6
Tratamento numérico das propostas de correções das zonas plásticas obtidas por uma análise numérica linear elástica para levar em consideração os efeitos do escoamento do material

Este capítulo é similar ao Capítulo 4, que trata das propostas de correção das zonas plásticas lineares elásticas que buscam levar em consideração os efeitos do escoamento dos materiais no tamanho e forma das $pz(\theta)_M$. A diferença é que neste capítulo as correções das $pz(\theta)_M$ são feitas numericamente. As quatro propostas de correção descritas na seção 4.1, que consideram o caso de um material perfeitamente plástico, podem ser aplicadas tanto pelo MEF quanto pelo MHEC. Entretanto, apenas as correções que consideram componente de tensão σ_{yy} e a tensão equivalente de Mises (σ_{Mises}) foram implementadas no programa de Lopes (2002). Essas duas propostas de correção são mostradas em três exemplos que são divididos em três seções. A primeira seção mostra o caso da placa de Griffith. A segunda seção mostra o caso da placa retangular sob tração com uma trinca central e a terceira seção mostra o exemplo da placa retangular com uma trinca central sob flexo tração. Por fim, a quarta seção apresenta as conclusões deste capítulo.

Para um melhor controle de convergência na integração numérica, permite-se que se subdivida o intervalo de integração conforme o critério de convergência adotado. No caso estudado, o intervalo de integração sempre é compreendido entre 0 a pz_M^{Wtg} .

A Figura 161 mostra o caso em que se subdivide o intervalo de integração, que inicialmente tem apenas um elemento e três pontos de Gauss, em outro com quatro elementos e doze pontos de Gauss.

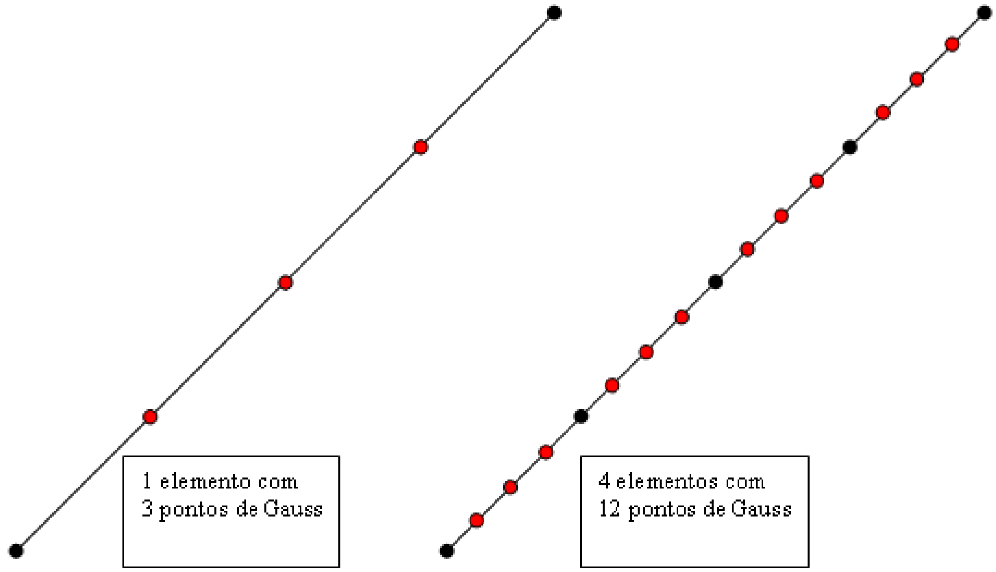


Figura 161 – Subidivisão do intervalo de integração numérica.

Assim, devido ao tratamento numérico, a Eq. (59) resulta na Eq. (89),

$$pz_M^{Wtg+eq\sigma_y} = \frac{1}{\sigma_{yy}\left(\sigma_n, pz_M^{Wtg}, \theta\right)} \sum_{i=1}^{NE} \left(\sum_{j=1}^{NPG} w_{ij}\, \sigma_{yy}\left(\sigma_n, r_{ij}, \theta\right) \right), \tag{89}$$

em que NE é o número de elementos usados na subdivisão, NPG é o número de pontos de Gauss usados dentro de cada elemento i, e w simboliza os pesos da integração numérica. Por outro lado, a Eq. (66) resulta na Eq. (90).

$$pz_M^{Wtg+eqM} = \frac{1}{S_Y} \sum_{i=1}^{NE} \left(\sum_{j=1}^{NPG} w_{ij}\, \sigma_{Mises}\left(\sigma_n, r_{ij}, \theta\right) \right). \tag{90}$$

A próxima seção mostra como a correção numérica da singularidade reproduz as mesmas estimativas obtidas pela correção feita analiticamente. Nessa próxima seção se estuda o exemplo da placa de Griffith.

6.1. Correção numérica das zonas plásticas para o caso da placa de Griffith

Esta seção mostra as estimativas das zonas plásticas obtidas numericamente que correspondem ao caso da placa de Griffith em que se considera a componente σ_{yy} $\left(pz_M^{LE-MHEC+eq\sigma_y}\right)$ e a tensão equivalente de Mises $\left(pz_M^{LE-MHEC+eqM}\right)$ na correção. Essas estimativas são comparadas com os mesmos resultados mostrados na subseção 4.1.7. Nessas comparações é possível rever os efeitos da relação σ_n/S_Y no tamanho das zonas plásticas.

A Figura 162 mostra, para o caso de tensão plana, a comparação entre as zonas plásticas corrigidas obtidas numericamente a partir do MHEC com as zonas plásticas corrigidas analiticamente. Nessa correção considera-se a componente σ_{yy}. Seis níveis são testados, σ_n/S_Y = 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8.

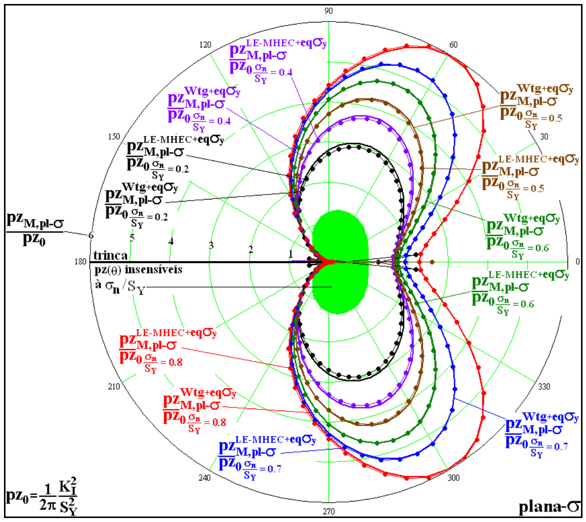


Figura 162 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas pela componente σ_{yy} obtidas numericamente e as zonas plásticas corrigidas pela componente σ_{yy} obtidas analiticamente para o caso sob tensão plana.

