

7

Estimativas de zonas plásticas obtidas numericamente a partir de uma análise não linear

Como visto anteriormente, o problema de determinar a quantidade de material plastificado na frente da ponta de trincas é intrinsecamente não linear. Entretanto, a MFLE utiliza o K_I , que é um parâmetro linear elástico, para representar o campo de tensões e para fazer previsões de fratura. O estudo dos limites de aplicabilidade de K_I para representar o campo de tensões e o consequente uso deste campo para estimar as zonas plásticas é o principal foco de pesquisa deste trabalho. Contudo, foi visto no Capítulo 3 que as zonas plásticas obtidas a partir de um função de tensão de Westergaard possuem incompatibilidades físicas, pois o campo de tensões que as determinam geram tensões singulares na ponta das trincas. Por causa disso, quatro propostas de correção foram feitas no Capítulo 4 como tentativa de melhorar as estimativas das zonas plásticas geradas a partir de um campo de tensões singular. Essas quatro tentativas consideram um material perfeitamente plástico.

No Capítulo 6, estimaram-se zonas plásticas obtidas a partir de um campo de tensões determinado numericamente, em que se considera duas correções propostas no Capítulo 4. Neste capítulo, essas estimativas de zonas plásticas feitas no Capítulo 6 são comparadas com as zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear feita com o uso do MEF disponibilizado no programa ANSYS (P_M^{EP-MEF}). Dentro desse enfoque, este capítulo é dividido em cinco seções. A primeira seção apresenta o modelo constitutivo utilizado no programa ANSYS (2001). A segunda seção faz uma breve explicação sobre os parâmetros que indicam a qualidade da resposta da análise não linear feita pelo programa ANSYS (2001). A terceira seção mostra as estimativas das zonas plásticas obtidas a partir da análise não linear feita no programa ANSYS para o exemplo de uma placa retangular com uma trinca central sob tração. A quarta seção é parecida com a terceira seção, a diferença é que o exemplo estudado dessa vez é uma placa

retangular com uma trinca central sob flexo tração. Por último, a quinta seção apresenta as conclusões deste capítulo.

7.1. O modelo constitutivo

O modelo constitutivo utilizado no programa ANSYS (2001) para simular a não linearidade do material é denominado de multilinear elástico, conforme mostra a Figura 184.

Pontos	ϵ	σ
1	0	0
2	0.001	75
3	0.002	150
4	0.003	225
5	0.004	240
6	0.005	250
7	0.025	300
8	0.060	355
9	0.100	390
10	0.150	420
11	0.200	435
12	0.250	449
13	0.275	450

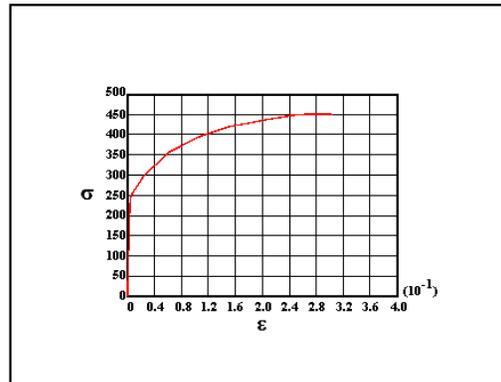


Figura 184 – Modelo multilinear elástico utilizado pelo programa ANSYS (adaptada de ANSYS, 2001).

Entretanto, por simplicidade, este trabalho só trata o modelo bilinear elástico que pode ser reproduzido pelo modelo multilinear, conforme mostra a Figura 185.

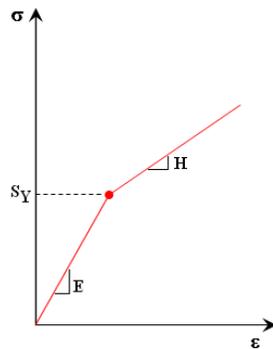


Figura 185 – Modelo bilinear elástico utilizado.

O modelo bilinear, mostrado na Figura 185, é determinado por apenas dois pontos. Esses dois pontos determinam as duas fases do material. A fase elástica é determinada pela tensão de escoamento (S_Y) e pelo módulo de elasticidade do material (E) e a fase plástica é determinada pela deformação plástica e pelo coeficiente de encruamento (H). Para $H = 99,9\%E$, o modelo bilinear simula uma

análise linear a partir de uma análise incremental. Para $H = 1\%E$, o modelo bilinear simula o caso de um material perfeitamente plástico. Para casos intermediários, $99,9\%E > H > 1\%E$, os efeitos do encruamento podem ser simulados. É importante enfatizar que a situação com $H = 0$, que seria a simulação real do caso de um material perfeitamente plástico, gera dificuldades adicionais de convergência da análise. Por esses problemas adicionais não acontecerem para a situação em que $H = 1\%E$ e por esse valor ser bem próximo de $H = 0$, as zonas plásticas elastoplásticas obtidas para $H = 1\%E$ são comparadas com as zonas plásticas lineares elásticas corrigidas. Outras informações necessárias para a realização de uma análise não linear são apresentadas na próxima seção

7.2. Parâmetros de controle da análise não linear

A utilização dos parâmetros de controle de uma análise não linear, como o incremento de carga e deslocamento, o número máximo de iteração e o controle de erro, são bem explicados no manual eletrônico do ANSYS (2001). Nesse manual estão detalhados todos os procedimentos que devem ser feitos para se realizar uma análise não linear. Além disso, o manual já fornece dicas sobre quais valores esses parâmetros devem ter para que se possa modelar o caso de um material com pouco encruamento. Independentemente dos parâmetros utilizados, o ANSYS (2001) indica a convergência da solução tanto em termos de deslocamento quanto em termos de força. Essa indicação é feita a partir de um gráfico, conforme mostra a Figura 186.

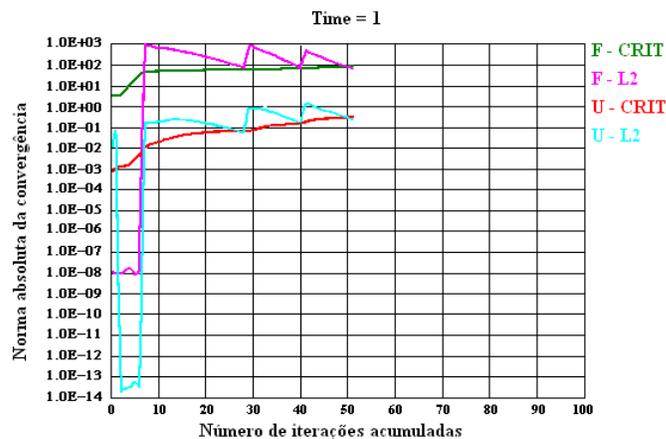


Figura 186 – Gráfico que indica a convergência da análise feita pelo ANSYS (2001) – adaptada de ANSYS (2001).

É importante ressaltar que todas as zonas plásticas mostradas nas próximas seções satisfizeram o critério de convergência utilizado pelo programa ANSYS (2001), conforme mostra a Figura 186.

7.3. Placa retangular sob tração com uma trinca central – análise não linear

Este exemplo pode ser visualizado com mais detalhe na Figura 19. Seis valores de σ_r/S_Y são utilizados: 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8. Dois valores de a/W são usados: 0,10 e 0,15. Quinze valores do coeficiente H são testados, que são: 1% E , 3% E , 5% E , 7% E , 9% E , 10% E , 20% E , 30% E , 40% E , 50% E , 60% E , 70% E , 80% E , 90% E e 99,9% E .

Com todas essas informações diferentes é possível avaliar os efeitos de σ_r/S_Y , de a/W e do encruamento no tamanho e forma das zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear $(p_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF})$, em que $C1$ indica a relação a/W adotada e $C2$ indica a porcentagem que relaciona o coeficiente H com o E . Dessa maneira, esta seção é dividida em duas subseções. A primeira subseção mostra o efeito do encruamento (H) e da relação σ_r/S_Y nas zonas plásticas para os dois estados planos e para as duas relações a/W adotadas. A segunda subseção mostra os efeitos de a/W para todos os valores de σ_r/S_Y utilizados. Além disso, essa subseção mostra que para $H = 99,9\%E$ as zonas plásticas $p_{M,a/W=C1,H=99,9\%E}^{EP-MEF}$ elastoplásticas reproduzem as estimativas lineares elásticas obtidas numericamente $(p_{M}^{LE-MHEC})$ e compara as estimativas numéricas lineares elásticas corrigidas $(p_{M}^{LE-MHEC+eq})$ com as estimativas elastoplásticas $(p_{M,a/W=C1,H=1\%E}^{EP-MEF})$.

7.3.1. Efeito do encruamento nas zonas plásticas elastoplásticas

A Figura 187 mostra as zonas plásticas elastoplásticas $(p_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF})$ para os quinze valores de H estudados para o caso de tensão plana para $a/W = 0,10$ e para $\sigma_r/S_Y = 0,2$.

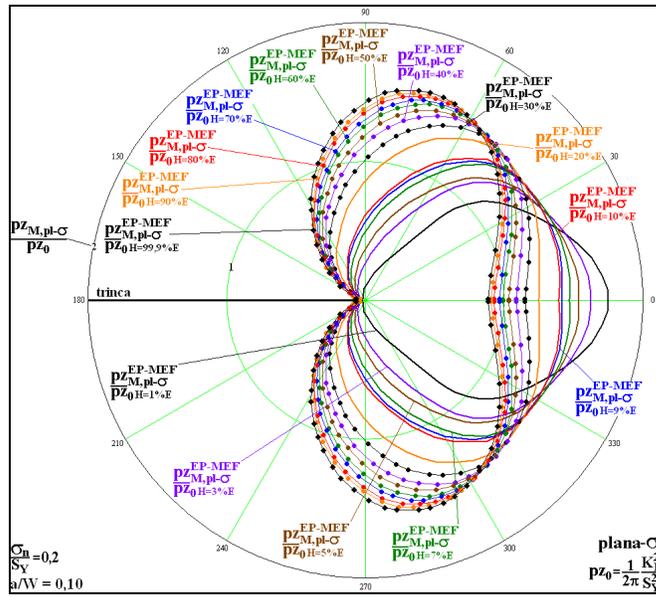


Figura 187 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_y = 0,2$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 188 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os quinze valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_y = 0,2$.

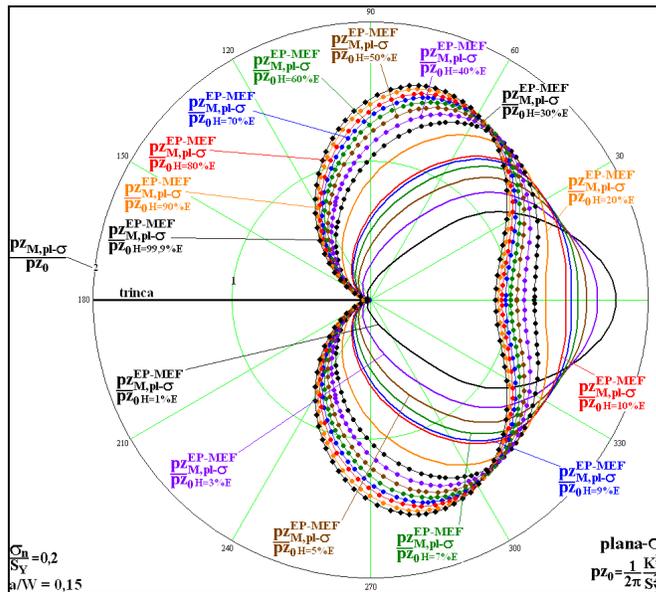


Figura 188 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_y = 0,2$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 189 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,4$.

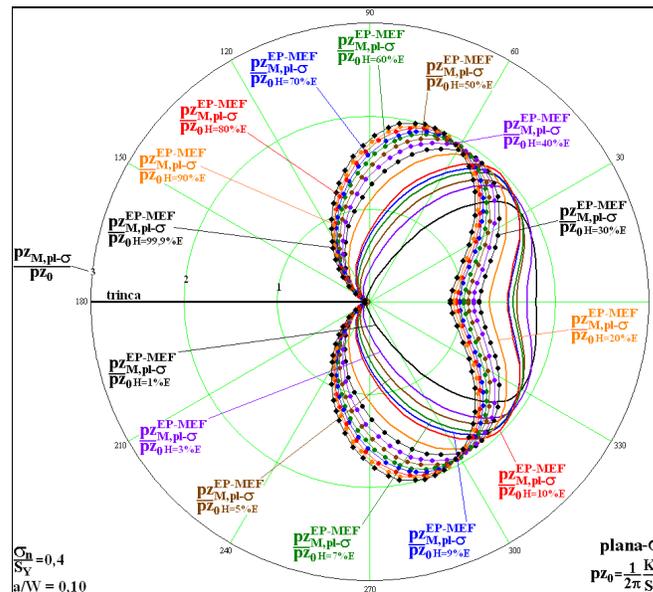


Figura 189 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,4$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 190 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,4$.

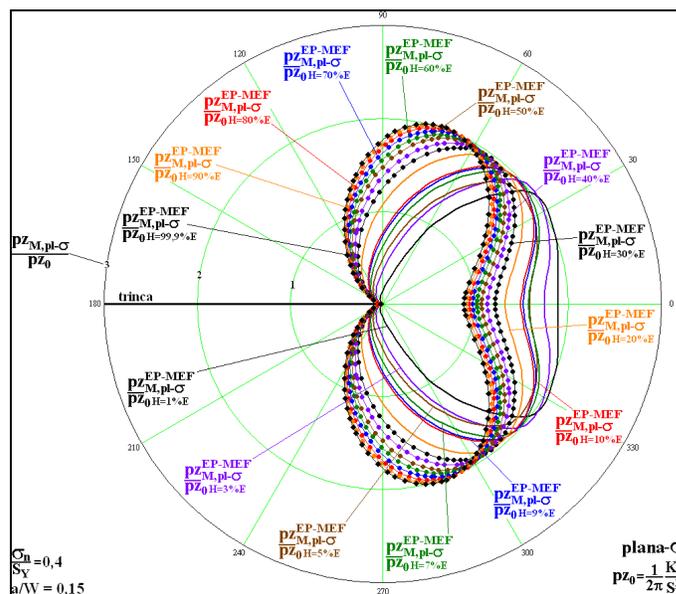


Figura 190 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,4$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 191 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,5$.

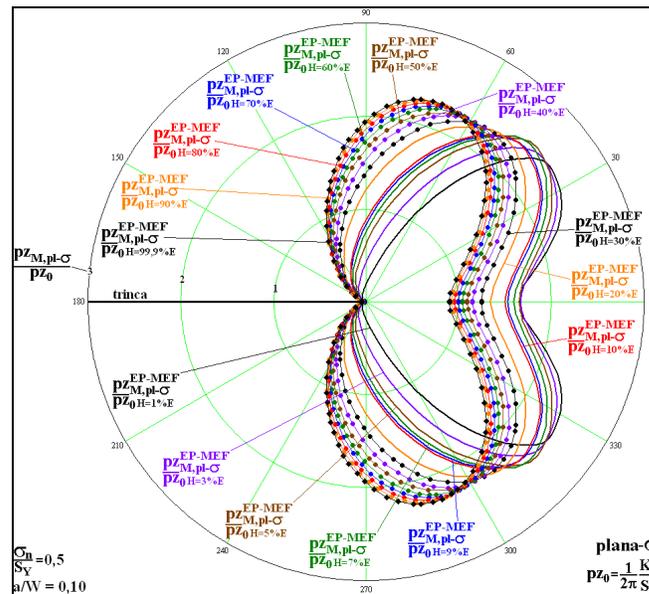


Figura 191 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,5$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 192 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,5$.

