

5

Modelagem e Resultados

O presente capítulo visa demonstrar a aplicabilidade dos elementos de fratura coesiva PPR, Bi-linear e Linear exponencial em ensaios de fratura de materiais quase frágeis, como é o caso do concreto reforçado com fibras de aço. Sendo assim, este capítulo está dividido em cinco seções. A primeira trata dos tipos de controles utilizados na simulação da análise. A segunda seção trata do estudo dos três modelos coesivos submetidos ao modo I puro de fratura. Na terceira seção serão estudados os três modelos submetidos ao modo II puro de fratura. Na quarta seção será estudada a fratura de um corpo submetido a um esforço de tração indireta, através de um ensaio de flexão em quatro pontos. E por fim, na quinta seção será estudada a resposta dos modelos de fratura coesiva utilizados em um corpo submetido ao modo misto de fratura.

5.1

Controles da análise

Para a simulação de fratura faz-se importante definir os controles de análise. É necessário definir tamanho, quantidade dos incrementos e o tipo de controle de análise.

O software Abaqus apresenta parâmetros padrões de incremento, tais incrementos de tempo são definidos para alcançar bom desempenho, porém para problemas de comportamento linear. Para análises descontínuas, como é o caso de fraturas, o tempo de interação padrão pode resultar em cortes antecipados ou finalização da análise. Sendo assim, é de fundamental importância configurar esses parâmetros para o caso de análises descontínuas, aumentando assim o valor do número de tentativas antes de abandonar o cálculo (Abaqus *Documentation 2011 – Analysis Procedures, Solution, and Control*).

No ensaio real em laboratório o processo é interrompido quando a fratura acontece, o que corresponde a uma queda significativa no valor da carga. No modelo computacional, para análise fratura e do comportamento do corpo de

prova é necessário fornecer uma quantidade de incrementos suficientemente grande para que o dano se inicie e evolua até a fratura completa.

Outro detalhe importante é o tipo de análise utilizada, como o processo deste trabalho trata-se de fratura (análise não linear), sabe-se que a carga aplicada chega ao máximo em um determinado passo da análise para depois começar a cair independente da evolução do ensaio. Para isso dois controles foram utilizados, o controle de deslocamentos e o controle pelo método de Riks. (Abaqus *Documentation 2011 – Analysis Procedures, Solution, and Control*).

5.2

Análise computacional de fratura em um corpo de prova submetido à esforço de tração

Nesta seção é estudado o comportamento de um corpo-de-prova submetido ao esforço de tração até a sua ruptura, caracterizando um ensaio de fratura em modo I puro. O material modelado trata-se do concreto reforçado com fibra de aço C2.1%65.

5.2.1

Modelagem do corpo de prova

O corpo de prova ensaiado apresenta as seguintes dimensões (Figura 5.1): altura (H) igual a 75 mm, comprimento (L) igual 100 mm e largura (t) igual a 100 mm. Na simulação do modo I foi adotado o modelo simples conforme a Figura 5.1, que consta de dois elementos de contínuo lineares tipo CPS4 e um elemento coesivo (nós 3,4,5 e 6). A análise transcorreu com a imposição de deslocamentos nos nós 7 e 8, e controlado estes deslocamentos.

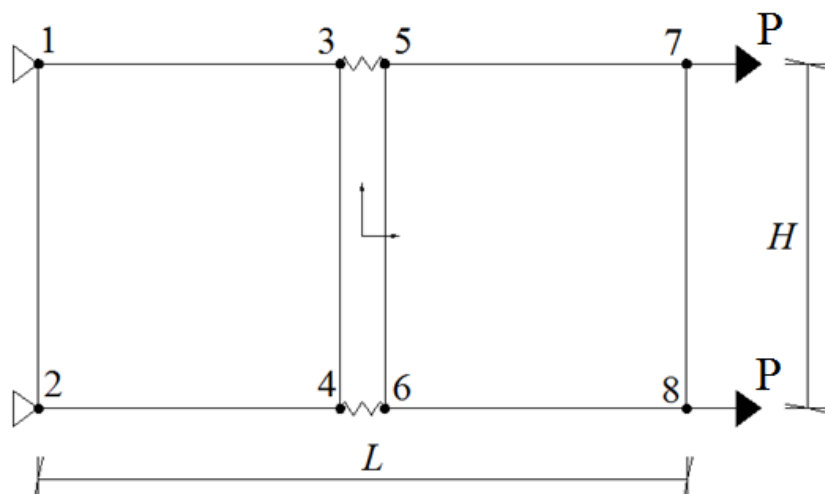


Figura 5.1: Peça modelada.

Os valores dos parâmetros de entrada utilizados para os modelos de fratura coesiva foram calculados conforme visto no capítulo 4. Tais valores são mostrados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Propriedades e parâmetros utilizados nos modelos constitutivos Bi-linear e Linear exponencial para tração.

G_{IC} (KN/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	K_{nn} (Pa/m)	φ (*)
7	4,96	3,1195e+11	5

(*) Somente para o modelo Linear exponencial.

Tabela 6: Propriedades e parâmetros utilizados no modelo constitutivo PPR para tração.

ϕ_n (KN/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	α	λ_n
7	4,96	5	0,004554

Nas Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 têm-se, respectivamente, os deslocamentos horizontais U1, as tensões de von Mises e as tensões S11.

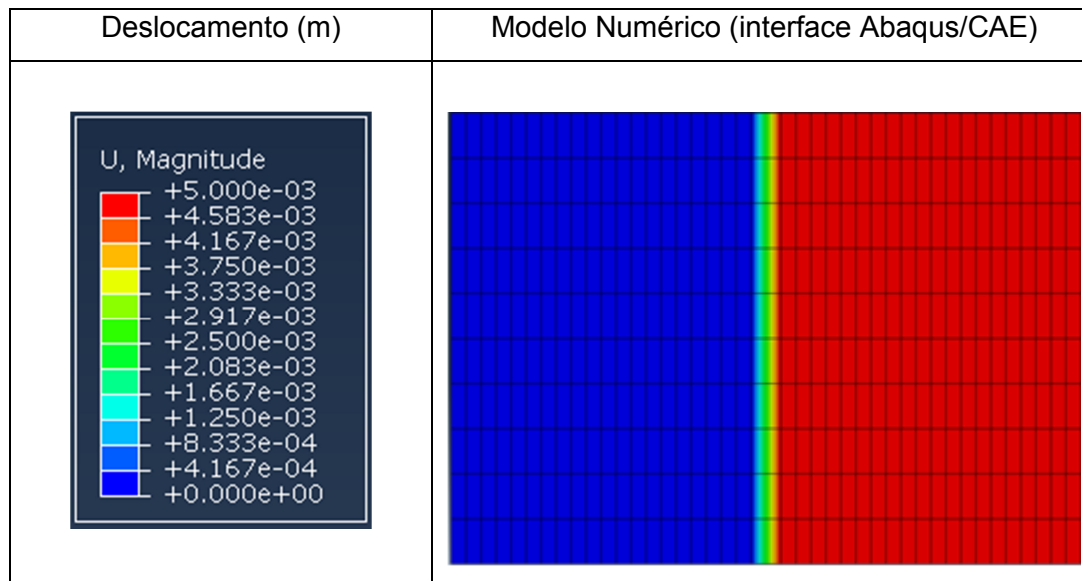


Figura 5.2: Distribuição de deslocamentos horizontais U1.

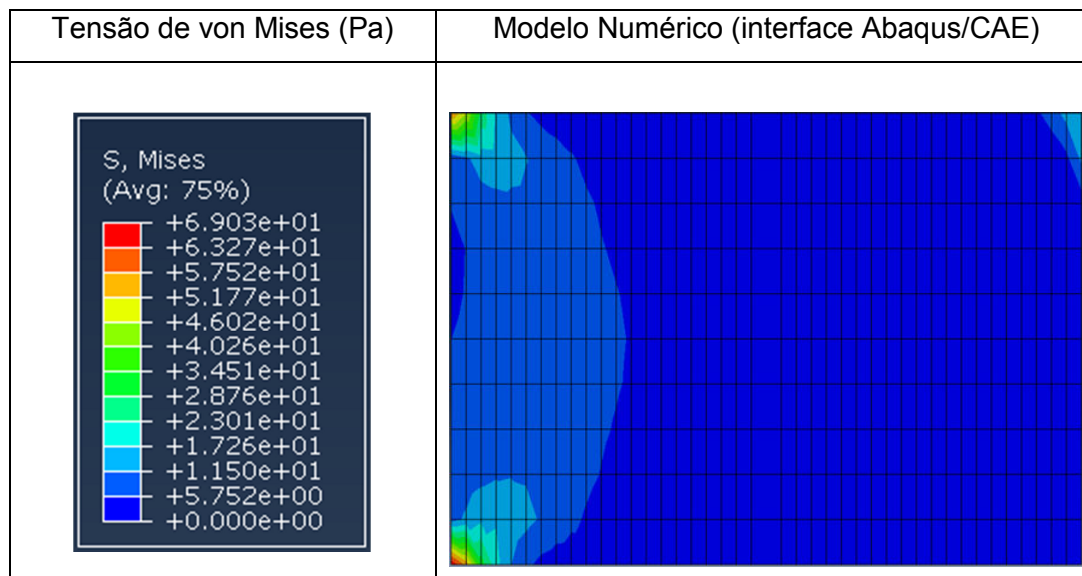


Figura 5.3: Distribuição das Tensões de von Mises.

