

6 Resultados Experimentais

O propósito deste capítulo é validar experimentalmente a metodologia apresentada nos capítulos anteriores através do programa computacional desenvolvido. O estudo é focado no comportamento elastoplástico das deformações próximas ao entalhe em uma barra retangular submetida a flexão. Para isso, um ensaio de flexão em quatro pontos é realizado em uma amostra de aço inox 304.

Primeiramente é descrito o procedimento para obtenção das propriedades mecânicas do material a ser ensaiado e, em seguida, é apresentada a configuração experimental adotada. Na parte final do capítulo são apresentados os resultados obtidos experimentalmente em laboratório. É feita a comparação com modelos semi-empíricos de previsão de efeitos de concentração de deformações, simulações utilizando o programa de Elementos Finitos ANSYS e medições feitas com o sistema de medição visual VIC-3D da empresa *Correlated Solutions*.

6.1. Caracterização do Material

A caracterização mecânica do aço inox 304 é feita segundo a norma ASTM E646-07. Para isso, um ensaio de tração uniaxial é executado em um corpo de prova do material, de forma e dimensões mostradas na Fig. 6.1.

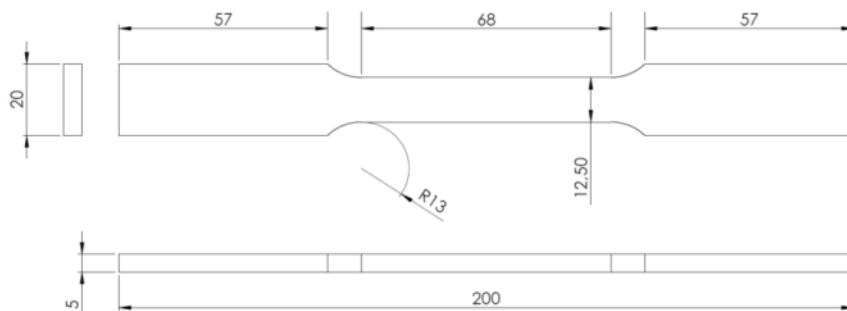


Figura 6.1 Geometria do corpo de prova utilizado para caracterização do aço 304 (dimensões em milímetros).

A Fig. 6.2 apresenta a curva tensão-deformação de engenharia obtida diretamente do ensaio de tração, e a sua respectiva curva tensão-deformação real transformada pelas relações:

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_{eng} (1 + \varepsilon_{eng}) \\ \varepsilon &= \ln(1 + \varepsilon_{eng})\end{aligned}\quad (6.1)$$

onde (σ, ε) são os pares de pontos na curva tensão-deformação real e, $(\sigma_{eng}, \varepsilon_{eng})$ os pares de pontos na curva tensão-deformação de engenharia.

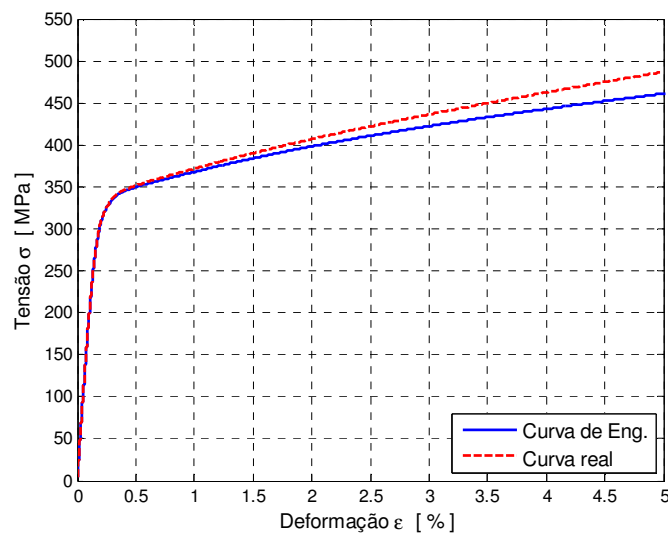


Figura 6.2 Curva σ - ε de engenharia e real para o aço inox 304.

A partir desse gráfico são extraídas algumas propriedades mecânicas do material, como o módulo de elasticidade (vide Fig. 6.3) e a resistência ao escoamento, $S_y = 345$ MPa.

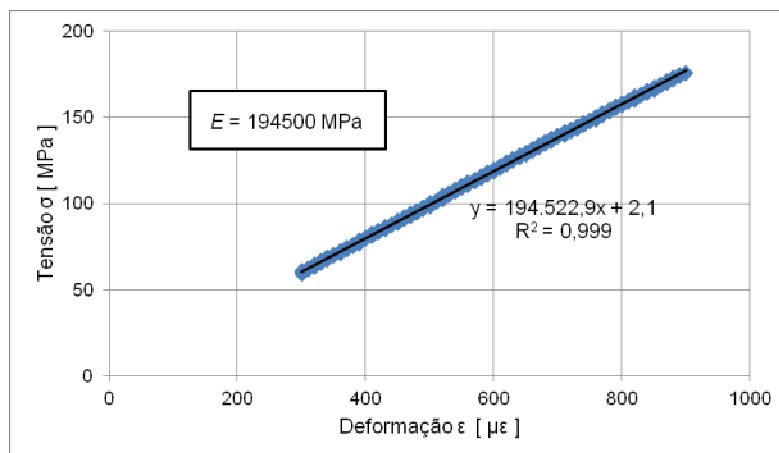


Figura 6.3 Determinação do módulo de elasticidade para o aço inox 304.

O coeficiente H e o expoente h de encruamento monotônico são determinados de acordo com o procedimento estabelecido na norma ASTM E646-07 (ASTM E646, 2007). Na Fig. 6.4 é mostrado o cálculo de H e h através do ajuste de uma reta aos dados tensão real versus deformação plástica real plotados em coordenadas *log-log*.

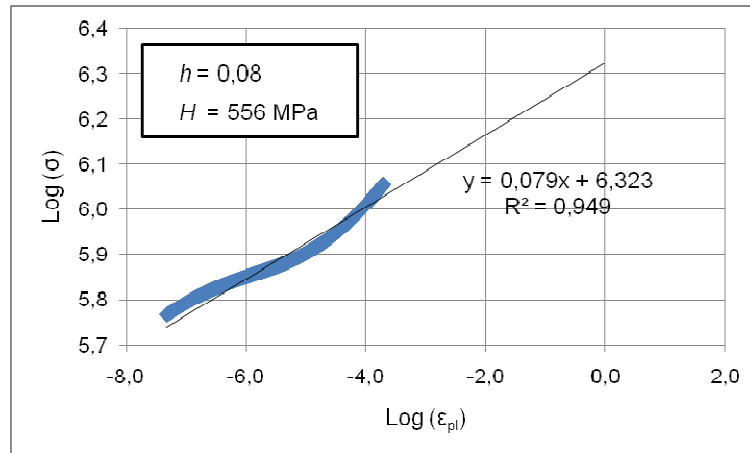


Figura 6.4 Ajuste do coeficiente H e do expoente h para o aço 304.

A Fig. 6.5 apresenta a curva tensão-deformação real monotônica modelada utilizando os parâmetros de encruamento ajustados anteriormente, através do modelo proposto por Ramberg-Osgood (1943):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H} \right)^{1/h} \quad (6.2)$$

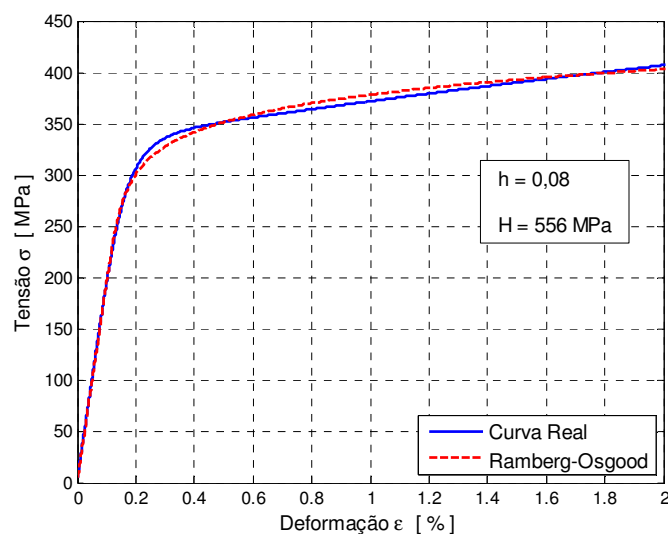


Figura 6.5 Ajuste de Ramberg-Osgood para o aço 304.

6.2. Montagem Experimental

Neste ensaio, o corpo de prova utilizado é uma barra retangular, no qual foi usinado um entalhe com formato semicircular de raio igual a 12,5 mm, conforme mostra o desenho da Fig. 6.6.

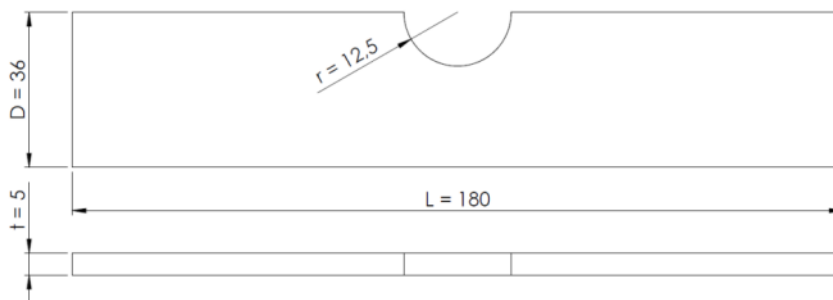


Figura 6.6 Geometria do corpo de prova utilizado para o ensaio de flexão (dimensões em milímetros).