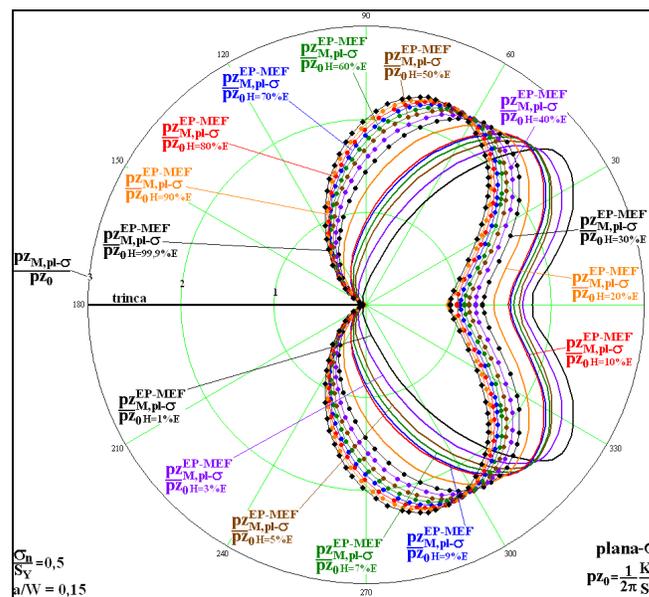


Figura 192 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,5$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 193 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,6$.

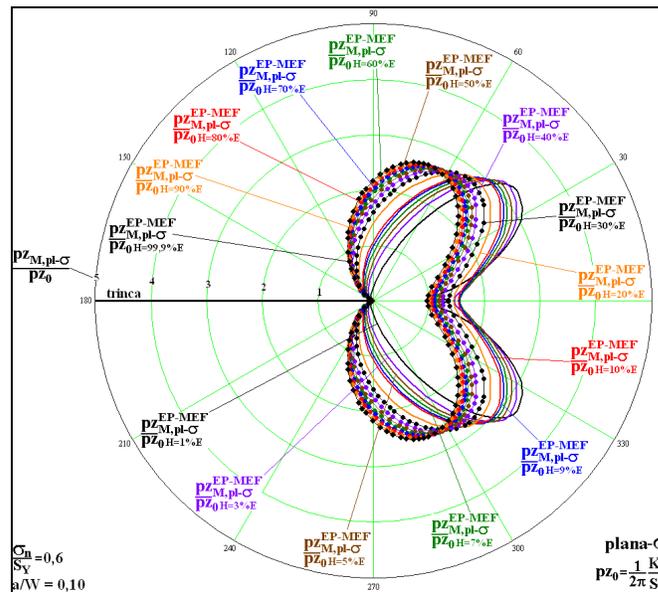


Figura 193 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,6$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 194 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,6$.

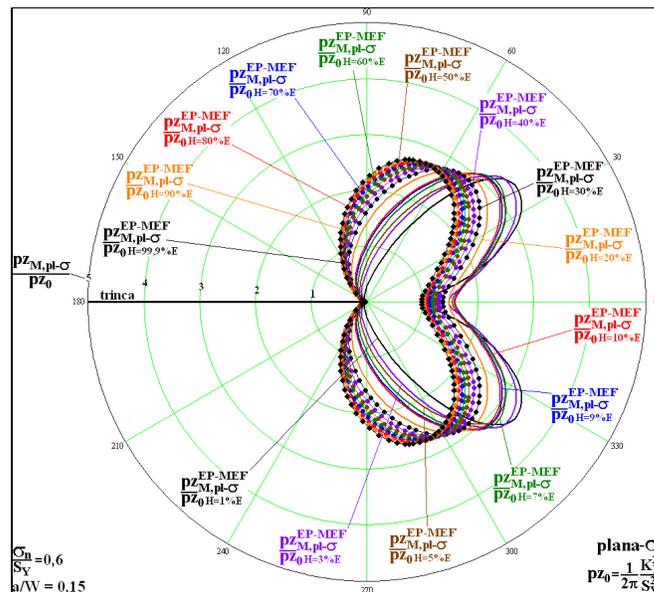


Figura 194 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,6$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 195 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,7$.

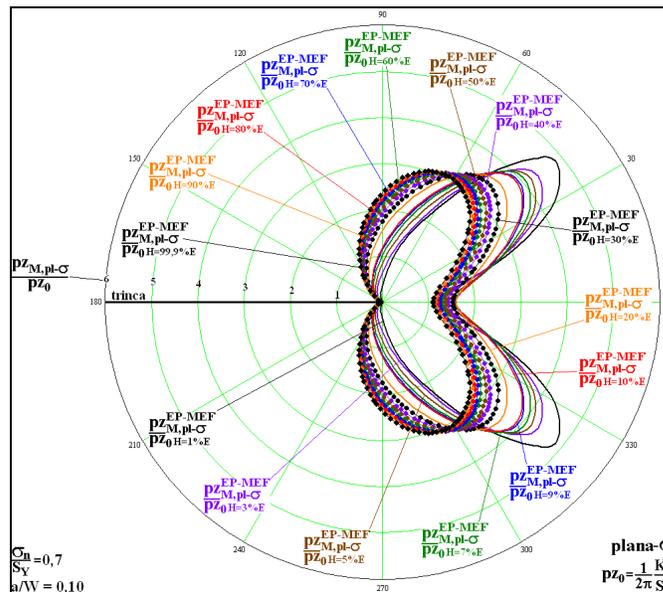


Figura 195 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,7$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 196 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,7$.

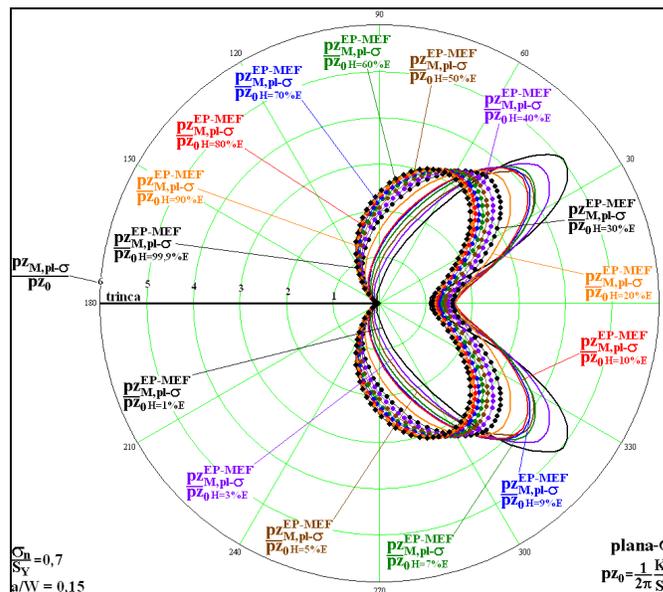


Figura 196 – Estimativas numérica feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,7$, com $a/W = 0,15$ e com os valores de coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 197 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,8$.

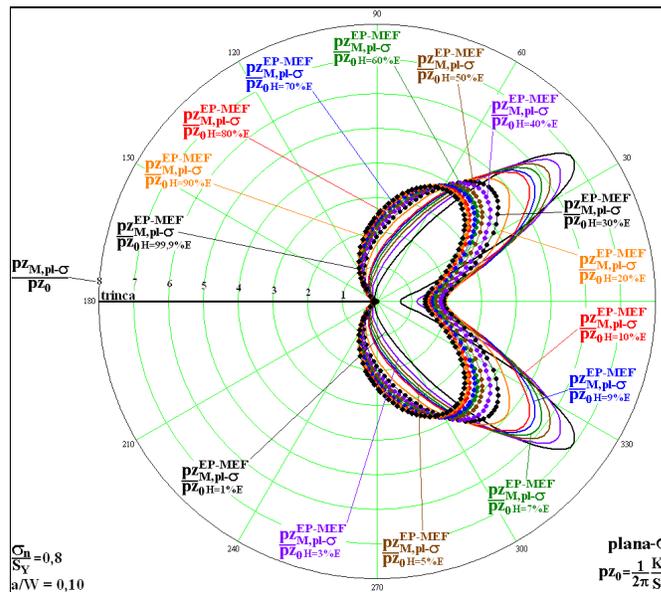


Figura 197 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,8$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 198 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de tensão plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,8$.

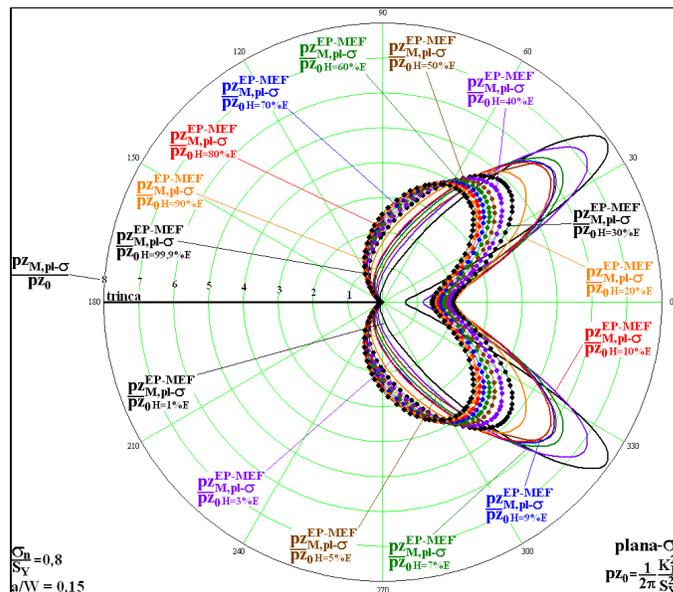


Figura 198 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,8$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 199 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,2$.

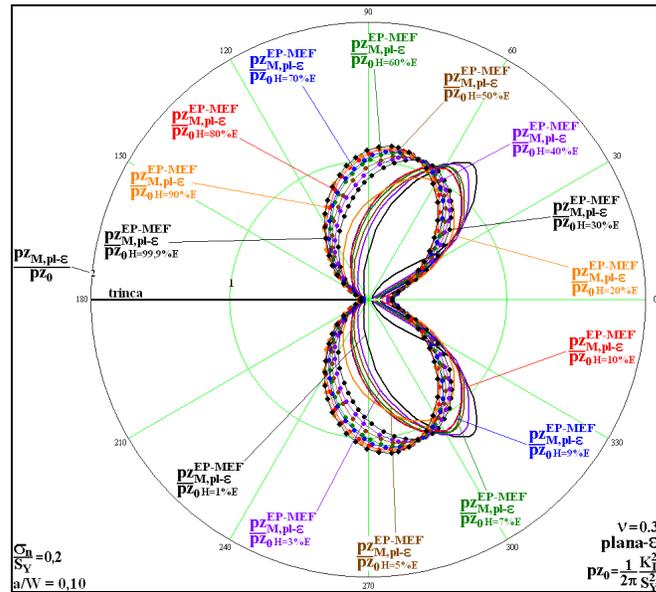


Figura 199 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,2$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 200 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,2$.

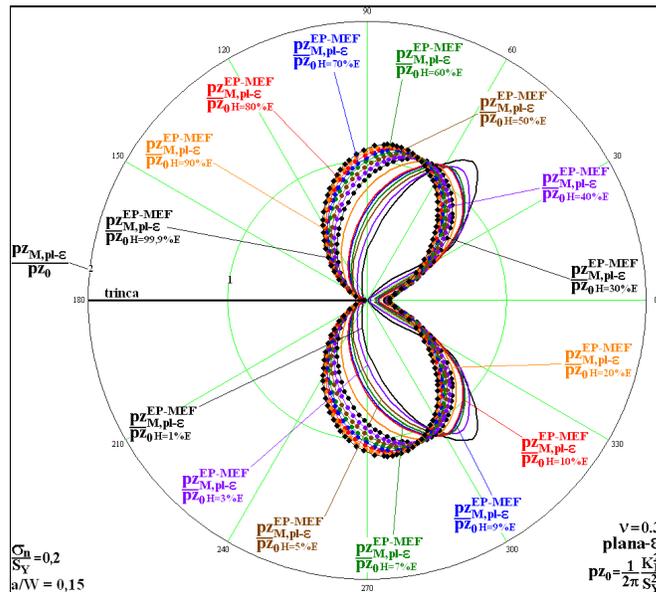


Figura 200 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,2$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 201 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,4$.

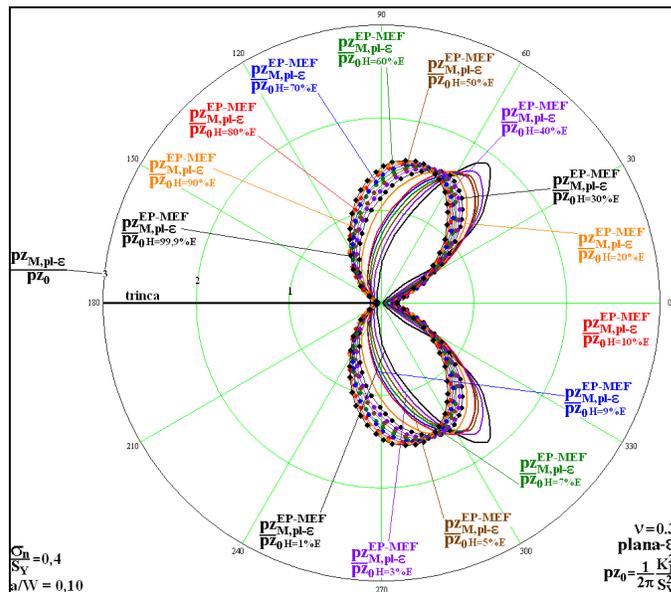


Figura 201 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,4$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 202 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,4$.

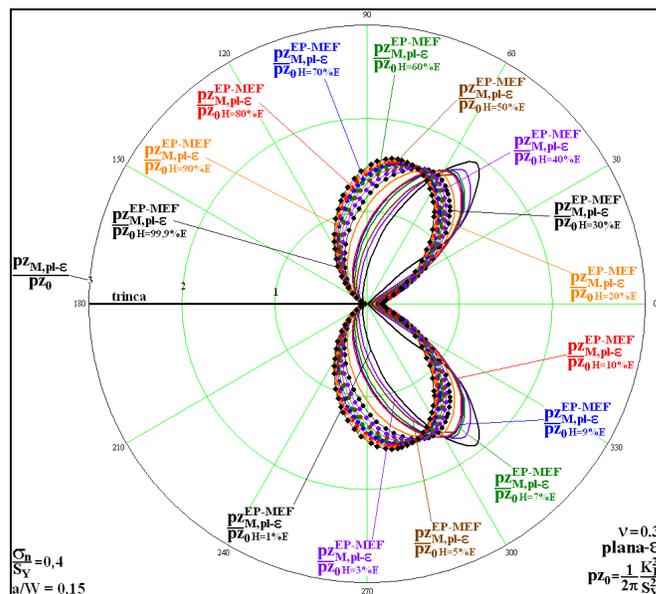


Figura 202 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,4$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 203 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,5$.

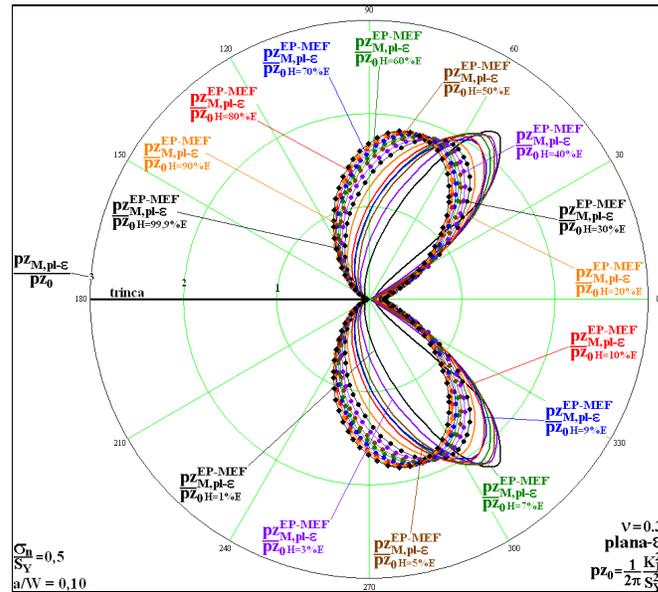


Figura 203 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,5$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 204 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,5$.

