

Capítulo V – Efeito da plasticidade na técnica do furo-cego.

V.1 – Introdução.

Conforme explicado no capítulo 3, a técnica do furo cego para medição de tensões residuais gera resultados excelentes quando se tem campo de tensões uniforme na profundidade e a tensão residual atuante não excede $0.3 S_y$. Este valor deriva do fator de concentração de tensões, K_t , que vale três para uma placa infinita contendo um furo passante, a qual está submetida a esforço uniaxial. Quando a tensão residual excede aquele limite, ocorre plastificação localizada na borda do furo e espera-se que ocorram erros ao se calcular a tensão residual mediante o emprego dos coeficientes linear-elásticos indicados pela Norma ASTM E 837. Quantificar estes erros, e estabelecer até que valor acima de $0.3S_y$ os erros encontrados são ainda aceitáveis têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores [4-6], pois a técnica não pode ser empregada justamente nos casos práticos mais interessantes, ou seja, quando se têm altos níveis de tensões residuais.

No capítulo anterior foram apresentados alguns resultados da literatura pertinentes a plastificação em torno de furos. Entretanto, estes trabalhos não são relacionados à influência da plastificação na medição de tensões residuais pela técnica do furo-cego. Para avaliar o erro gerado ao se usar coeficientes linear – elásticos numa situação em que estão ocorrendo deformações plásticas, é necessário carregar um espécime de forma a gerar tais deformações na borda do furo e então medir as deformações correspondentes sob os extensômetros empregando-as a seguir para calcular as tensões residuais. Esta avaliação é muito difícil de proceder experimentalmente e há poucos trabalhos na literatura que tenham feito tal estudo [4 - 6]. Estudos sobre este assunto têm sido feitos [4, 5] através de análises numéricas, nos quais tensões progressivamente mais altas são aplicadas e calculam-se as tensões residuais a partir das deformações indicadas por extensômetros virtuais, conforme mostrado no capítulo 3. Desta forma, é possível quantificar a disparidade entre as tensões aplicadas e as calculadas.

A avaliação acima citada já foi realizada por alguns pesquisadores [4, 6], para o caso do furo passante e foi demonstrado nestes trabalhos que os erros podem chegar a 140% do valor da tensão aplicada. Conforme dito anteriormente, os extensômetros medem a mudança nas deformações causadas pela usinagem do furo e nas análises numéricas, é preciso simular esta mudança nas deformações. Em suas análises, os pesquisadores acima citados [4, 6] aplicaram o princípio da superposição para obter tais deformações. Entretanto, este princípio só pode ser empregado em regime linear-elástico e seu uso para avaliar a validade da técnica do furo cego aplicado em regime plástico, pode acrescentar erros que não estão ligados ao problema furo-cego/plasticidade. Assim, serão apresentadas três metodologias alternativas para simular as deformações causadas pelo alívio de tensões gerado pela usinagem do furo. É importante esclarecer que a diferença entre as metodologias consiste apenas na obtenção da mudança na deformação; uma vez obtido este valor, calculam-se as tensões residuais conforme proposto pela Norma ASTM E 837. Desta forma, em cada uma das metodologias as tensões calculadas serão comparadas com as tensões aplicadas, sempre com o objetivo de avaliar as diferenças entre as tensões aplicadas e as calculadas.

Além disso, será avaliada também a influência da forma da curva tensão-deformação nos erros obtidos. Para tanto, foram utilizados na análise um material elástico perfeitamente plástico (M1) e outro cujos valores de limite elástico e limite de escoamento são bastante distintos (M2), que também não sofre encruamento. Similarmente ao apresentado no capítulo três, foram simulados três diferentes carregamentos com o objetivo de avaliar a influência deste fator nos erros encontrados.

Finalmente, todo o procedimento descrito acima será repetido para o caso de furo-cego, uma vez que não foram encontrados muitos artigos referentes a este assunto [5]. Serão modeladas profundidades próximas da mínima e da máxima prescritas pela Norma ASTM E837 com o objetivo de avaliar os erros ao longo do processo de furação.

V.2 – Erros gerados pela plastificação.

Pelo desenvolvimento apresentado no capítulo três, percebe-se que tensões residuais a partir de $0.3 S_y$ geram escoamento na borda do furo, no caso em que estas tensões são uniaxiais. Nesta situação, ao se empregar o procedimento apresentado pela Norma ASTM E 837 para calcular as tensões residuais serão encontrados valores de tensão residuais diferentes dos reais. O motivo desta diferença é que todo o procedimento apresentado no capítulo três é baseado em hipóteses linear-elásticas, as quais perdem a validade em presença de deformações plásticas. Pode se expressar o “erro” referente ao emprego do procedimento da Norma em situações em que há deformação plástica, como:

$$\text{erro - ASTM} = \frac{\sigma_{\text{ASTM}}}{\sigma_{\text{real}}} \quad (5.1)$$

onde:

erro-ASTM – é o erro encontrado ao se usar aos coeficientes linear-elásticos da Norma ASTM E 837 em situações em que ocorrem deformações plásticas;

σ_{ASTM} – é a tensão residual calculada, utilizando-se os coeficientes e a metodologia indicados pela ASTM E 837,

σ_{real} – é a tensão residual presente no componente. No caso do presente trabalho é a tensão aplicada no modelo numérico.

Embora a plastificação comece em $0.3 S_y$ ¹, a Norma sugere que até $0.5 S_y$ os erros-ASTM gerados ainda são aceitáveis e a técnica do furo pode ser empregada. Este valor máximo foi verificado por alguns pesquisadores.

O primeiro objetivo deste trabalho é avaliar os erros-ASTM gerados ao se empregar a técnica do furo-cego em componentes submetidos a níveis de tensões residuais acima de $0.3 S_y$, que de agora em diante serão chamados de “altos níveis de tensões” ou simplesmente “altas tensões”. Para tanto, é necessário avaliar que fatores podem ter influência naqueles erros. Os fatores investigados neste trabalho estão listados e discutidos a seguir.

¹ Para carregamento uniaxial.

V.2.1 – Nível de Plastificação.

O primeiro fator é obviamente o nível das tensões residuais, ou melhor, a razão entre estas tensões e o limite de escoamento do material. Seguindo a nomenclatura apresentada no capítulo quatro, tem-se:

$$\pi = \frac{\sigma_o}{S_y} \quad (5.2)$$

onde:

π – nível de plastificação;

σ_o – tensão residual equivalente e,

S_y – tensão de escoamento do material.

Para que se tivesse uma idéia da variação dos erros-ASTM à medida que se aumenta π , foram feitas simulações com $\pi = 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ e 0.9 .