A Figura 163 mostra, para o caso em tensão plana, a comparação entre as zonas plásticas corrigidas numericamente e as zonas plásticas corrigidas analiticamente em que se usa σ_{Mises}.

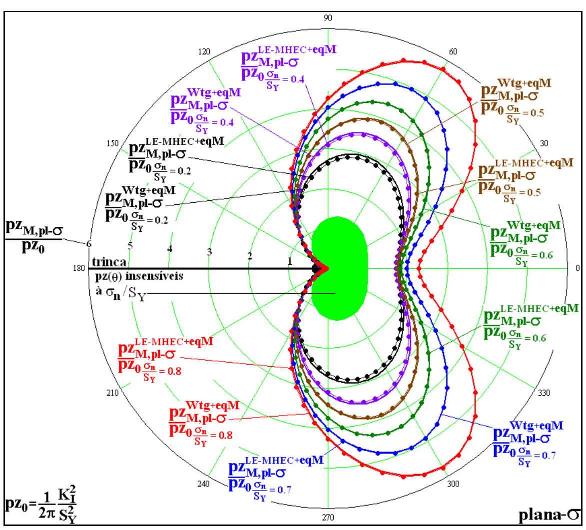


Figura 163 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas pela componente σ_{Mises} obtidas numericamente e as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas analiticamente para o caso sob tensão plana.

A Figura 164 mostra, para o caso de deformação plana, a comparação entre as zonas plásticas corrigidas numericamente e as zonas plásticas corrigidas analiticamente em que se usa a componente σ_{yy}.

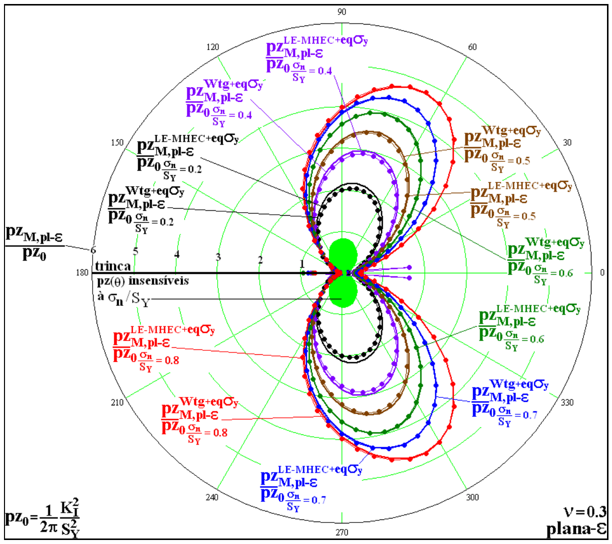


Figura 164 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas pela componente σ_{yy} obtidas numericamente e as zonas plásticas corrigidas pela componente σ_{yy} obtidas analiticamente para o caso em deformação plana.

A Figura 165 é parecida com a Figura 164. A diferença é que no caso da Figura 165 se usa σ_{Mises}.

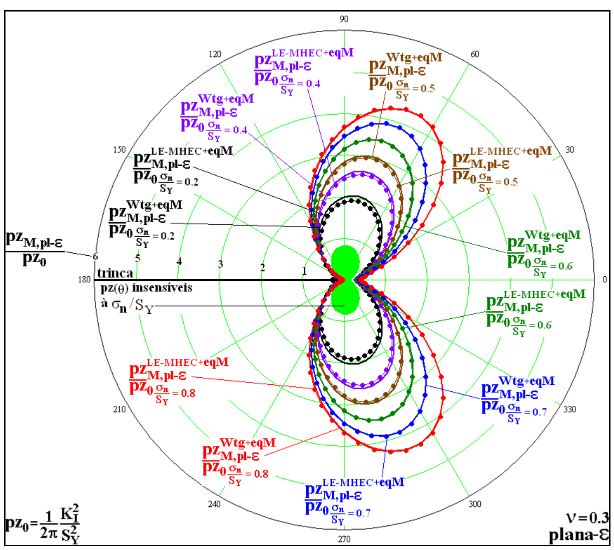


Figura 165 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas pela componente σ_{Mises} obtidas numericamente e as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas analiticamente para o caso em deformação plana.

O próximo exemplo estudado é o da placa retangular sob tração com uma trinca central.

6.2. Correção numérica das zonas plásticas para o caso da placa retangular sob tração com uma trinca central

Os mesmo três valores de *a/W* estudados para o caso das zonas plásticas sem correção serão estudados nesta seção. Como o caso da placa retangular com uma trinca central tem uma função de tensão de Westergaard aproximada, Eq. (29), as zonas plásticas corrigidas numericamente são comparadas com as zonas plásticas corrigidas analiticamente.

A Figura 166 mostra, para o caso em tensão plana, a comparação entre as zonas plásticas corrigidas numericamente e analiticamente a partir de σ_{Mises} para $a/W = 0{,}05$.

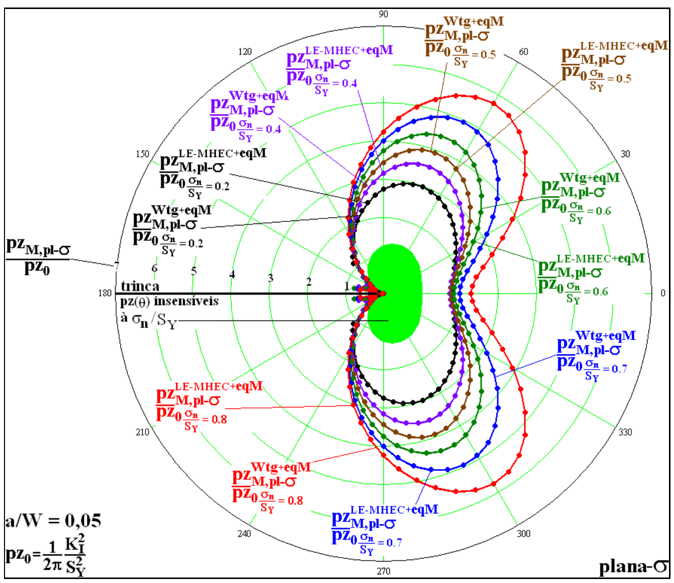


Figura 166 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas numericamente e analiticamente para o caso sob tensão plana com $a/W = 0{,}05$.

A Figura 167 mostra, para o caso em tensão plana, a comparação entre as zonas plásticas corrigidas numericamente e analiticamente a partir de σ_{yy} para $a/W = 0{,}05$.