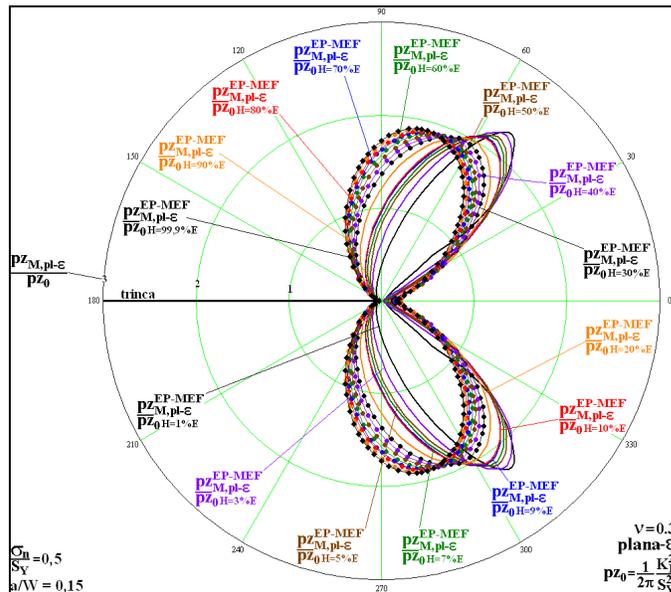


Figura 204 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,5$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 205 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,6$.

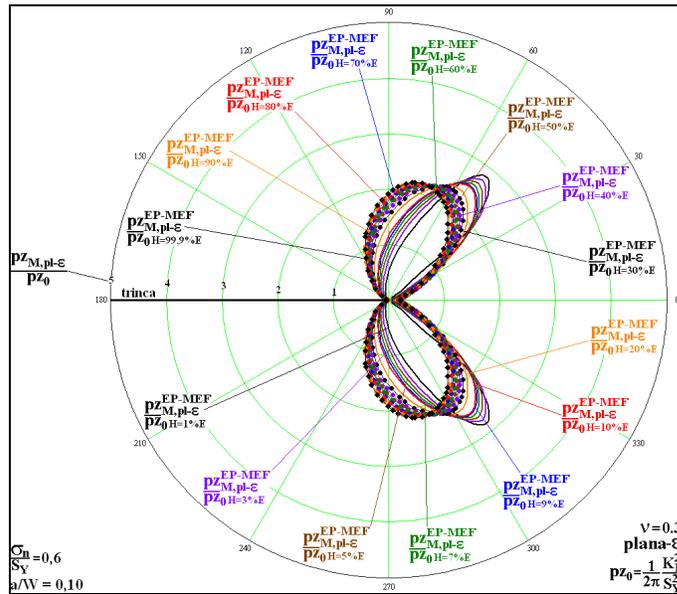


Figura 205 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,6$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 206 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,6$.

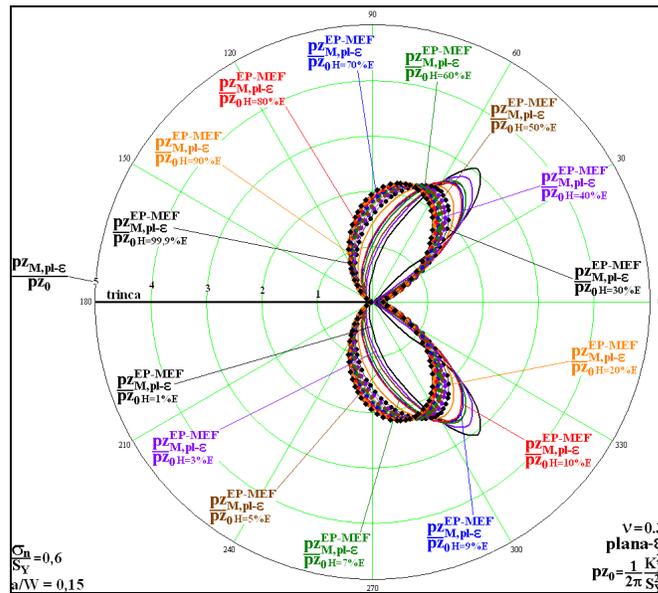


Figura 206 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,6$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 207 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,7$.

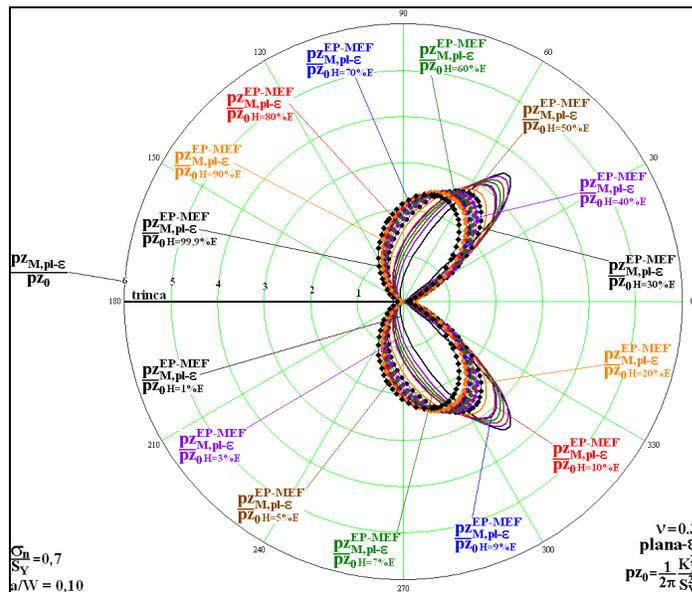


Figura 207 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,7$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 208 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,7$.

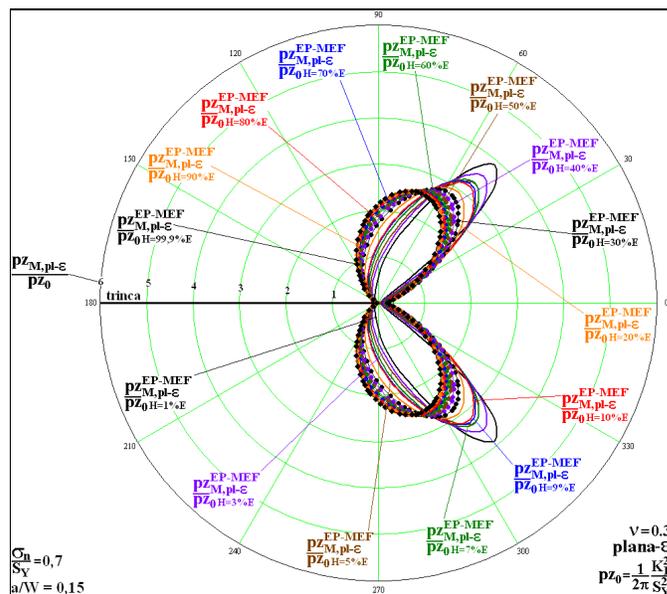


Figura 208 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,7$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 209 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,10$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,8$.

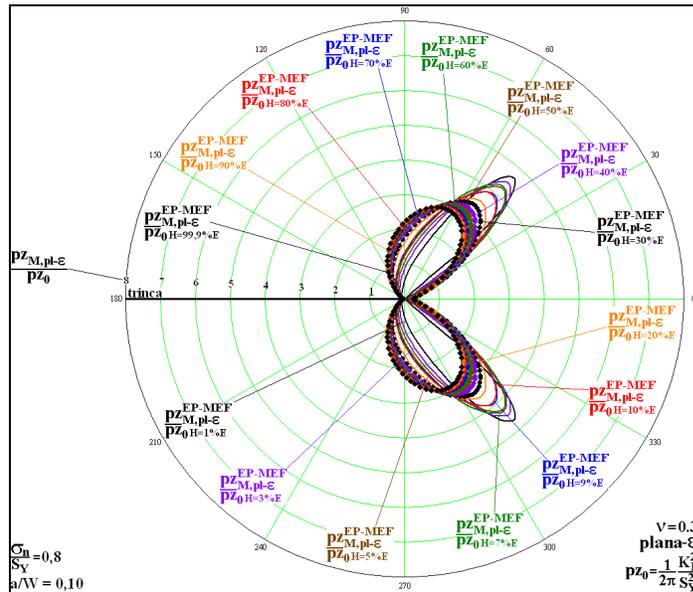


Figura 209 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,8$, com $a/W = 0,10$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

A Figura 210 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para os valores de H estudados para o caso de deformação plana com $a/W = 0,15$ e com $\sigma_n/S_Y = 0,8$.

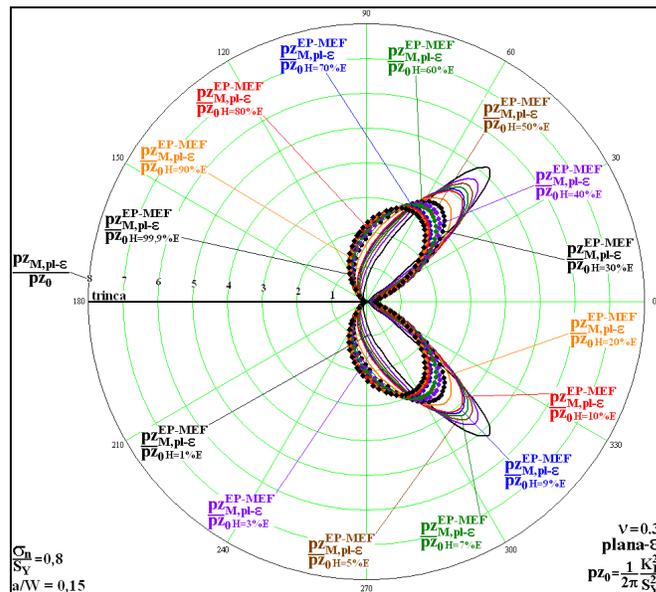


Figura 210 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana, para $\sigma_n/S_Y = 0,8$, com $a/W = 0,15$ e com os valores do coeficiente de encruamento H adotados.

As 24 figuras anteriores mostram os efeitos do encruamento na estimativa das zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear para duas relações a/W e para os dois estados planos. Analisando essas figuras, dois fatos podem ser observados. Primeiro, a mudança do encruamento de $H = 99,9\%E$ até a $H = 1\%E$ gera uma transição suave na estimativa das zonas plásticas. Esse fato reforça o uso do procedimento numérico utilizado, pois não há nenhuma mudança brusca nos resultados, o que poderia indicar algum problema de convergência numérica. O segundo fato que deve ser comentado e que é mais fácil de ser observado para os casos em tensão plana, é que a mudança de H parece alterar apenas a forma das zonas plásticas, sendo que para baixos níveis de σ_n/S_Y e para baixos valores de H (materiais próximos do modelo perfeitamente plásticos) as zonas plásticas crescem na direção paralela ao plano da trinca. Ao se manter os valores de H baixos, as zonas plásticas crescem em uma direção em torno de 45° em relação ao plano da trinca à medida que se aumenta o valor de σ_n/S_Y , conforme mostra a Figura 197 e a Figura 198.

A comparação entre as zonas plásticas obtidas por uma análise não linear ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) e as zonas plásticas corrigidas ($pZ_M^{LE-MHEC+eq}$), assim como um estudo sobre os efeitos do parâmetro geométrico a/W , são feitos na próxima subseção.

7.3.2. Efeito do parâmetro a/W nas zonas plásticas elastoplásticas e comparação entre essas zonas plásticas com as zonas plásticas corrigidas

Esta subseção apresenta doze figuras, seis que mostram o caso em tensão plana e seis que mostram o caso em deformação plana. Para cada figura, fixa-se o valor σ_n/S_Y e se mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e $H = 99,9\%E$ para os dois valores de a/W estudados (0,10 e 0,15). Também se mostra, em cada figura, as zonas plásticas lineares elásticas obtidas pelo MHEC ($pZ_M^{LE-MHEC}$) e as zonas plásticas corrigidas em que se considera um material perfeitamente plástico ($pZ_M^{LE-MHEC+eq}$). Dessa forma, a Figura 211 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,2$ para o caso em tensão plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

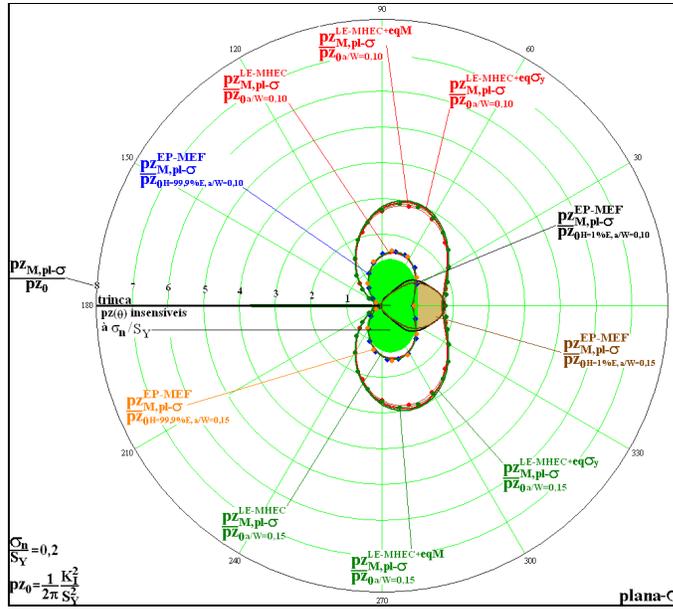


Figura 211 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 212 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,4$ para o caso em tensão plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

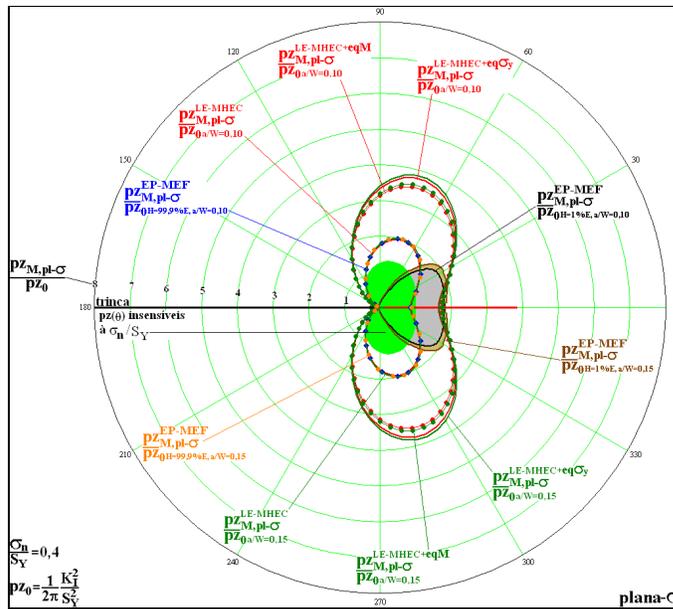


Figura 212 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,4$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 213 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,5$ para o caso em tensão plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

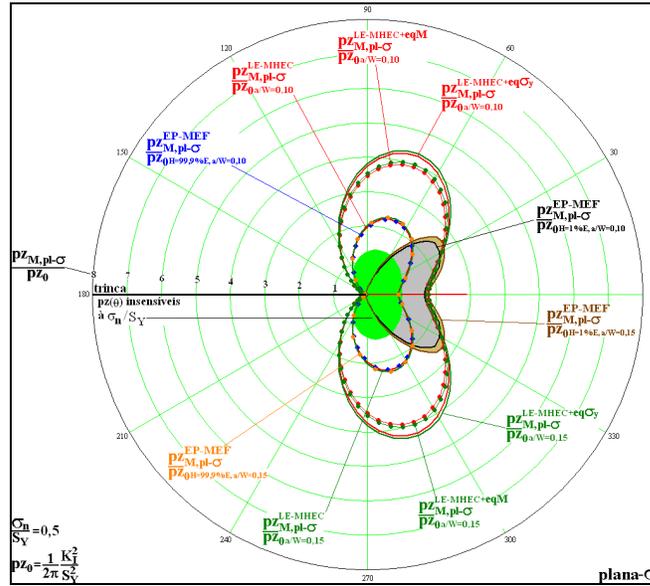


Figura 213 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pz_M^{LE-MHEC}$ e $pz_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,5$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 214 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,6$ para o caso em tensão plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

