciação de cerca de 9% e 6,86% para

situações de regime de serviço com deslocamento de 10 mm e 25,75% e 15,75% para situações de redução de 25% e 75%.

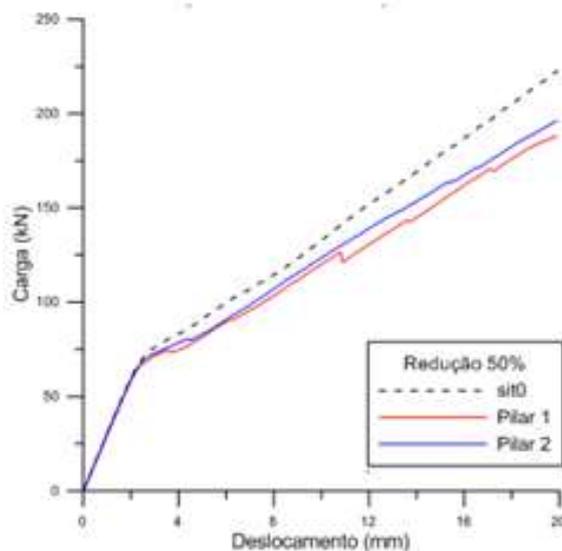


Figura 8 - Gráfico da curva carga versus deslocamento dos pilares 1 e 2 com redução de armadura de 50%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 3 - Carga e redução da carga última dos pilares 1 e 2 submetidos a uma redução de 50% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Pilar 1	10	120	9,57%
	19,9	188,4	15,40%
Pilar 2	10	123,6	6,86%
	19,9	196,4	11,81%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

E da mesma forma é comprovado pelos dados coletado da situação onde temos uma redução de armadura de 75%. Na Tabela 3 pode-se observar uma redução na armadura de 25,71% e 15,75% quando o deslocamento vale 10 mm e 38,08% e 25,06% quando o deslocamento vale 19,9mm.

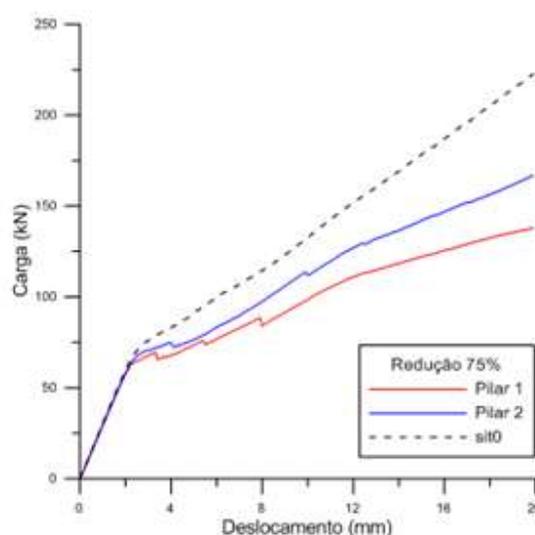


Figura 9 - Gráfico da curva carga versus deslocamento dos pilares 1 e 2 com redução de armadura de 75%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 4 - Carga e redução da carga última dos pilares 1 e 2 submetidos a uma redução de 75% em sua armadura nos deslocamentos de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Pilar 1	10	98,58	25,71%
	19,9	137,9	38,08%
Pilar 2	10	111,8	15,75%
	19,9	166,9	25,06%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Analisando agora as vigas, pode-se observar que, assim como nos pilares, a diferença na capacidade de absorção de carga gerada pela redução de 25% de armadura nas vigas se mostrou muito tímida quando comparada a situação original e mostrando que ambos os elementos, neste caso, possuem praticamente a mesma influência sobre a peça como um todo. A Figura 10 e Tabela 4 evidenciam essa conclusão com as reduções da capacidade de carga em cerca de 5% a 6% para os valores últimos, bem semelhantes ao que ocorrem nos pilares.