Uma região de interesse na superfície do corpo de prova foi devidamente acondicionada conforme procedimento descrito na Seção 5.1, executado com tinta branca de fundo e salpicos de tinta preta, como mostrado na Fig. 6.7.



Figura 6.7 Corpo de prova utilizado no ensaio de flexão em quatro pontos.

As duas câmeras do sistema de visão estereoscópico são posicionadas em frente ao corpo de prova, e calibradas conforme descrito na Seção 5.3. Esta configuração das câmeras fornece um campo de visão equivalente a $34,9 \times 29,2 \text{ mm}^2$, com uma resolução de imagem de $14,3 \text{ }\mu\text{m/pixel}$ no plano do objeto. Um sistema de iluminação por fibra óptica foi posicionado a uma distância conveniente da superfície do material.

A configuração experimental do ensaio de flexão em quatro pontos é mostrada esquematicamente na Fig. 6.8. Os comprimentos dos vãos menor e maior são de $L_s = 80$ mm e $L_i = 160$ mm, respectivamente.

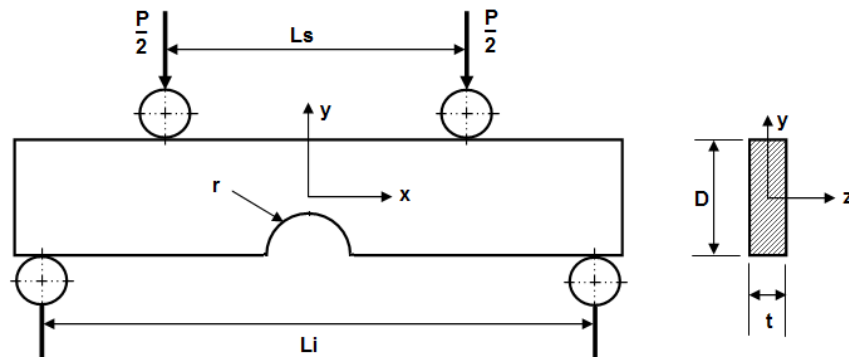


Figura 6.8 Viga retangular com entalhe semicircular submetida a flexão em quatro pontos.

O ensaio de flexão em quatro pontos foi realizado na máquina universal Instron® modelo 4411, pertencente ao Laboratório de Fadiga da PUC-Rio. Dispositivos adequados para este tipo de ensaio mecânico são fixados na máquina, como mostrado na Fig. 6.9.

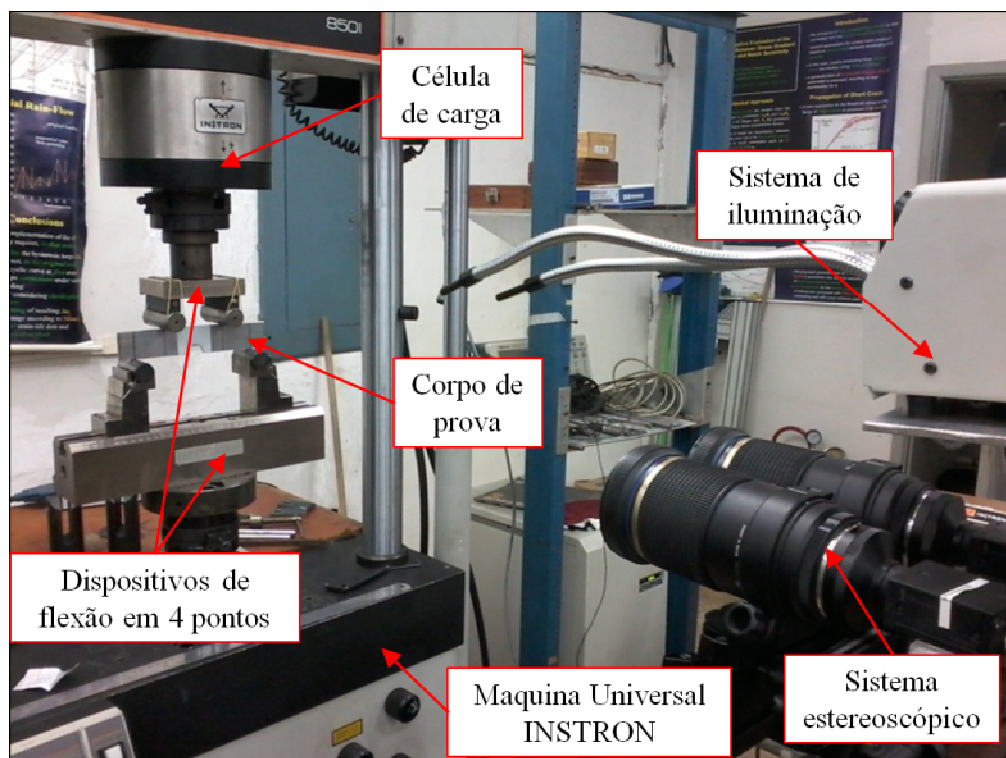


Figura 6.9 Montagem experimental.

A imagem de referência é capturada no início do ensaio, antes da aplicação dos carregamentos. Em seguida, foram aplicados incrementos sucessivos de carga P da ordem de 0,5 kN, até atingir $P = 12$ kN. Em cada incremento de força foram capturadas as respectivas imagens.

6.3. Análise a partir de Modelos Semi-Empíricos

Para a geometria em questão, o valor do coeficiente de concentração de tensão linear elástico K_t é calculado a partir de simulações 3-D utilizando o *software* de elementos finitos ANSYS. Os resultados das simulações são apresentados na Tab. 6.1.

Tabela 6.1 Resultados obtidos para o cálculo do K_t linear elástico.

Carga [N]	Deformação Nominal [$\mu\epsilon$]	Deformação Máxima [$\mu\epsilon$]	K_t
2000	446	639	1,43
3000	670	959	1,43
4000	893	1279	1,43

A seguir, são discutidas as regras semi-empíricas de concentração de tensões utilizadas na análise.

6.3.1. Regra de Neuber

A regra de Neuber consiste no método de aproximação local mais frequentemente utilizado no cálculo de tensões e deformações elastoplásticas locais. Se o material seguir a relação de Ramberg-Osgood (Equação 6.2), para o regime elastoplástico localizado tem-se:

$$K_t^2 \frac{\sigma_n^2}{E} = \frac{\sigma_m^2}{E} + \sigma_m \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.3)$$

Esta equação assume, no entanto, que as tensões nominais são elásticas. Seeger e Heuler (1980) mostraram a aplicabilidade da generalização da regra de Neuber a carregamentos monotônicos em que a tensão nominal é próxima ou superior à resistência de escoamento do material. Nesta situação, são consideradas

duas equações de Ramberg-Osgood, uma para descrever as tensões que atuam na raiz do entalhe e a outra para modelar as tensões nominais, que ao serem equacionadas resultam em (Castro e Meggiolaro, 2009):

$$K_t^2 \left[\frac{\sigma_n^2}{E} + \sigma_n \left(\frac{\sigma_n}{H} \right)^{1/h} \right] = \frac{\sigma_m^2}{E} + \sigma_m \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.4)$$

6.3.2. Regra de Molski e Glinka

Glinka propõe para o cálculo das tensões e deformações locais o método da energia de deformação equivalente, que se traduz pela seguinte expressão para tensões nominais elásticas:

$$K_t^2 \cdot \frac{\sigma_n^2}{2E} = \frac{\sigma_m^2}{2E} + \frac{\sigma_m}{1+h} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.5)$$

Se a tensão nominal for próxima ou superior à resistência de escoamento, então a Eq. (6.5) toma a forma (Castro e Meggiolaro, 2009):

$$K_t^2 \cdot \left[\frac{\sigma_n^2}{2E} + \frac{\sigma_n}{1+h} \cdot \left(\frac{\sigma_n}{H} \right)^{1/h} \right] = \frac{\sigma_m^2}{2E} + \frac{\sigma_m}{1+h} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.6)$$

6.3.3. Regra de Neuber Modificada

Na referência Lee *et al.*(2005) é apresentada uma versão modificada da tensão nominal, σ_n^M , para casos de plasticidade generalizada na presença de gradientes de tensão, proposta por Seeger e Heuler (1980):

$$\sigma_n^M = \sigma_n \left(\frac{K_t}{K_p} \right) \quad (6.7)$$

onde K_p é chamado de fator de plasticidade do entalhe, definido por:

$$K_p = \frac{L_p}{L_y} \quad (6.8)$$

onde L_y e L_p são as cargas de escoamento e de colapso plástico, respectivamente, do componente e carregamento estudados.

Para o caso da barra retangular com entalhe semicircular sujeita a flexão, a tensão nominal é calculada baseada na área líquida da placa descontando a área do entalhe.

Assim, seja uma viga de comprimento L , seção retangular de altura $(D - r)$ e base t , e seja o material dúctil modelado como elastoplástico sem encruamento, o valor de K_p é então calculado da seguinte forma:

$$K_p = \frac{S_y \cdot \left(\frac{t \cdot (D-r)^2}{4} \right)}{S_y \cdot \left(\frac{t \cdot (D-r)^2}{6} \right)} = 1,5 \quad (6.9)$$

onde S_y é a resistência ao escoamento do material.