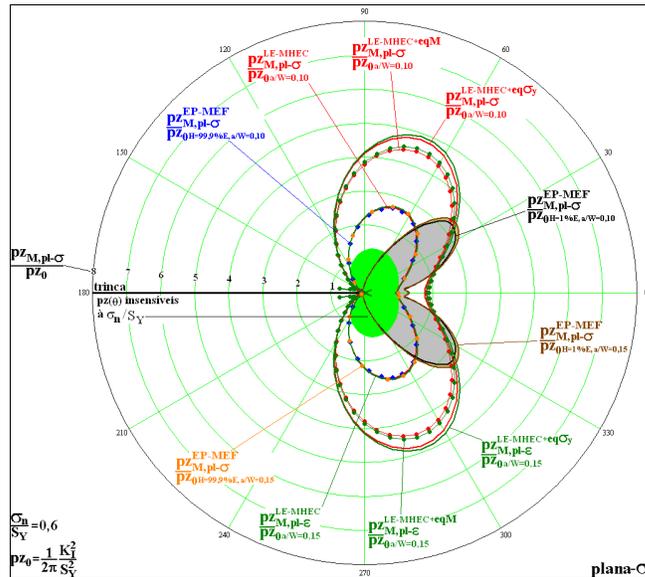


Figura 214 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pz_M^{LE-MHEC}$ e $pz_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,6$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 215 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,7$ para o caso em tensão plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

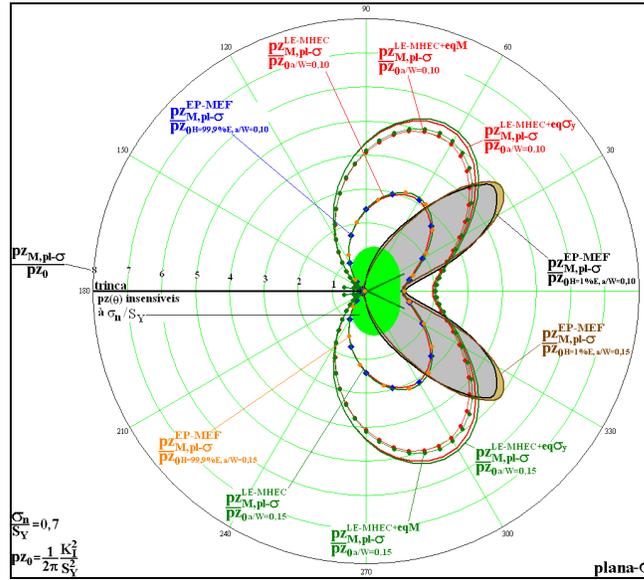


Figura 215 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,7$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 216 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,8$ para o caso em tensão plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

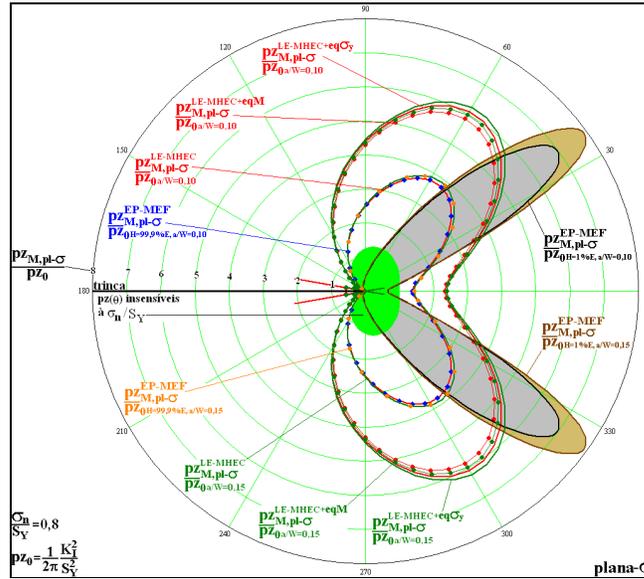


Figura 216 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,8$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 217 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_r/S_Y = 0,2$ para o caso em deformação plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

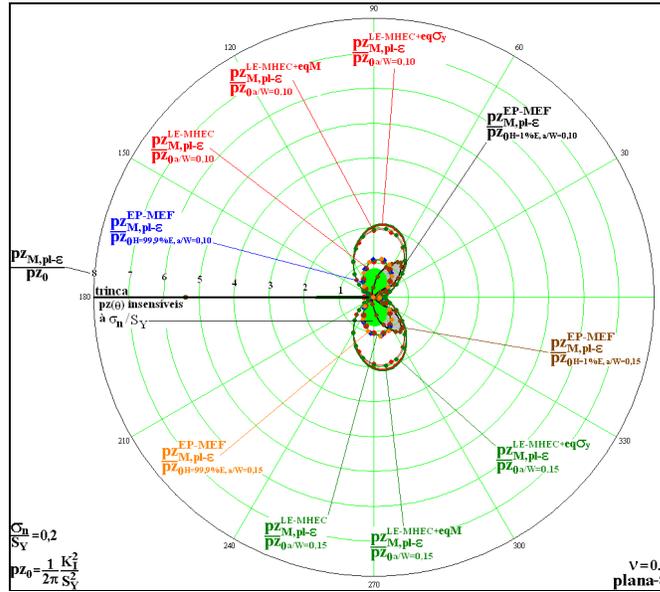


Figura 217 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_r/S_Y = 0,2$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 218 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_r/S_Y = 0,4$ para o caso em deformação plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

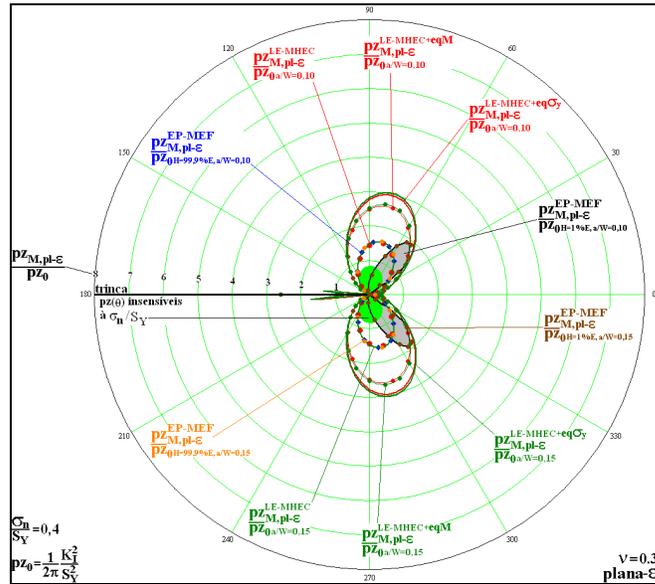


Figura 218 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_r/S_Y = 0,4$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 219 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_r/S_Y = 0,5$ para o caso em deformação plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

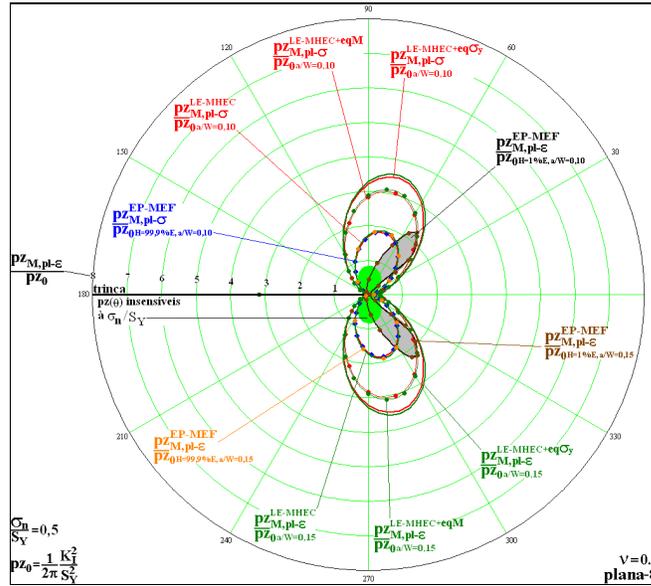


Figura 219 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_r/S_Y = 0,5$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

A Figura 220 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_r/S_Y = 0,6$ para o caso em deformação plana e para os valores de H iguais à $1\%E$ e $99,9\%E$.

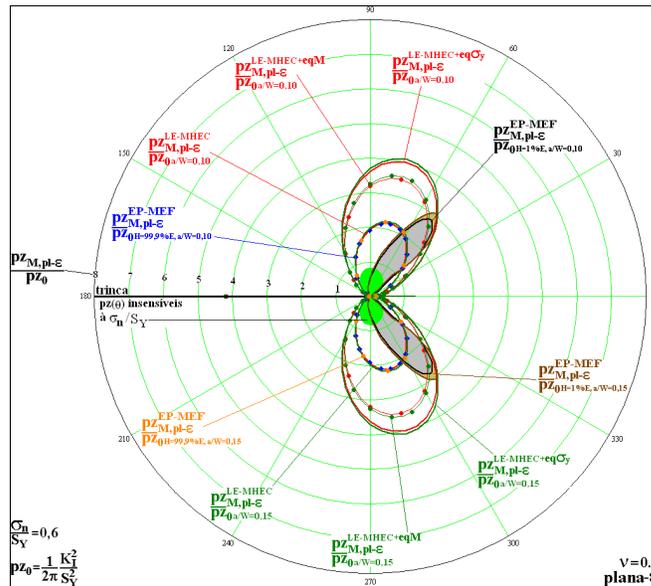


Figura 220 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 99,9\%E$ e $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_r/S_Y = 0,6$ e com $a/W = 0,10$ e $a/W = 0,15$.

Ao se analisar as doze figuras anteriores, é possível perceber que para um valor fixo de σ_n/S_Y , as zonas plásticas para $a/W = 0,15$ são maiores que as zonas plásticas obtidas para $a/W = 0,10$. Essa diferença aumenta a medida que se aumenta o valor de σ_n/S_Y e ocorre para as zonas plásticas $pz_M^{LE-MHEC}$, para as zonas plásticas $pz_M^{LE-MHEC+eq}$, e para as zonas plásticas elastoplásticas $(pz_{M,a/W,H}^{EP-MEF})$.

Em relação a comparação entre as zonas plásticas $pz_M^{LE-MHEC+eq}$ e as zonas plásticas $pz_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$, é possível perceber que para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y \leq 0,5$ as zonas plásticas $pz_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pz_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ para $\theta = 0^\circ$, conforme foi previsto por Irwin (1958). A diferença é que Irwin utilizou o campo de tensões linear elástico gerado por K_I e as zonas plásticas corrigidas nas figuras anteriores foram obtidas pelo campo de tensões linear elástico gerado numericamente pelo MHEC. Para direções diferentes de $\theta = 0^\circ$, percebe-se que a diferença entre as estimativas elastoplásticas e as estimativas lineares elásticas corrigidas são consideravelmente grandes.

Conforme visto na subseção 7.3.1., para $H = 1\%E$, as zonas plásticas, sob tensão plana, crescem em uma direção em torno de 45° em relação ao plano da trinca à medida que se aumenta o valor de σ_n/S_Y .

7.4. Placa retangular com uma trinca central sob flexo tração

Este exemplo pode ser visualizado com mais detalhe na Figura 121. Seis valores de σ_n/S_Y são utilizados: 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 e 0,8. Dois valores de a/W são usados: 0,05 e 0,40 com o tamanho da trinca ($2a$) igual a 1 cm. Sete valores do coeficiente H são testados, que são: $1\%E$, $3\%E$, $5\%E$, $7\%E$, $9\%E$, $20\%E$ e $40\%E$.

Com todas essas informações diferentes é possível avaliar os efeitos de σ_n/S_Y , de a/W e do encruamento no tamanho e forma das zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear $(pz_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF})$, em que $C1$ indica a relação a/W adotada e $C2$ indica a porcentagem que relaciona o coeficiente H com o E .

Dessa maneira, esta seção é dividida em duas subseções. A primeira subseção mostra o efeito do encruamento (H) e da relação σ_n/S_Y nas zonas plásticas para os dois estados planos e para as duas relações a/W adotadas. A segunda subseção mostra os efeitos de a/W para todos os valores de σ_n/S_Y utilizados. A estimativa linear elástica é obtida numericamente a partir do MHEC ($pZ_M^{LE-MHEC}$). As estimativas numéricas lineares elásticas corrigidas ($pZ_M^{LE-MHEC+eq}$) que são obtidas a partir do uso do MHEC são comparadas com as estimativas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=1\%E}^{EP-MEF}$) obtidas a partir do ANSYS (2001).

7.4.1. Efeito do encruamento nas zonas plásticas elastoplásticas

A Figura 223 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e $a/W = 0,05$.

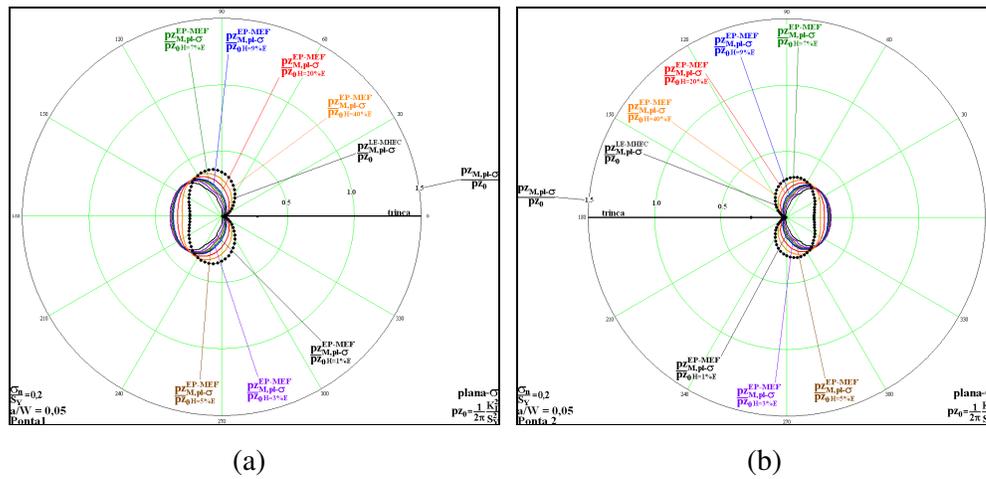


Figura 223 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,2$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 224 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e $a/W = 0,40$.

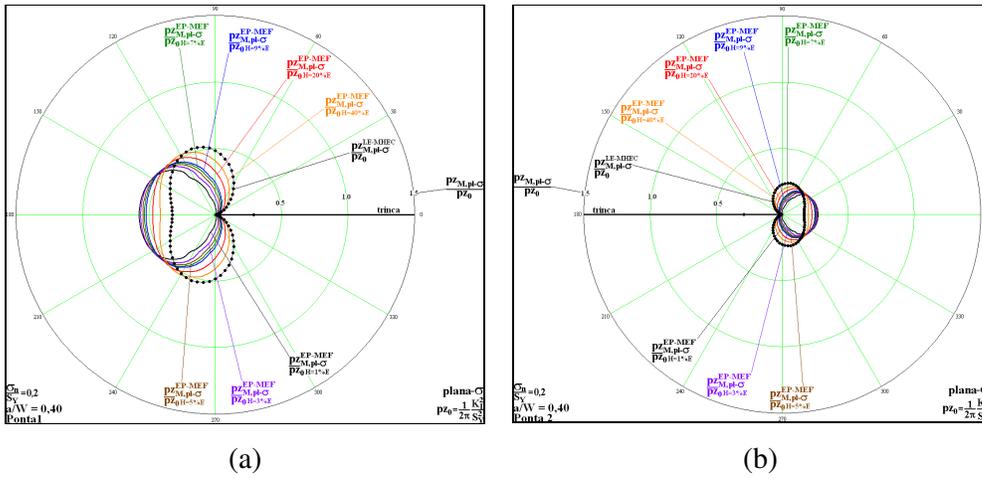


Figura 224 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z^M^{EP-MEF}$ para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,2$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 225 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z^M^{EP-MEF}$, $a/W=C1, H=C2\% E$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ e $a/W = 0,05$.