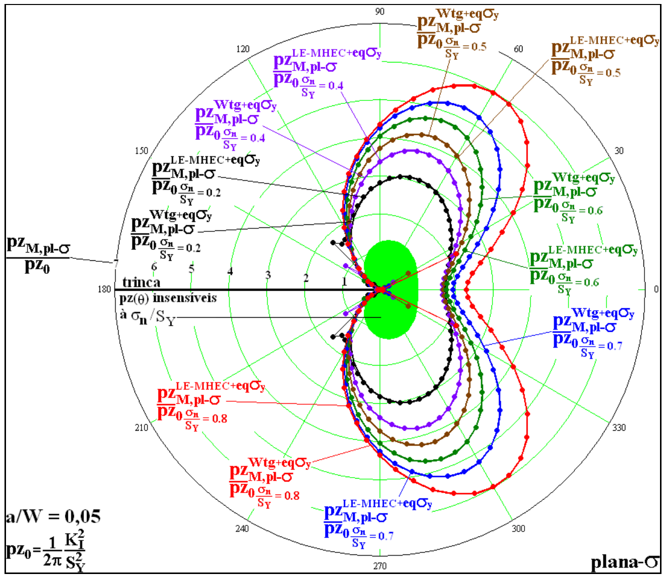


Figura 167 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{yy} obtidas numericamente e analiticamente para o caso sob tensão plana com *a/W* = 0,05.

A Figura 168 é parecida com a Figura 166. A diferença é que na Figura 168 a relação *a/W* estudada é igual à 0,10.

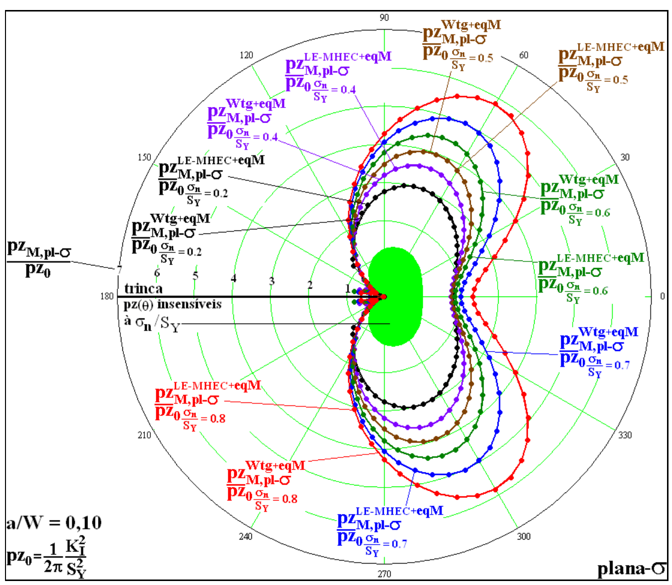


Figura 168 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas numericamente e analiticamente para o caso sob tensão plana com *a/W* = 0,1.

A Figura 169 é parecida com a Figura 167. A diferença é que na Figura 169 a relação *a/W* estudada é igual à 0,10.

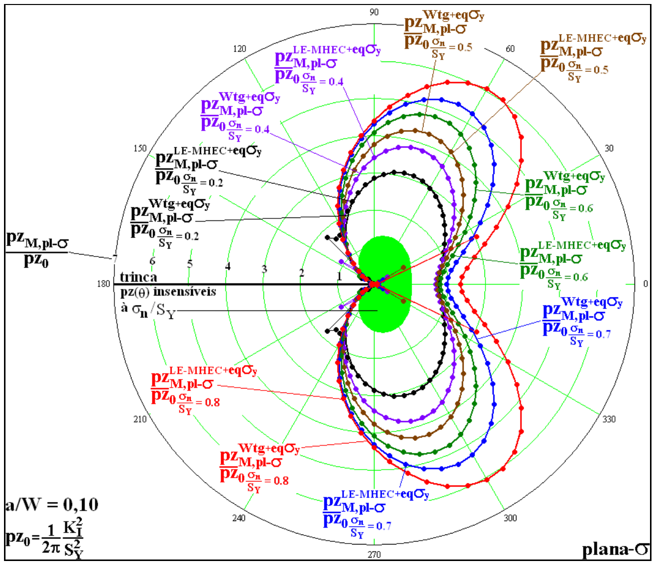


Figura 169 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{yy} obtidas numericamente e analiticamente para o caso sob tensão plana com *a/W* = 0,1.

A Figura 170 é parecida com a Figura 166 e com a Figura 168. A diferença é que na Figura 170 a relação *a/W* estudada é igual à 0,18.

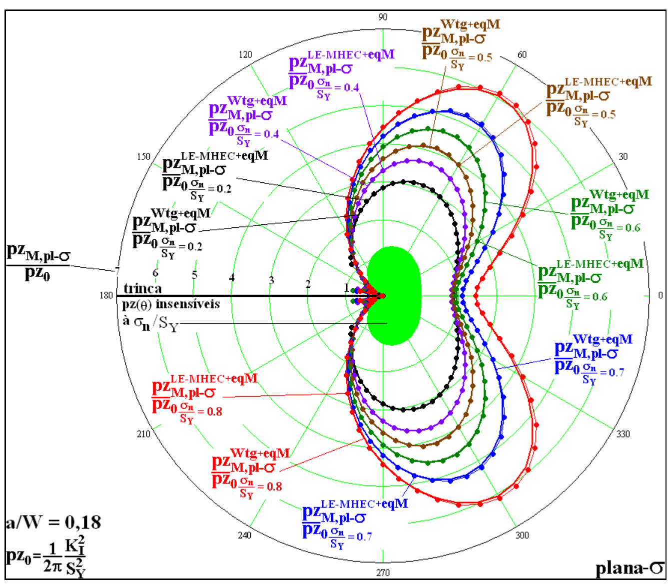


Figura 170 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em tensão plana com *a/W* = 0,18.

A Figura 171 é parecida com a Figura 167 e com a Figura 169. A diferença é que na Figura 171 a relação *a/W* estudada é igual à 0,18.