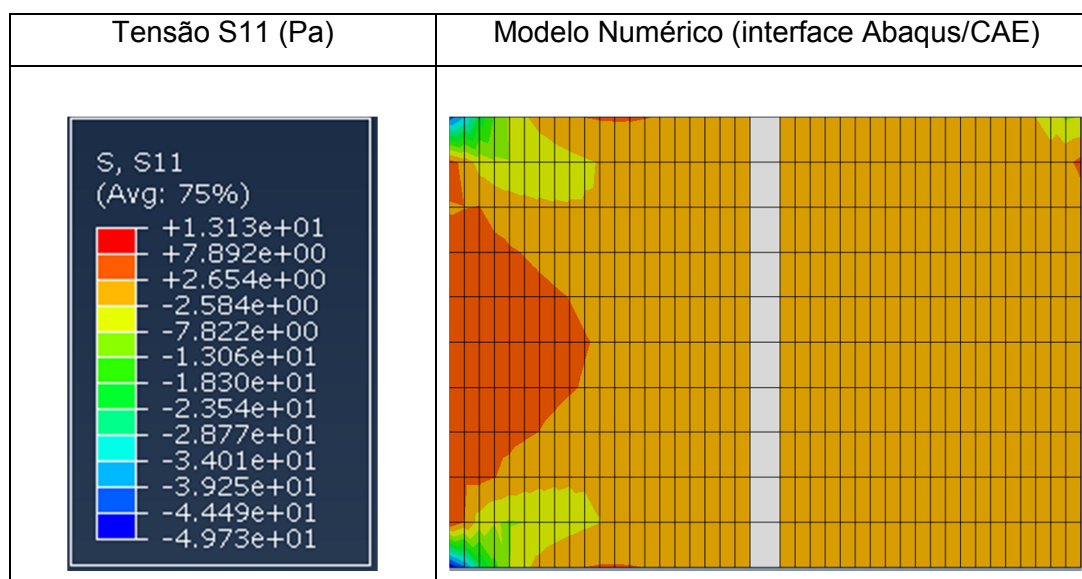


Figura 5.4: distribuição das Tensões S11.

Na Figura 5.5 é apresentado o gráfico da tensão x abertura da fissura.

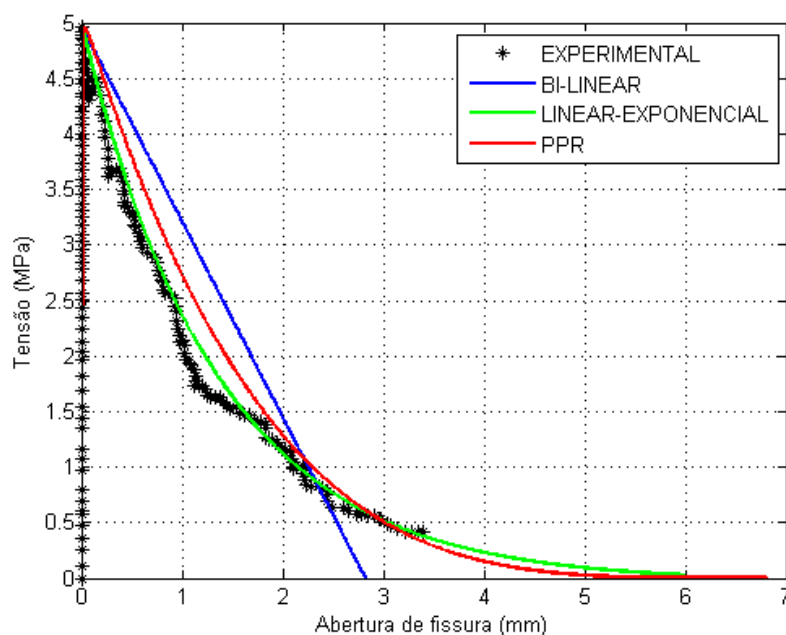


Figura 5.5: Curva tensão x abertura de fissura.

Na fase ascendente da Figura 5.5 fica evidente que a abertura de fissura é muito pequena antes de a curva alcançar a tensão máxima suportada pela interface. Sendo assim, achou-se importante plotar o gráfico da tensão - deformação apenas na fase ascendente, para uma melhor análise qualitativa do comportamento da curva nesta fase, além do que Marangon apresenta também resultados para tensão - deformação. Assim, é apresentada a Figura 5.6 para a

visualização do comportamento da relação tensão x Deformação na fase de carregamento.

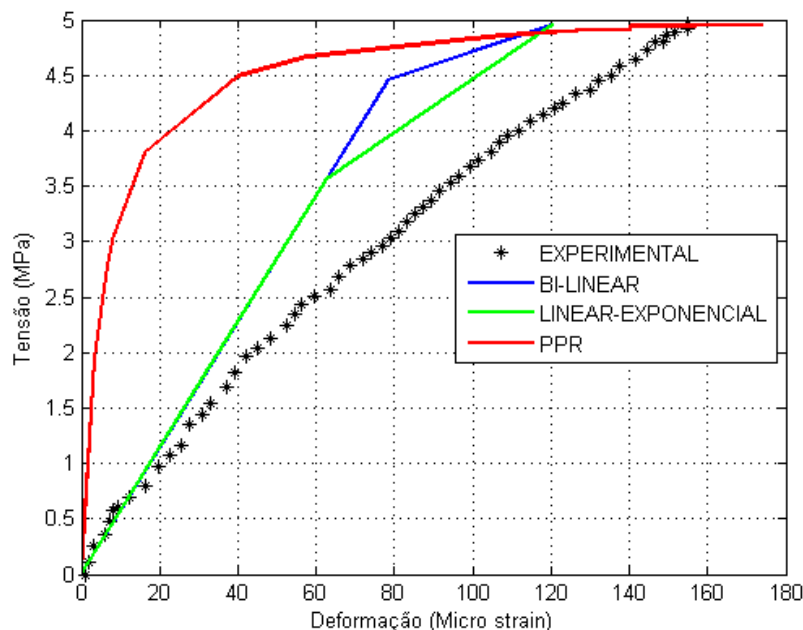


Figura 5.6: Tensão x Deformação.

A Tabela 7 apresenta os valores das tensões máximas para início de dano, bem como as suas respectivas deformações.

Tabela 7: Tensões máximas e deformações.

	Experimental	Bi-linear	Linear exponencial	PPR
$\sigma_{\max}$ (MPa)	4,96	4,953	4,954	4,95
Deformação ($\mu\epsilon$)	158,83	120,39	120,38	170,3

Com o resultado final, evidenciou-se que para representar melhor o comportamento da zona onde ocorre a fratura, o modelo Linear exponencial e o modelo PPR apresentaram maior flexibilidade para se ajustar a curva experimental, enquanto que o Bi-linear se distanciou da curva de referência.

Para a fase de carregamento é verificado tanto na Figura 5.5, como mais especificamente, na Figura 5.6 que existe uma pequena diferença de inclinação entre as curvas numérica e experimental, no entanto as tensões máximas foram praticamente iguais para todos os modelos.

Observou-se claramente o modelo PPR na fase de carregamento computou mais pontos de leitura quando comparado aos outros dois modelos

coesivos. Outra pequena diferença encontrada foi entre as tensões, porém para melhorar os resultados foram adotados incrementos de passos diferentes em cada análise para os modelos coesivos, o que acarretou em mais pontos na fase de carregamento melhorando a curva final da tensão x deslocamento.

Com relação à inclinação das retas, a pequena diferença deve ser atribuída a cada tipo de modelo ou ao tipo de controle adotado nas análises, uma vez que todos os valores retirados para o parâmetros de entrada dos modelos foram extraídos dos resultados experimentais e calculados conforme as equações vistas no capítulo 4.

5.3

Análise computacional de fratura em um corpo de prova submetido à esforço de cisalhamento

Nesta seção é estudado o comportamento de um corpo-de-prova submetido ao esforço de cisalhamento até a sua ruptura, caracterizando um ensaio de fratura em modo II puro. O material constituinte do corpo-de-prova trata-se do concreto reforçado com fibra de aço C2.1%65.

5.3.1

Modelagem do corpo de prova

O corpo de prova ensaiado apresenta as seguintes dimensões (Figura 5.7): altura (H) igual a 100 mm, comprimento (L) igual 400 mm e a largura foi definida como ($t1$) igual a 100 mm para região onde o corpo-de-prova foi modelado com elementos contínuos CPS4 e ($t2$) igual a 80 mm onde o corpo-de-prova foi modelado com elementos de fratura coesiva. Na simulação do modo II foi adotado um modelo que consta de 300 elementos contínuos lineares tipo CPS4 e 20 elementos coesivos localizados próximos aos apoios centrais, distribuídos ao longo da altura do modelo. A análise transcorreu com a imposição de força nos nós acima da faixa que contem os elementos coesivos e o controle da análise foi através de Riks (Abaqus *Documentation* 2011).

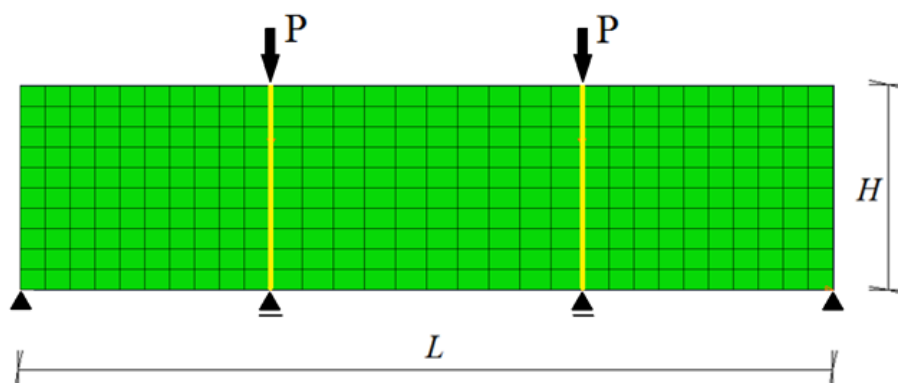


Figura 5.7: Modelo computacional do corpo-de-prova.

Como foi observado no capítulo 3, nas Figuras 3.9 e 3.10, onde se quis observar o efeito de cisalhamento no corpo-de-prova, foram realizados os entalhes. Na modelagem numérica, os entalhes foram representados por elementos coesivos. Os detalhes da modelagem da zona onde se processa a fratura são mostrados na Figura 5.8. Para efeito ilustrativo é mostrado a coluna dos elementos coesivos com uma espessura “ e ”, onde em um nó mais externo colocou-se o apoio e no nó mais interno foi imposto a força, vale ressaltar que na modelagem essa espessura é nula, ou seja, os nós estão sobrepostos.