Logo, os valores modificados de tensão e deformação, no corpo de prova submetido à flexão, são definidos pelas seguintes relações:

$$\sigma_n^M = \frac{\sigma_n \cdot K_t}{1,5} \quad (6.10)$$

$$\epsilon_n^M = \frac{\sigma_n^M}{E} + \left(\frac{\sigma_n^M}{H} \right)^{1/h} \quad (6.11)$$

Um fator de concentração de tensões modificado, K_t^M , associado à tensão modificada da Eq. (6.10) é definido por:

$$\sigma_n^M \cdot K_t^M = \sigma_n \cdot K_t \quad (6.12)$$

E, desta forma, a regra de Neuber pode ser reescrita:

$$\left(K_t^M \right)^2 \cdot \sigma_n^M \cdot \epsilon_n^M = \frac{\sigma_m^2}{E} + \sigma_m \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.13)$$

Finalmente, a regra de Neuber modificada é rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{(\sigma_n \cdot K_t)^2}{E} = \frac{\sigma_m^2}{E} + \sigma_m \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.14)$$

Se a tensão nominal for próxima ou superior à resistência ao escoamento, então a equação anterior toma a forma:

$$\left(K_t^M\right)^2 \left[\frac{\left(\sigma_n^M\right)^2}{E} + \sigma_n^M \left(\frac{\sigma_n^M}{H} \right)^{1/h} \right] = \frac{\sigma_m^2}{E} + \sigma_m \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.15)$$

Em função de K_t , K_p e σ_n :

$$\sigma_n \cdot K_t \cdot K_p \left[\frac{\sigma_n \cdot K_t}{K_p \cdot E} + \left(\frac{\sigma_n \cdot K_t}{K_p \cdot H} \right)^{1/h} \right] = \frac{\sigma_m^2}{E} + \sigma_m \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.16)$$

onde $K_p = 1,5$, para a viga em flexão (Eq. 6.9).

6.3.4. Regra Molski e Glinka Modificada

O mesmo procedimento descrito na seção anterior, aplicado para modificar a regra de Neuber, será adotado para modificar a regra de Molski e Glinka (Eq. 6.5). Desse modo,

$$\frac{K_t^2 \cdot \sigma_n^2}{3E} = \frac{\sigma_m^2}{2E} + \frac{\sigma_m}{1+h} \cdot \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.17)$$

E, se a tensão nominal for próxima ou superior à tensão de escoamento, tem-se:

$$\left(K_t^M\right)^2 \left[\frac{\left(\sigma_n^M\right)^2}{2E} + \frac{\sigma_n^M}{1+h} \left(\frac{\sigma_n^M}{H} \right)^{1/h} \right] = \frac{\sigma_m^2}{2E} + \frac{\sigma_m}{1+h} \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.18)$$

Em função de K_t , K_p e σ_n :

$$K_p \left[\frac{\left(\sigma_n \cdot K_t\right)^2}{3 \cdot E} + \frac{\sigma_n \cdot K_t}{1+h} \left(\frac{\sigma_n \cdot K_t}{K_p \cdot H} \right)^{1/h} \right] = \frac{\sigma_m^2}{2E} + \frac{\sigma_m}{1+h} \left(\frac{\sigma_m}{H} \right)^{1/h} \quad (6.19)$$

onde $K_p = 1,5$, para a viga em flexão (Eq. 6.9).

6.4. Análise por Elementos Finitos

O *software* Ansys foi também utilizado para realizar as simulações elastoplásticas pertinentes ao método de Elementos Finitos, de modo a avaliar e comparar os resultados obtidos experimentalmente. Para tanto, foi construído um

modelo tridimensional a partir das propriedades do material e dimensões do corpo de prova.

A malha utilizada nas simulações, mostrada na Fig. 6.10, é composta de elementos tetraédricos quadráticos. Nota-se que foi feito um maior refinamento da malha na região próxima do entalhe, com a finalidade de poder registrar de maneira mais precisa o efeito da mudança no campo de deformações.

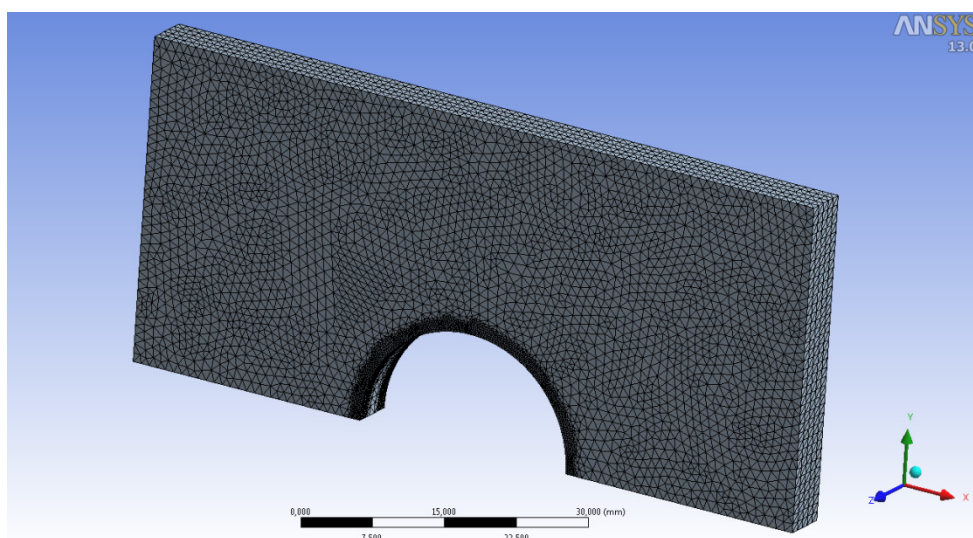


Figura 6.10 Discretização do modelo do corpo de prova em elementos finitos.

Para simular o comportamento elastoplástico do material foi adotado um modelo multilinear isotrópico, o qual é descrito por uma curva tensão-deformação plástica do material iniciando com valor de deformação plástica igual a zero (vide Fig. 6.11). Mais detalhes sobre a utilização do *software* ANSYS Workbench podem ser encontrados no manual do programa (Ansys, 2009).

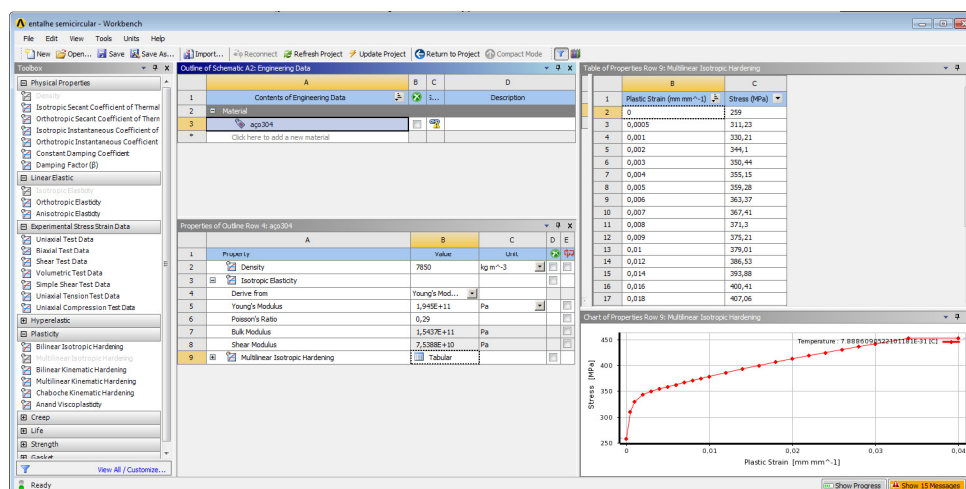


Figura 6.11 Exemplo de configuração do modelo de encruamento em ANSYS.

6.5. Análise Utilizando o **Software VIC-3D**

Após a captura das imagens do ensaio, as mesmas são exportadas diretamente para o *software* VIC-3D 2010®, onde é realizada a calibração do sistema e as correlações das imagens do espécime avaliado.

Entre os principais parâmetros a serem configurados no programa, pode-se citar o tamanho da janela de correlação (*subset*), e o tamanho do passo da varredura dentro da área de interesse (*step*). Mais detalhes sobre a utilização do VIC-3D podem ser encontrados no manual do programa em (VIC-3D, 2010).

Para a análise apresentada neste capítulo, foi utilizado um tamanho de janela de 31/31 *pixels* e um tamanho de passo de 15 *pixels*, que foram os que apresentaram os melhores resultados na obtenção do campo de deformações na vizinhança do entalhe. A Fig. 6.12 apresenta a tela principal do programa, onde é mostrada a discretização da região de interesse com estes parâmetros.

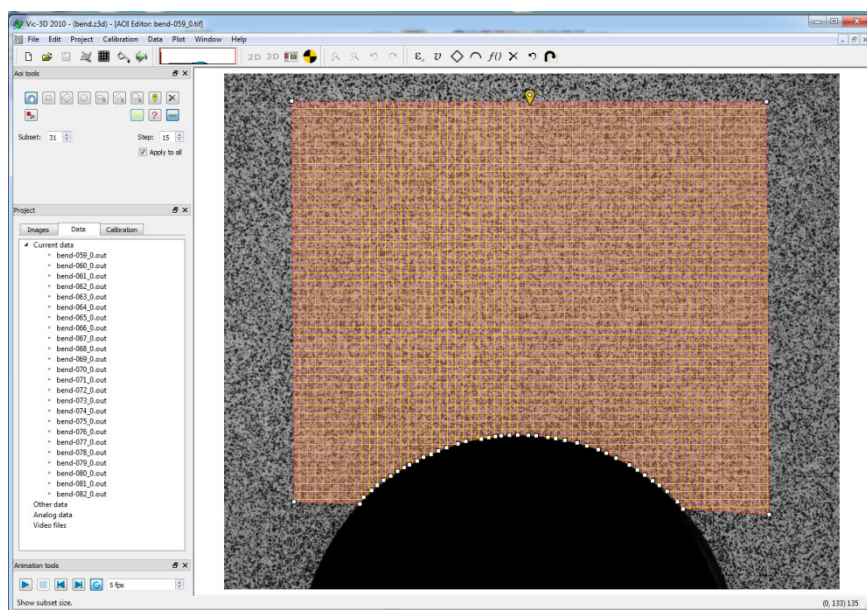


Figura 6.12 Região de interesse analisada no *software* VIC-3D.