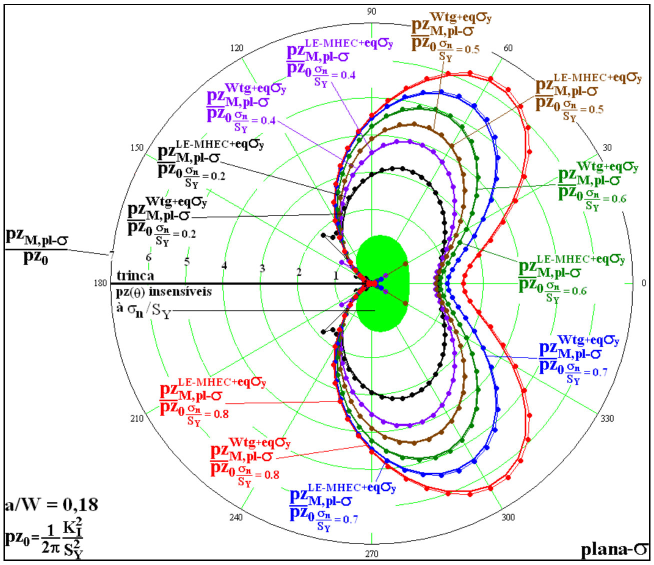


Figura 171 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{yy} obtidas numericamente e as analiticamente para o caso sob tensão plana com a/W = 0,18.

A Figura 172 mostra para o caso em deformação plana a comparação entre as zonas plásticas corrigidas numericamente e analiticamente a partir de σ_{Mises} para a/W = 0,05.

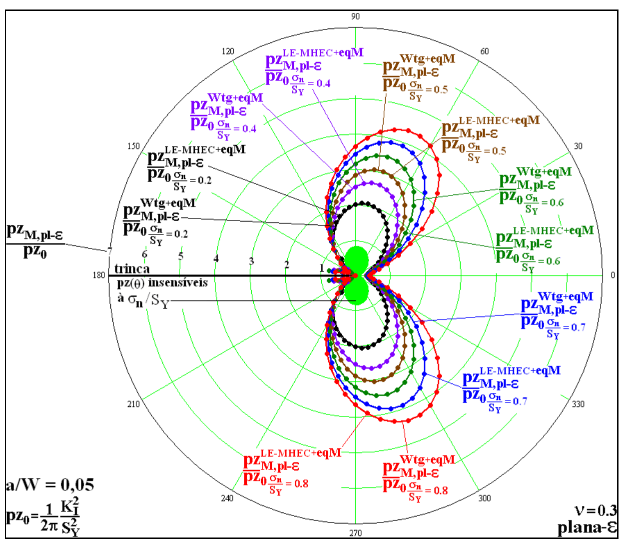


Figura 172 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em deformação plana com a/W = 0,05.

A Figura 173 mostra para o caso em deformação plana a comparação entre as zonas plásticas corrigidas numericamente e analiticamente a partir de σ_{yy} para a/W = 0,05.

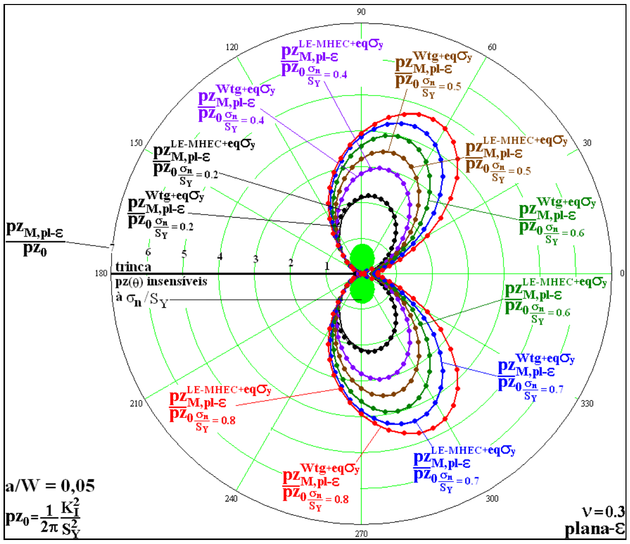


Figura 173 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{yy} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em deformação plana com *a/W* = 0,05.

A Figura 174 é parecida com a Figura 172. A diferença é que na Figura 174 a relação *a/W* estudada é igual à 0,10.

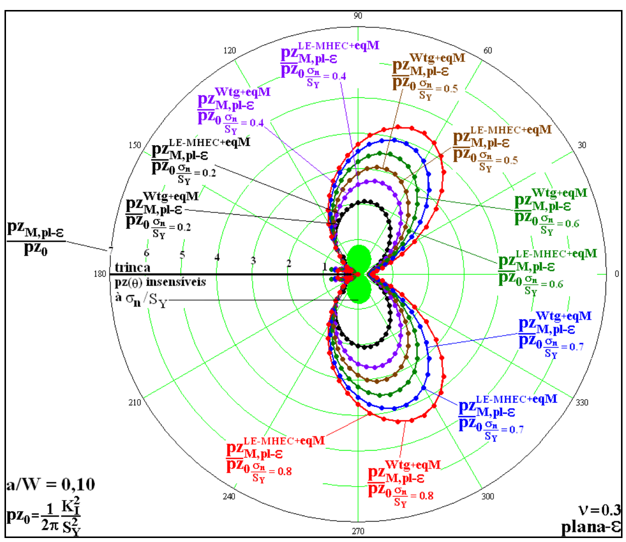


Figura 174 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em deformação plana com *a/W* = 0,10.

A Figura 175 é parecida com a Figura 173. A diferença é que na Figura 175 a relação *a/W* estudada é igual à 0,10.

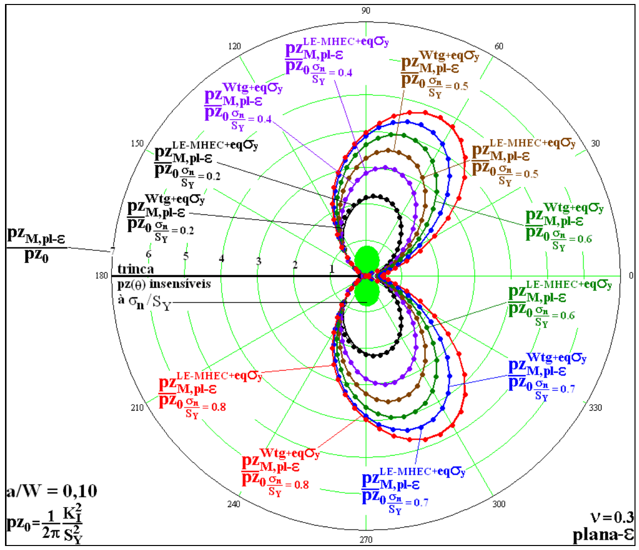


Figura 175 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{yy} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em deformação plana com *a/W* = 0,10.

A Figura 176 é parecida com a Figura 172 e com a Figura 174. A diferença é que na Figura 176 a relação *a/W* estudada é igual à 0,18.