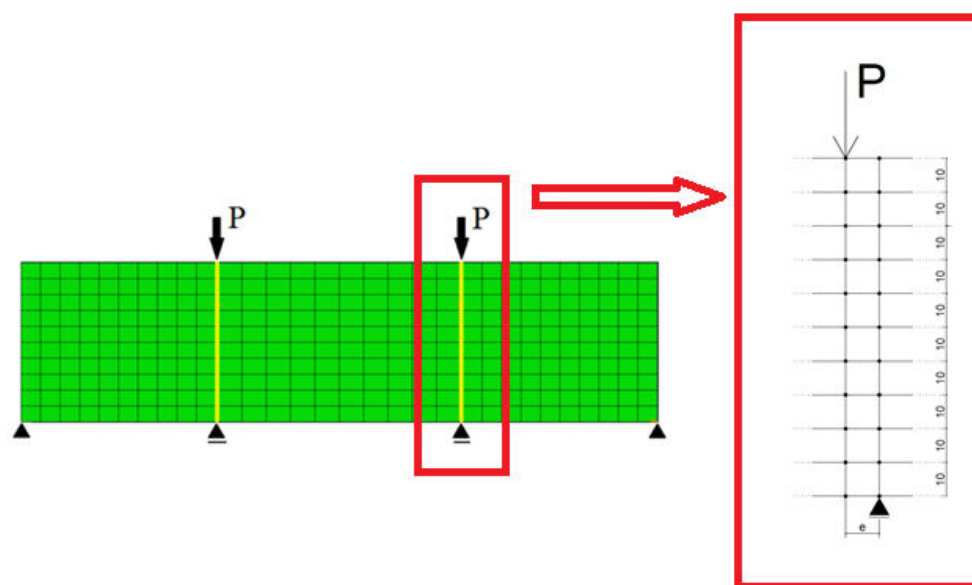


Figura 5.8: Região de zona coesiva.

Os valores dos parâmetros de entrada utilizados para os modelos de fratura coesiva foram calculados conforme visto no capítulo 4. Tais valores são mostrados nas Tabelas 8 e 9 a seguir.

Tabela 8: Propriedades e parâmetros utilizados nos modelos constitutivos Bi-linear e Linear exponencial o cisalhamento.

G_{IIC} (KN/m)	$\tau_{\max}$ (MPa)	K_{ss} (Pa/m)	φ (*)
17,79	14,79	4,10833e+11	3,75

(*) Somente para o modelo Linear exponencial.

Tabela 9: Propriedades e parâmetros utilizados no modelo constitutivo PPR para o cisalhamento.

ϕ_t (KN/m)	$\tau_{\max}$ (MPa)	β	λ_t
17,79	14,79	4	0,06593

Nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11, têm-se os deslocamentos verticais U2, as tensões de von Mises e as tensões S22, respectivamente.

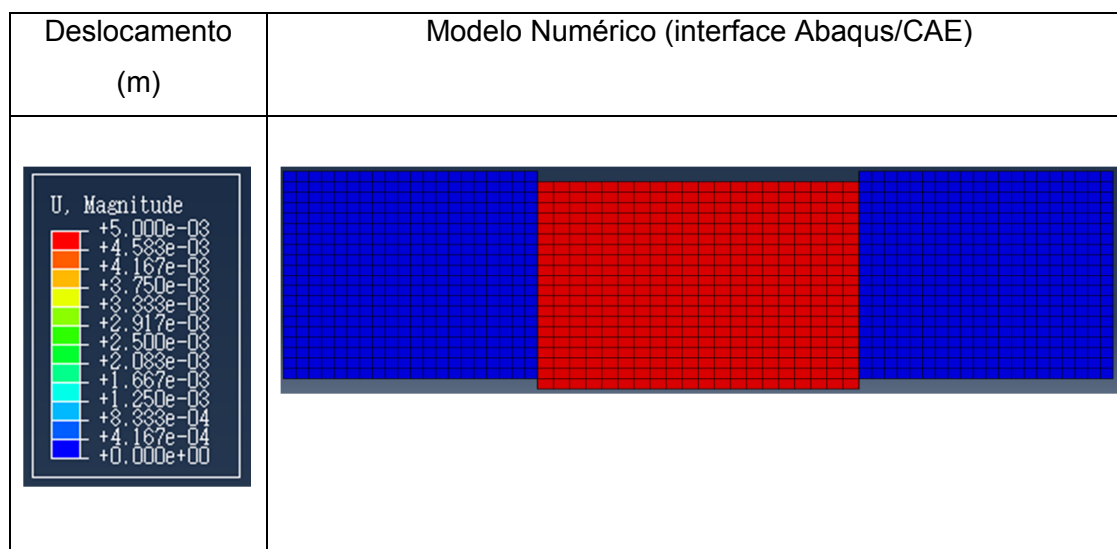


Figura 5.9: Distribuição dos deslocamentos verticais U2.

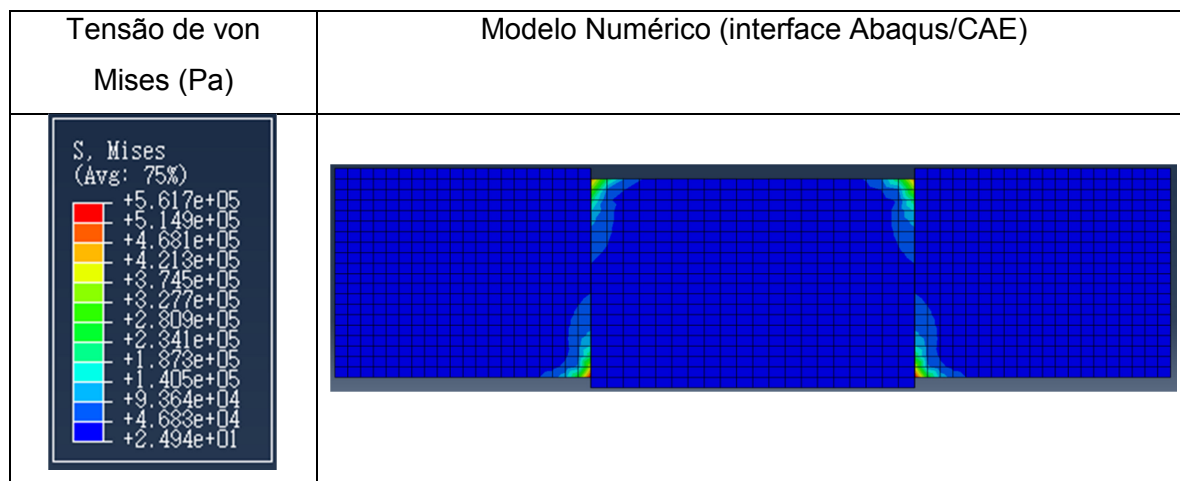


Figura 5.10: Distribuição das tensões de von Mises.

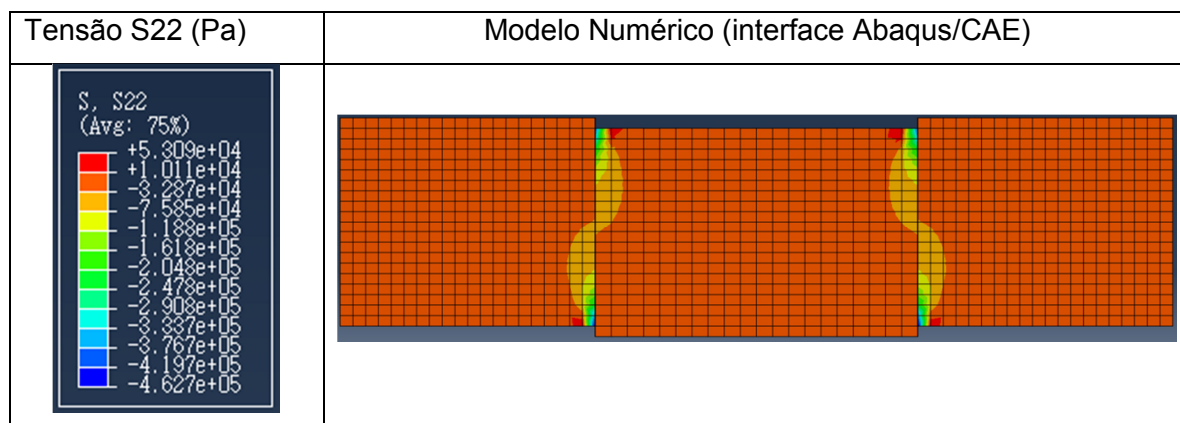


Figura 5.11: Distribuição das tensões S22.

Para o resultado da curva Carga aplicada x deslocamento vertical tem-se a Figura 5.12.

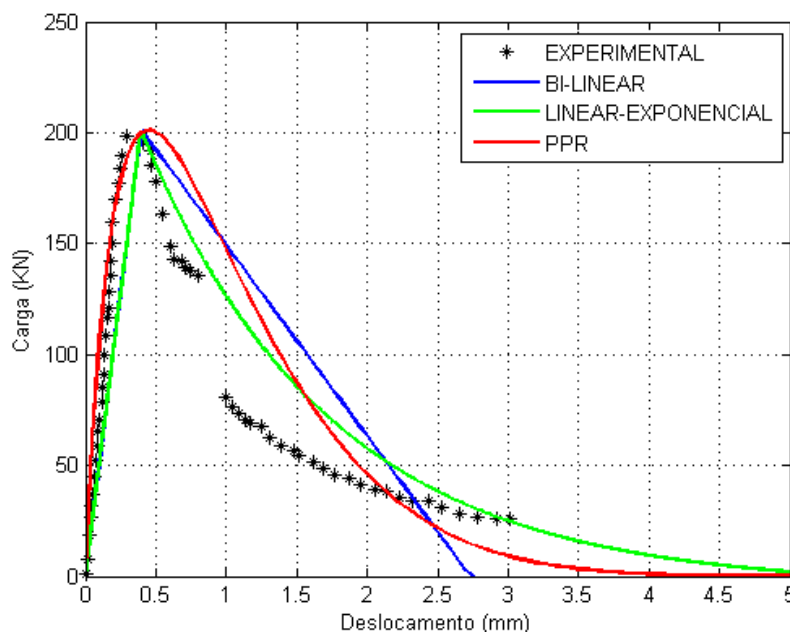


Figura 5.12: Curva Carga x deslocamento vertical

Na Tabela 10 têm-se os valores das Cargas máximas suportadas pelas interfaces assim como os seus respectivos deslocamentos críticos para efeito comparativo quantitativo.