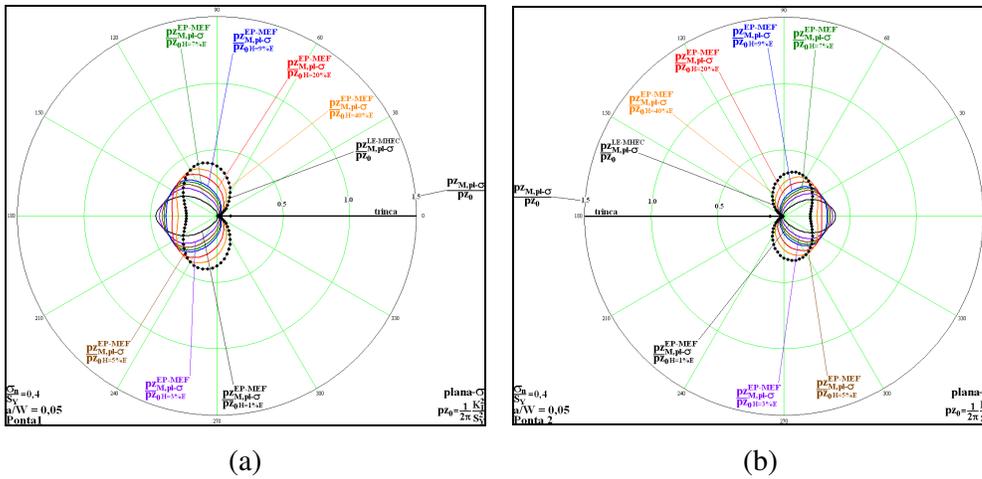


Figura 225 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z^M^{EP-MEF}$ para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 226 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z^M^{EP-MEF}$, $a/W=C1, H=C2\% E$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ e $a/W = 0,40$.

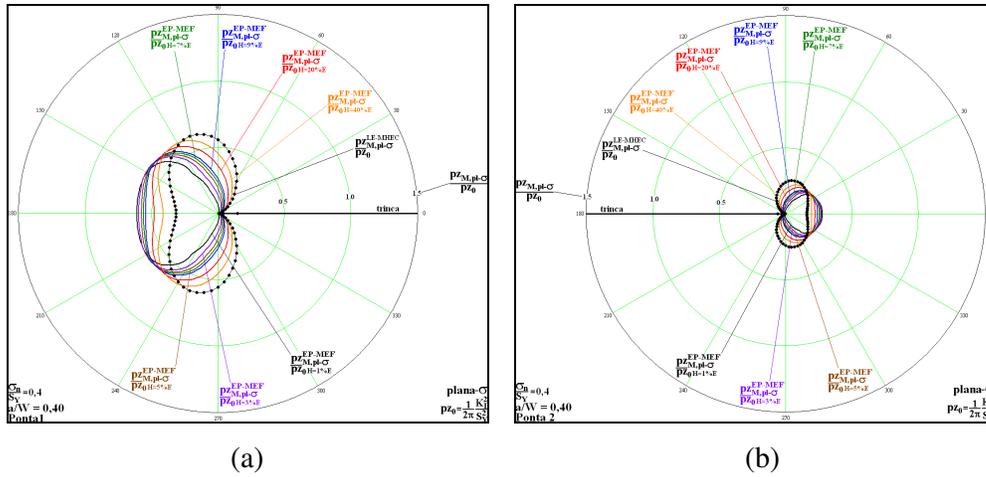


Figura 226 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 227 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,5$ e $a/W = 0,05$.

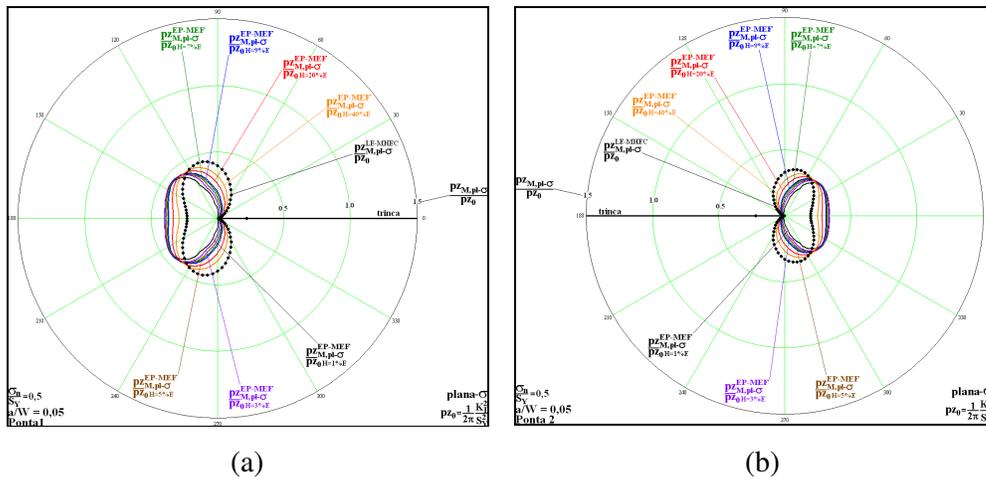


Figura 227 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,5$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 228 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_y = 0,5$ e $a/W = 0,40$.

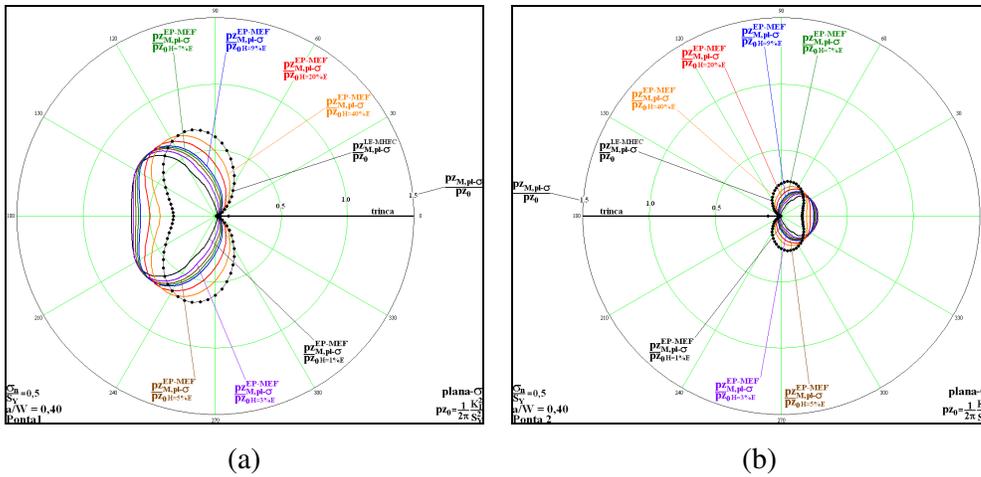


Figura 228 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,5$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 229 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,6$ e $a/W = 0,05$.

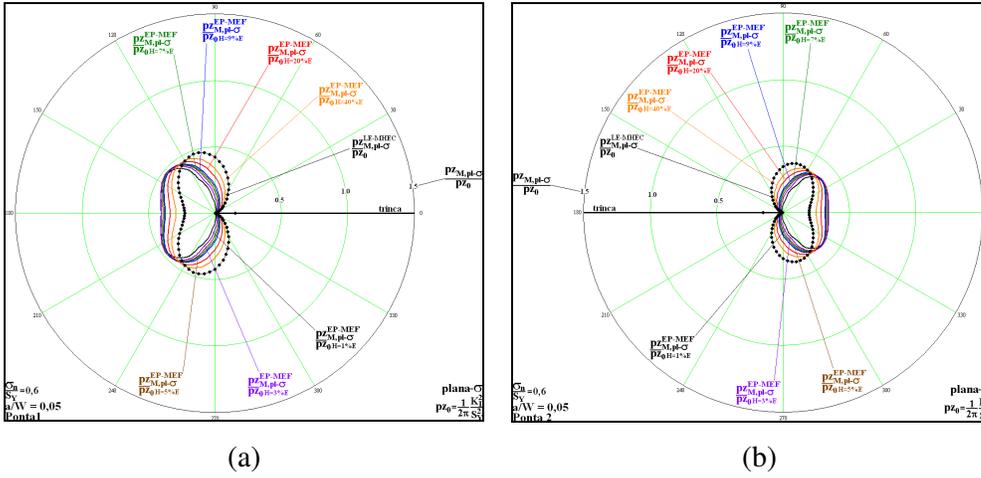


Figura 229 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,6$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 230 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,6$ e $a/W = 0,40$.

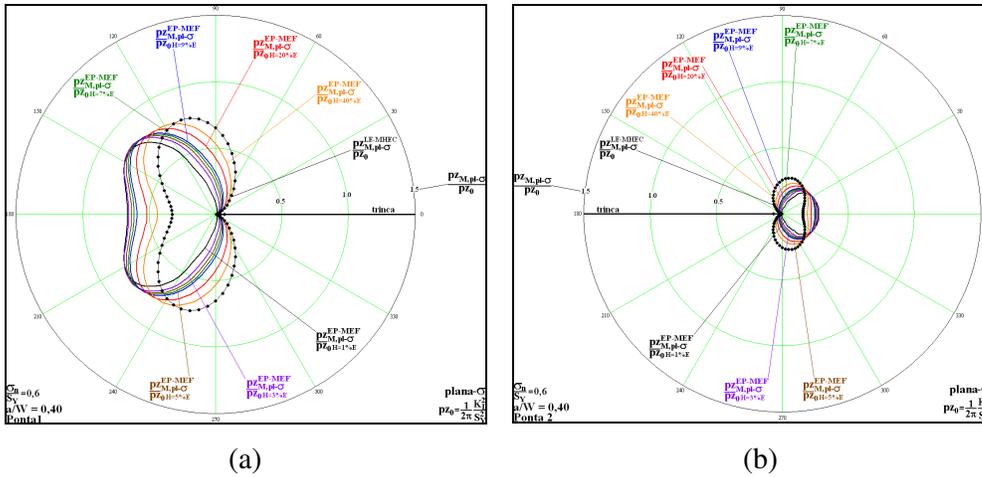


Figura 230 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pzM^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,6$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 231 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pzM,a/W=C1,H=C2\%E$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,7$ e $a/W = 0,05$.

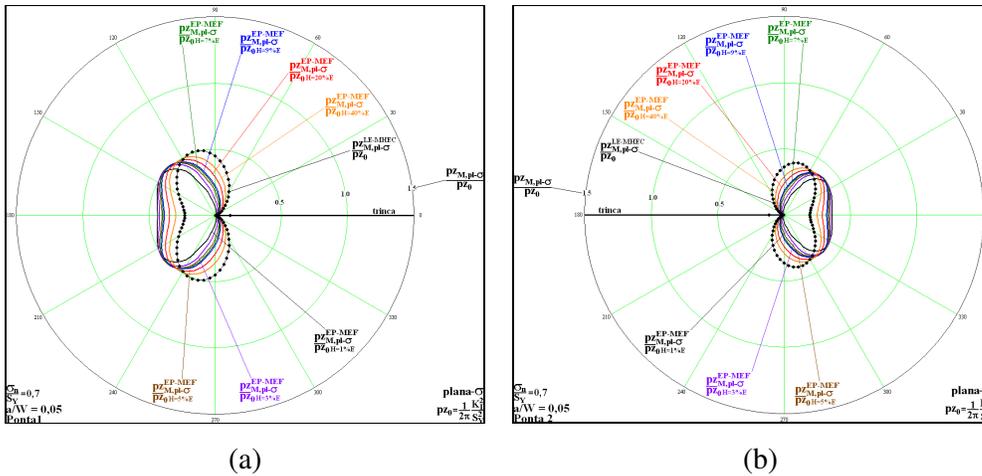


Figura 231 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pzM^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,7$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 232 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pzM,a/W=C1,H=C2\%E$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,7$ e $a/W = 0,40$.

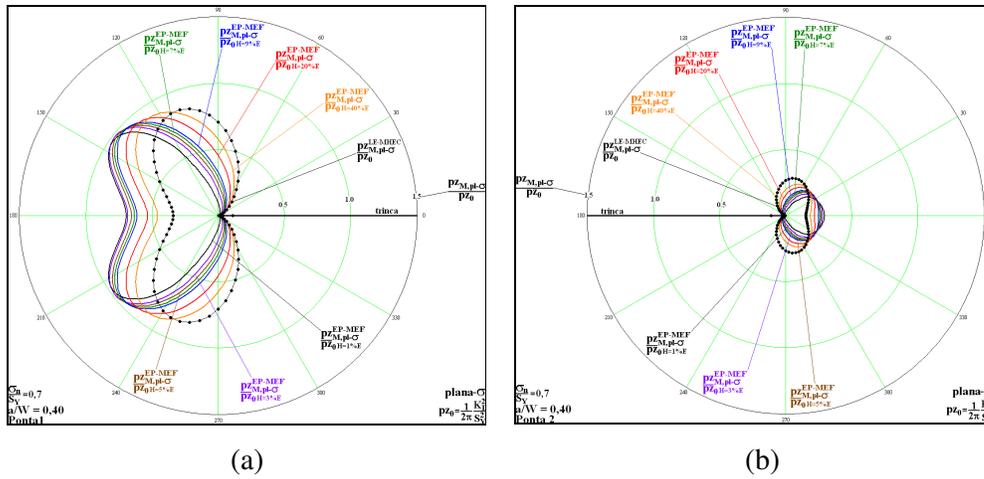


Figura 232 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,7$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 233 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pz_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,8$ e $a/W = 0,05$.

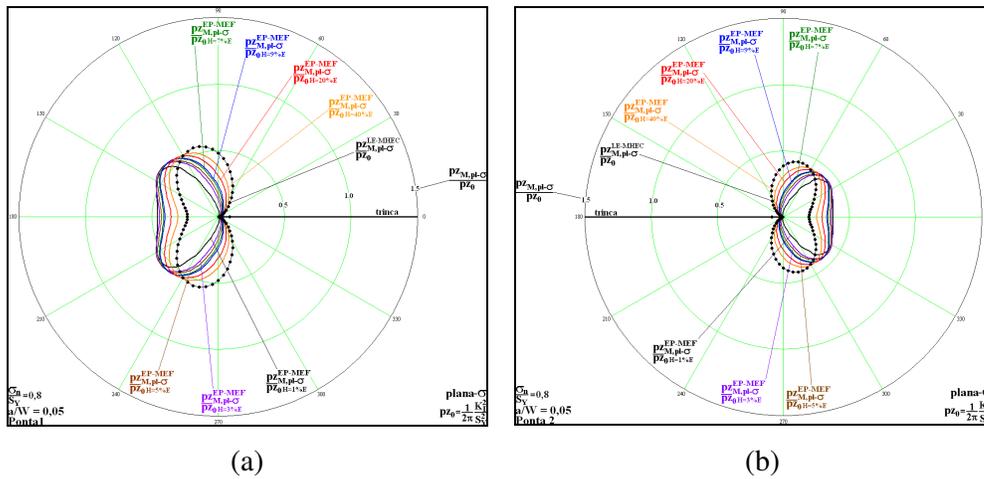


Figura 233 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pz_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,8$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 234 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pz_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) para os sete valores de H estudados para o caso de tensão plana com $\sigma_r/S_Y = 0,8$ e $a/W = 0,40$.

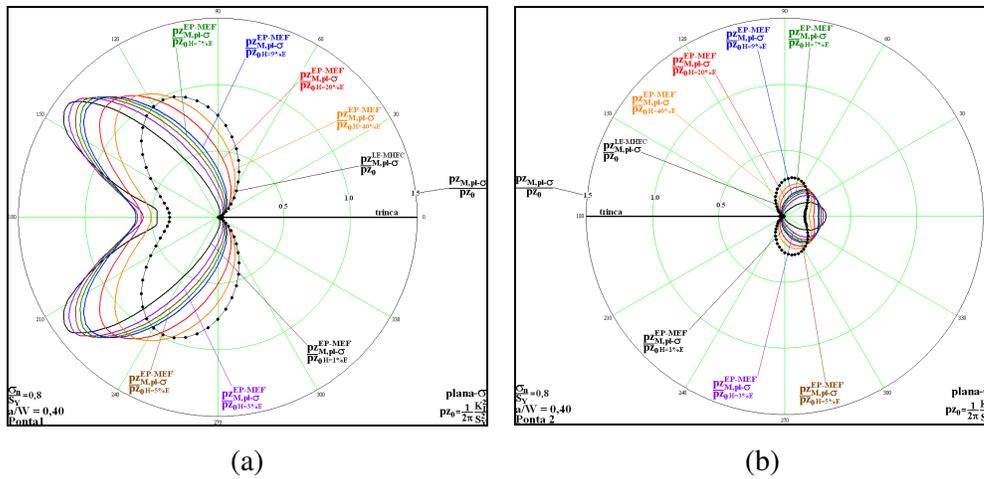


Figura 234 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de tensão plana com $\sigma_n/S_Y = 0,8$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 235 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e $a/W = 0,05$.