V.2.2 – Tipo de Curva Tensão-Deformação.

A Norma ASTM E 837 apresenta como limite de utilização da técnica do furo, uma fração do limite de escoamento do material, $0.5 S_y$. Portanto, o próximo fator que influencia os erros-ASTM é o tipo da curva tensão-deformação do material e, por conseguinte o significado de “ $0.5 S_y$ ”. Conforme será visto a seguir, um dos mais detalhados trabalhos disponíveis na literatura [4] utilizou materiais cujas curvas tensão-deformação eram representada por duas linhas retas, ou seja, materiais cujos limites de escoamento e elástico são iguais, sendo que a partir deste limite um dos materiais utilizados apresentava comportamento perfeitamente plástico e os demais sofriam encruamento. Assim, imediatamente antes de se atingir a tensão nominal de $\frac{1}{3} S_y$, a deformação plástica localizada na borda do furo é zero, uma vez que nesta região não foram atingidos nem S_y nem S_e . A partir de $0.3 S_y$ começa a plastificação, mas, segundo a literatura, os erros-ASTM causados por esta plastificação são desprezíveis até $0.5 S_y$, crescendo rapidamente a partir daí. Serão utilizados nas simulações deste trabalho dois

materiais distintos, recebendo a denominação M1 e M2. O material M1 é perfeitamente plástico e tem limites de escoamento e elástico iguais:

$$S_e = S_y = 75 \text{ MPa}$$

O material M2 é o alumínio usado por Durelli em seu artigo, cujo limite elástico ocorre bem antes do limite de escoamento:

$$S_e = 75 \text{ MPa.}$$

$$S_y = 149 \text{ MPa.}$$

A fim de facilitar a compreensão, a curva tensão-deformação destes materiais está mostrada na figura 5.1, na qual pode ser observado que o material M2 também não sofre encruamento.

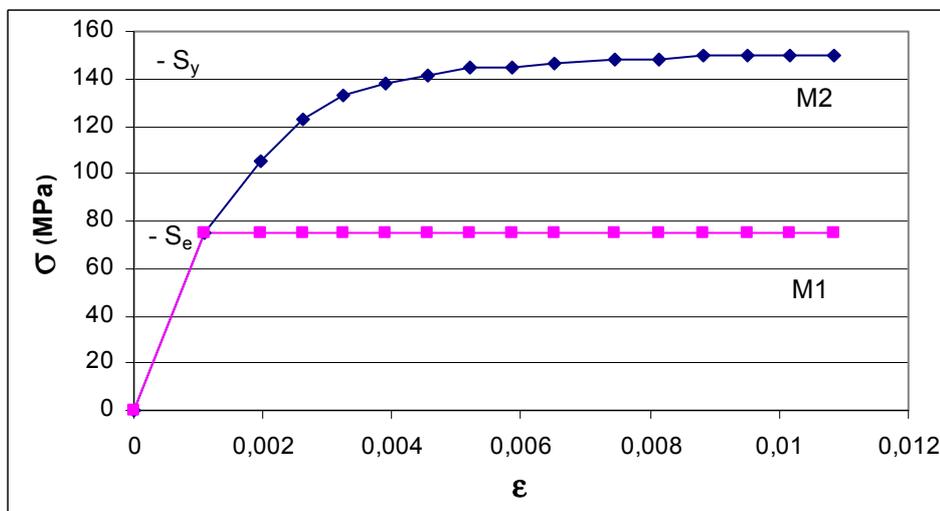


Figura 5.1 - Propriedades dos materiais M1 e M2.

Assim, com uma tensão nominal ligeiramente menor que $\frac{1}{3}S_y$, por exemplo $\sigma_{\text{nom}} = 45 \text{ MPa}$, a princípio não haveria deformação plástica no furo. No entanto, como o limite elástico é menor que o de escoamento ocorre uma pequena deformação plástica, pois:

$$\sigma_{\text{max}} \cong \sigma_{\text{nom}} \times K_t = 45 \times 3.01 = 135.45 \text{ MPa} > 75 \text{ MPa.}^2$$

É de se esperar que até chegar a $0.5 S_y$ haja um nível de deformação mais alto no material M2 que aquele no material M1. Nas tabelas abaixo se encontram alguns valores de deformações plásticas radiais encontrados na borda do furo e no

² A geometria usada neste capítulo é igual a do capítulo três e portanto o K_t é o mesmo, 3.01.

meio dos extensômetros 1 e 3, para diferentes níveis de plastificação e carregamento uniaxial na direção y . As deformações foram normalizadas com relação a seus limites de escoamentos, de forma que:

$$\epsilon_{\text{norm}} = \frac{E\epsilon}{S_y} \quad (5.3)$$

Tabela 5.1 – Deformações plásticas radiais normalizadas, $\epsilon_{\text{norm}} = \frac{E\epsilon}{S_y}$, na direção do extensômetro 1, $\Omega=0$

π	M1		M2	
	Borda	Extensômetro	Borda	Extensômetro
0.3	0	0	-0.087	0
0.5	-0.332	0	-0.453	-0.005
0.8	-1.290	0	3.408	-0.319

Tabela 5.2 – Deformações plásticas radiais normalizadas, $\epsilon_{\text{norm}} = \frac{E\epsilon}{S_y}$, na direção do extensômetro 3, $\Omega=0$

π	M1		M2	
	Borda	Extensômetro	Borda	Extensômetro
0.3	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0
0.8	0	0	0.092	0.014

Confirmando o esperado, para $\pi = 0.3$, só ocorreu deformação plástica para o material M2. Para os outros valores de π , houve deformação plástica na borda do furo para os dois materiais, entretanto os valores de M2 são maiores que os de M1. Uma vez que se esperam erros-ASTM cada vez maiores à medida que se aumenta a deformação plástica, o material M2 vai sempre apresentar erros maiores que M1, para os mesmos π s, lembrando que π está definido em relação ao limite de escoamento e não ao limite elástico. No entanto, o erro-ASTM é por definição oriundo da presença de deformações plásticas, assim é provável que esta definição seja válida apenas se o limite de escoamento for próximo ao limite

elástico. Em materiais em que esses limites são distintos, π deve ser definido como a relação entre a tensão residual equivalente e o limite elástico:

$$\pi_e = \frac{\sigma_o}{S_e} \quad (5.4)$$

π_e - é o nível de plastificação definido em relação ao limite elástico.

Assim, para evitar o surgimento de deformação plástica no furo deveria ser usado como valor máximo permitido de tensão nominal $0.3 S_e$ no lugar de $0.3 S_y$. À luz desta nova definição é preciso também estabelecer um novo limite aceitável de erro-ASTM para M2, que não necessariamente será $0.5 S_e$.