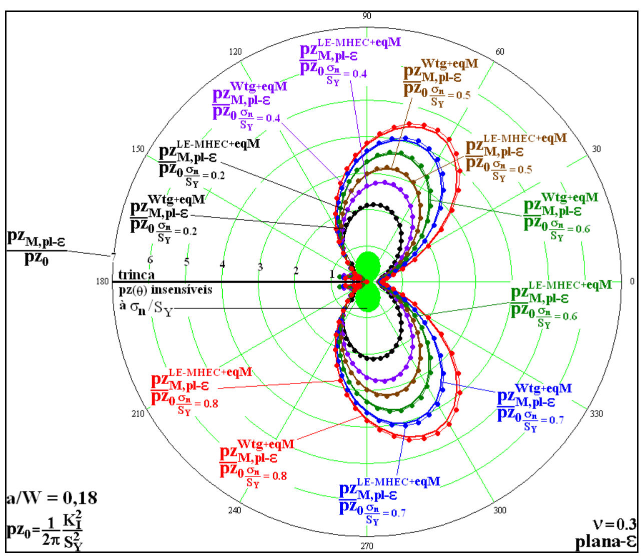


Figura 176 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{Mises} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em deformação plana com *a/W* = 0,18.

A Figura 177 é parecida com a Figura 173 e com a Figura 175. A diferença é que na Figura 177 a relação *a/W* estudada é igual à 0,18.

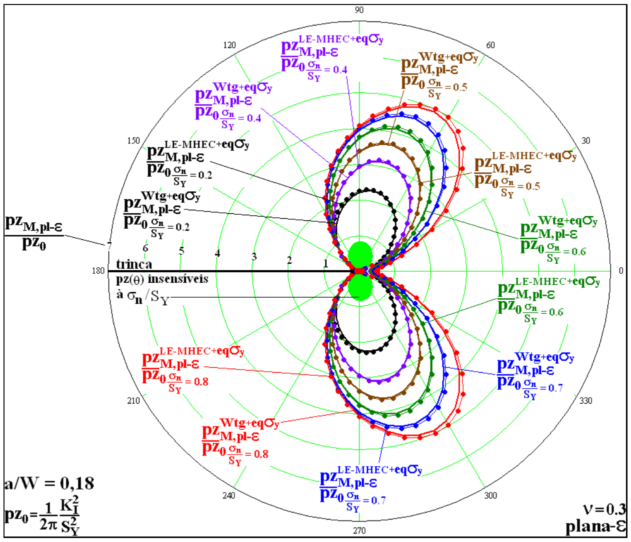


Figura 177 – Comparação entre as zonas plásticas corrigidas por σ_{yy} obtidas numericamente e analiticamente para o caso em deformação plana com a/W = 0,18.

O próximo exemplo estudado é o da placa retangular com uma trinca central sob tração.

6.3. Correção numérica das zonas plásticas para o caso da placa retangular com uma trinca central sob flexo tração

Os mesmo três valores de a/W estudados para o caso das zonas plásticas sem correção serão estudados nesta seção. Os efeitos de a/W, assim como o efeito de σ_n/S_Y, já foram vistos para as zonas plásticas sem a correção da singularidade. Portanto, nesta seção, apenas se mostra as zonas plásticas corrigidas em que se considera um material perfeitamente plástico.

A Figura 178 mostra as zonas plásticas corrigidas em que se usa a tensão equivalente de Mises, σ_{Mises}, e a componente σ_{yy} para a correção para o caso de tensão plana com a/W = 0,05.

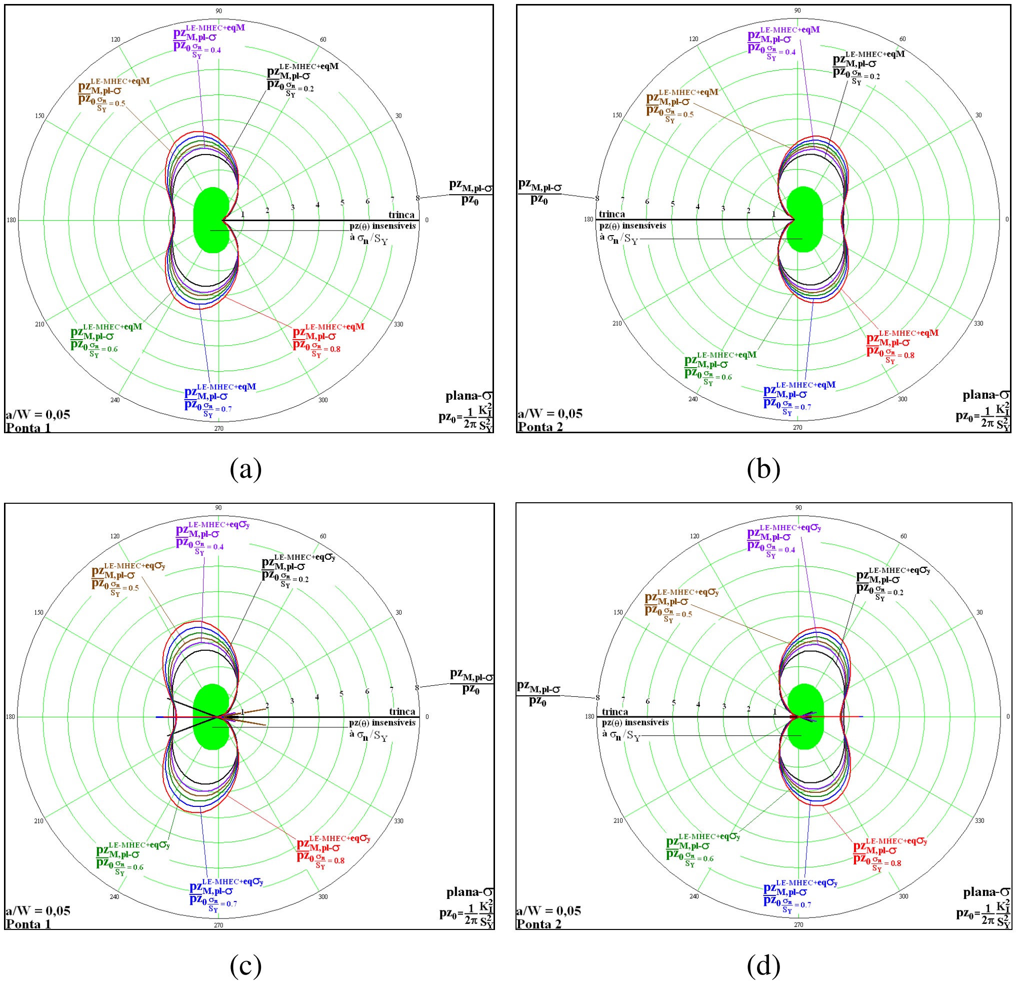
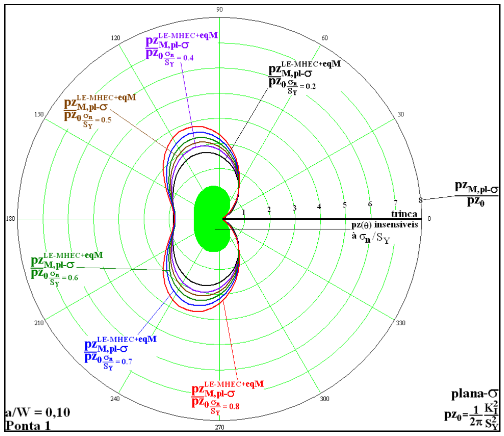
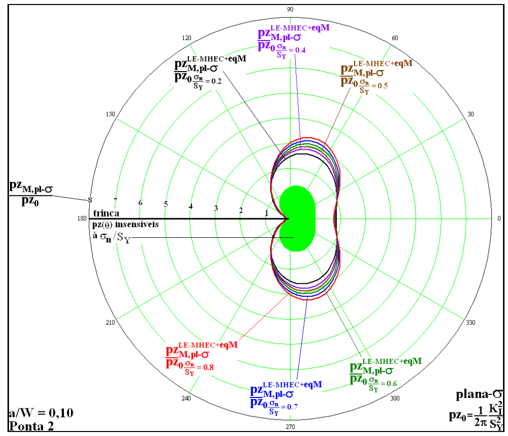