Tabela 10: Cargas máximas e deslocamentos medidos numericamente

	Experimental	Bi-linear	Linear exponencial	PPR
Carga (KN)	198,18055	200,72	200,384	201,086
Deslocamento (mm)	0,36	0,402601	0,395309	0,45

Para o resultado da zona onde se processa a fratura, tem-se a curva da Tensão x deslocamento vertical (Figura 5.13).

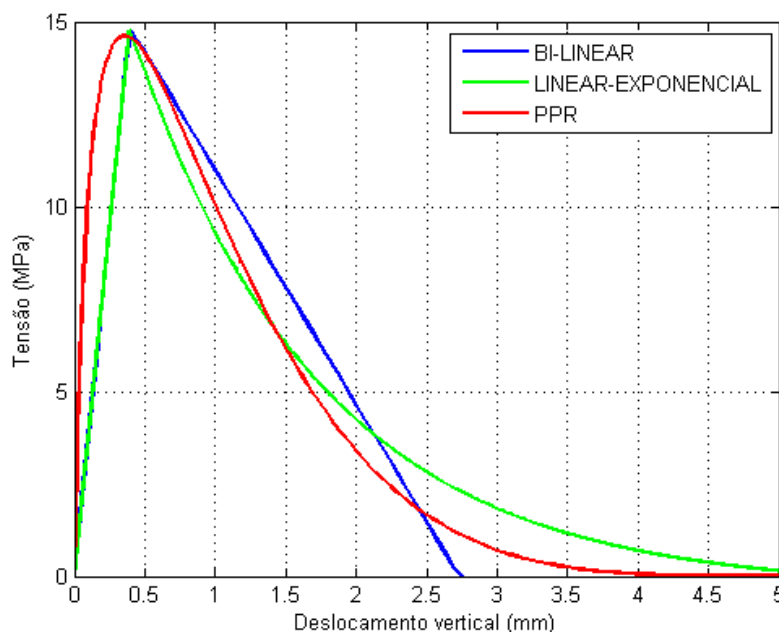


Figura 5.13: Curva Tensão x deslocamento vertical.

A Tabela 11 apresenta os valores medidos para Tensões máximas suportadas pelas interfaces bem como os seus respectivos deslocamentos críticos. Em Marangon são fornecidos os valores relativos à tensão cisalhante máxima e o deslocamento medido.

Tabela 11: Tensões máximas e deslocamentos.

	Experimental	Bi-linear	Linear exponencial	PPR
Tensão medida (MPa)	14,79	14,728	14,732	14,62
Deslocamento (mm)	0,36	0,403	0,395	0,359

Depois de calibrados todos os modelos coesivos, foram evidenciados que em relação aos resultados relativos à força aplicada x deslocamento vertical (Figura 5.12), os modelos Bi-linear e Linear exponencial apresentam comportamentos idênticos da fase de carregamento, diferindo do modelo PPR e do resultado experimental, onde estes dois últimos apresentam comportamentos similares na fase de carregamento. No entanto, vale ressaltar que o resultado experimental, especificamente na fase de carregamento não apresenta comportamento linear, apresentando vários desvios de linearidade.

Embora na fase de carregamento curvas dos modelos Bi-linear e Linear exponencial não os desvios de linearidade do resultado experimental, os

mesmos apresentam praticamente os mesmos deslocamentos para ponto em que se inicia o dano, diferindo em um erro de aproximadamente 0,04 mm.

Ainda para a curva Carga aplicada x deslocamento vertical (Figura 5.12) na fase de carregamento, o modelo PPR apresenta bom resultado quando comparado com o experimental, diferindo apenas em uma etapa de carga próxima ao pico do gráfico em questão, ocasionando um erro no deslocamento crítico (deslocamento de início de dano) de 0,09 mm.

Como conclusão para esta análise, ficou evidente que dentre os três modelos utilizados o que mais se adequou ao resultado experimental foi o modelo Linear exponencial.

Para o gráfico de Tensão x deslocamento vertical (Figura 5.13), mais uma vez fica evidente na fase de carregamento que os modelos Bi-linear e Linear exponencial apresentam comportamentos estritamente lineares, logo o cálculo correto da rigidez inicial (K_{ss}) é muito importante, tendo em vista que independente da linearidade da curva, o deslocamento crítico deve ser o mesmo ou aproximado do medido experimentalmente.

Já o modelo PPR devido a sua formulação, tanto na fase de carregamento quanto na de amolecimento pode assumir um polinômio de grau qualquer, o que possibilita aproximar-se mais da curva que se quer reproduzir, para isso é importante o cálculo correto de seus parâmetros de entrada.

5.4

Análise computacional de fratura em um corpo de prova submetido ao teste de flexão de quatro pontos

Nesta seção será analisado o comportamento do corpo ensaiado à flexão de quatro pontos. Tendo como resultados as tensões ao longo do corpo bem como na zona onde se processa a fratura, e por fim tem-se o valor da carga última aplicada ao corpo-de-prova.

5.4.1

Modelagem do corpo de prova

O corpo de prova ensaiado apresenta as seguintes dimensões (Figura 5.14): altura (H) igual a 100 mm, comprimento (L) igual a 300 mm e largura (t) igual a 100 mm. Na região onde se processará a fratura (região central) foram utilizados elementos coesivos ao longo da altura, no resto do modelo foram utilizados elementos de contínuo lineares tipo CPS4. A análise ocorreu com a

imposição de duas forças localizadas nos nós que distam à $\frac{L}{3}$ de cada apoio. O controle da análise se deu por Riks (Abaqus *Documentation* 2011).

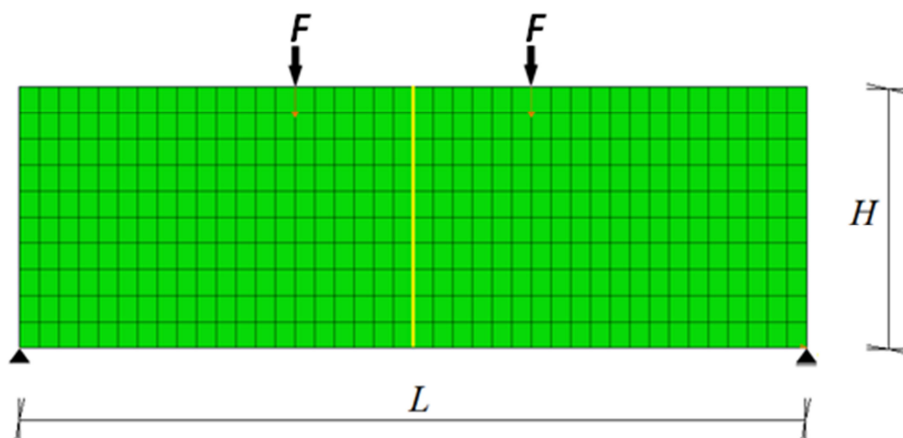


Figura 5.14: Modelo computacional do corpo-de-prova.

Foram realizados três modelos do mesmo corpo-de-prova, estes modelos diferenciam-se no refinamento da malha. Os três modelos foram denominados MOD_1, MOD_2 e MOD_3. A criação dos três modelos teve como intenção se fazer uma análise de convergência dos resultados obtidos na análise numérica.

As características de cada um dos modelos são mostradas na Tabela 12.

Tabela 12: Características dos corpos-de-prova modelados.

	Nós	Elementos coesivos	Elementos CPS4
MOD_1	462	10	400
MOD_2	1976	25	1850
MOD_3	7752	50	7500

Os valores dos parâmetros de entrada utilizados para os modelos de fratura coesiva foram calculados conforme visto no capítulo 4. Tais valores são mostrados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13: Propriedades e parâmetros utilizados nos modelos constitutivos Bi-linear e Linear exponencial para flexão.

G_{IC} (KN/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	K_m (Pa/m)	φ (*)
11	11,01	3,1195e+11	3,75

(*) Somente para o modelo Linear exponencial.

Tabela 14: Propriedades e parâmetros utilizados no modelo constitutivo PPR para flexão.

ϕ_n (KN/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	α	λ_n
11	11,01	6	0,0043558

As Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 mostram, respectivamente, o deslocamentos verticais U2, as tensões de von Mises, as tensões S11 e o dano sofrido pelo corpo-de-prova na zona de fratura.

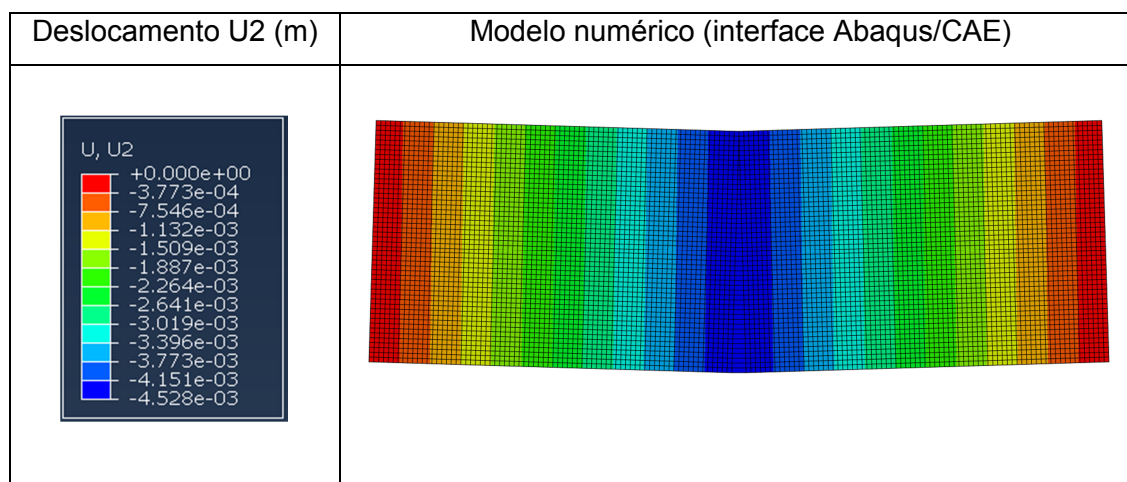


Figura 5.15: Distribuição dos deslocamentos verticais.