Neste trabalho serão avaliadas as diferenças nos erros-ASTM obtidos entre M1 e M2 e, além disso, a relevância de se utilizar π_e ou π para estabelecer limites de aplicação da técnica do furo.

V.2.3 – Carregamento.

Para que se obtivessem resultados bastante gerais e ao mesmo tempo comparáveis aos resultados elásticos, foram simulados os mesmos carregamentos apresentados no capítulo três. Conforme apresentado naquele capítulo, chama-se razão de biaxilidade à relação entre as tensões agindo na direção dos extensômetros 1 e 3, respectivamente. Assim:

$$\Omega = \frac{\sigma^1}{\sigma^3} \quad (5.5)$$

onde:

σ^1 – é a tensão na direção do extensômetro 1,

σ^3 – é a tensão na direção do extensômetro 3.

As três razões de biaxilidade utilizadas neste trabalho são:

$\Omega = 0$, simulando o caso uniaxial, com $\sigma_x = 0$

$\Omega = 1$, simulando o caso biaxial, com $\sigma_x = \sigma_y$

$0 > \Omega > 1$, simulando um carregamento genérico sendo neste trabalho, $\Omega = 0.5$.

É importante esclarecer, que o nível de plastificação, π , é definido em relação à tensão equivalente, σ_0 . Assim, por exemplo, no caso de M2 e $\Omega = 0.5$, tem-se:

$$\sigma_1 = 80 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_2 = 40 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_0 = (80^2 + 40^2 - 80 \times 40)^{1/2} = 69.28 \text{ MPa}$$

e portanto o nível de plastificação é:

$$\pi = \frac{69.28}{149.5} = 0.46$$

Seria interessante variar também o ângulo θ que as direções principais fazem com os eixos do extensômetro. A maioria dos artigos da literatura considera que as direções principais são coincidentes com os eixos dos extensômetros [4-6], o que com certeza é uma hipótese bastante simplificadora. Nestas situações, como será visto adiante, a maior diferença entre o ângulo calculado e o imposto na simulação foi de 10° . Assim, com o objetivo de restringir um pouco a abrangência deste trabalho, este parâmetro será desprezado e as tensões serão sempre aplicadas nas mesmas direções dos extensômetros 1 e 3.

V.2.4 – Profundidade do Furo-cego.

Conforme visto no capítulo três, os valores máximos da tensão no furo-cego são notadamente menores que o furo passante, para o mesmo raio. Além disso, à medida que a profundidade da furação aumenta, a tensão máxima aumenta e o ponto no qual esta tensão ocorre se desloca ligeiramente para o interior do furo. Portanto, serão analisadas diferentes profundidades de furo a fim de comparar o comportamento dos furos passante e cego, em regime plástico. Assim, foram usados os mesmos modelos de placa contendo furo passante e furo-cego usados no capítulo 3. As dimensões destas placas são:

Largura = 100 mm

$$r = 0.4 r_m = 1.028 \text{ mm}$$

$$p = 0.2 \times r_m$$

$$p = 1.0 \times r_m$$

Onde r_m é uma grandeza características das rosetas, definida anteriormente no capítulo três.

Levando-se em consideração todos os fatores até agora discutidos, foram simuladas diversas séries de experimentos e os erros-ASTM encontrados entre as tensões aplicadas e as tensões calculadas serão apresentados no próximo item.

V.3 – Análise dos erros-ASTM entre as altas tensões aplicadas e as tensões calculadas usando os coeficientes ASTM.

No capítulo três, foi avaliada a possibilidade de simular pelo método dos elementos finitos a técnica do furo-cego. O procedimento inicial para avaliar os erros-ASTM decorrentes do emprego da técnica do furo em componentes contendo tensões residuais altas é similar ao empregado naquela avaliação. De uma forma geral tal procedimento consiste em aplicar uma tensão no modelo de elementos finitos, obter as deformações virtuais nos três extensômetros, a partir destes valores de deformações calcular a tensão aplicada, seguindo o procedimento da Norma ASTM E 837 e finalmente comparar a tensão aplicada com a calculada. Foi utilizado o programa Ansys 6.0 para proceder às análises numéricas seguindo o procedimento descrito abaixo, o qual conforme mencionado no capítulo três será chamada de metodologia Tradicional:

- Construiu-se e carregou-se o “modelo-antes”;
- Executou-se o programa,
- Obteve-se os valores de deformação do “modelo-antes”, ϵ_a ;
- Construiu-se e carregou-se o “modelo-depois”, no qual um furo foi desenhado;
- Executou-se o programa;
- Obteve-se os valores de deformação do “modelo-depois”, ϵ_d ;

Tendo estes valores de deformação “antes” e “depois”, calculou-se a deformação causada pelo alívio de tensões devido à “usinagem” do furo. Assim:

$$\varepsilon^1 = \varepsilon_d^1 - \varepsilon_a^1 \quad (5.6.a)$$

$$\varepsilon^2 = \varepsilon_d^2 - \varepsilon_a^2 \quad (5.6.b)$$

$$\varepsilon^3 = \varepsilon_d^3 - \varepsilon_a^3 \quad (5.6.c)$$

cada sub-índice referindo-se a um dos extensômetros.

Com estas deformações e os coeficientes indicados pela Norma ASTM E837, foram calculadas as tensões aplicadas. Nas tabelas 5.3 e 5.4 encontram-se os erros-ASTM encontrados para os materiais M1 e M2, respectivamente.

Como as tensões foram aplicadas nas direções dos extensômetros 1 e 3, estas são as próprias tensões principais. Para que fosse possível avaliar o comportamento de cada tensão, nos casos em que as duas tensões são diferentes de zero, serão apresentados os erros-ASTM em relação às duas tensões e não em relação à tensão equivalente.

Tabela 5.3 – Erros-ASTM para M1.