Figura 178 – Efeito de σ_n/S_Y nas zonas plásticas corrigidas numericamente para $a/W = 0{,}05$ sob tensão plana para (a) ponta 1 considerando σ_{Mises}; (b) ponta 2 considerando σ_{Mises}; (c) ponta 1 considerando σ_{yy} e (d) ponta 2 considerando σ_{yy}.

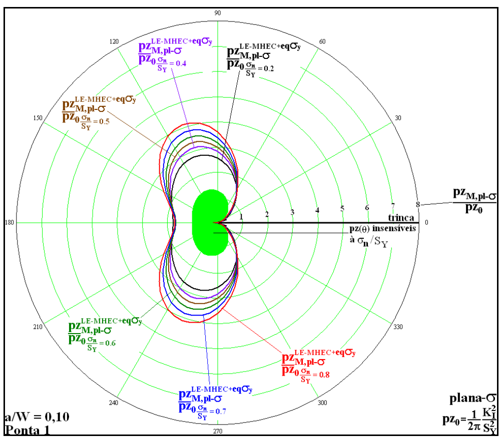
A Figura 179 mostra as zonas plásticas corrigidas em que se usa a tensão equivalente de Mises, σ_{Mises}, e a componente σ_{yy} para a correção para o caso de tensão plana com $a/W = 0{,}10$.



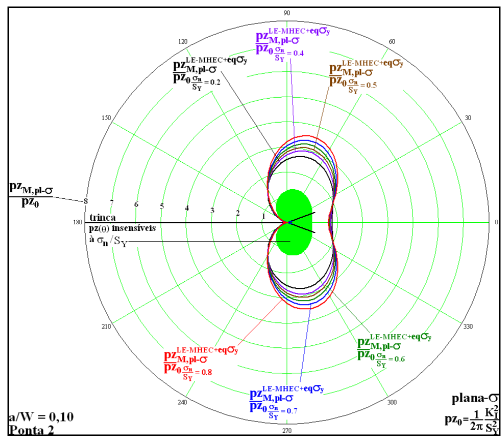
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 179 – Efeito de σ_n/S_Y nas zonas plásticas corrigidas numericamente para $a/W = 0{,}10$ em tensão plana para (a) ponta 1 considerando σ_{Mises}; (b) ponta 2 considerando σ_{Mises}; (c) ponta 1 considerando σ_{yy} e (d) ponta 2 considerando σ_{yy}.

A Figura 180 mostra as zonas plásticas corrigidas em que se usa a tensão equivalente de Mises, σ_{Mises}, e a componente σ_{yy} para a correção para o caso de tensão plana com $a/W = 0{,}40$.

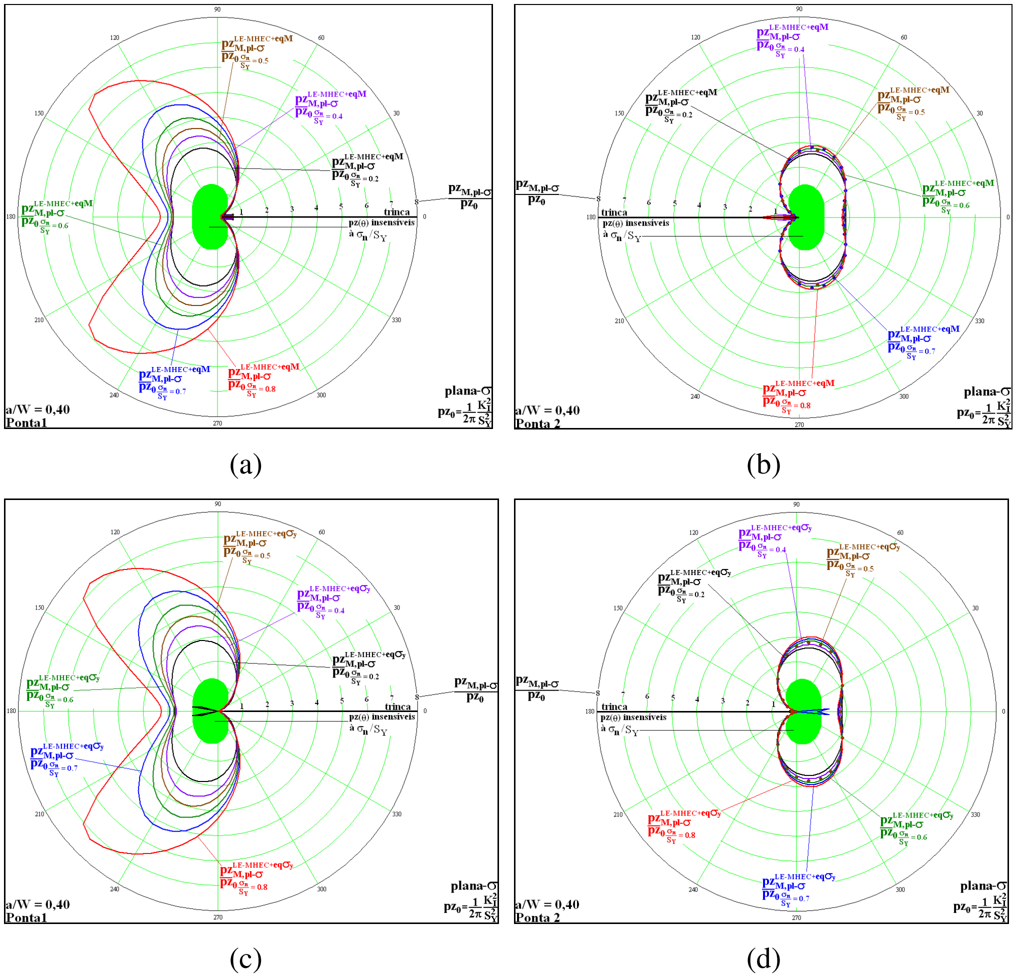


Figura 180 – Efeito de σ_n/S_Y nas zonas plásticas corrigidas numericamente para a/W = 0,40 em tensão plana para (a) ponta 1 considerando σ_{Mises}; (b) ponta 2 considerando σ_{Mises}; (c) ponta 1 considerando σ_{yy} e (d) ponta 2 considerando σ_{yy}.