6.6. Análise Utilizando o Método SIFT-Meshless

No método proposto nesta tese, depois da escolha da região de interesse, as imagens são processadas pelo algoritmo SIFT. Na Fig. 6.13 são mostrados os pontos homólogos extraídos do par-estéreo correspondente à imagem de referência.

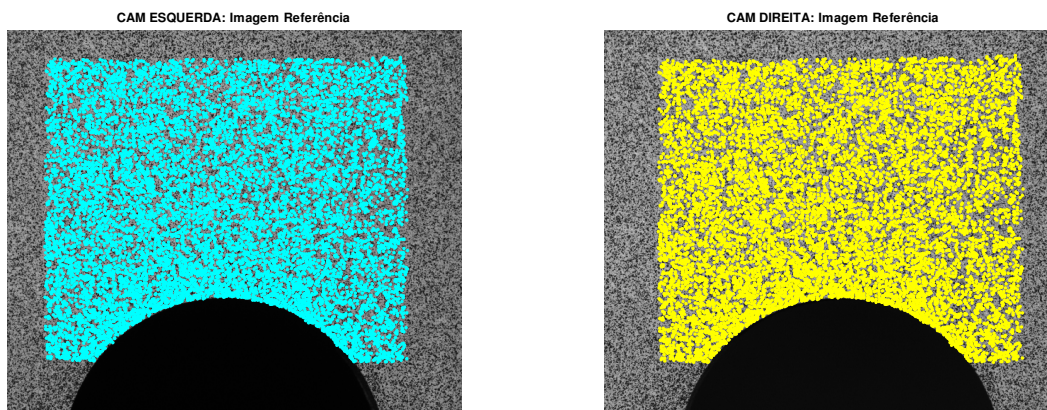


Figura 6.13 Pontos correspondentes localizados na imagem de referência pelo algoritmo SIFT.

A Tab. 6.2 apresenta detalhes sobre o processamento das imagens estéreo capturados para cada valor de carga aplicada.

Tabela 6.2 Detalhes do processamento SIFT para o corpo de prova metálico.

Carga [N]	N° de <i>matches</i>			Tempo (seg) ^(*)
	Par-Estéreo Referência	Par-Estéreo Deformada	Referência/ Deformada	
2000	15737	15539	9688	271
3000	15891	15676	9246	270
4000	15928	15811	8813	271
5000	15733	15581	8344	275
6000	15798	15610	8366	261
7000	15691	15541	8064	275
8000	15670	15521	7879	268
9000	15905	15485	7584	279
10000	15979	15786	7437	275
11000	15603	15338	7137	269
12000	15921	15677	6995	265

(*)Intel core i7,processador 2.2GHz.

Na formulação sem malha, o domínio de influência é circular com raio de influência mínimo, d_i , igual a 2,5 mm, como mostrado na Fig. 6.14. A função peso adotada é a função Gaussiana (Eq. 4.41) com parâmetros $b = 2$ e $k = 1$.

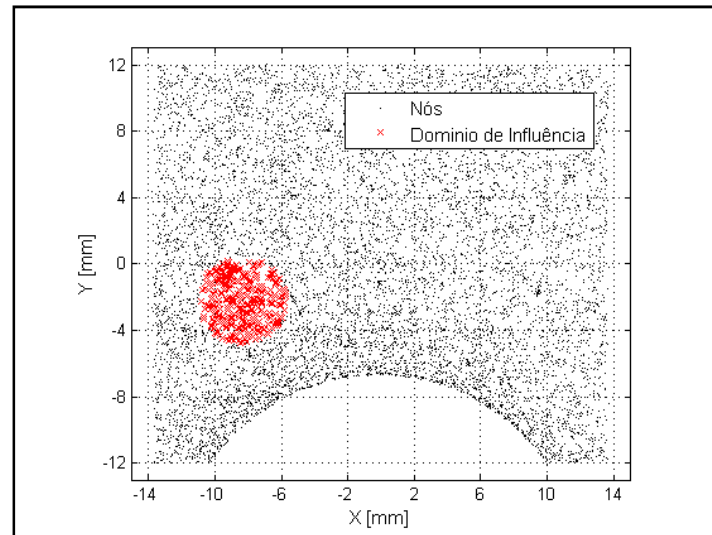


Figura 6.14 Nós no domínio do problema e domínio de influência mínimo ($d_i = 2,5$ mm) utilizados na formulação sem malha.

6.7. Comparação de Resultados

A seguir são apresentadas as saídas gráficas para a componente de deformação na direção horizontal x , geradas pelo programa desenvolvido. A Fig. 6.15 corresponde ao valor de carga de 4 kN, ainda no regime elástico, e a Fig. 6.16 ao valor de carga de 8 kN, quando se tem deformações elastoplásticas na raiz do entalhe.

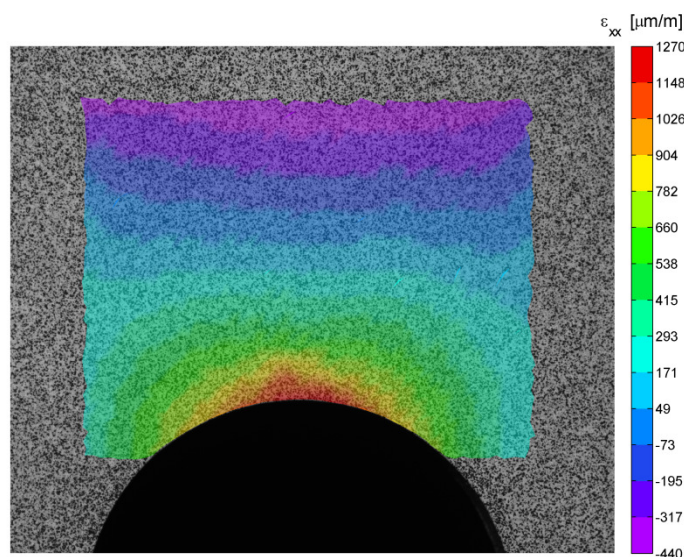


Figura 6.15 Campo de deformações na direção horizontal x obtido pelo método SIFT-Meshless para a carga de 4 kN.

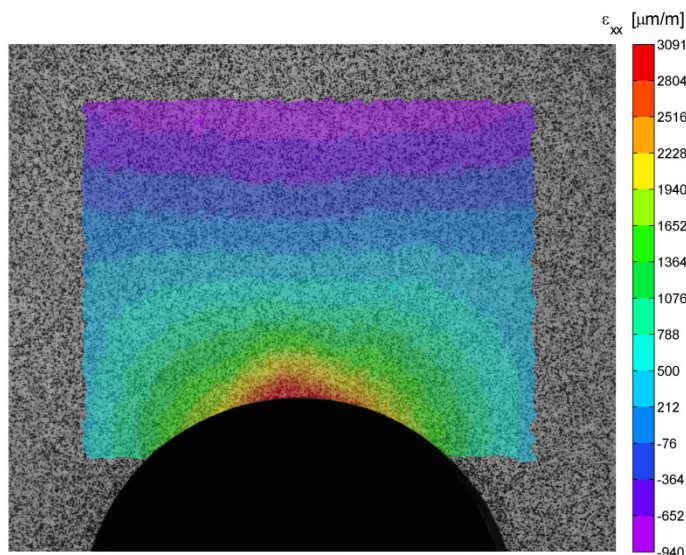


Figura 6.16 Campo de deformações na direção horizontal x obtido pelo método SIFT-Meshless para a carga de 8 kN.

Nas Figs. 6.15 e 6.16 identificam-se claramente os efeitos da concentração de deformações na região do entalhe, onde o pico máximo de deformação aparece na região próxima ao elemento concentrador de tensões. O valor positivo da deformação máxima é consequência do momento fletor aplicado no corpo de prova, que provoca esforços de tração na parte inferior da viga e esforços de compressão na parte superior.

As Figs. 6.17 e 6.18 apresentam as saídas gráficas processadas pelo *software* VIC-3D para os mesmos valores de carga 4 kN e 8 kN, respectivamente. Os resultados correspondem à configuração de parâmetros definida na Seção 6.5.

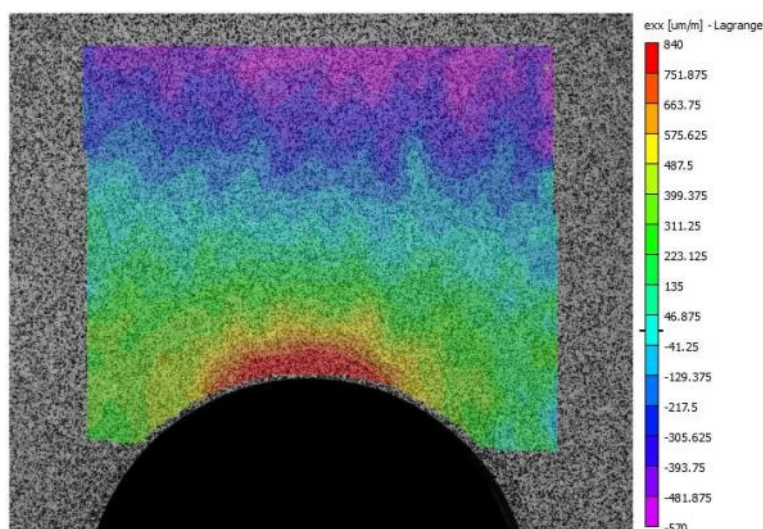


Figura 6.17 Campo de deformações na direção horizontal x obtido pelo *software* VIC-3D para a carga de 4 kN.