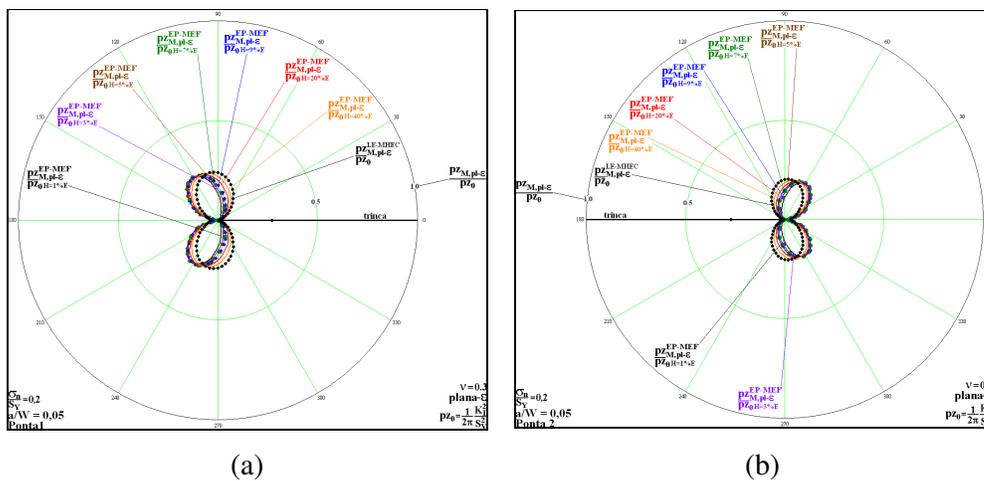


Figura 235 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pZ_M^{EP-MEF} para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,2$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 236 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($pZ_{M,a/W=C1,H=C2\%E}^{EP-MEF}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e $a/W = 0,40$.

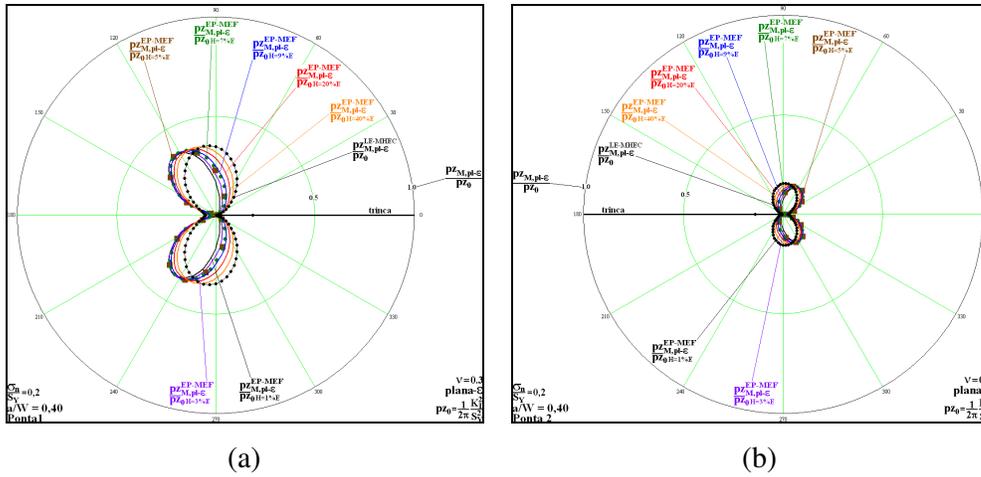


Figura 236 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,2$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 237 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ e $a/W = 0,05$.

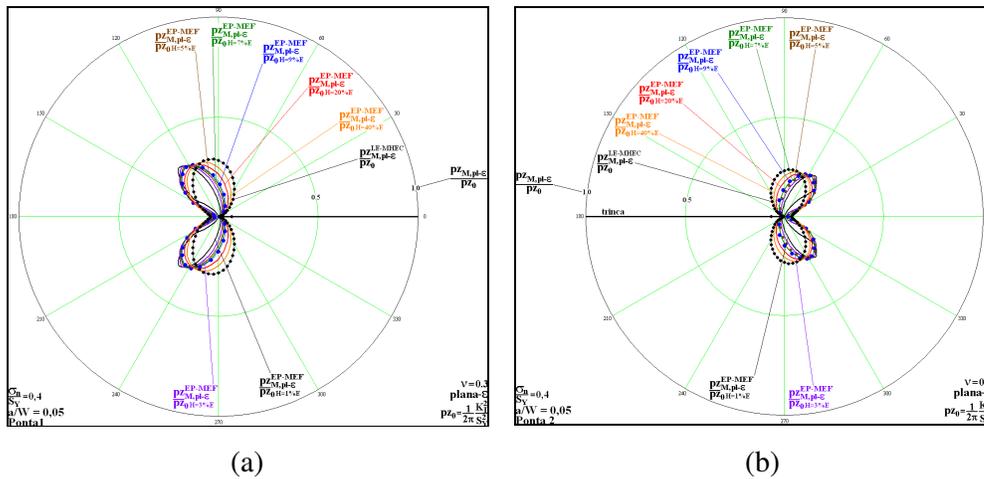


Figura 237 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 238 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,4$ e $a/W = 0,40$.

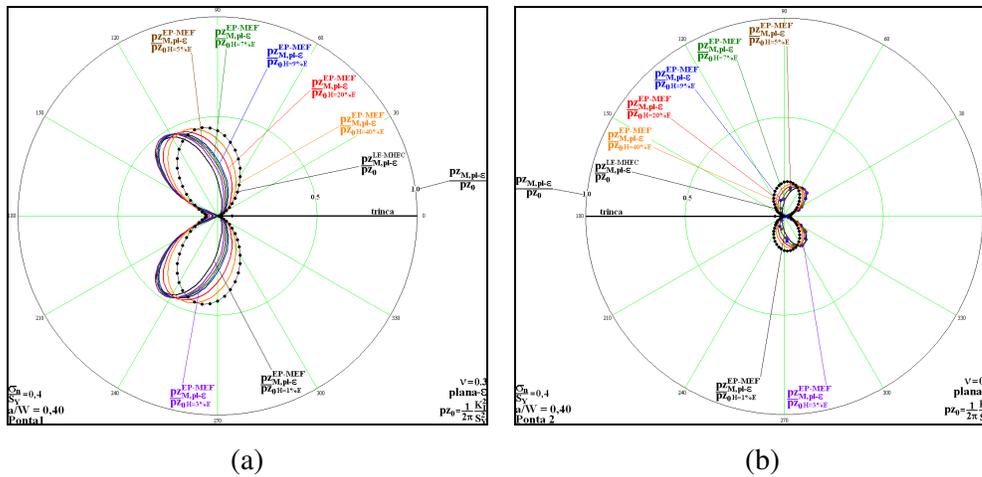


Figura 238 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,4$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 239 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,5$ e $a/W = 0,05$.

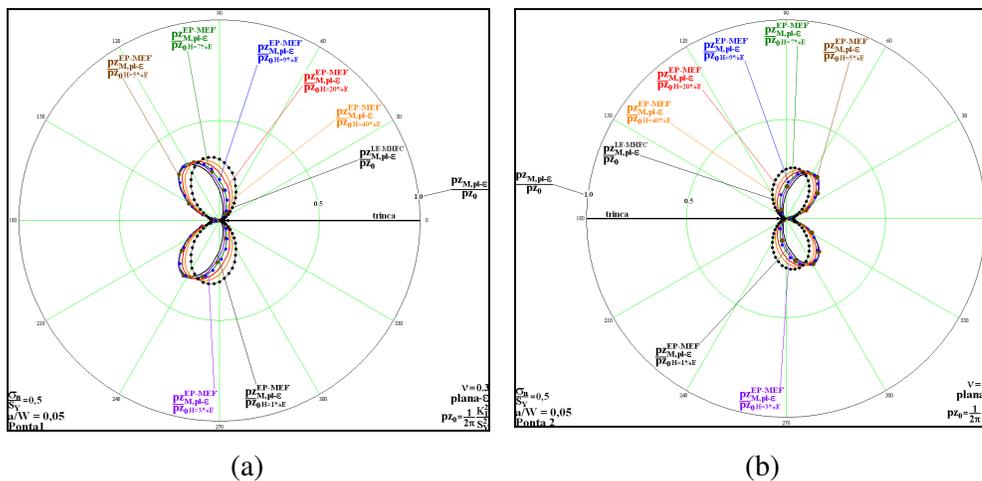


Figura 239 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,5$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 240 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,5$ e $a/W = 0,40$.

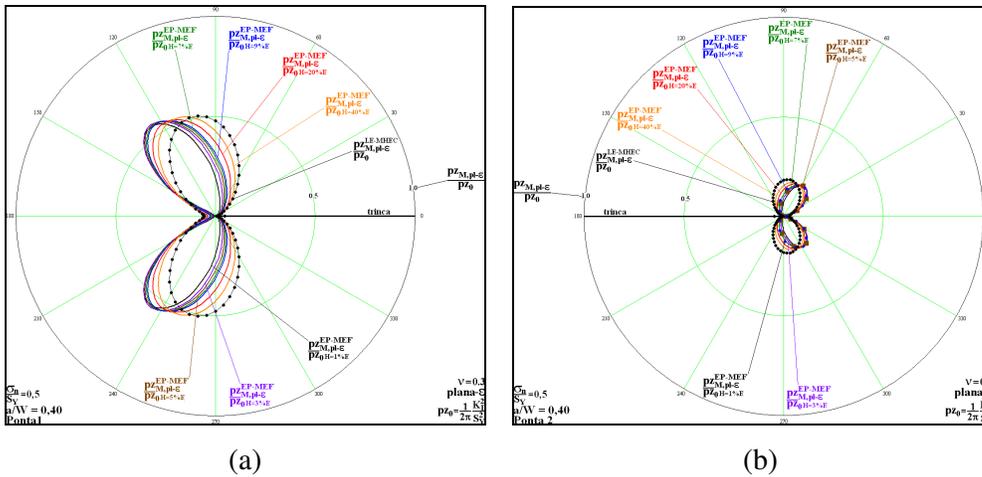


Figura 240 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pzM^{EP-MEF} para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,5$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 241 mostra as zonas plásticas elastoplásticas (pzM^{EP-MEF}) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,6$ e $a/W = 0,05$.

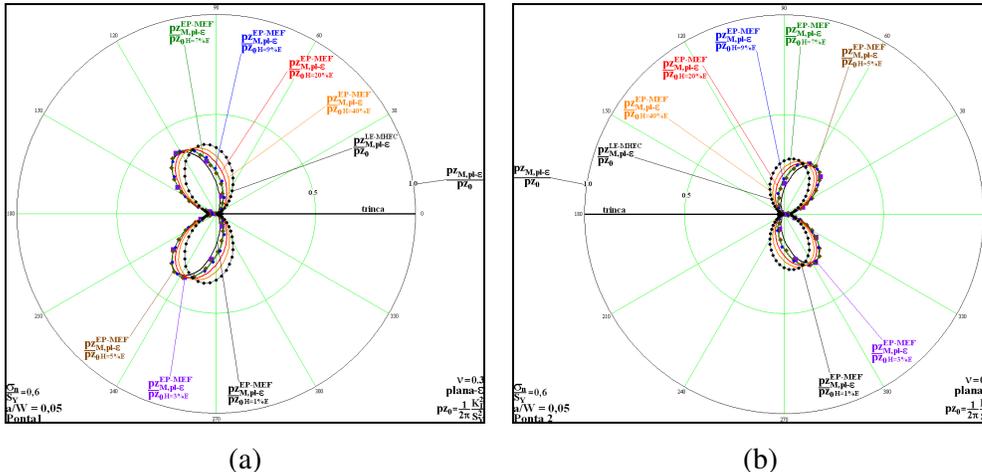


Figura 241 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das pzM^{EP-MEF} para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,6$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 242 mostra as zonas plásticas elastoplásticas (pzM^{EP-MEF}) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,6$ e $a/W = 0,40$.

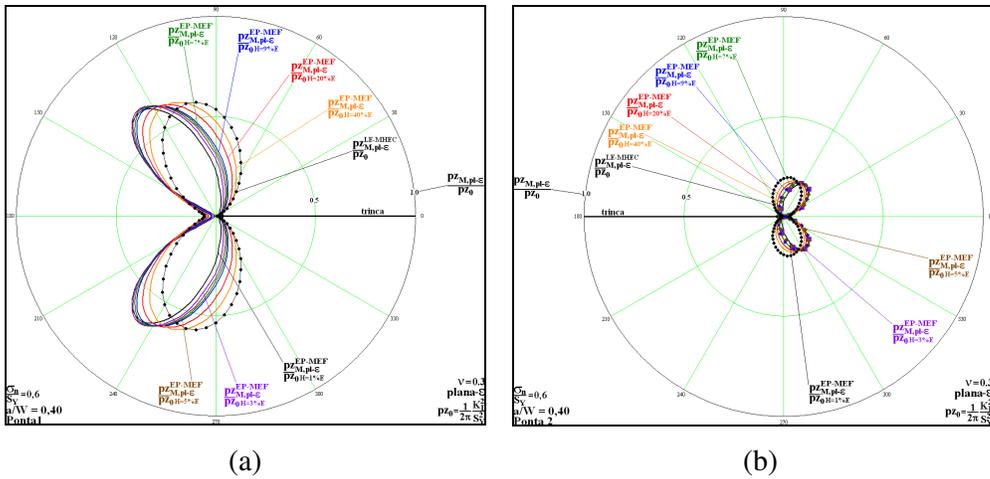


Figura 242 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,6$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 243 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,7$ e $a/W = 0,05$.

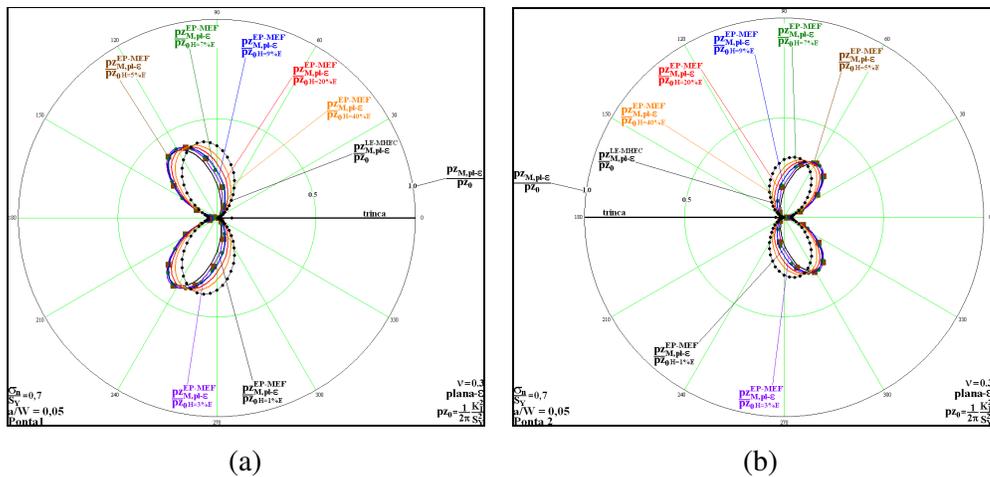


Figura 243 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,7$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 244 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,7$ e $a/W = 0,40$.