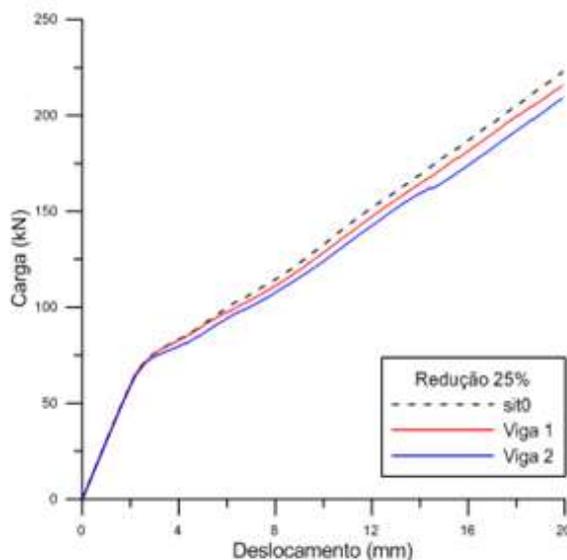


Figura 10 - Gráfico da curva carga versus deslocamento das vigas 1 e 2 com redução de armadura de 25%
 Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 5 - Carga e redução da carga última das vigas 1 e 2 submetidos a uma redução de 25% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Viga 1	10	126,1	4,97%
	19,9	208,3	6,47%
Viga 2	10	128,2	3,39%
	19,9	212,4	4,63%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Já com a redução de 50% e 75% da armadura destes elementos a diferença se mostra muito mais expressiva, onde temos a Viga 1 como elemento de maior importância para a estrutura em relação a Viga 2, devido a sua capacidade de absorção de carga superior a da Viga 2.

No caso que temos 50% de redução de armadura nas vigas podemos observar que a redução de armadura no deslocamento de 10 mm foi de 7,54% e 14,24%. Entretanto mesmo com o aumento do deslocamento a redução da carga ultima foi tímida, assumindo valores de 7,54% e 15%.

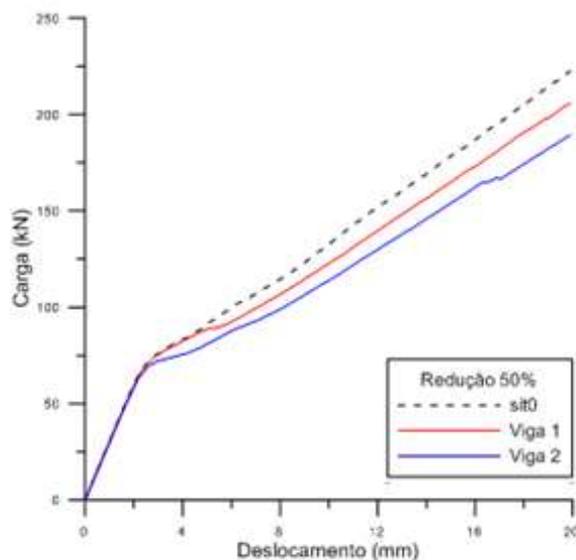


Figura 11 - Gráfico da curva carga versus deslocamento das vigas 1 e 2 com redução de armadura 50%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 6 - Carga e redução da carga última das vigas 1 e 2 submetidos a uma redução de 50% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Viga 1	10	122,7	7,54%
	19,9	205,9	7,54%
Viga 2	10	113,8	14,24%
	19,9	189,3	15,00%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Já na redução de 75% a mudança na carga se mostrou bem expressiva. Nos 10 mm tivemos uma redução de 3,77% e 23,81% nas vigas 1 e 2 respectivamente e nos 19,9mm esta porcentagem saltou para 7,54% e 28,11%.

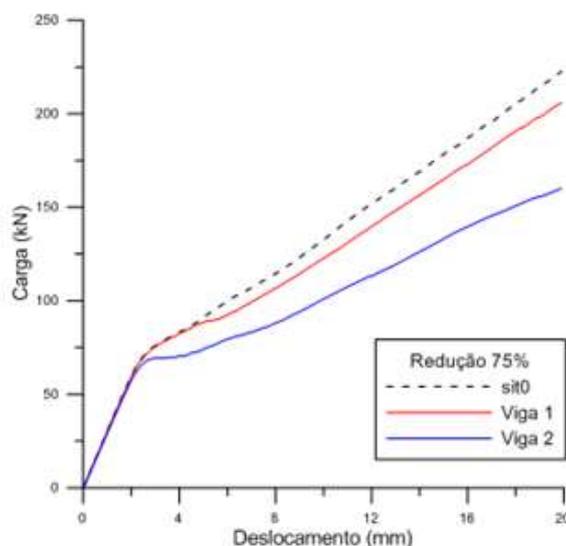


Figura 12 - Gráfico da curva carga versus deslocamento das vigas 1 e 2 com redução de armadura 75%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 7 - Carga e redução da carga última das vigas 1 e 2 submetidos a uma redução de 75% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Viga 1	10	127,7	3,77%
	19,9	205,9	7,54%
Viga 2	10	101,1	23,81%
	19,9	160,1	28,11%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Comparativo da redução de aço nos elementos estruturais com combinação da redução em ao menos 2 elementos.