Profundidade	Erro-ASTM (%)				
	$\Omega = 0$				
	$\pi = 0.5$	$\pi = 0.6$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.8$	$\pi = 0.9$
p = 0.2 r _m	-1.7	-1.7	-1.7	-	-1.0
p = 1.0 r _m	1.1	-	1.3	-	1.6
Passante	2.4	7.3	9.8	17.3	38.6
	$\Omega = 0.5$				
	$\pi = 0.46$	$\pi = 0.58$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.81$	$\pi = 0.9$
	p = 0.2 r _m	-1.1 e -3.0	-	-	-
p = 1.0 r _m	0.8 e -1.7	-	-5.7 e -2.5	-	1.5 e 2.8
Passante	0.6 e 2.0		9.7 e 6.2	-	70.6 e 112.8
	$\Omega = 1$				
	$\pi = 0.5$	$\pi = 0.6$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.8$	$\pi = 0.9$
	p = 0.2 r _m	6.2 e -9.4		6.8 e -9.3	
p = 1.0 r _m	3.7 e 0.6		2.9 e 0.6		3.5 e 1.1
Passante	0.6 e -1.1	1.5 e 0.3	-3.6 e -1.3	25.9 e 24.3	49.2 e 41.1

Tabela 5.4 – Erros-ASTM para M2.

Profundidade	Erro-ASTM (%)				
	$\Omega = 0$				
	$\pi = 0.5$	$\pi = 0.6$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.8$	$\pi = 0.9$
p = 0.2 r _m	6.5	23.9	37.0	65.0	132.0
p = 1.0 r _m	8.2	41.5	66.4	100.0	186.4
Passante	12.6	52.7	87.0	136.8	261.8
	$\Omega = 0.5$				
	$\pi = 0.46$	$\pi = 0.58$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.81$	$\pi = 0.9$
	p = 0.2 r _m	1.4 e 1.9	19 e 4.6	34.4 e 14.9	64.1 e 33.6
p = 1.0 r _m	5.1 e 2.4	32.7 e 28.8	52.0 e 48.0	99.8 e 103.6	-
Passante	14.8 e 16.8	47.1 e 43.4	83.2 e 77.4	139.5 e 147.2	-
	$\Omega = 1$				
	$\pi = 0.5$	$\pi = 0.6$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.8$	$\pi = 0.9$
	p = 0.2 r _m	-4.2 e -12.1	21.7 e 9.8	26.4	53.5 e 40.7
p = 1.0 r _m	10.9	31.9	49.3	83.5	137.6
Passante	18.5 e 16.4	41.7 e 38.2	61.3 e 58.1	107.4 e 100.8	180 e 169.7

Das tabelas acima, pode-se tirar algumas conclusões importantes:

- É realmente inviável usar a técnica do furo passante ou do furo-cego quando ocorre plastificação. Os resultados corroboram a recomendação da Norma ASTM E 837, segunda a qual até $\pi = 0.5$ a técnica pode ser aplicada sem erros-ASTM consideráveis, porém a partir daí, tais erros são inaceitáveis.

- Percebe-se também que os erros-ASTM para o material M1 são menores que aqueles para M2, conforme havia sido discutido no item V.2.2.

- O tipo de carregamento tem certa influência no valor das tensões medidas, pois para o mesmo tipo de furo e mesmo nível de plastificação tem-se erros-ASTM diferentes para cada razão de biaxilidade,

- Finalmente, parece claro que para todos os casos, os erros-ASTM encontrados para o furo passante são maiores que para o furo-cego.

- Confirmando resultados da literatura, o erro-ASTM máximo encontrado para o ângulo que a direção do extensômetro 1 faz com a direção principal 1, foi de 9 graus, embora estes resultados não estejam disponíveis nas tabelas 5.3 e 5.4.

Conforme dito anteriormente, a restrição à técnica do furo é severa e impede a sua aplicação justamente nos casos de maior interesse, ou seja, aqueles em que altas tensões residuais estão presentes. Assim, alguns pesquisadores [4-6] empenharam-se em descobrir maneiras de aumentar aplicabilidade da técnica, isto é, desenvolver metodologias para corrigir ou diminuir os erros-ASTM encontrados. Serão apresentadas as modificações propostas por dois autores [4, 6], um dos realizou as simulações experimentalmente enquanto o outro o fez numericamente. A partir dos valores de deformações obtidos numericamente no presente trabalho, os quais foram utilizados para gerar as tabelas 5.3 e 5.4, repetiram-se as metodologias de correção propostas por aqueles dois autores [4, 6]. Desta forma, pretende-se alcançar os seguintes objetivos:

- obter profundo entendimento das metodologias propostas pelos autores;
- comparar os dados presentes com os da literatura.
- avaliar o comportamento das metodologias propostas pelos autores em situação um pouco diferentes das pesquisadas por eles.

No próximo item apresentam-se resumidamente os dois artigos acima citados .

V.4 – Algumas propostas de correção baseadas no princípio da superposição.

Beghini et alli [4] publicaram um trabalho em 1994 sobre o efeito da plasticidade na medição de tensões residuais. Neste trabalho, eles chamaram a atenção para um detalhe importante, que não tinha sido tocado anteriormente. Ao se resolver o problema da placa com furo, procedeu-se da forma apresentada no item IV.3.1, aplicando-se o princípio da superposição, ou seja, a metodologia tradicional. Esta metodologia foi aplicada largamente por diversos pesquisadores, no regime elástico obtendo-se erros da ordem de 2%, conforme apresentado no capítulo três. Em geral, estes pesquisadores estavam procurando formas de calcular e avaliar a exatidão dos coeficientes previstos pela Norma ASTM E 837, em situações elásticas um pouco diferentes das estabelecidas por esta, por exemplo, quando há excentricidade na furação ou em situações em que as tensões

residuais variam com a espessura do componente. Entretanto, o princípio da superposição só é válido no regime linear-elástico; no regime plástico este princípio deixa de funcionar, pois a história de carregamento é importante para determinar o estado final de tensões e deformações. Beghini enfatiza que “*em regime elástico, usinar um furo numa placa pré-carregada ou carregar uma palca com um furo pré-existente produzem a mesma distribuição final de tensão e deformação, enquanto no regime elasto-plástico a solução final pode, em teoria, depender da seqüência de carregamentos*”. Em seu artigo Beghini [4] realizou três tipos de experimentos para avaliar a sensibilidade dos resultados ao método usado para simular o processo de usinagem. O primeiro foi a metodologia tradicional, o segundo uma placa contendo um furo passante com um diâmetro que variava desde zero até o diâmetro final do furo, e finalmente uma placa contendo um furo de diâmetro igual ao diâmetro final cuja profundidade variava desde zero até a espessura da placa (em seu trabalho Beghini só modelou furos passantes). Para proceder estas simulações, foram utilizados um material perfeitamente plástico e outros com diferentes coeficientes de encruamento, r , conforme definido no capítulo IV.

Como os materiais utilizados por Beghini tinham limite elástico e de escoamento iguais, os resultados das três simulações foram os mesmos, e, portanto Beghini seguiu usando a metodologia tradicional por ser mais rápida de executar no programa *Ansys*. Será demonstrado neste trabalho que esta conclusão não é válida para materiais cujo limite elástico sejam muito diferente do limite de escoamento. Assim, as simulações dois e três propostas por Beghini serão estudadas com mais detalhes para M1 e M2.