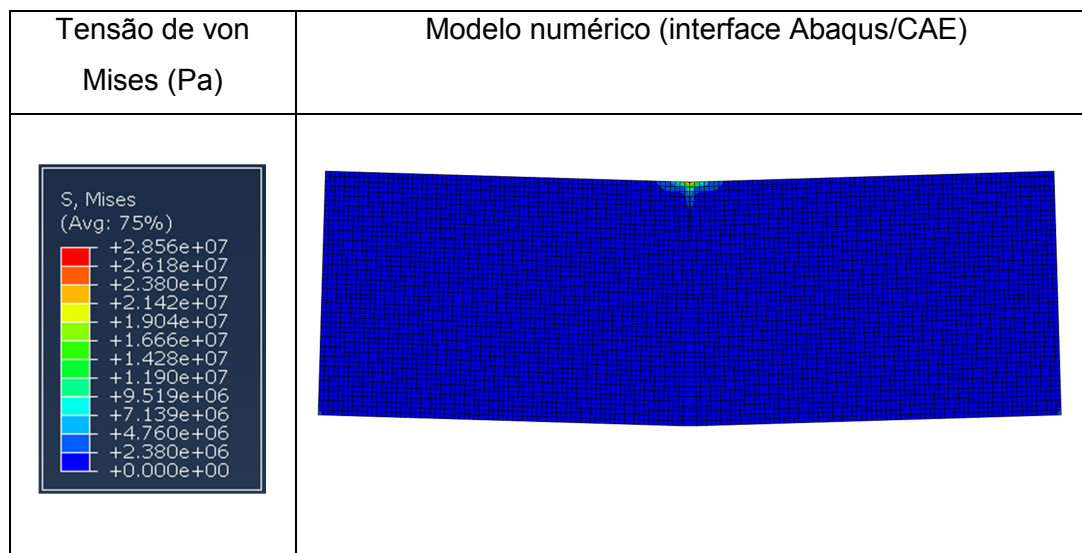


Figura 5.16: Distribuição das tensões de von Mises.

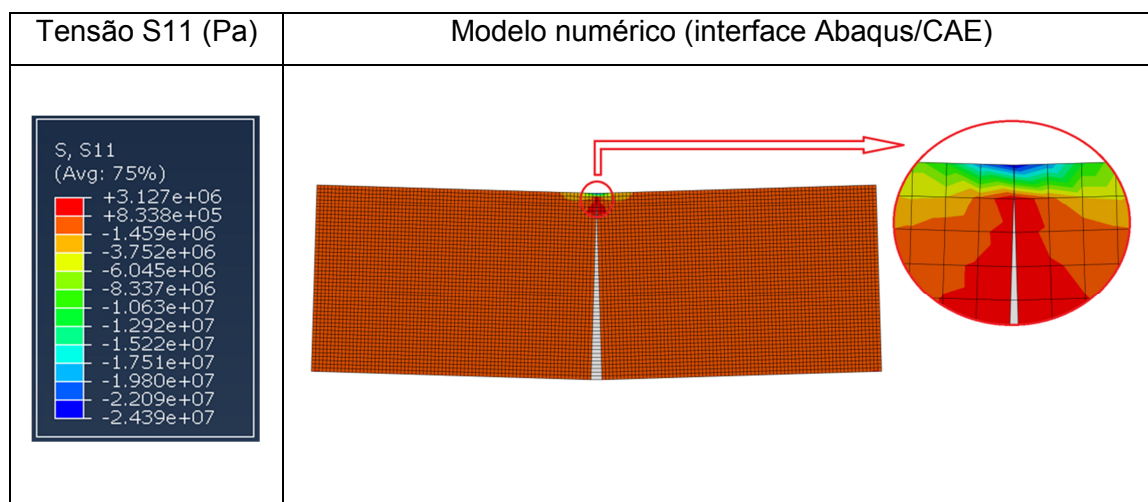


Figura 5.17: Distribuição das tensões S11.

Fica evidente pela Figura 5.17 que as tensões de compressões que surgem no bordo superior até bem próximo à ponta da trinca variam em um intervalo de 24 Mpa a 1,5 Mpa. A tensão de ruptura medida experimentalmente foi de 11,01 Mpa, valor este que está inserido no intervalo medido a partir dos campos das tensões S11 numéricas.

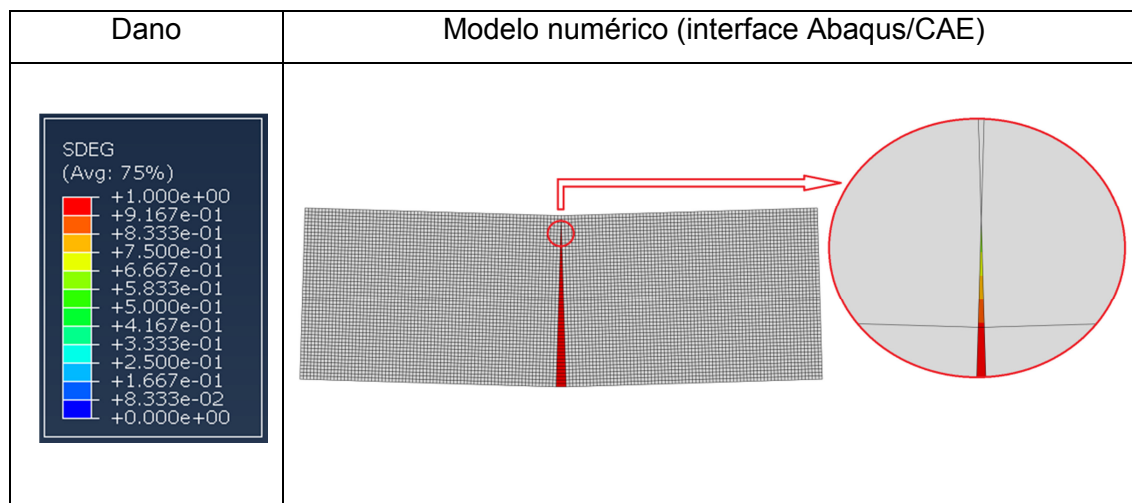


Figura 5.18: Distribuição do dano ao longo da zona onde se processa a fratura.

A Figura 5.18 mostra o dano produzido ao longo da zona coesiva no corpo-de-prova. Na escala de dano são verificados valores no intervalo de zero a um. Onde o valor zero indica que o dano não foi iniciado e o valor um indica que o dano está completo. Assim como o ensaio experimental, o ensaio numérico não rompeu completo, ficando uma pequena região acima da ponta da trinca com o dano iniciado sujeito à compressão.

As figuras 5.19, 5.20 e 5.21 mostram uma análise comparativa para cada modelo coesivo quando a malha do corpo-de-prova é refinada. Assim, são apresentadas as curvas carga aplicada x deslocamento vertical para cada modelo coesivo.

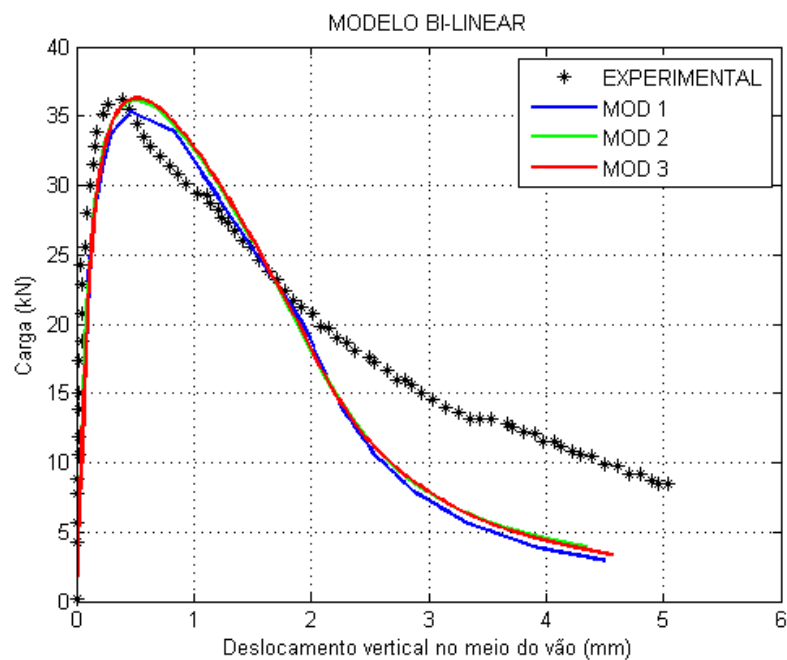


Figura 5.19: Carga x deslocamento vertical para o modelo Bi-linear.

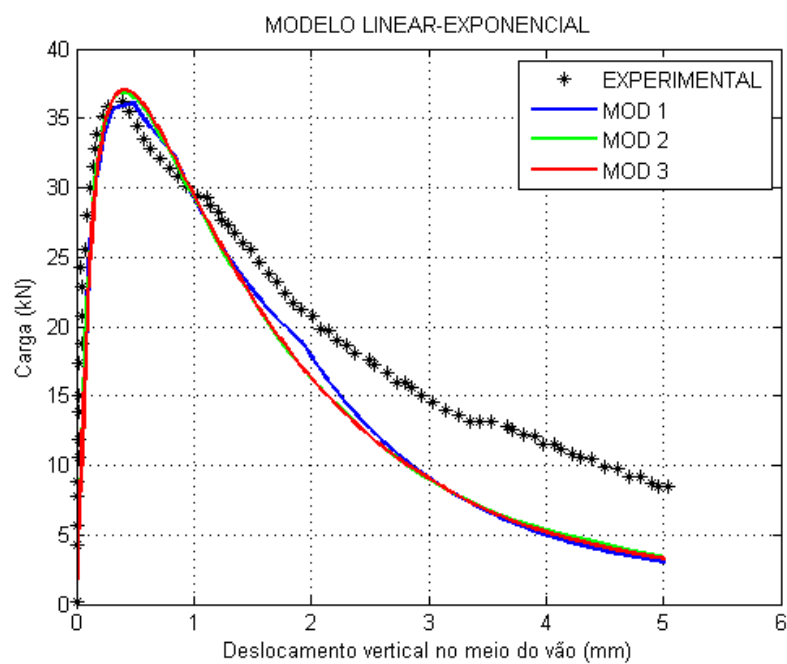


Figura 5.20: Carga x deslocamento vertical para o modelo Linear exponencial.