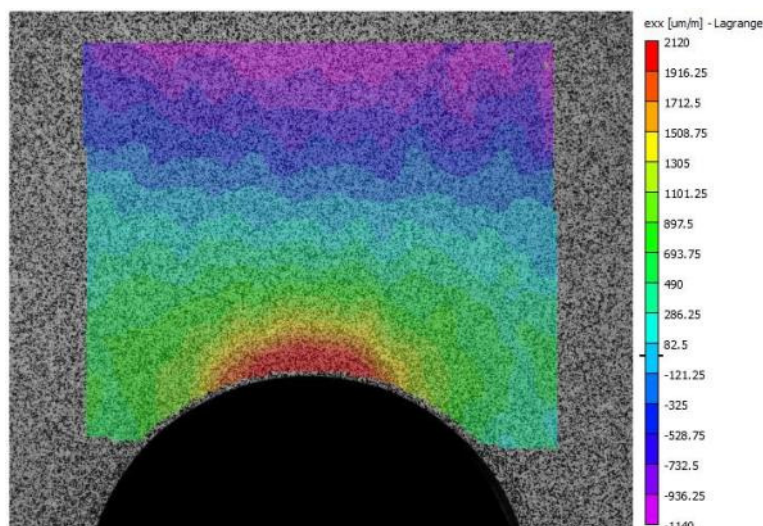


Figura 6.18 Campo de deformações na direção horizontal x obtido pelo *software* VIC-3D para a carga de 8 kN.

Em seguida, os resultados da análise tridimensional por Elementos Finitos utilizando o *software* ANSYS, para as mesmas condições de carga, são mostrados nas Figs. 6.19 e 6.20. As simulações são realizadas utilizando a discretização do modelo definida na Seção 6.4.

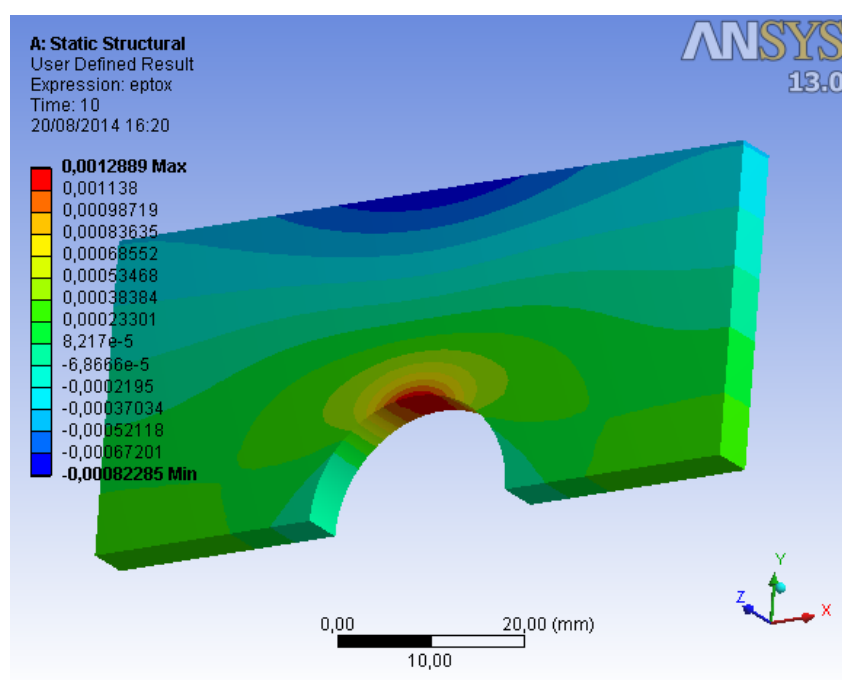


Figura 6.19 Campo de deformações na direção horizontal x obtido pelo *software* ANSYS para a carga de 4 kN.

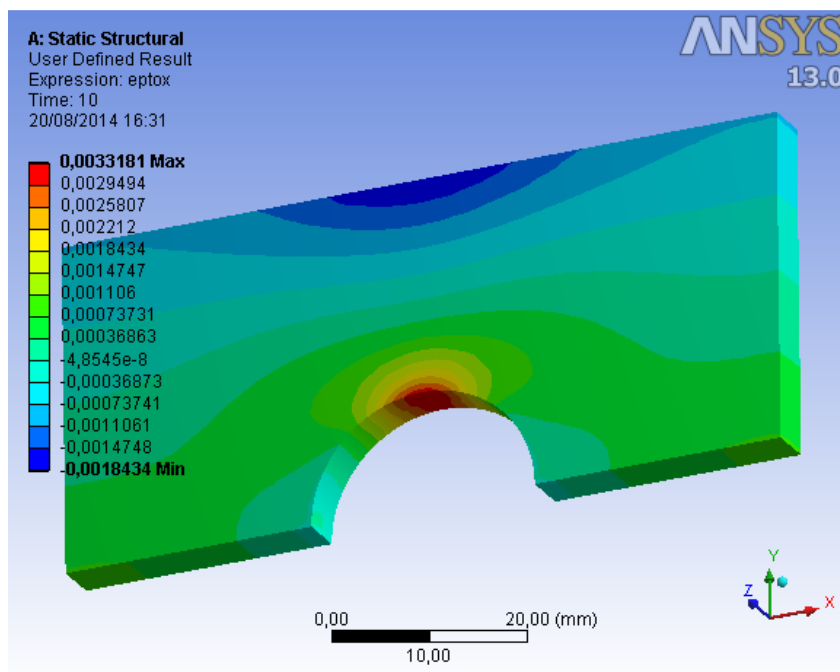


Figura 6.20 Campo de deformações na direção horizontal x obtido pelo *software* ANSYS para a carga de 8 kN.

Para se verificar a concordância dos resultados, primeiramente são comparados os resultados experimentais obtidos pelo método proposto SIFT-Meshless com os resultados numéricos das simulações utilizando ANSYS. Para isto, ambas as respostas são mostradas na mesma escala. As Figs. 6.21 e 6.22 mostram os resultados da comparação, onde uma boa coerência entre as respostas pode ser observada.

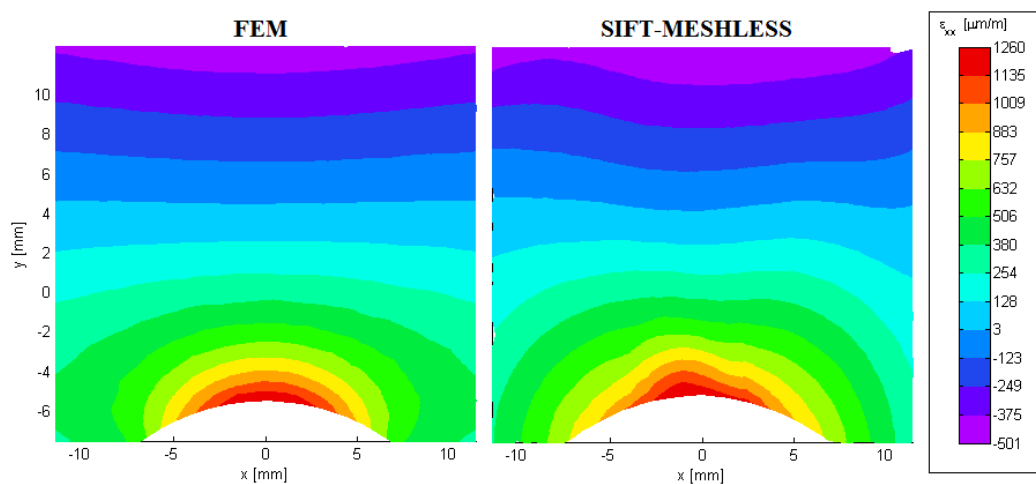


Figura 6.21 Comparação entre resultados numérico e experimental para a componente de deformação na direção horizontal x com carga 4 kN.

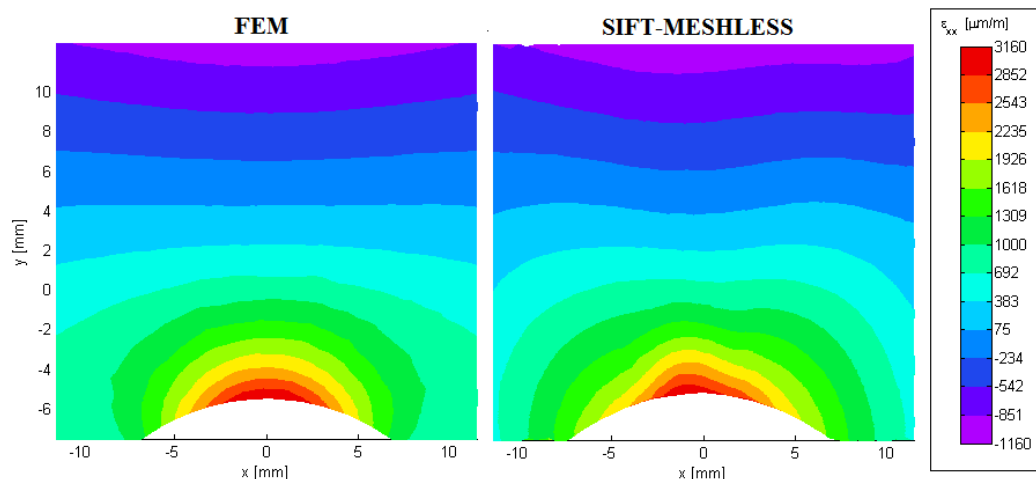


Figura 6.22 Comparação entre resultados numérico e experimental para a componente de deformação na direção horizontal x com carga de 8 kN.