Em seu trabalho, Beghini primeiro avalia a aplicabilidade da técnica do furo passante em componentes com altos níveis de plastificação, concluindo que tal aplicação é inviável. A partir desta conclusão, foi proposta a seguinte metodologia para corrigir as tensões calculadas utilizando-se os coeficientes linear-elásticos da Norma ASTM E837. Visando obter uma representação comparativa do nível de tensão residual para qualquer razão de biaxilidade, foi definido por Beghini o fator de carga, f :

$$f = \frac{\sigma_{eq} - \sigma_{eq,i}}{\sigma_{ys} - \sigma_{eq,i}} \quad (5.7)$$

onde

σ_{eq} é a tensão residual equivalente atuante,

$\sigma_{eq,i}$ é a tensão equivalente nominal que causa o início do escoamento na borda do furo e

σ_{ys} é a tensão de escoamento.

Este fator “ f ” é menor que zero quando o material está no regime elástico e assume valores de 0 (início do escoamento, na borda do furo) até 1 (placa totalmente plastificada³). Primeiramente, Beghini considerou que as direções principais eram conhecidas, e que os extensômetros 1 e 3 estão alinhados nestas direções. Considerou também que $\sigma^1 > \sigma^3$. Na figura 5.2, estão apresentados as relações entre as deformações nas direções dos extensômetros 1 e 3, ou seja, ϵ^1 e ϵ^3 , contra a razão de biaxilidade, Ω . Neste gráfico, encontram-se os resultados de Beghini para M1 e os deste trabalho para M1 e M2.

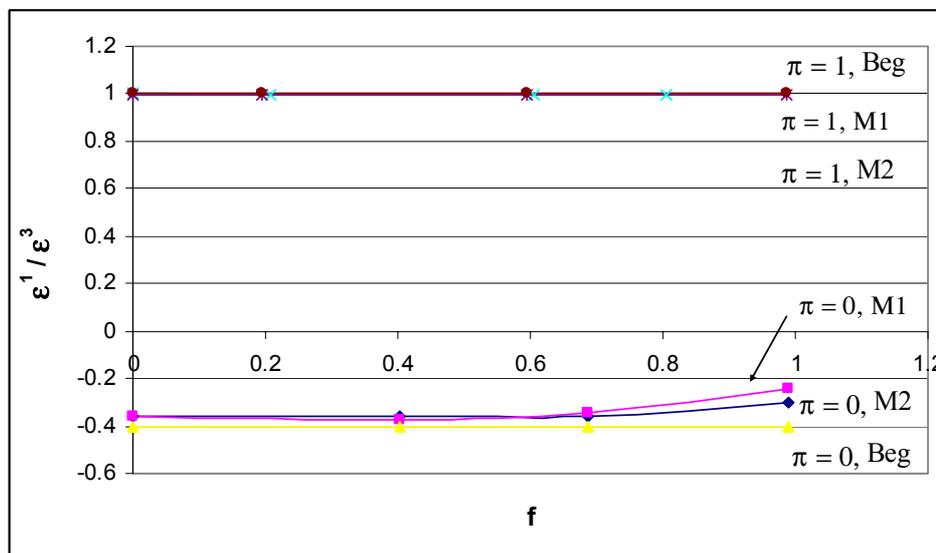


Figura 5.2 – Comparação entre os resultados obtidos por Beghini e os deste trabalho, para a relação entre as deformações e o fator de carga, para os materiais M1 e M2.

³ No caso dos materiais elásticos perfeitamente-plásticos, o valor máximo alcançado em toda a placa é o próprio S_y .

A partir deste gráfico, percebe-se que a relação $\frac{\bar{\epsilon}^3}{\bar{\epsilon}^1}$ é praticamente independente do fator de carga. Assim, Beghini demonstrou que a razão de biaxilidade pode ser escrita em função das deformações indicadas pelos extensômetros 1 e 3, da seguinte forma:

$$\Omega_B = \frac{\sigma^3}{\sigma^1} \cong \frac{(\bar{A} - \bar{B}) - \frac{\bar{\epsilon}^3}{\bar{\epsilon}^1}(\bar{A} + \bar{B})}{\frac{\bar{\epsilon}^3}{\bar{\epsilon}^1}(\bar{A} - \bar{B}) - (\bar{A} - \bar{B})} \quad (5.8)$$

onde \bar{A} e \bar{B} são os coeficientes previstos pela norma ASTM E837 para furo passante, os quais dependem das constantes elásticas do material e da geometrias da roseta e do diâmetro furo, conforme visto no capítulo três. Usou-se a designação Ω_B apenas para enfatizar que trata-se da razão de biaxilidade calculada segundo Beghini.

Então, Beghini fez um gráfico do fator de carga real contra o fator de carga calculado usando as tensões obtidas através dos coeficientes ASTM e das deformações oriundas de suas simulações numéricas. Este gráfico está apresentado na figura 5.3.

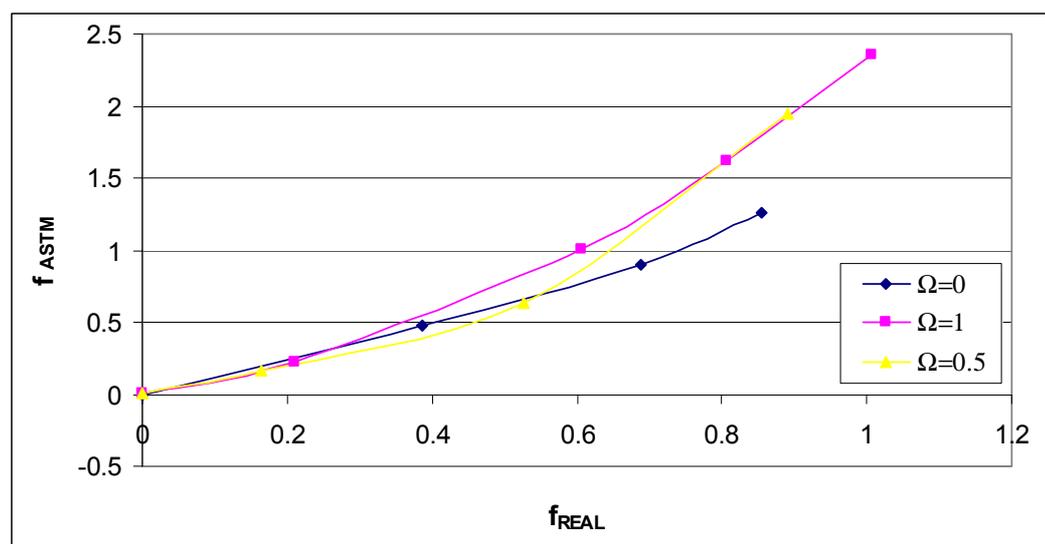


Figura 5.3 – Comparação entre f_{REAL} e f_{ASTM} para os diferentes Ω s.