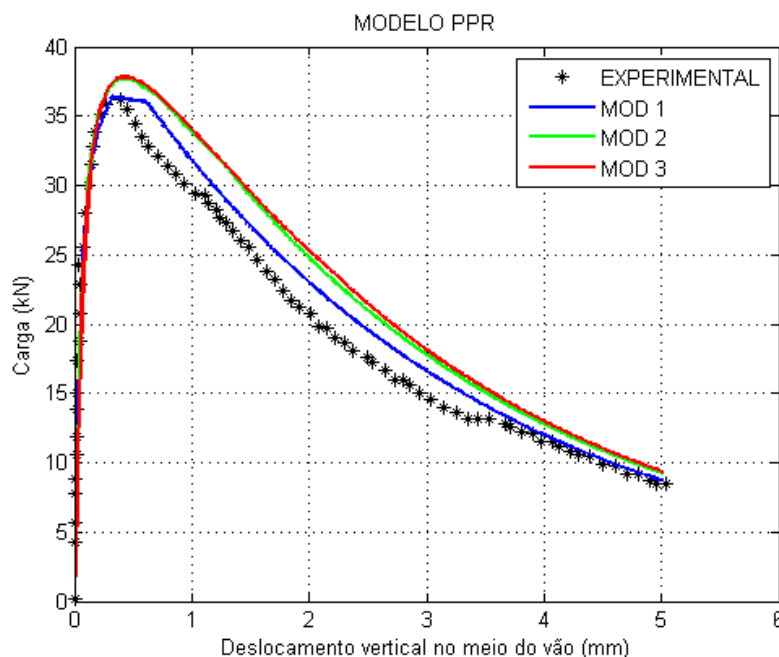


Figura 5.21: Carga x deslocamento vertical para o modelo PPR.

Nas Figuras 5.19 e 5.20 percebeu-se que o refinamento da malha teve mais influencia na região do pico da curva para os modelos coesivo Bi-linear e Linear exponencial. Com o refinamento mais pontos foram computados melhorando assim a concavidade da curva no ponto de máximo, tornando a curva mais suave. Nas demais localidades, tanto na parte pré-pico quanto na pós-pico das curvas ficou evidente que o comportamento é praticamente o mesmo para os três modelos MOD 1, MOD 2 e MOD3.

Na Figura 5.21 evidenciou-se que o refinamento da malha para o modelo PPR teve uma pequena mudança na força máxima suportada pela interface. Quanto mais refinada a malha maior foi a carga aplicada, além de que mais pontos foram computados na análise para a região de pico do gráfico, suavizando mais a curva no ponto de máximo. Outra mudança verificada foi na região da curva referente ao amolecimento, percebe-se que os modelos MOD 2 e MOD 3 são similares e diferem do MOD 1

A Figura 5.22 mostra a comparação entre os três modelos estudados, o Bil-linear, Linear exponencial e o PPR para a carga aplicada x deslocamento.

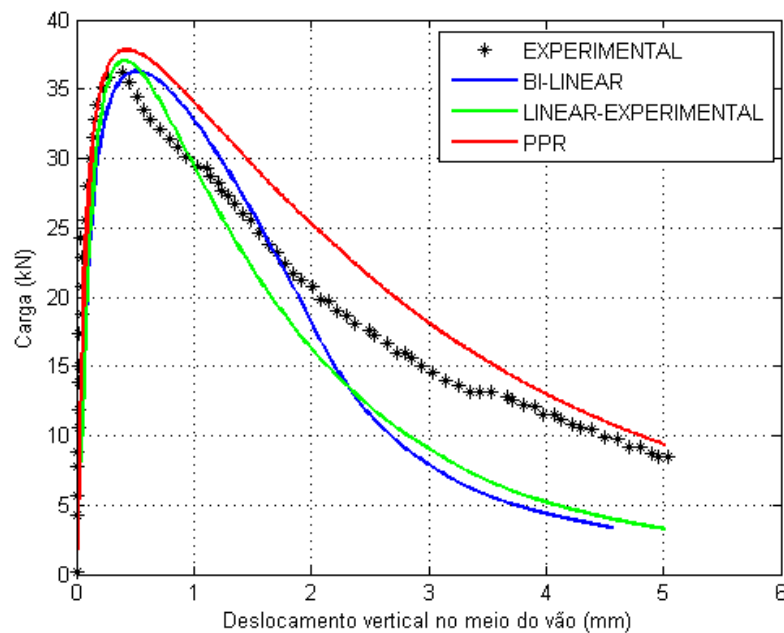


Figura 5.22: Curva Força aplicada x deslocamento vertical

Na Tabela 15 são apresentados os valores para as forças máximas aplicadas bem como os deslocamentos relativos a essas forças.

Tabela 15: Carga aplicada e deslocamentos.

	Experimental	Bi-linear	Linear exponencial	PPR
Carga (KN)	36,176	36,287	37,035	37,84
Deslocamento (mm)	0,4	0,522	0,424	0,424

A Figura 5.23 demonstra o resultado para a Tensão x deslocamento medido no ponto médio da viga.

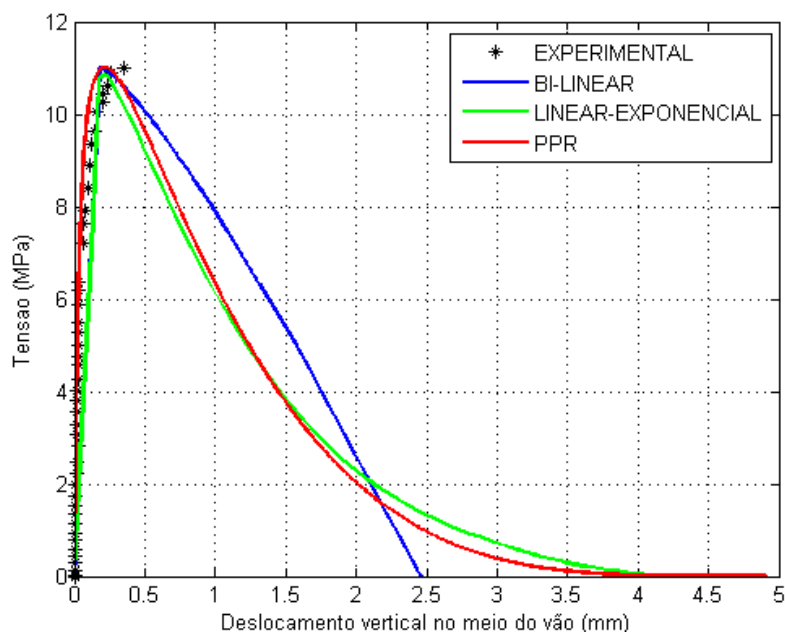


Figura 5.23: Tensão x deslocamento vertical

Na Tabela 16 são apresentados os valores medidos numericamente e experimentalmente para as tensões máximas suportadas e seus respectivos deslocamentos. Vale ressaltar que Marangon apresenta apenas os valores medidos de tensão até o deslocamento relativo até a tensão máxima medida.

Tabela 16: Tensões máximas e deslocamentos.

	Experimental	Bi-linear	Linear exponencial	PPR
Tensão (MPa)	11,01	11,082	10.95	11,01
Deslocamento (mm)	0,3	0,229	0.225	0,219

Outro resultado importante na análise de compósitos cimentícios é o ensaio de Carga aplicada pela abertura da boca da trinca (CMOD - *Crack Mouth Opening Displacement*) (Figura 5.24). Este ensaio consiste em medir a abertura máxima da boca da trinca quando a peça efetivamente rompe juntamente com a carga máxima aplicada.

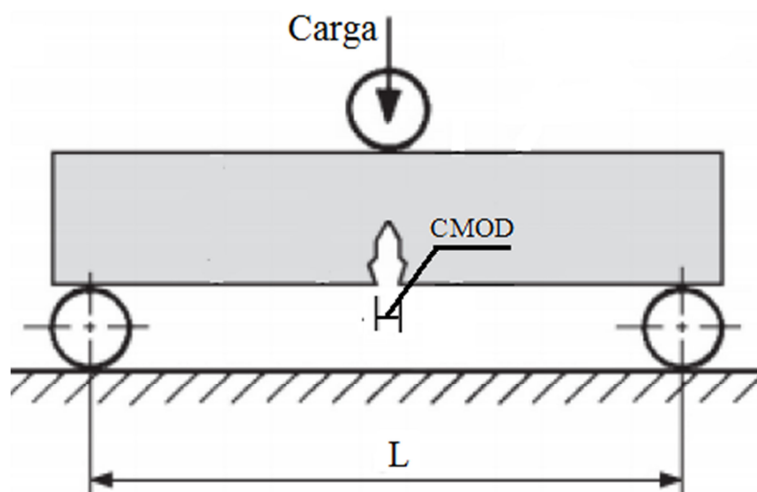


Figura 5.24: Ensaio de corpos-de-prova em flexão à três pontos de vigas entalhadas.

A partir deste ensaio é possível determinar três parâmetros importantes para a mecânica da fratura: A energia de fratura dos materiais, fator de tensão crítico (K_{IC}) e o parâmetro CTOD. Marangon não apresenta resultados experimentais para este tipo de ensaio, logo, o ensaio apresentado aqui é de caráter numérico. Os resultados são apresentados na Figura 5.25.

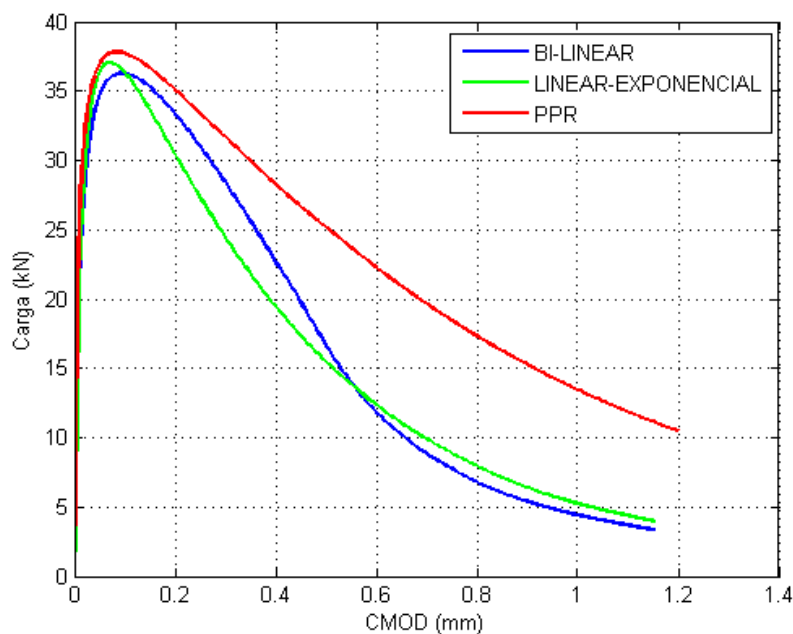


Figura 5.25: Carga x CMOD.