Os resultados relativos à máxima deformação prevista para a componente na direção horizontal, ε_{xx} , oferecidos pelo método SIFT-Meshless, simulações por Elementos Finitos e pelas análises semi-empíricas são apresentadas na Tab. 6.3.

Tabela 6.3 Resultados de máxima deformação na direção horizontal x .

Carga [N]	Valores de deformação máxima ε_{xx} [$\mu\epsilon$]					
	Neuber	M&G	Neuber Mod.	M&G Mod.	MEF ANSYS	SIFT-Meshless
2000	639	638	639	639	639	600
3000	960	960	960	960	959	1011
4000	1297	1285	1297	1285	1279	1213
5000	1728	1628	1725	1628	1599	1585
6000	2261	2004	2220	1971	2021	1985
7000	2867	2489	2738	2362	2499	2462
8000	3616	3139	3298	2831	3113	3091
9000	4660	4150	4041	3471	3933	3820
10000	6347	5770	5158	4532	5093	5078
11000	9457	8818	7122	6411	6908	6648
12000	16188	15096	11257	10455	10109	9372

Para uma melhor visualização, dois gráficos são montados a partir da Tab. 6.3 e mostrados nas Figs. 6.23 e 6.24. Na Fig. 6.23 são mostrados os valores correspondentes à regra de Neuber (Equação 6.4), regra de Molski-Glinka

(Equação 6.6), Elementos Finitos e método SIFT-Meshless. Na segunda figura são mostrados os valores correspondentes à regra de Neuber modificada (Equação 6.16), regra de Molski-Glinka modificada (Equação 6.19) e método SIFT-Meshless.

Observando a Fig. 6.23 pode ser apreciada uma elevada correspondência entre os valores de deformação obtidos pelo método SIFT-Meshless e o método de Elementos Finitos. Note que as regras tradicionais de Neuber e Molski-Glinka superestimam as deformações ε_{xx} , mesmo considerando tensões nominais como elastoplásticas, em especial para maiores carregamentos envolvendo muita plasticidade localizada. A interação elastoplástica entre os gradientes de tensão nominal (devido à flexão) e de tensão no entalhe não é computada pelas regras tradicionais, sendo, no entanto, muito bem previstas pelas regras modificadas apresentadas, como verificado na Fig. 6.24.

As diferenças entre as previsões do fator de concentração de deformações elastoplástico, K_e , para o caso da barra fletida, aplicando as regras tradicionais de Neuber e Molski-Glinka e as regras modificadas são mostradas na Fig. 6.25. Nesta figura, os valores de K_e foram obtidos considerando a tensão nominal como elástica utilizando a Lei de Hooke. Nota-se que, a igualdade $K_t = K_e$ vale apenas no caso linear elástico, pois $K_t < K_e$ quando a tensão nominal está próxima ou é superior à resistência ao escoamento do material.

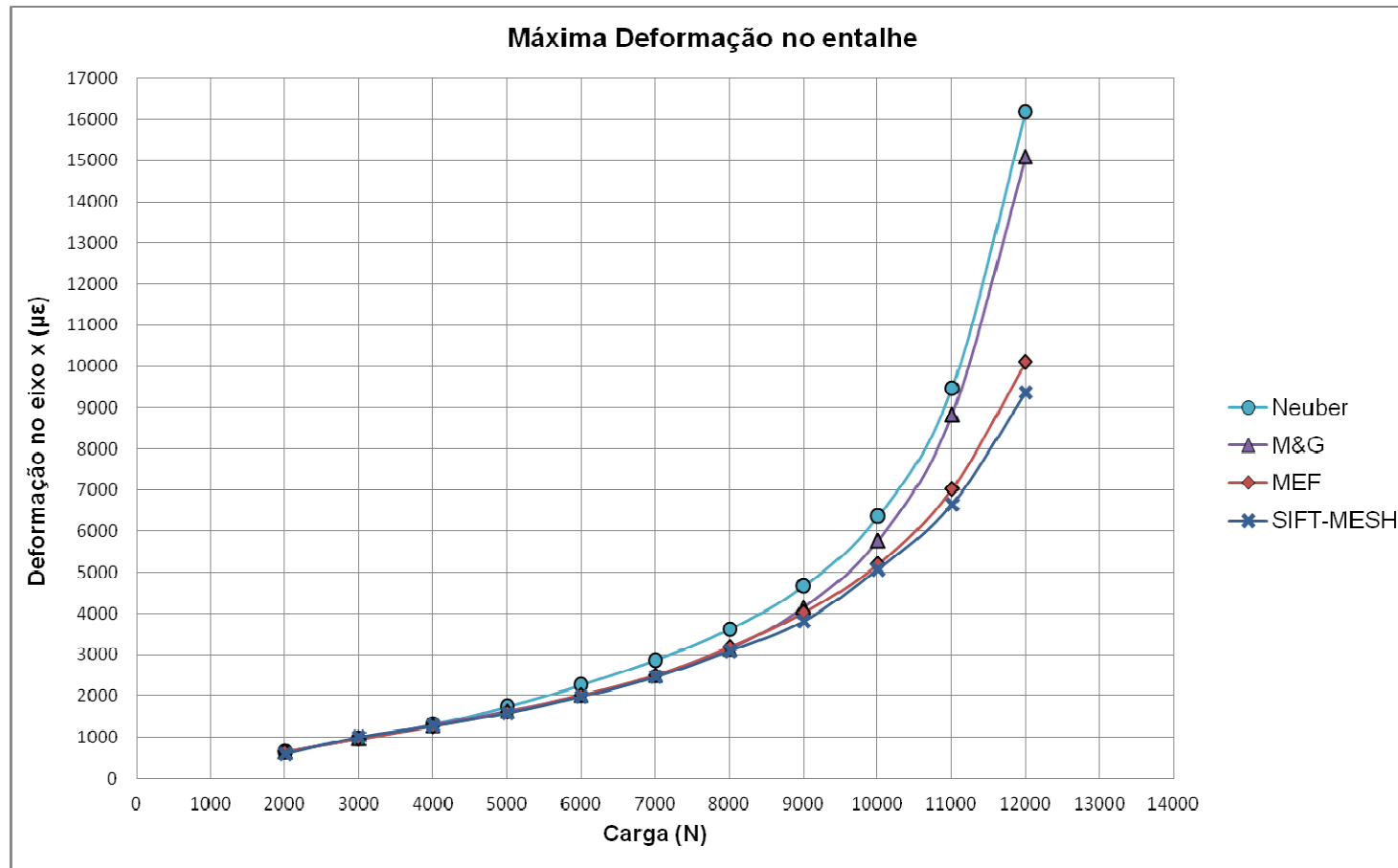


Figura 6.23 Comparação de resultados para deformação máxima na direção horizontal x obtidos pelas regras de Neuber e Molsky-Glinka, o Método de Elementos Finitos (ANSYS), e o método SIFT-Meshless.

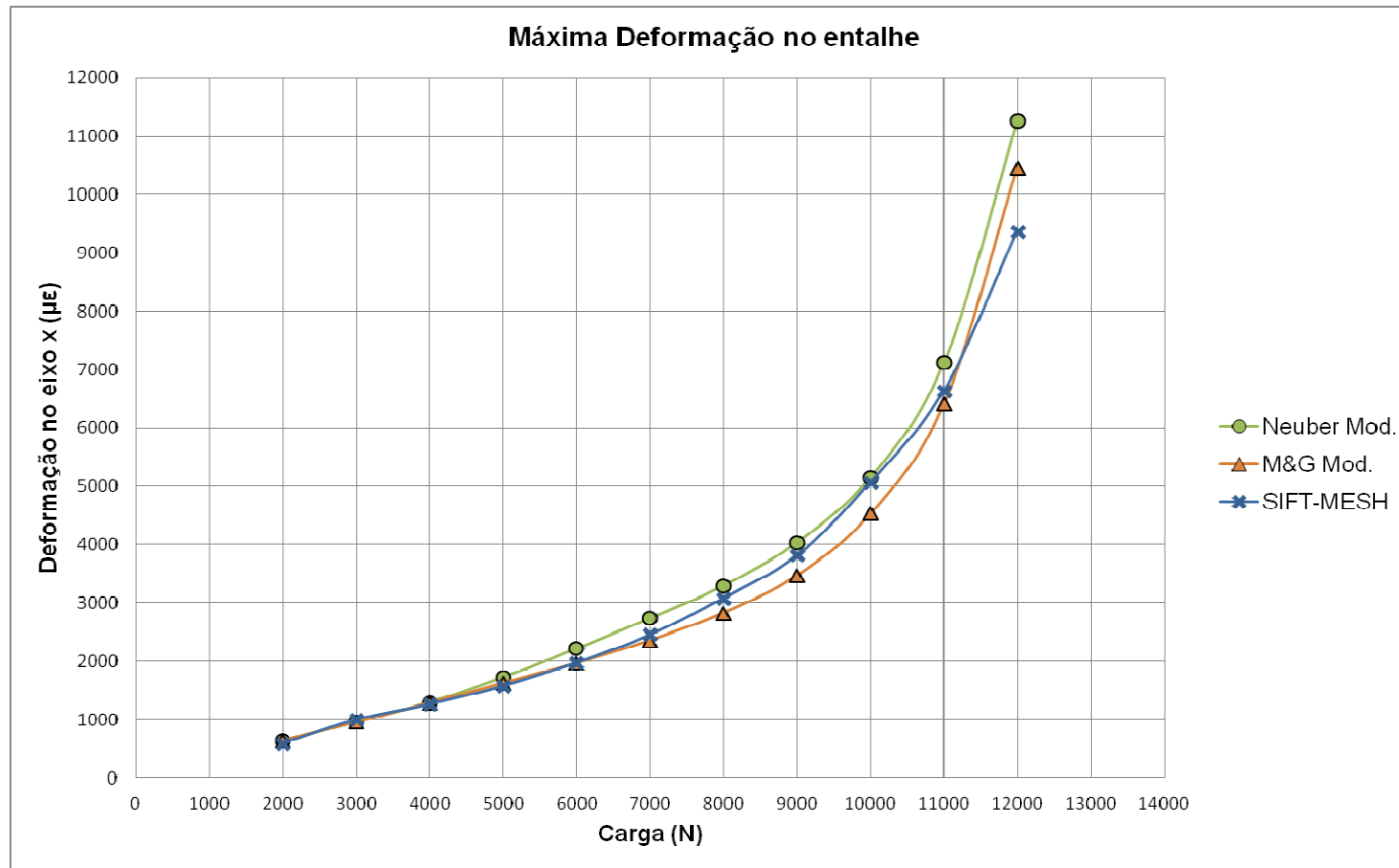


Figura 6.24 Comparação de resultados para deformação máxima na direção horizontal x obtidos pelas regras modificadas de Neuber e Molski-Glinka, e o método SIFT-Meshless.