A partir da figura 5.3 Beghini percebeu que era possível correlacionar o fator “f” previsto pela norma ASTM e o “f” real da seguinte forma:

$$f_{astm} = f_{real} + C f_{real}^2 \tag{5.9}$$

Na equação (5.9), o parâmetro C, o qual é o único a ser determinado, foi obtido para quaisquer Ω s e coeficiente de encruamento, por mínimos quadrados. A figura 5.4 apresenta um gráfico do parâmetro C versus γ ($\gamma = \tan^{-1} \Omega$), para vários coeficiente de encruamento, q.

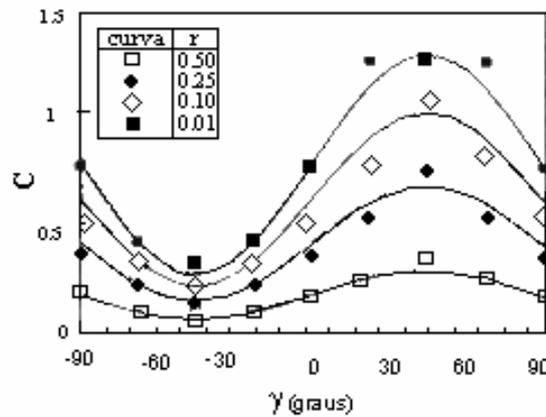


Figura 5.4 – Valores calculados do parâmetro C, pela equação 5.7, versus razão de biaxialidade Ω . Para vários coeficientes de encruamento, q.

Com base neste gráfico, Beghini propôs a seguinte equação para calcular C a partir de Ω e q:

$$C = 0.793(1-q)^{2.167} [0.6495\sin(2\gamma) + 1] \tag{5.10}$$

Uma vez que se obteve o parâmetro C, pode-se inverter a equação (5.9) e obter o fator de carga estimado, f_{es} :

$$f_{es} = \frac{\sqrt{1 + 4Cf_{ASTM}} - 1}{2C} \tag{5.11}$$

Combinando as equações (5.8) e (5.11), chega-se à correção proposta por Beghini:

$$\sigma_{x,es} = \sigma_{ys} \left[f_{es} \left(\frac{1}{\sqrt{\Omega_B^2 - \Omega_B + 1}} - \frac{1}{3 - \Omega_B} \right) + \frac{1}{3 - \Omega_B} \right] \tag{5.12}$$

e

$$\sigma_{y,es} = \Omega_B \sigma_{x,ex} \quad (5.13)$$

É importante esclarecer que da equação (5.7) até a (5.10), Beghini estava trabalhando com os resultados oriundos das diversas simulações realizadas por ele, ou seja, resultados que embora tenham sido gerados numericamente, existiam. A partir da equação (5.11), Beghini começa a prever ou “estimar” parâmetros, como o fator de carga, para situações reais, nas quais só se dispõem dos valores da mudança na deformação. Assim, de posse destes valores de mudança de deformação, são calculados f_{ASTM} e Ω_B . Em seguida, calcula-se C , f_{es} e finalmente obtém, $\sigma_{x,es}$ e $\sigma_{y,es}$ que são as tensões estimadas pela correção de Beghini.

Os dados de deformação obtidos das diversas simulações realizadas no item V.3 foram utilizados segundo a metodologia apresentada acima, de forma a corrigir as tensões que haviam sido calculadas a partir deles. Nas tabelas 5.5 e 5.6 se encontram os novos valores dos erros-ASTM depois de aplicada a correção de Beghini, para os dois materiais empregados na presente análise. Na tabela 5.5, é possível notar, que para o material elástico-perfeitamente plástico, nos casos de $\Omega = 0$ e 1 a correção é muito boa, entretanto para $\Omega = 0.5$, o mesmo não ocorreu.

Tabela 5.5 – Erros-ASTM para os valores corrigidos pela metodologia de Beghini, para M1

π	$\Omega = 0$	$\Omega = 1$	$\Omega = 0.5$
0,5	0,0	-1,6	4,2
0,6	-4,1	-2,3	-1,8
0,8	-6,0	-0,5	-12,7
0,9	-2,2	-3,1	33,5

Tabela 5.6 – Erros-ASTM para os valores corrigidos pela metodologia de Beghini, para M2

π	$\Omega = 0$	$\Omega = 1$	$\Omega = 0,5$
0,4	-11,8	-12,2	-
0,5	-16,3	-14,7	-5,2
0,6	-7,2	-15,4	-14,6
0,7	-3,5	-17,7	-18,7
0,8	2,0	-15,0	-15,5
0,9	16,6	-9,3	-13,1

Na tabela 5.6 apresentam-se as correções para M2. Observa-se que neste caso a correção não é tão boa quanto para M1, independente do carregamento. Logicamente, comparando-se as tabelas 5.3 e 5.4 com 5.5 e 5.6, observa-se que a correção de Beghini é bastante efetiva, pois gera resultados bem melhores que os anteriores. O erro-ASTM na situação mais desfavorável, $\Omega = 0$ e $\pi = 0.9$, cai de 262 % para 16.6 %. Se ainda for considerado que os materiais são diferentes, percebe-se que a correção de Beghini é bastante robusta, uma vez que se adapta bem a diferentes situações. Como crítica a seu trabalho, pode-se citar o fato de que a razão de biaxialidade segundo Beghini, Ω_B , conforme calculada pela equação (5.8), é usada na correção final. Mas, esta equação se baseia em medições de deformação que carregam em si, uma componente plástica. Foi observado que, à exceção de $\Omega = 1$, a equação (5.8) não gera bons resultados para tensões residuais muito altas, conforme mostrado na tabela 5.7. Nesta tabela, apresentam-se os valores calculados de Ω , para cada um dos Ω s reais.

Tabela 5.7 – Valores da razão de biaxialidade calculados pela equação 5.7

π	M1			M2		
	$\Omega=0$	$\Omega=0.5$	$\Omega=1$	$\Omega=0$	$\Omega=0.5$	$\Omega=1$
0.5	0.001	0.50	1.01	0.08	0.49	0.99
0.7	0.01	0.48	0.99	0.140	0.43	0.99
0.9	0.14	0.63	0.99	0.400	0.37	1.00

Assim, boa parte do método fica comprometida, como o exemplo abaixo pode mostrar:

- Seja o material M2, $\Omega = 0$ e $\lambda = 0.8$, ou seja, $\sigma_1 = 119.6$ MPa e $\sigma_2 = 0$.