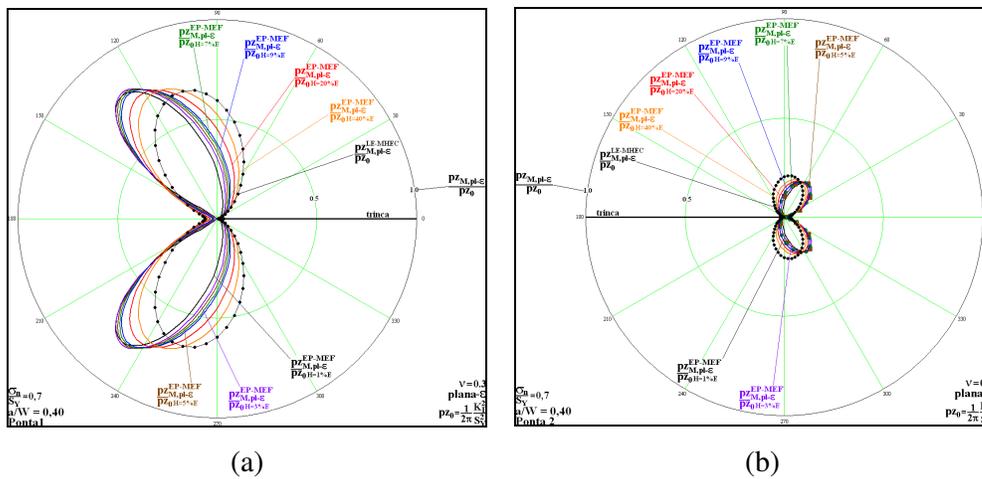


Figura 244 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,7$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 245 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,8$ e $a/W = 0,05$.

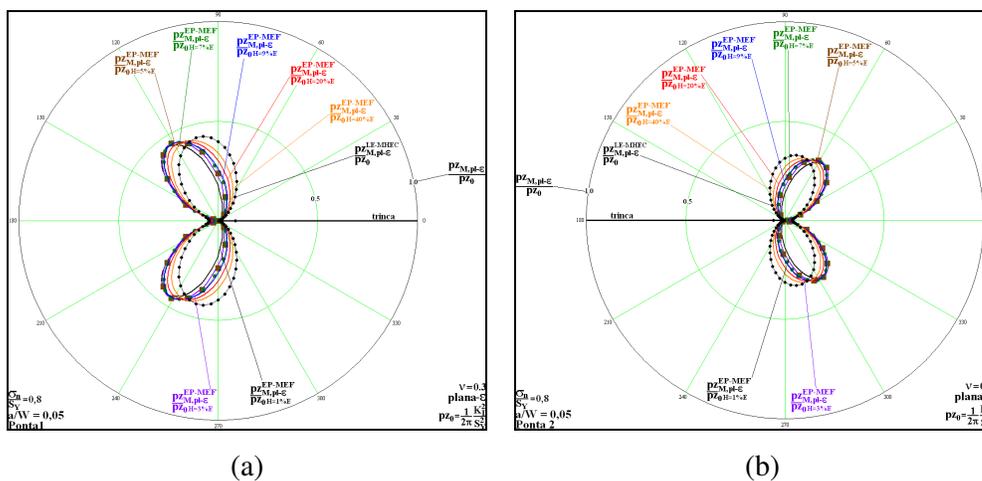


Figura 245 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,8$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,05$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 246 mostra as zonas plásticas elastoplásticas ($p_z_{M,a/W=C1,H=C2\%E}$) para os sete valores de H estudados para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_y = 0,8$ e $a/W = 0,40$.

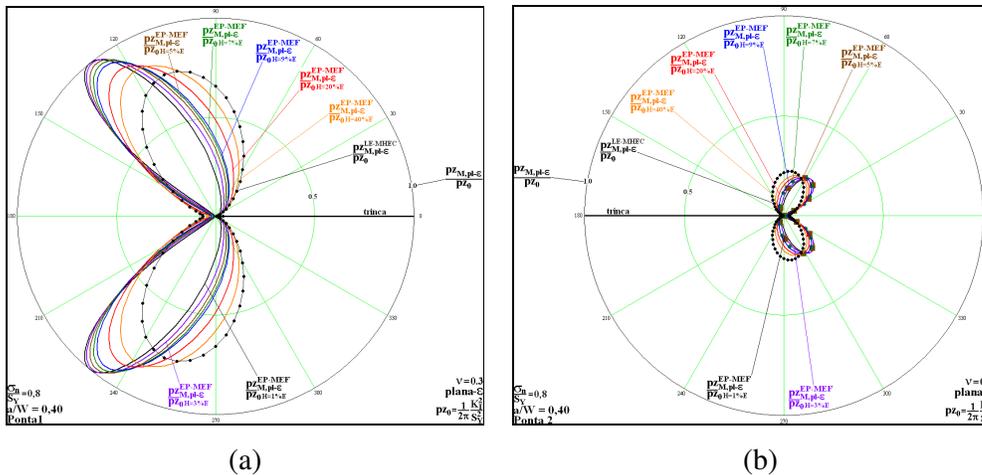


Figura 246 – Estimativas numéricas feitas pelo programa ANSYS (2001) das $p_z_M^{EP-MEF}$ para o caso de deformação plana com $\sigma_n/S_Y = 0,8$ para os sete valores de H adotados e com a relação de $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

As 24 figuras anteriores mostram os efeitos do encruamento na estimativa das zonas plásticas obtidas a partir de uma análise não linear para duas relações a/W e para os dois estados planos. Igualmente ao que acontece para o exemplo da placa retangular com trinca central sob tração, dois fatos podem ser observados. Primeiro, a mudança do encruamento gera uma mudança suave na estimativa das zonas plásticas. Esse fato reforça o uso do procedimento numérico utilizado, pois não há nenhuma mudança brusca nos resultados, o que poderia indicar algum problema de convergência numérica. O segundo fato que deve ser comentado e que é mais fácil de ser observado para os casos em tensão plana, é que a mudança de H parece alterar apenas a forma das zonas plásticas, sendo que para baixos níveis de σ_n/S_Y e para baixos valores de H (materiais próximos do modelo perfeitamente plásticos) as zonas plásticas crescem na direção paralela ao plano da trinca. Ao se manter os valores de H baixos, as zonas plásticas crescem em uma direção em torno de 45° em relação ao plano da trinca à medida que se aumenta o valor de σ_n/S_Y , conforme mostra a Figura 234(a). Além desses dois fatos que também puderam ser verificados no exemplo da placa retangular com trinca central sob tração, este exemplo apresenta outro fato importante. Ao se manter a relação σ_n/S_Y fixa e ao se aumentar o valor de a/W de 0,05 para 0,40 é possível perceber que as zonas plásticas correspondentes à ponta mais tracionada (ponta 1) aumentam de tamanho. Em contrapartida, as zonas plásticas correspondentes à

ponta menos tracionada (ponta 2) diminuem de tamanho. Essa diminuição das zonas plásticas correspondentes à ponta 2 pode ser justificada pelo fato de que ao se aumentar o valor de a/W de 0,05 para 0,40 a placa retangular com uma trinca central sob flexo tração fica menos tracionada e mais fletida.

A comparação entre as zonas plásticas obtidas por uma análise não linear $(p_{z_M}^{EP-MEF, a/W=C1, H=C2\%E})$ e as zonas plásticas corrigidas $(p_{z_M}^{LE-MHEC+eq})$, assim como um estudo sobre os efeitos do parâmetro geométrico a/W são feitos na próxima subseção.

7.4.2. Efeito do parâmetro a/W nas zonas plásticas elastoplásticas e comparação entre essas zonas plásticas com as zonas plásticas corrigidas

Esta subseção apresenta doze figuras, seis que mostram o caso em tensão plana e seis que mostram o caso em deformação plana. As duas pontas de trincas são analisadas em cada figura. Para cada uma delas, fixa-se o valor σ_n/S_Y e se mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ para os dois valores de a/W estudados (0,05 e 0,40). Também se mostra, em cada figura, as zonas plásticas lineares elásticas obtidas pelo MHEC $(p_{z_M}^{LE-MHEC})$ e as zonas plásticas corrigidas em que se considera um material perfeitamente plástico $(p_{z_M}^{LE-MHEC+eq})$. Dessa forma, a Figura 247 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,2$ para o caso sob tensão plana e para $H = 1\%E$.

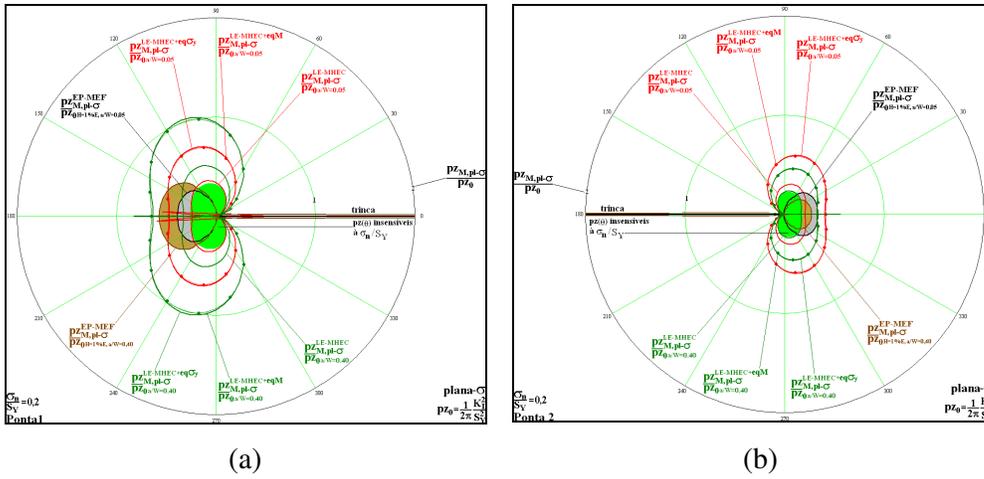


Figura 247 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $p_z_M^{LE-MHEC}$ e $p_z_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 248 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,4$ para o caso sob tensão plana e para $H = 1\%E$.

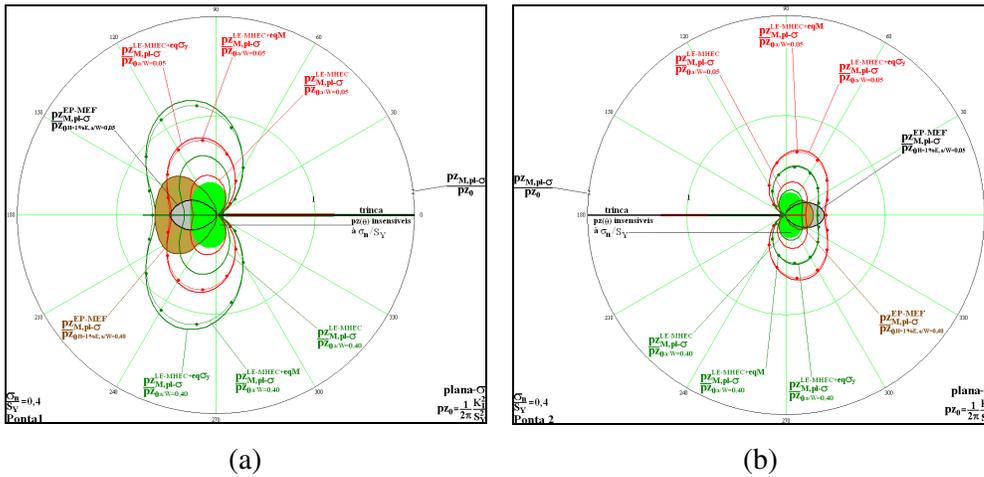


Figura 248 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $p_z_M^{LE-MHEC}$ e $p_z_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,4$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 249 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,5$ para o caso sob tensão plana e para $H = 1\%E$.

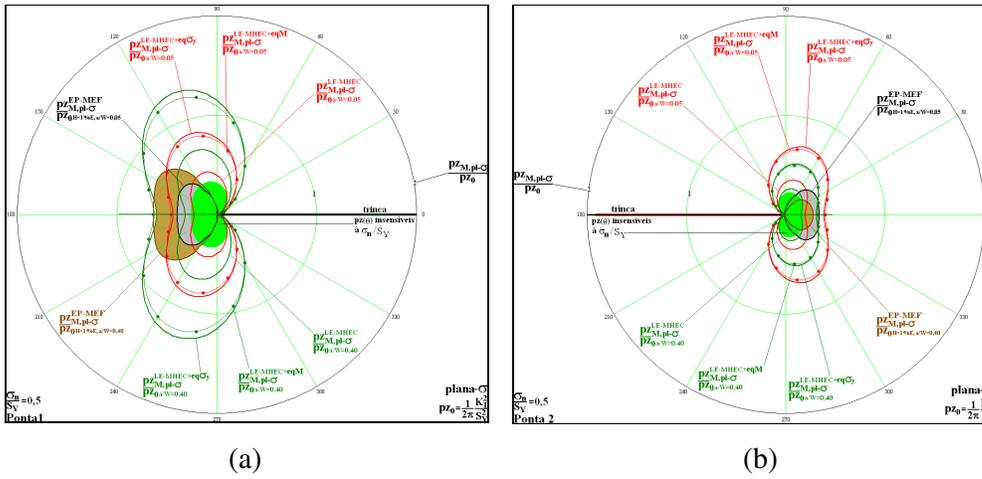


Figura 249 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $p_z^{LE-MHEC}$ e $p_z^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,5$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 250 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,6$ para o caso sob tensão plana e para $H = 1\%E$.

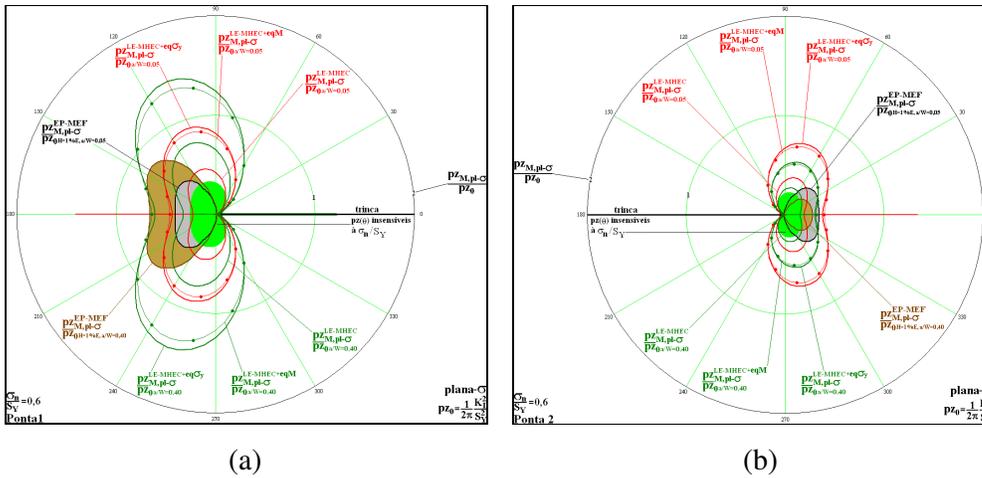


Figura 250 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $p_z^{LE-MHEC}$ e $p_z^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,6$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 251 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,7$ para o caso sob tensão plana e para $H = 1\%E$.

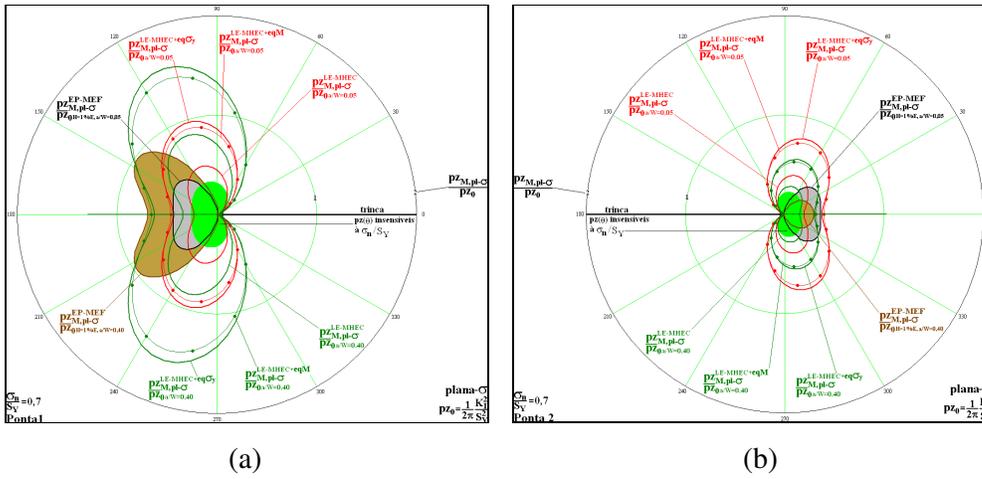


Figura 251 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,7$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 252 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,8$ para o caso sob tensão plana e para os valores de H igual a $1\%E$.