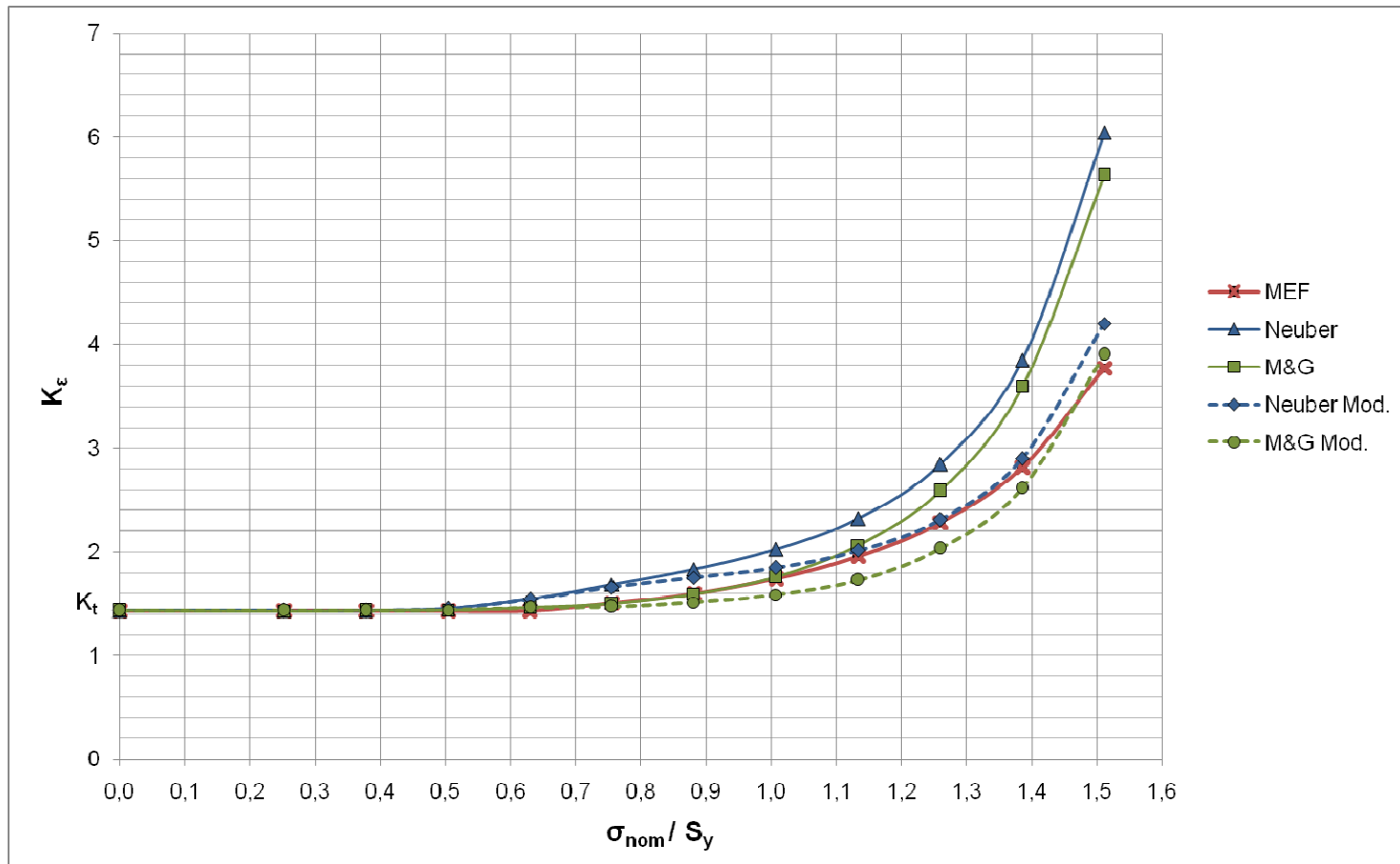


Figura 6.25 Comparação de resultados para K_ϵ obtidos pelas regras de Neuber e Molski-Glinka, regras modificadas de Neuber e Molski-Glinka, e o método de Elementos Finitos (ANSYS).

A seguir, é apresentada a evolução da deformação ao longo da seção transversal na posição $x = 0$ para cada valor de carga. Nas Figs. 6.26 a 6.35 são comparadas as soluções obtidas pelo método SIFT-Meshless, *software* de correlação digital de imagens VIC-3D e o método de Elementos Finitos. Em todos os casos, nota-se que o método SIFT-Meshless proposto mede perfis de deformação muito próximos aos calculados por Elementos Finitos, em especial na raiz do entalhe (distância relativa ao entalhe nula).

Por outro lado, em todas as figuras, nota-se um desempenho inferior do sistema VIC-3D nesta configuração experimental, mesmo com seus parâmetros otimizados. Em especial, o sistema VIC-3D subestima significativamente a deformação no entalhe, e consequentemente K_e , sendo potencialmente não conservativo para todos os casos estudados. Um dos principais motivos dessa deficiência é a incapacidade do VIC-3D de obter diretamente as deformações nas bordas de componente, justamente onde se encontram as raízes de entalhes. Isto pode ser notado nas Figs. 6.26 a 6.35, que mostram perfis de deformação do VIC-3D partindo de 0,4 mm da distância relativa ao entalhe. Os valores máximos de deformação, desse modo precisariam ser calculados por extrapolação do campo de deformações, comprometendo a acurácia da medição.

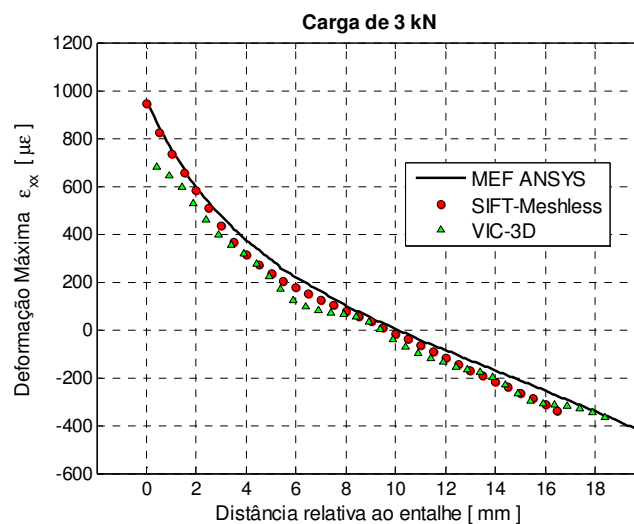


Figura 6.26 Distribuições de ϵ_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 3$ kN.

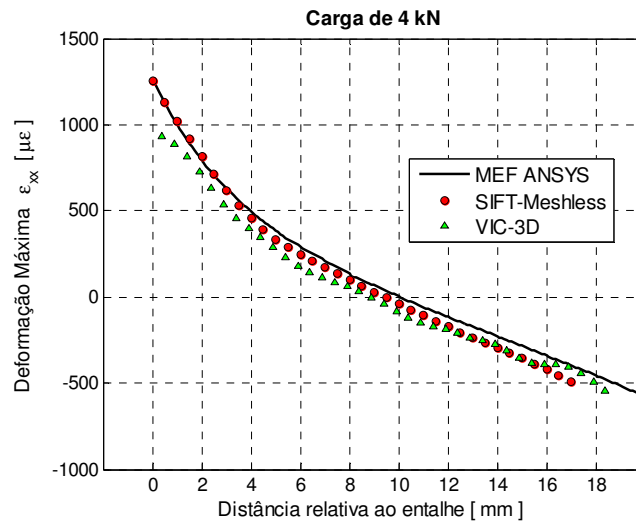


Figura 6.27 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 4$ kN.

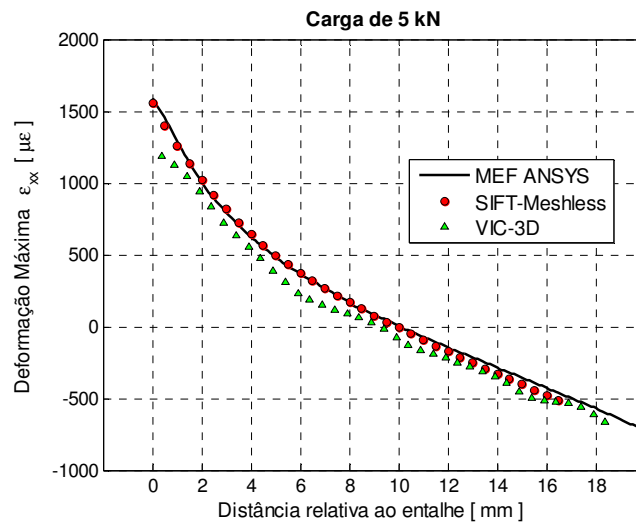


Figura 6.28 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 5$ kN.