Nesta situação, as tensões indicadas pelos coeficientes ASTM são, $\sigma_1 = 281,7$ MPa e $\sigma_2 = 56$ MPa e a razão de biaxialidade calculada pela equação (5.6) é $\Omega = 0.2$. Depois de empregada a correção de Beghini, tem-se $\sigma_{1\text{corrigido}} = 121.4$, que é um valor excelente. Entretanto, para calcular σ_2 é necessário multiplicar este valor por $\Omega = 0.2$, chegando-se a $\sigma_2 = 24.3$ MPa, que não é um valor tão

atraente⁴. É importante esclarecer que numa situação real, não há como saber de antemão, a relação entre as tensões residuais e, portanto tem-se que acreditar nos resultados indicados pela correção. Além disso, é dito no artigo de Beghini que as correções são válidas para todos as razões de biaxilidade, mas este fato não é mostrado em nenhuma tabela ou gráfico. Mesmo assim, o trabalho de Beghini é uma grande contribuição à análise da influência da plasticidade na medição de tensões residuais, pois chamou atenção para detalhes muito importantes como a importância de simular corretamente o processo de usinagem e levou em conta explicitamente fatores como razão de biaxilidade e coeficiente de encruamento, que não haviam sido citados anteriormente.

É sabido que existem tensões residuais em componentes que foram soldados e muitas vezes estas tensões são altas. Por isto, há um grande interesse por parte dos pesquisadores da área de soldagem em desenvolver metodologias que possibilitem a utilização da técnica do furo-cego em componentes contendo altas tensões residuais. Em 1996, Yan et alli [5] propuseram correções para a técnica do furo-cego para estas situações. Eles utilizaram apenas dados experimentais, o que tornou seu trabalho diferente e bastante relevante. No caso de componentes soldados, as direções das tensões principais são normalmente a paralela e a perpendicular ao cordão de solda. Assim, dois extensômetros são suficientes para descrever o estado de tensões residuais. Para realizar seus experimentos, foi carregada uma placa na qual estavam colados dois extensômetros segundo as direções principais. O material da placa é um aço doce tendo $S_y = 235.2$ MPa. Foram aplicadas tensões progressivamente mais altas, antes e depois da usinagem de um pequeno furo-cego. Para cada uma das tensões aplicadas, foram registradas as deformações indicadas pelos extensômetros e então foram calculados os coeficientes de alívio \bar{a} e \bar{b} . Conforme feito no artigo de Beghini, serão usadas as deformações medidas pelos extensômetros virtuais nas diversas simulações numéricas realizadas no presente trabalho, para avaliar a validade da metodologia de correção proposta por Yan. Assim, nas figuras 5.4 e 5.5, mostra-se a

⁴ É importante destacar que no caso em que as duas tensões principais têm o mesmo sinal, o que importa para projeto é o valor da máxima tensão. Assim, esta “falha” na metodologia de Beghini pode não ser tão grave.

dependência dos coeficientes de alívio com a tensão residual, para o material M2. Na figura 5.4 a tensão residual é normalizada com relação ao limite de escoamento e na figura 5.5, com relação ao limite elástico. É interessante notar que \bar{a} e \bar{b} são independentes da tensão residual até que se atinja $0.5 S_y$ ou $1.0 S_e$, que são equivalentes, pois para M2, tem-se:

$$S_e = 0.5 S_y$$

Das tabelas 5.3 e 5.4, percebe-se que a Norma ASTM se torna inaplicável em $\pi = 0.5$ para ambos os materiais, o que acaba de ser mais uma vez confirmado, por uma perspectiva diferente. No entanto, ainda segundo aquelas tabelas, os erros-ASTM do material M2 são bem maiores.

É importante esclarecer que, embora Yan afirme ter executado um furo-cego, não é citado em seu artigo a profundidade nem o diâmetro deste. Tampouco é apresentada a curva tensão-deformação do material por ele utilizado. Desta forma torna-se difícil comparar os seus resultados com os encontrados neste trabalho. Mesmo assim, as modificações propostas por Yan serão aplicadas aos dados disponíveis, a partir dos quais as tabelas 5.5 e 5.6 foram gerada.

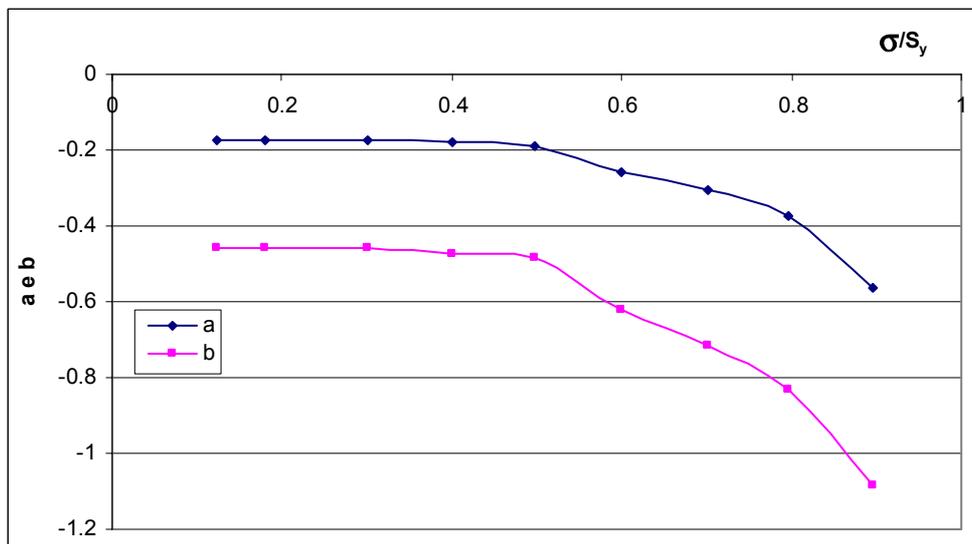


Figura 5.5 – Variação dos coeficientes de alívio \bar{a} e \bar{b} com $\frac{\sigma}{S_y}$.