Outra possível análise é a de combinações das reduções de armadura, semelhante à análise 2, ela nos fornece dados para que seja possível descobrir qual dos elementos ou combinações mais influenciam o pórtico como um todo.

Para essa análise foram creditados apenas os defeitos de maior intensidade como a redução de 50% e 75%, pois ela gera a maior capacidade de perda de carga.

Observa-se que para as combinações as porcentagens na capacidade resistiva do pórtico são bem maiores. Com uma redução de 75% na armadura dos elementos indicados temos uma

diminuição de 31,39% e 40,81% nas combinações indicadas. Já nos 19,9 mm essa diminuição da carga aumenta chegando a 42,12% e 49,03% das respectivas combinações.

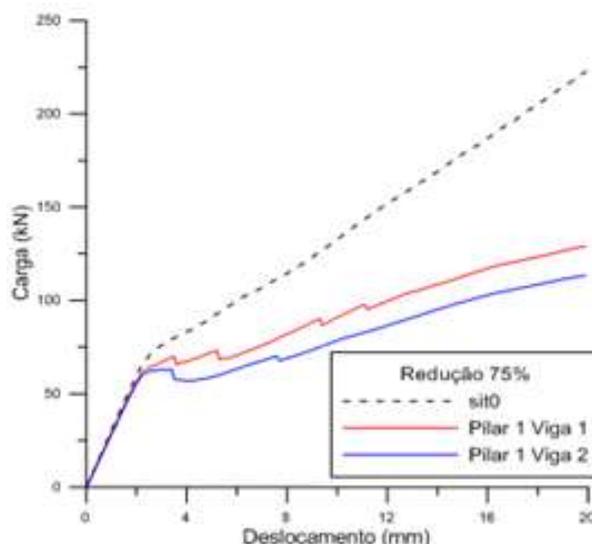


Figura 13 - Gráfico da curva carga versus deslocamento das combinações pilar 1 viga 1 e pilar 1 viga 2 com redução de armadura de 25%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 8 - Carga e redução da carga última das combinações pilar 1 viga 1 e pilar 1 viga 2 submetidos a uma redução de 75% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Pilar 1	10	91,04	31,39%
Viga 1	19,9	128,9	42,12%
Pilar 1	10	78,54	40,81%
Viga 2	19,9	113,5	49,03%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Assim como nos 75% o estudo feito com redução de 50% de armadura não é diferente. Com um deslocamento de 10 mm tem-se 15,67% e 22,38% de redução em relação à resistência do pórtico original e nos 19,9mm tem-se 19,67% e 25,91% de redução.

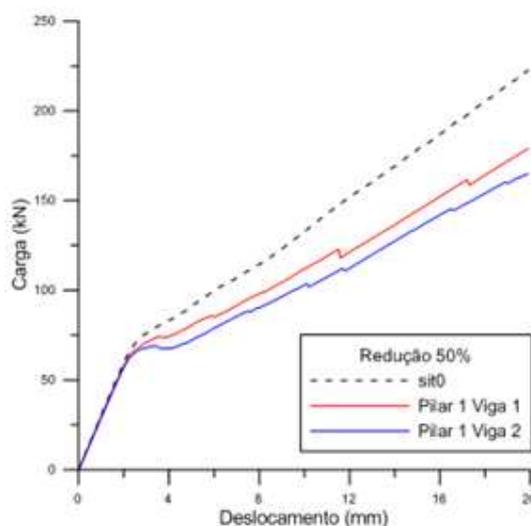


Figura 14 - Gráfico da curva carga versus deslocamento das combinações pilar 1 viga 1 e pilar 1 viga 2 com redução de armadura de 50%

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 9 - Carga e redução da carga última das vigas 1 e 2 submetidos a uma redução de 50% em sua armadura nos deslocamento de 10 e 19,9mm.

Elemento	Deslocamento (mm)	Carga (kN)	% Red
Pilar 1	10	111,9	15,67%
Viga 1	19,9	178,9	19,67%
Pilar 1	10	103	22,38%
Viga 2	19,9	165	25,91%
Sit0	10	132,7	
	19,9	222,7	

Fonte: Elaborado pelos autores

Tanto com uma redução de 75% ou 50% nota-se que quando esse defeito é atribuído de forma combinada aos elementos estruturais ele se torna muito mais potente, ou seja, teremos uma redução muito maior na capacidade de carga do pórtico em questão.