A Figura 181 mostra as zonas plásticas corrigidas em que se usa a tensão equivalente de Mises, σ_{Mises}, e a componente σ_{yy} para a correção para o caso de deformação plana para a/W = 0,05.

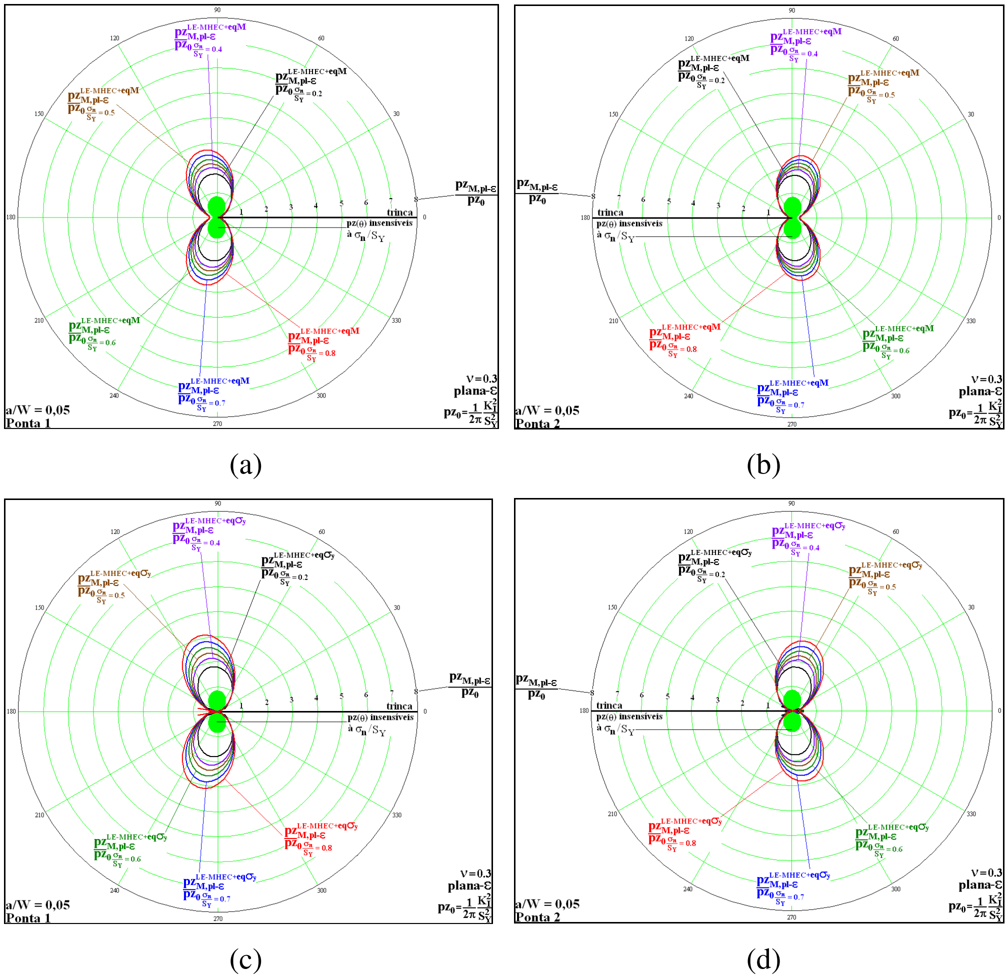


Figura 181 – Efeito de σ_n/S_Y nas zonas plásticas corrigidas numericamente para a/W = 0,05 em deformação plana para (a) ponta 1 considerando σ_{Mises}; (b) ponta 2 considerando σ_{Mises}; (c) ponta 1 considerando σ_{yy} e (d) ponta 2 considerando σ_{yy}.

A Figura 182 mostra as zonas plásticas corrigidas em que se usa a tensão equivalente de Mises, σ_{Mises}, e a componente σ_{yy} para a correção para o caso de deformação plana com a/W = 0,10.