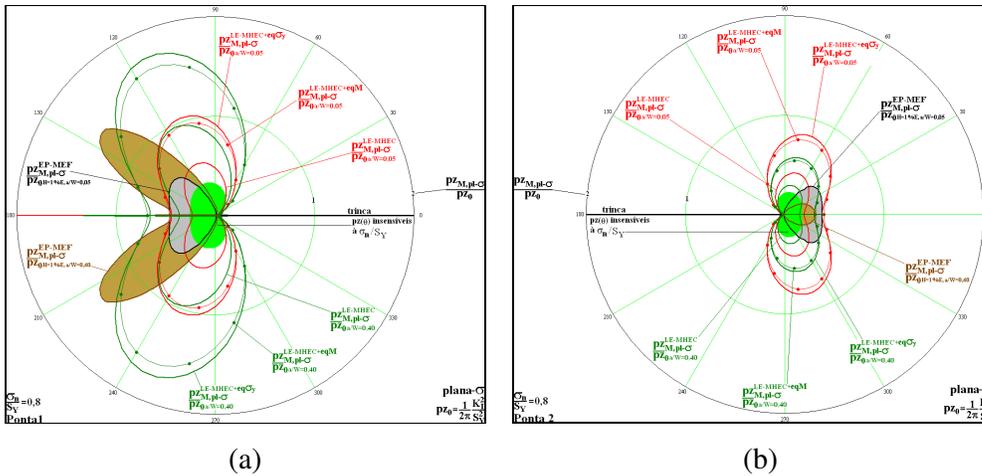


Figura 252 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de tensão para $\sigma_n/S_Y = 0,8$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

As próximas seis figuras correspondem ao caso de deformação plana. A Figura 253 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,2$ para o caso sob deformação plana e para $H = 1\%E$.

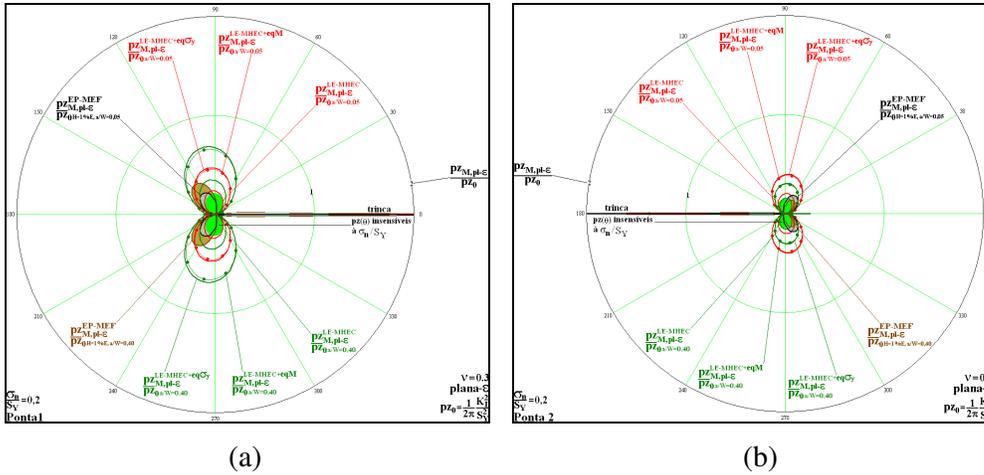


Figura 253 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $p_z_M^{LE-MHEC}$ e $p_z_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_n/S_Y = 0,2$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 254 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,4$ para o caso sob deformação plana e para $H = 1\%E$.

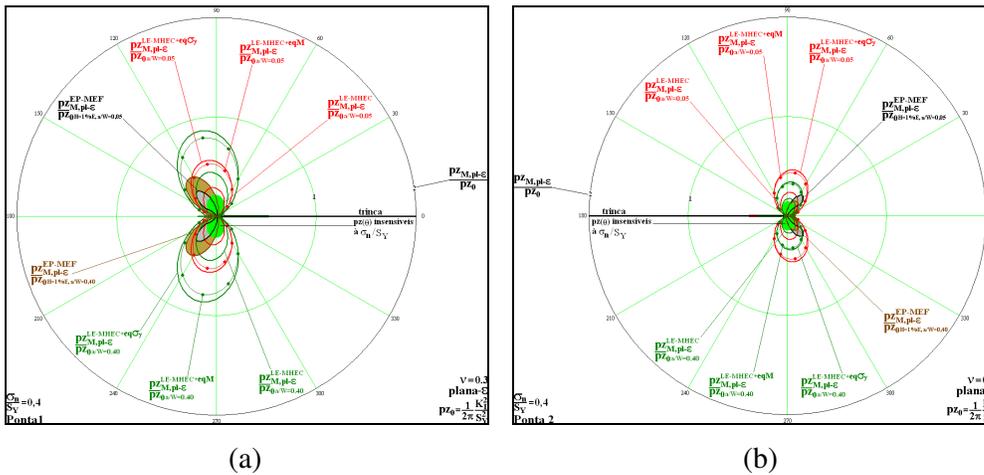


Figura 254 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $p_z_M^{LE-MHEC}$ e $p_z_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_n/S_Y = 0,4$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 255 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,5$ para o caso sob deformação plana e para $H = 1\%E$.

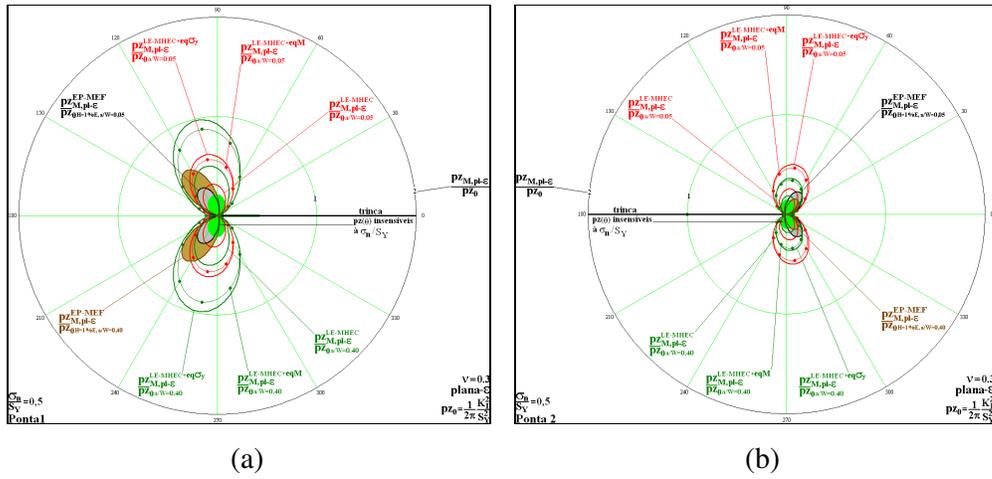


Figura 255 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_n/S_Y = 0,5$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 256 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,6$ para o caso sob deformação plana e para os valores de H igual a $1\%E$.

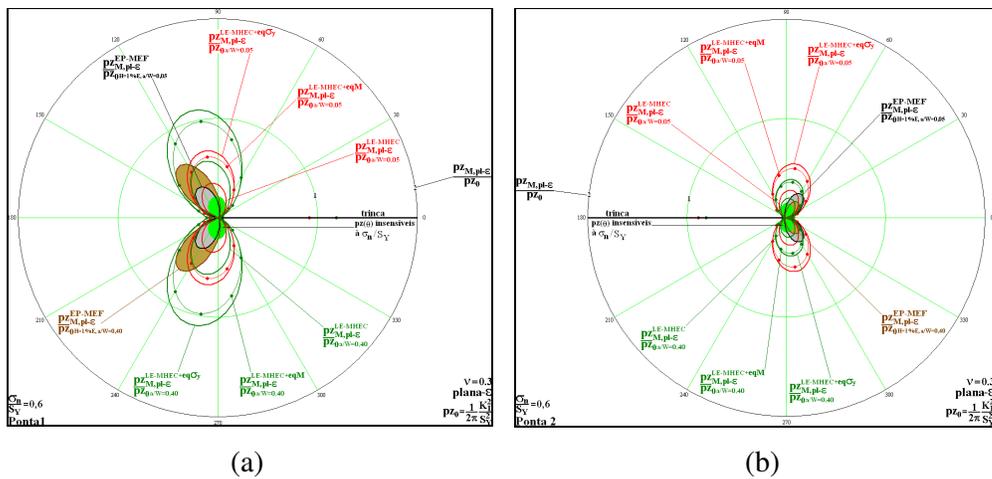
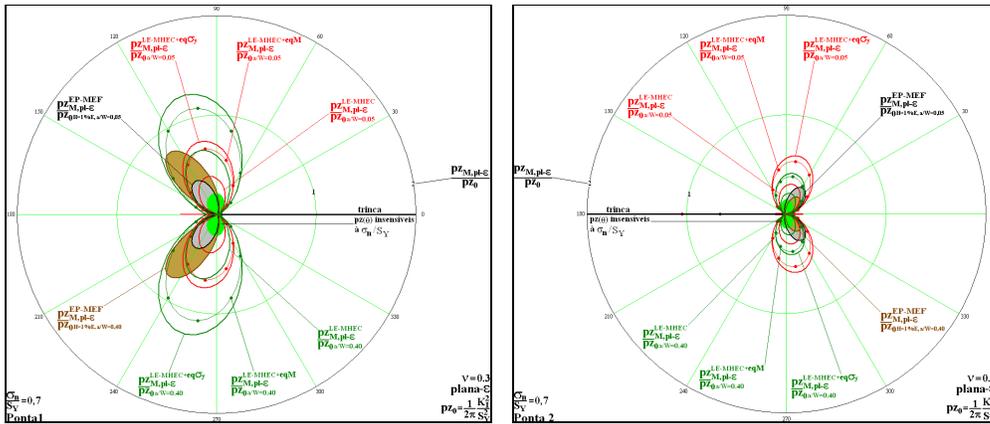


Figura 256 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_n/S_Y = 0,6$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 257 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,7$ para o caso sob deformação plana e para $H = 1\%E$.

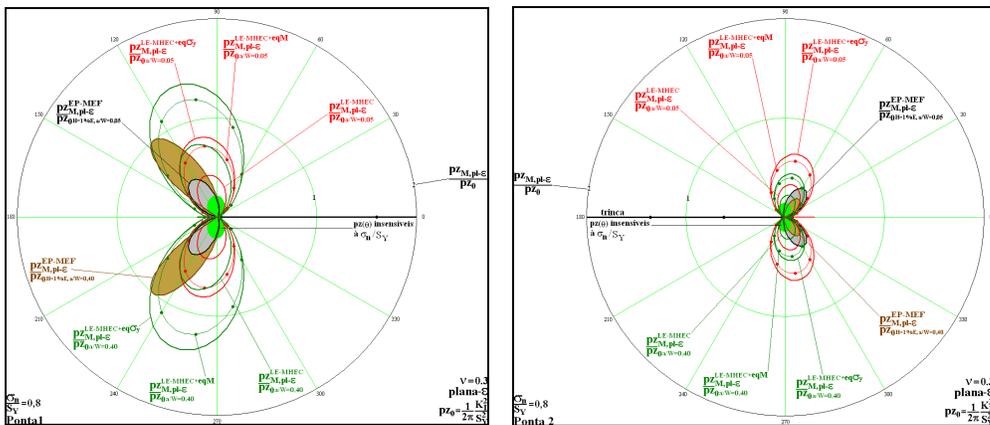


(a)

(b)

Figura 257 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_n/S_Y = 0,7$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

A Figura 258 mostra as zonas plásticas elastoplásticas para $\sigma_n/S_Y = 0,8$ para o caso sob deformação plana e para $H = 1\%E$.



(a)

(b)

Figura 258 – Zonas plásticas elastoplásticas para $H = 1\%E$ e zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC}$ e $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ sob um estado plano de deformação para $\sigma_n/S_Y = 0,8$ e com $a/W = 0,05$ e $a/W = 0,40$ para (a) ponta 1 e para (b) ponta 2.

Ao se analisar as doze figuras anteriores é possível perceber que para um valor fixo de σ_n/S_Y as zonas plásticas correspondentes à ponta 1 para $a/W = 0,40$ são maiores que as zonas plásticas obtidas para $a/W = 0,05$. Já para a ponta 2, ao se manter fixo o valor de σ_n/S_Y , percebe-se que as zonas plásticas para $a/W = 0,40$

são menores que as zonas plásticas obtidas para $a/W = 0,05$. Os efeitos do valor de a/W nas zonas plásticas são maiores à medida que se aumenta o valor de σ_y/S_Y .

Em relação a comparação entre as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ e as zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$, é possível perceber que para o caso de tensão plana com $\sigma_y/S_Y = 0,2$ as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são diferentes das zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ em todas as direções e inclusive para o plano da trinca, conforme mostra a Figura 247. Esse fato ocorre para os dois valores de a/W e para as duas pontas. Para o caso de tensão plana com $\sigma_y/S_Y = 0,4$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca, para o caso em que a/W é igual a 0,05 e para as duas pontas. Para $a/W = 0,4$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca apenas para a ponta 1. Para o caso de tensão plana com $\sigma_y/S_Y = 0,5$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca apenas para a ponta 1 e somente para $a/W = 0,4$. Para o caso de tensão plana com $\sigma_y/S_Y = 0,6$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são diferentes das zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ em todas as direções e inclusive para plano da trinca, conforme mostra a Figura 250. Para o caso de tensão plana com $\sigma_y/S_Y = 0,7$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca, para as duas pontas e para o caso em que a/W é igual a 0,05. Para $a/W = 0,4$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca apenas para a ponta 2. Para o caso de tensão plana com $\sigma_y/S_Y = 0,8$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca para as duas pontas e para o caso em que a/W é igual a 0,05. Para $a/W = 0,4$, as zonas plásticas $pZ_M^{LE-MHEC+eq}$ são praticamente iguais às zonas plásticas $pZ_{M,a/W,H}^{EP-MEF}$ na direção do plano da trinca apenas para a ponta 2.

Para o estado plano de deformação é possível perceber, independentemente do valor de σ_y/S_Y , que as zonas plásticas $p_{z_M}^{LE-MHEC+eq}$ e as zonas plásticas $p_{z_{M,a/W,H}}^{EP-MEF}$ são bem parecidas apenas na direção paralela ao plano da trinca. Isso acontece porque todas as componentes de tensão são bem pequenas nessa direção.

7.5. Conclusões do capítulo

Fundamentado no fato de que as estimativas de zonas plásticas obtidas a partir de campos de tensões lineares elásticos singulares é um problema intrinsecamente não linear, este capítulo mostrou as estimativas não lineares de zonas plásticas para dois exemplos. Nesses dois exemplos se estudou os efeitos do encruamento (H), de a/W e de σ_y/S_Y nas zonas plásticas. Essas estimativas não lineares com $H = 1\%E$ foram comparadas com as estimativas de zonas plásticas obtidas pelo campo de tensões lineares e corrigidas pela componente de tensão σ_y e pela tensão de Mises (σ_{Mises}). O ponto mais importante que deve ser destacado é que dependendo do valor de a/W e de σ_y/S_Y essas duas estimativas de zonas plásticas são iguais para a direção paralela ao plano da trinca, fato que já tinha sido levantado por Irwin (1957). Entretanto, para as outras direções, as duas estimativas são bem diferentes.