Análises de dano nas situações de redução de armadura

Verificando os valores relativos às danificações na peça foi possível visualizar que a primeira fissura surge em torno de 33 kN na peça, independente da redução de armadura utilizada, diferenças mais sensíveis da armadura foram verificadas em estágios superiores a carga de 120 kN, que é a carga de serviço do pórtico. Isso pode ser verificado na prática dos dimensionamentos de estruturas de concreto, onde em estágios de carga mais reduzida a mesma

tem um efeito tímido sobre o conjunto, sendo de extrema importância em situação de estado limite de serviço e estado limite último, estágios II e III do estudo de peças de concreto armada sobre flexão.

Os valores de dano ainda são bem tímidos cerca de uma redução de 1% no módulo de elasticidade original da peça, já que o dano afeta a parcela de rigidez do material. Diferentemente do processo de norma brasileira (ABNT NBR 6118:2014) que penaliza a rigidez do material com o enfoque na perda de seção resistiva, ou inércia.

Para as cargas de regime de serviço foi possível perceber que o modelo apresentou quedas no valor do módulo de até 5%, quando a redução chegou a valores de 75% da armadura por exemplo.

Essa maior penalização do concreto já era esperada, pois com a redução da armadura o concreto sofrerá mais com os deslocamentos embutidos no sistema gerando danificações cada vez maiores. Como já era de se esperar o elemento com maior danificação é o elemento 1 que representa a base do pilar 1.

CONCLUSÃO

A partir das análises feitas neste trabalho pode-se concluir de o modelo de mecânica do dano pode ser aplicado em situações práticas para desenvolvimento tanto do campo prático quanto do campo científico, já que através desta ferramenta nós conseguimos quantificar inúmeros fatores como, por exemplo, os micros defeitos. Além da aplicação em micro defeitos neste trabalho foi possível constatar que a ferramenta também pode ser utilizada para melhorar a compreensão em regime de serviços, em situações de fragilização da estrutura, no caso do nosso trabalho a redução da armadura de determinados elementos estruturais de um pórtico, apresentando resultados satisfatórios e dentro da expectativa.

Pode-se notar também que a mecânica do ano apresentou problemas de convergência em casos onde o elemento estrutural possuía um alto grau de fissuração (peças com redução de 75% de armadura), pois sua principal função é relacionada à microfissuras e para o estágio de carregamento referido as fissuras já se encontravam na macroestrutura, fazendo com que o código não apresentasse convergência a esse regime de cargas.

Portanto entende-se que o modelo de dano pode sim ser utilizado em diversas situações práticas, entretanto, possui algumas limitações que com o tempo podem ser aperfeiçoadas.

Como sugestão de trabalhos futuros fica como sugestão a utilizando dessa metodologia de análise paramétrica de vigas e também utilizando outros materiais, como o concreto com fibras e até concretos mais resistentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. ABNT, 2014.

KACHANOV, L. M. Time of the rupture process of non-linear solid mechanics. **Otd.Tech. Nauk.**, v. 8, pp. 28-31, 1958.

LEMAITRE, J. (1984). How to use damage mechanics. Nucl. Eng. Des., v.80, p.233.

LEMAITRE, J. **A course on damage mechanics**. 2. ed. Berlim: Springer Verlag, 1996.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L. **Mechanics of solid materials**. Cambridge University Press, 1990. 556 p.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J.L. (1974). A non-linear model of creep-fatigue damage cumulation and interation. In: IUTAM SYMP. OF MECHANICS OF VISCOELASTIC MEDIA AND BODIES, Gothenburg, 1974. Proc. Springer

PEREIRA JÚNIOR, W. M.; PITUBA, J. J. D. C. A bi-dissipative damage model for concrete. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 8, p. 49-65, 2015.

PINTO, R. S; RAMALHO, M. A. Não linearidade física e geométrica no projeto de edifícios usuais de concreto armado. In: **Caderno de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, n. 19, p. 171-206, 2002.

PITUBA, J. J. C. **Estudo e aplicação de modelos constitutivos para o concreto fundamentados na mecânica do dano contínuo**. 1998. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Paulo, 1998.

PITUBA, J. J. C. **Sobre a formulação de um modelo de dano para concreto**. 2003. 151 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

VECCHIO, F.J.; EMARA, M.B.E. (1992). Shear deformations in reinforced concrete frames. ACI Structural Journal, v.89, n.1, p. 46-56.

Recebido em 10 de novembro de 2015.

Aprovado em 26 de dezembro de 2015.