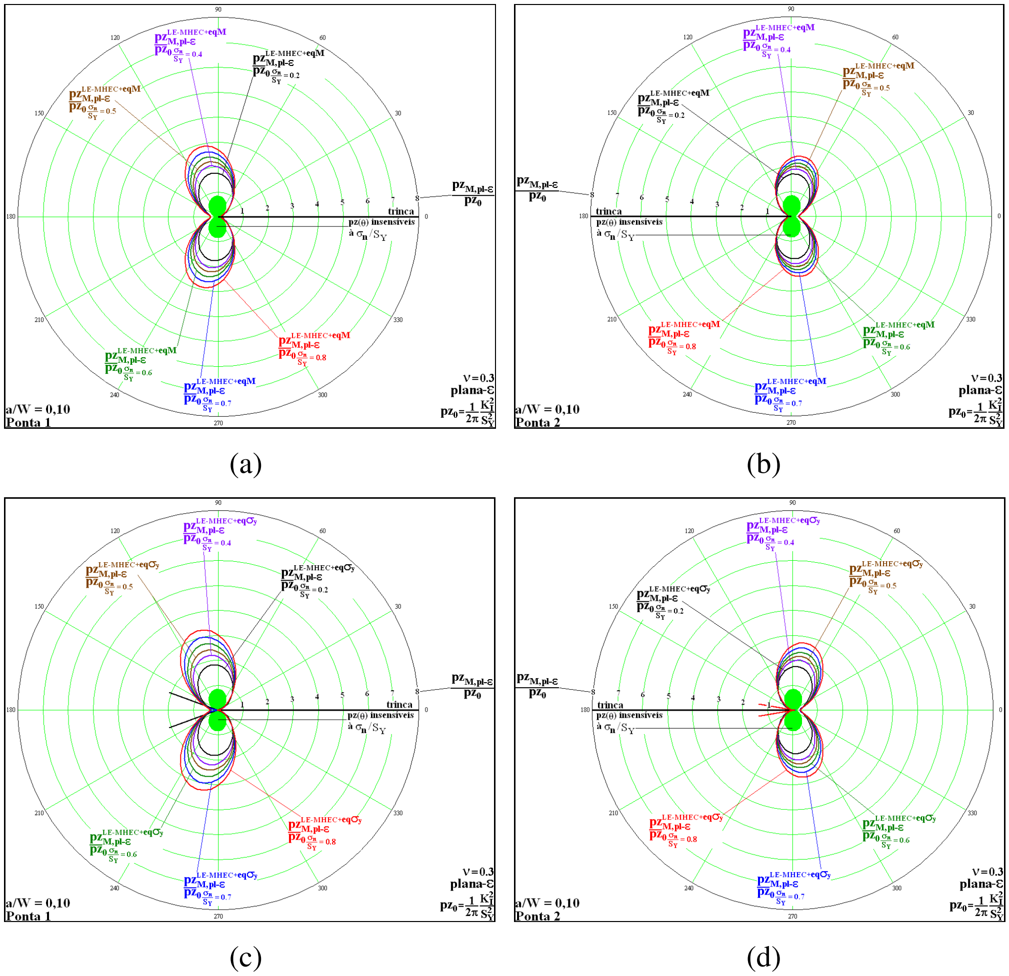


Figura 182 – Efeito de σ_n/S_Y nas zonas plásticas corrigidas numericamente para a/W = 0,10 em deformação plana para (a) ponta 1 considerando σ_{Mises}; (b) ponta 2 considerando σ_{Mises}; (c) ponta 1 considerando σ_{yy} e (d) ponta 2 considerando σ_{yy}.

A Figura 183 mostra as zonas plásticas corrigidas em que se usa a tensão equivalente de Mises, σ_{Mises}, e a componente σ_{yy} para a correção para o caso de deformação plana com a/W = 0,40.

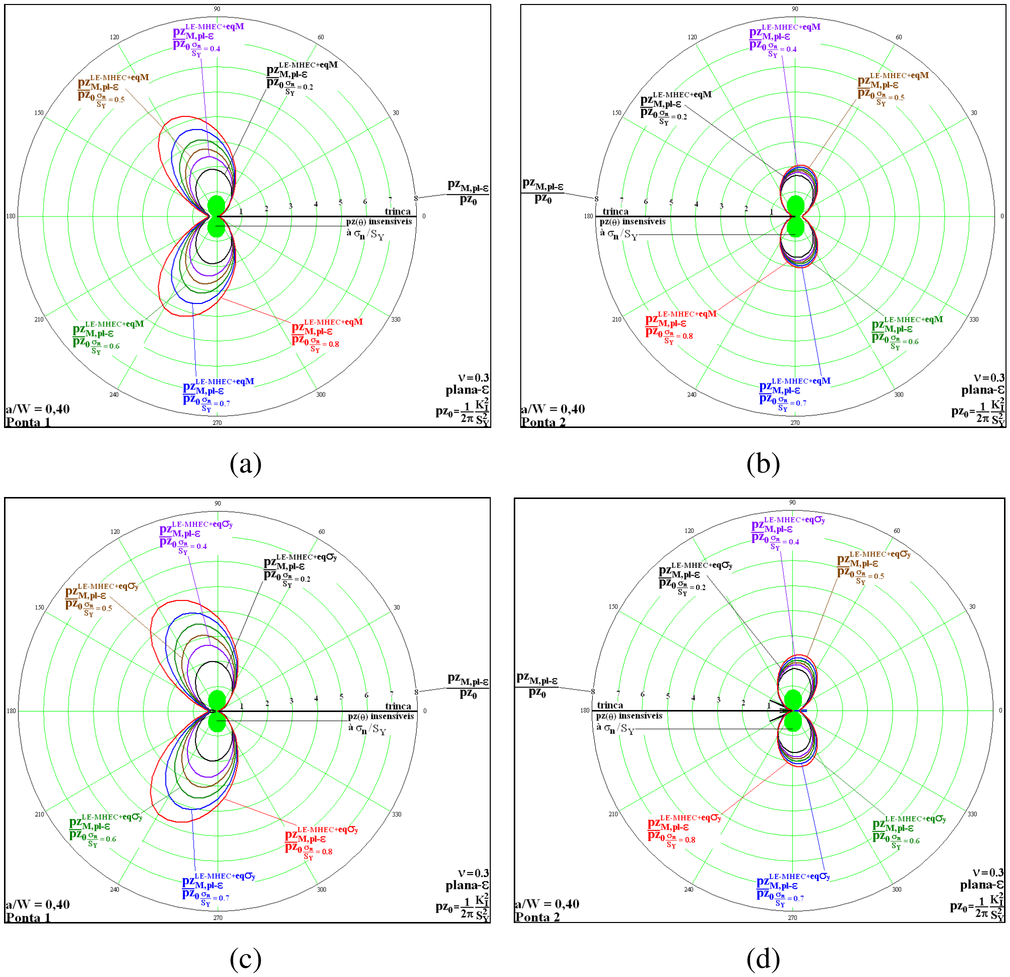


Figura 183 – Efeito de σ_n/S_Y nas zonas plásticas corrigidas numericamente para a/W = 0,40 em deformação plana para (a) ponta 1 considerando σ_{Mises}; (b) ponta 2 considerando σ_{Mises}; (c) ponta 1 considerando σ_{yy} e (d) ponta 2 considerando σ_{yy}.

6.4. Conclusões do capítulo

Este capítulo mostrou, em três exemplos, que as mesmas correções analíticas das zonas plásticas propostas no Capítulo 4 podem ser feitas numericamente. Para os exemplos da placa de Griffith e da placa retangular tracionada com uma trinca central, este capítulo mostrou que as zonas plásticas corrigidas numericamente são praticamente iguais às zonas plásticas corrigidas analiticamente. O terceiro exemplo foi o de uma placa retangular com uma trinca central sob flexo tração. Nos três exemplos estudados, foi verificado que as zonas plásticas corrigidas são bem maiores que as zonas plásticas obtidas apenas pelo campo de tensões obtido por K_I para todos os níveis de σ_n/S_Y.

Todas as zonas plásticas corrigidas neste capítulo partem da hipótese feita por Irwin (1958) para o caso da placa de Griffith, pois elas partem das estimativas lineares elásticas (LE) para depois sim levar em consideração os efeitos do escoamento do material. Dessa maneira, essas estimativas possuem um carácter qualitativo, pois devido à singularidade da formulação matemática, o problema da estimativa das zonas plásticas é intrinsecamente não linear. Zonas plásticas estimadas a partir de uma análise não linear são apresentadas no próximo capítulo.