Na Tabela 17 são apresentados os valores para as cargas máximas bem como as aberturas das trincas para cada modelo.

Tabela 17: Carga aplicada e deslocamentos.

	Bi-linear	Linear exponencial	PPR
Carga (kN)	36,287	37,047	37,824
Abertura (mm)	0,0962	0,0696	0,0826

Como resultado, demonstrou-se que o comportamento na fase inicial de carregamento de todos os modelos, Figura 5.22, apresentaram uma inclinação similar a da curva experimental. Apenas o modelo Bi-linear apresentou um pequeno desvio de linearidade a partir de uma determinada etapa de carga próximo ao pico.

Mesmo calibrando os parâmetros responsáveis pela inclinação inicial da curva dos elementos Bi-linear e Linear-experimental (K_{nn}) através dos dados experimentais houve ainda uma pequena diferença entre os deslocamentos relativos às forças máximas, porém com o modelo Bi-linear se afastando mais do resultado experimental, com uma diferença de 0,12 mm entre os deslocamentos. O modelo PPR no que diz respeito ao deslocamento medido relativo à carga máxima aplicada foi muito próximo ao experimental, porém diferenciou-se na carga, sendo maior do que a medida experimentalmente.

Em relação à força medida, as forças máximas para os modelos Bi-linear e Linear-experimental são similares à força medida experimentalmente. Já no elemento PPR apresentou uma força maior.

Com relação à tensão, na fase de carregamento os dados numéricos têm como parâmetros comparativos os resultados de Marangon, porém este não apresenta resultados experimentais para a fase de amolecimento, o mesmo apresenta uma formulação para determinar as tensões a partir das cargas medidas durante o ensaio. Dessa forma, o presente trabalho optou por apresentar apenas as respostas numéricas relativas à fase de amolecimento.

Ainda na fase de carregamento da curva tensão x deslocamento, Figura 5.23, observa-se a diferença entre as inclinações das curvas, porém nota-se que todas as curvas numéricas apresentam uma tendência muito próxima a da curva experimental. Onde a curva experimental apresenta um grande desvio de linearidade em um determinado passo de carga, tensão de aproximadamente 10 MPa, acentuando assim mais a curva.

Para o resultado do gráfico da carga x CMOD, Figura 5.25, têm-se resultados semelhantes para a fase de carregamento em todos os modelos, com as aberturas das bocas de trincas ficando em um intervalo 0,0696 mm a 0,0962 mm para as cargas máximas medidas. Como Marangon não apresenta resultados experimentais para este ensaio, o presente apresenta apenas os resultados das simulações numéricas.

5.5

Análise computacional de fratura em um corpo de prova em modo misto

Esta seção tem por objetivo analisar o comportamento de um corpo-de-prova submetido a um ensaio de fratura em modo misto, ou seja, quando estão agindo sobre a trinca tanto tensões normais quanto tensões tangenciais. Para ensaio em modo misto Marangon (2011) não apresenta resultados experimentais realizados com o CAAF para efeito de validação dos resultados numéricos.

No entanto, a abordagem utilizada aqui tem como fundamento teórico os estudos de Turon, Camanho, Costa e Renart (2010), os quais investigam a precisão dos resultados de elementos de fratura coesiva empregados a carregamentos de modo misto, nas condições em que a MFLE se aplica.

5.5.1

Modelagem do corpo de prova

Existem na literatura vários modelos numéricos para simular o comportamento de corpos-de-prova sob carregamentos em modo misto. Estes modelos numéricos em sua grande maioria não apresentam soluções analíticas. Assim, para validar os resultados numéricos destes modelos são realizados ensaios experimentais.

Tendo em vista que o material analisado no presente trabalho (CAAF C2.1%65) trata-se de um compósito produzido para um estudo específico, pressupõem-se que a literatura não apresenta resultados experimentais de ensaios em modo misto para corpos-de-prova do compósito em questão.

Sendo assim, para modelar um ensaio numérico em modo misto com o compósito C2.1%65 faz-se uso do modelo numérico proposto por Reeder e Crews (1990, 1991, 1998), Mixed Mode Bending – MMB, uma vez que este apresenta uma solução analítica segundo a MFLE. O que acaba por justificar a

utilização do MMB, pois pode-se comparar os resultados provenientes da modelagem numérica com o resultado analítico segundo a MFLE.

O teste MMB consiste da combinação de dois modelos distintos, o Double Cantilever Beam – DCB, que trata-se de um modo de carregamento em modo I e o End Notched Flexure – ENF, que se trata de um modo de carregamento em modo II (Figura 5.26).

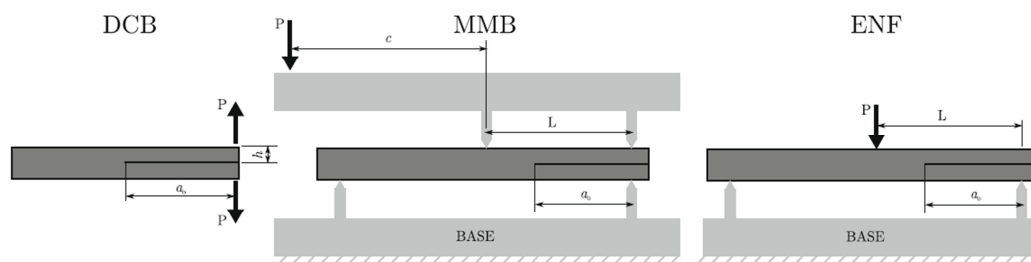


Figura 5.26: Modelos de fratura DCB, MMB E ENF.

Na simulação do modo misto foi adotado um modelo que consta de 10578 elementos de contínuo lineares tipo CPS4 e 683 elementos coesivos localizados em todo comprimento da viga à meia altura (Figura 5.27). A análise transcorreu com aplicação de carga em dois nós do modelo: na ponta da viga (uma carga voltada na direção vertical e sentido positivo) e outra carga no meio do vão da viga (direção vertical e sentido negativo). O controle adotado para a análise foi Riks (Abaqus *Documentation* 2011).

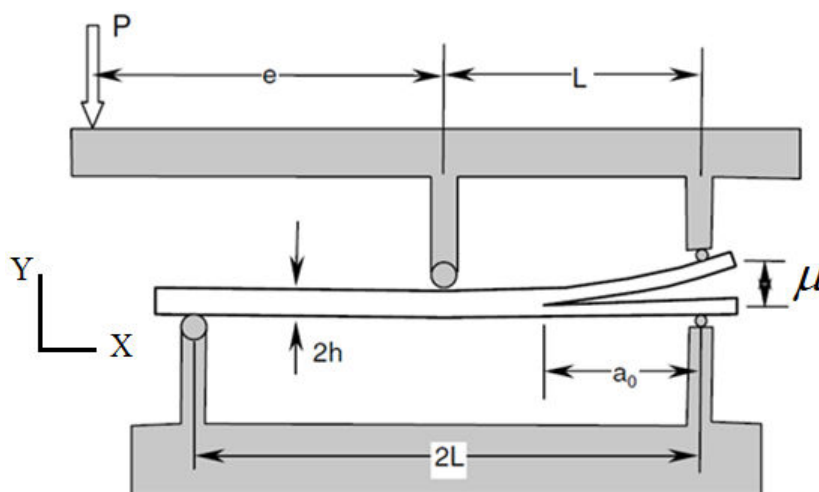


Figura 5.27: Modo misto de fratura, modelo teórico.

Foram assumidos os seguintes valores para o coeficiente de Poisson e para o Módulo de Elasticidade:

Tabela 18: Propriedades adotadas para o material.

E (GPa)	ν
35,58	0.2

A MFLE considera o modo misto uma superposição dos modos I e II puros no que diz respeito às tensões atuantes na trinca e a energia dissipada. Logo, foram utilizados como parâmetros dos elementos coesivos os valores obtidos nos modo I e modo II puros analisados anteriormente. Os valores das propriedades e parâmetros de entrada dos modelos utilizados são apresentados conforme as tabelas 19 e 20.

Tabela 19: Propriedades e parâmetros utilizados nos modelos constitutivos Bi-linear e Linear exponencial para o modo misto.

G_{IC} (KN/m)	G_{IIC} (KN/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\tau_{\max}$ (MPa)	K_{nn} (Pa/m)	K_{ss} (Pa/ m)
7	17,790	4,96	14,79	3,1195e+11	4,10833e+10

Tabela 20: Propriedades e parâmetros utilizados no modelo constitutivo PPR para o modo misto

ϕ_n (KN/m)	ϕ_t (KN/m)	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\tau_{\max}$ (MPa)	α	β	λ_n	λ_t
7	20,884	4,96	14,79	5	8	0,004554	0,064334

Vale ressaltar que para análise em modo misto no software Abaqus® são utilizados apenas os modelos coesivos Bi-linear e o PPR.

E para avaliar o resultado numérico têm-se as relações obtidas para o ensaio de MMB a partir da MFLE segundo a ASTM D6671/D6671M.

Na Figura 5.28 observa-se a deformada da viga em três momentos distintos da análise.