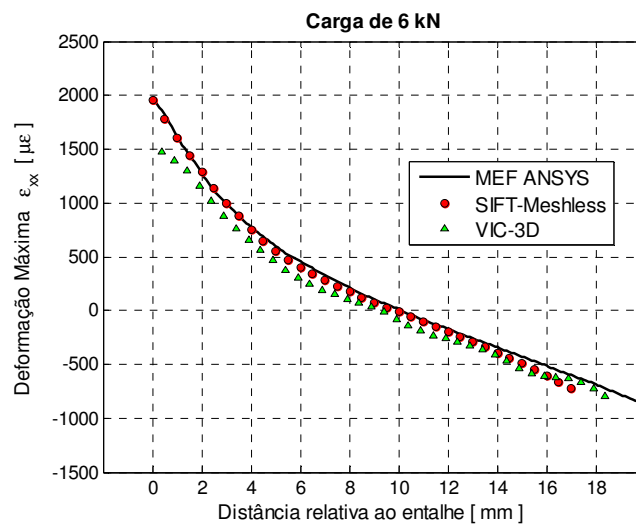


Figura 6.29 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 6$ kN.

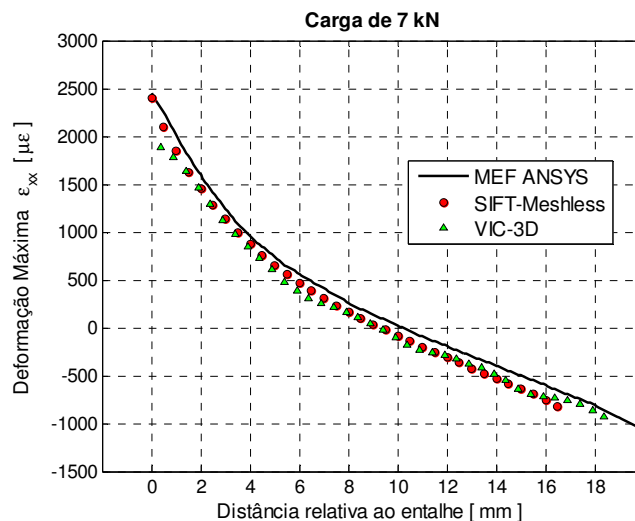


Figura 6.30 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 7$ kN.

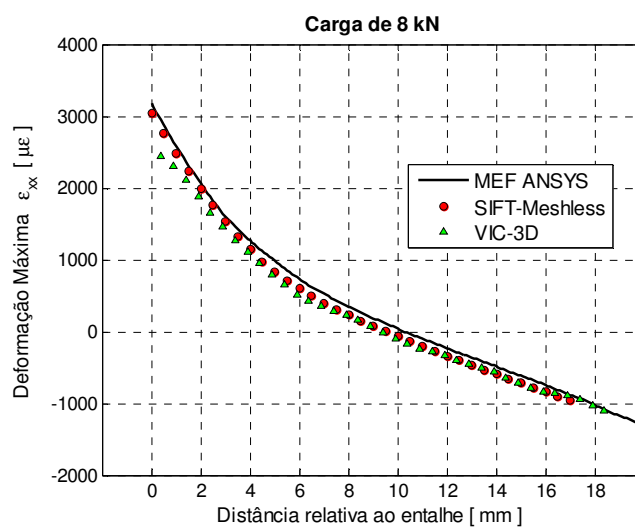


Figura 6.31 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 8$ kN.

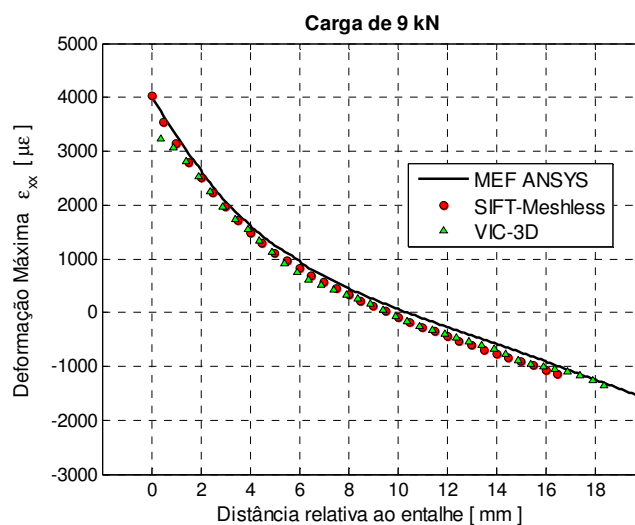


Figura 6.32 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 9$ kN.

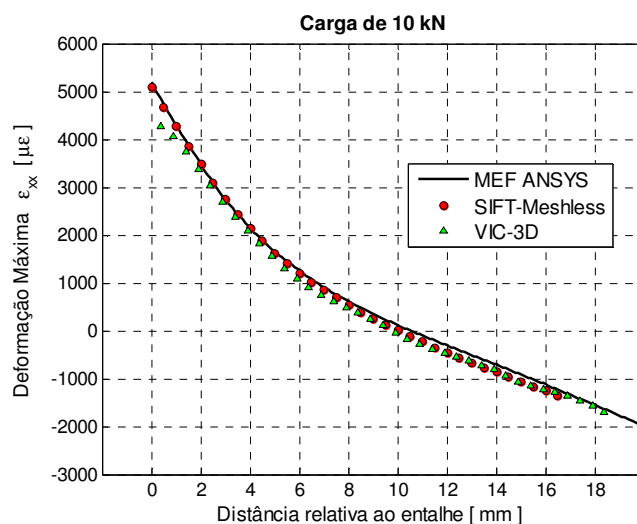


Figura 6.33 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 10$ kN.

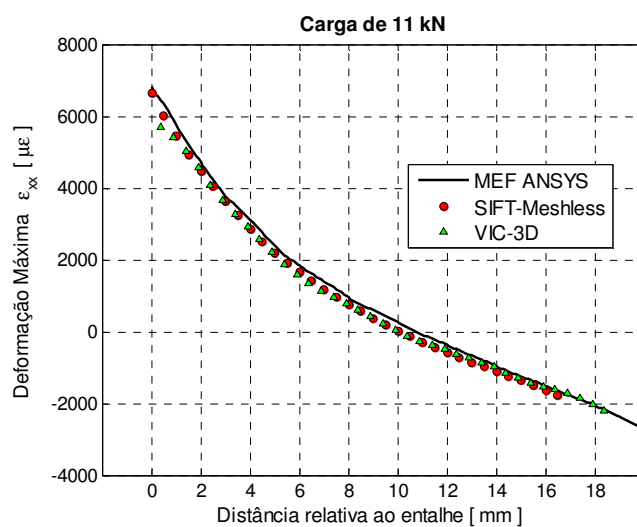


Figura 6.34 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 11$ kN.

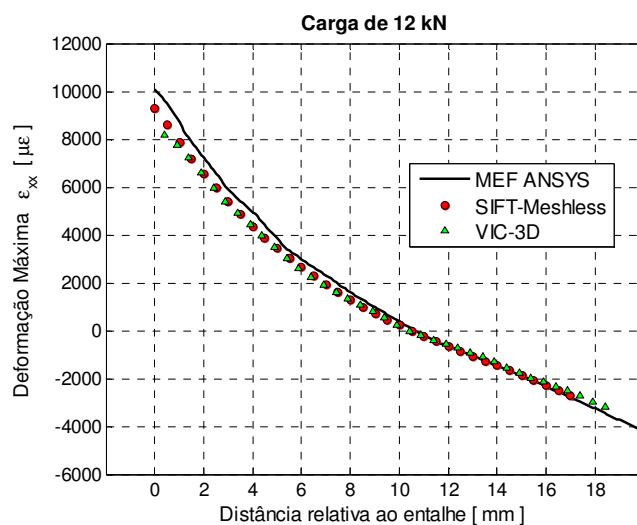


Figura 6.35 Distribuições de ε_{xx} na posição $x = 0$ para $P = 12$ kN.

6.8.

Análise da Incerteza nas Medições Experimentais

Nesta seção é feita uma avaliação do grau de incerteza do método SIFT-Meshless proposto, que pode ser associado a erros na localização do algoritmo SIFT ou mesmo da calibração das câmeras. A metodologia adotada consiste na análise de pares de imagens do corpo de prova capturadas sem aplicação de carga, para determinar valores de deformação nas imagens, a princípio iguais.

A Tab. 6.4 apresenta os resultados da análise de três pares de imagens estéreo indicando o erro RMS e o máximo erro absoluto, demonstrando a adequabilidade da técnica em medir as deformações estudadas, atingindo 10000 $\mu\epsilon$ para carga de 12 kN, com erros abaixo de 40 $\mu\epsilon$. Uma vez que esses erros são intrínsecos à resolução e calibração da câmera, à textura aplicada ao material, e a erros do algoritmo SIFT, estima-se que o valor do erro não deve aumentar significativamente com a carga aplicada.

Tabela 6.4 Análise de incerteza para o método utilizado.

Imagem	Erro RMS (μm)	Erro RMS (<i>pixels</i>)	Erro RMS ($\mu\epsilon$)	Erro máximo ($\mu\epsilon$)
Par-Estéreo 1	3,9	0,3	39	113
Par-Estéreo 2	1,5	0,1	28	86
Par-Estéreo 3	1,3	0,09	23	66