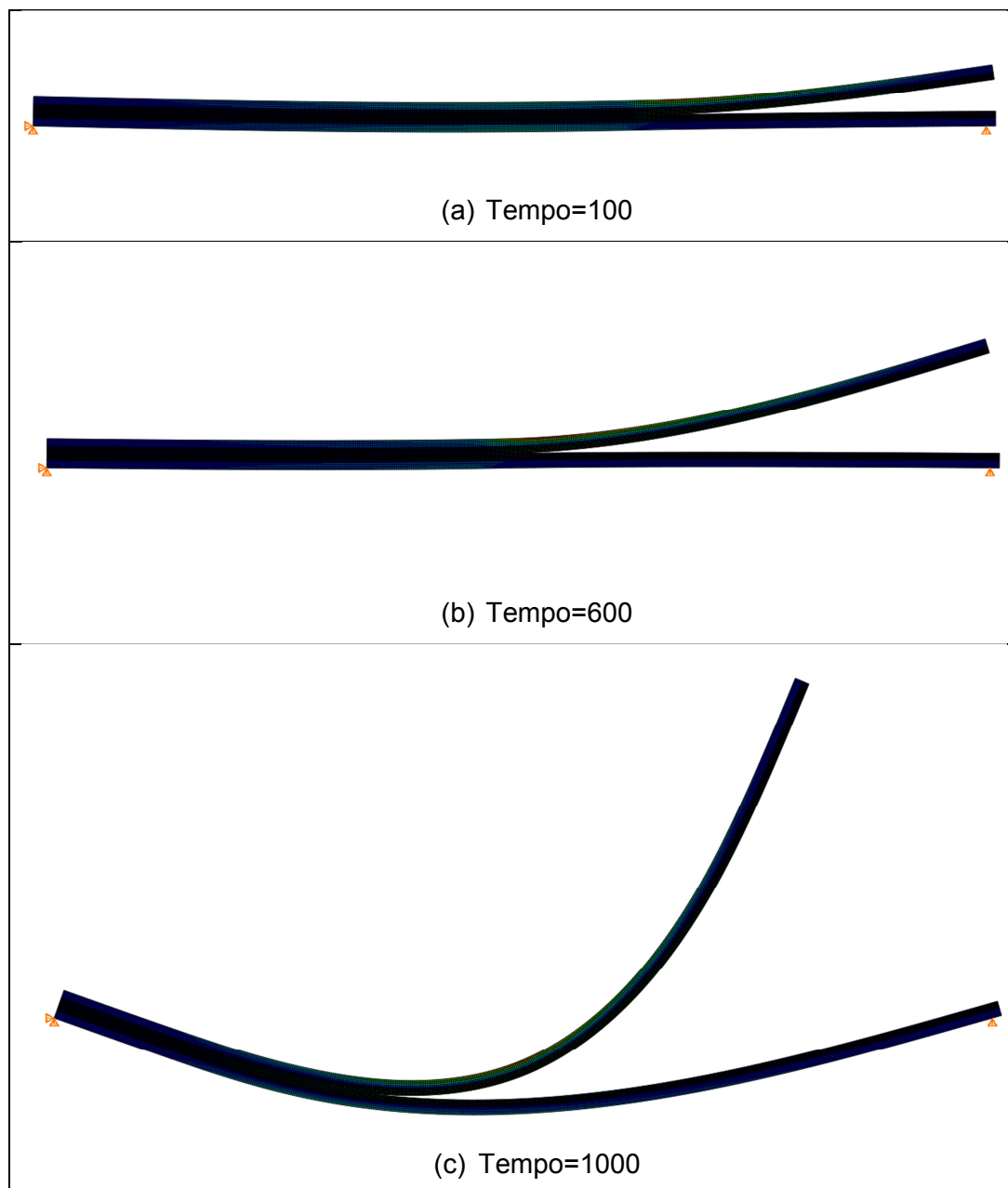


Figura 5.28: Deformada da Viga solicitada em modo misto.

Na Figura 5.29 têm-se os gráficos da tensão normal x deslocamento normal e tensão tangencial x deslocamento tangente, com as tensões sendo medidas no ponto de Gauss dos elementos de fratura coesiva e o deslocamento medido nos nós dos mesmos elementos.

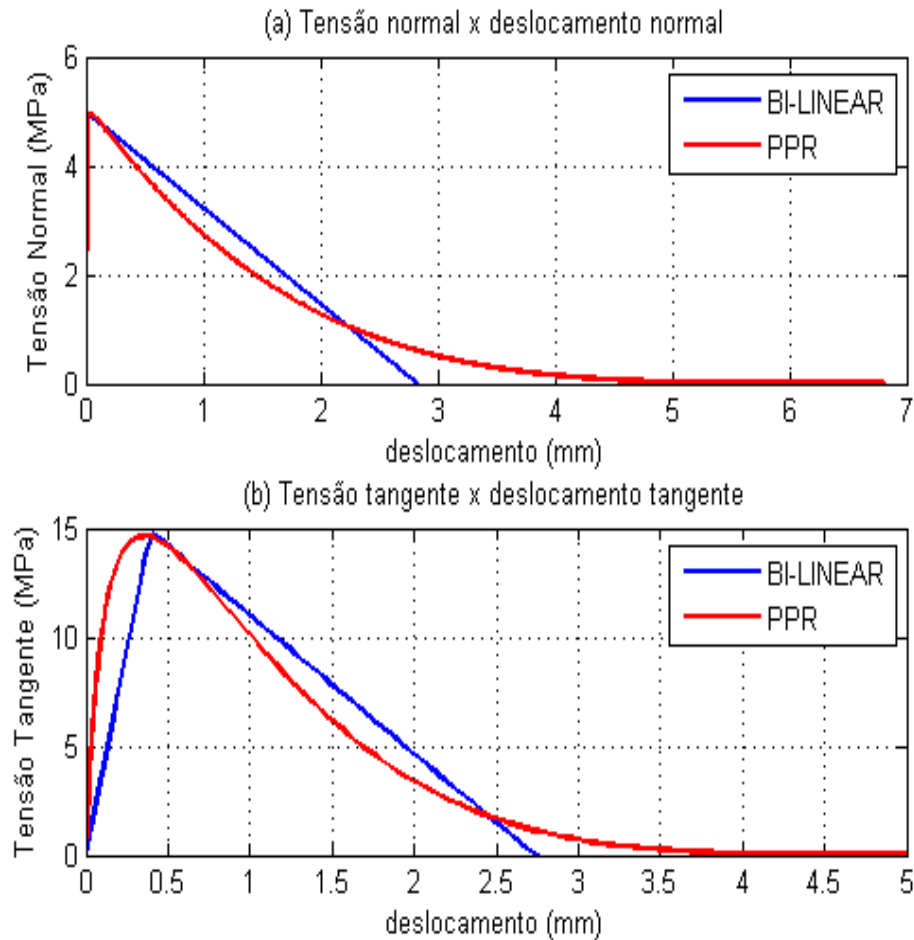


Figura 5.29: (a) Tensão normal x Deslocamento normal, (b) Tensão tangencial x Deslocamento tangente.

Percebe-se que as tensões normal e tangencial medidas no modo misto são praticamente as mesmas utilizadas nos ensaios de modos I e II puros estudados anteriormente. Os valores das tensões correspondem aos valores máximos fornecidos como parâmetro de entrada e os deslocamentos medidos para as tensões máximas correspondem aos mesmos dos modos puros segundo as Tabelas Tabela 7e Tabela 11.

Na Figura 5.30 tem-se o gráfico da força aplicada pela abertura da boca da trinca (μ) medindo o afastamento vertical entre as faces dos elementos coesivos colocado na altura média do modelo ao longo do comprimento.

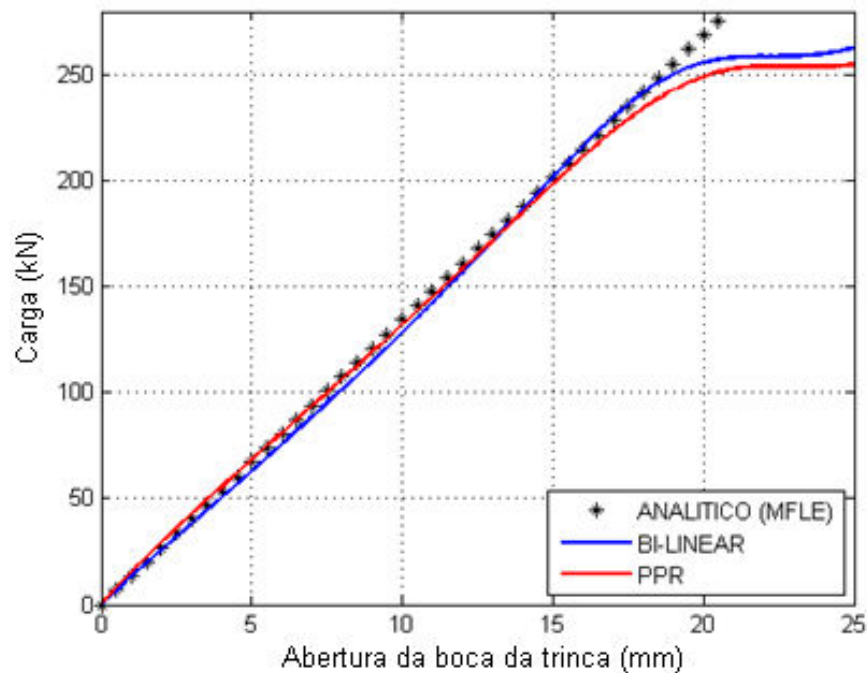


Figura 5.30: Carga aplicada x Abertura da boca da trinca (μ).

A partir deste gráfico revela-se que a ideia de extrapolar os parâmetros calibrados a partir dos modos I e II puros para o modo misto neste exemplo se faz válida, pelo menos na fase linear, segundo a MFLE. Tanto o modelo coesivo Bi-linear quanto o PPR seguem basicamente a mesma curva acompanhando a curva analítica. Esta última sobe indefinidamente, enquanto que para os elementos de fratura coesiva há o desvio de linearidade devido ter alcançado a tensão máxima fornecida ao programa. Assim os dois elementos alcançaram cargas máximas na ordem de 250 N.

A respeito da parte de amolecimento da Figura 5.30 este trabalho não pode inferir a exatidão dos resultados quantitativos por falta de resultados analíticos ou experimentais para este material.

Porém, Turon, Dávila, Camanho e Costa (2010) e Park e Paulino (2012) apresentam resultados numéricos para este ensaio de modo misto para outros tipos de materiais compósitos, e a forma das curvas referente ao amolecimento se assemelham muito a forma encontrada neste trabalho, do ponto de vista qualitativo e não quantitativo. Logo, pode-se concluir qualitativamente que o resultado aqui mostrado apresenta grande possibilidade de estar dentro de um intervalo aceitável de valores para a Carga aplicada x abertura da boca da trinca.