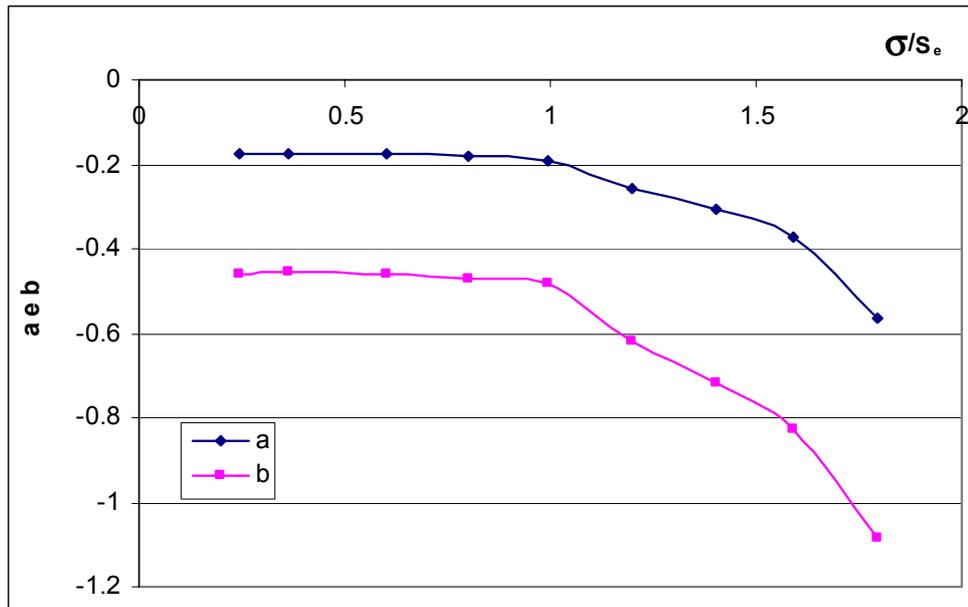


Figura 5.6 – Variação dos coeficientes de alívio \bar{a} e \bar{b} com $\frac{\sigma}{S_e}$.

Yan, partiu do critério de Von Mises, o qual para o caso de tensão plana é:

$$\sigma_{VM} = \sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 \quad (5.14)$$

e em seguida escreveu a lei de Hooke

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \quad (5.15.a)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \mu \sigma_x) \quad (5.15.b)$$

e substituindo as equações 5.15 na equação 5.14 tem-se:

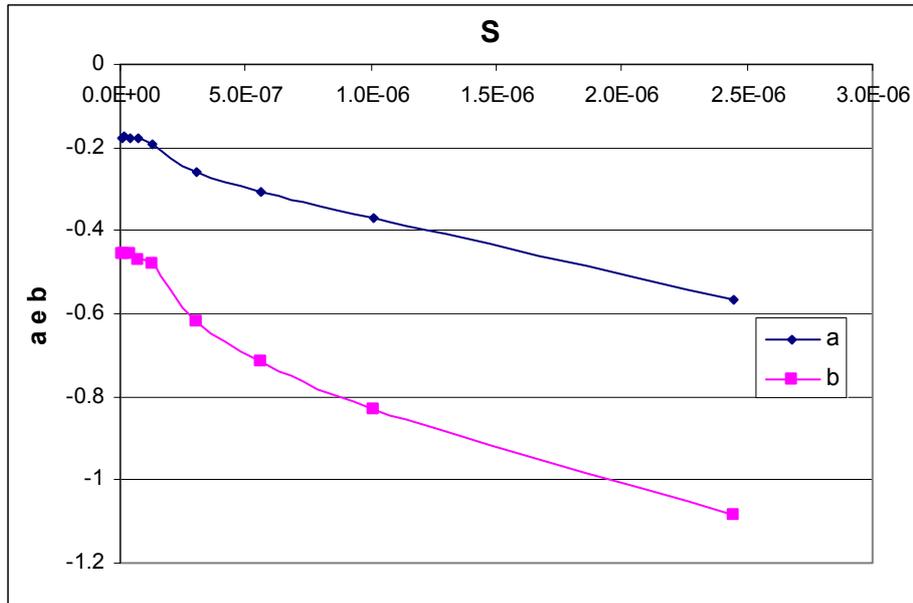
$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 = S \left(\frac{E}{1-\nu^2} \right)^2 \quad (5.16)$$

onde

$$S = (1 + \nu^2 - \nu)(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2) - (1 - \nu^2 - 4\nu)\epsilon_x \epsilon_y \quad (5.17)$$

Desta forma, **S** representa a magnitude da energia de distorção correspondente a certo nível de estado de tensão (ou deformação). Então, pode-se concluir que o material circunvizinho ao furo vai escoar se **S** atingir certo grau. A variação dos coeficientes \bar{a} e \bar{b} com **S** é demonstrada na figura 5.7, onde fica

ratificada a dependência destes coeficientes com S para valores altos da tensão aplicada.



5.7 - Variação dos coeficientes \bar{a} e \bar{b} com o parâmetro S .

Pelo gráfico da figura 5.7, pode-se observar que a relação entre S e os coeficientes de alívio, para altos valores de S , é praticamente linear. Assim, as relações abaixo podem ser usadas para corrigir os coeficientes de alívio \bar{a} e \bar{b} :

$$\bar{a}' = -(\alpha_A + \beta_A S) \quad (5.18.a)$$

$$\bar{b}' = -(\alpha_B + \beta_B S) \quad (5.18.b)$$

onde S pode ser calculado pela expressão (5.17), α_A , β_A , α_B e β_B são obtidos do gráfico da figura 5.7, enquanto \bar{a}' e \bar{b}' são os coeficientes de alívio depois da correção. Procedendo à correção dos coeficientes \bar{a} e \bar{b} e aplicando-os para calcular as tensões aplicadas, foram encontrados os erros-ASTM indicados na tabela 5.8. Como Yan não deixou claro em seu artigo qual a profundidade do furo-cego, neste trabalho foi utilizada $p = 1.0 r_m$.

Tabela 5.8 – Erros-ASTM obtidos antes e depois da correção de Yan, para os dados experimentais obtidos no trabalho dele e para os dados numéricos deste trabalho, sendo $p = 1.0 r_m$

Dados	Erro-ASTM (%)				
	$\Omega = 0$				
	$\pi = 0.5$	$\pi = 0.6$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.8$	$\pi = 0.9$
Experimentais de Yan	1.7	2.8	6.4	12.6	27.4
Experimentais de Yan (corrigidos)	0.8	0.7	1.2	0.5	1.9
Numéricos, $p = 1.0 r_m$	8.2	41.5	66.4	100.0	186.4
Numéricos, $p = 1.0 r_m$ (corrigidos)	-	10.7	13.1	10.3	1.0 ⁵
	$\Omega = 1$				
	$\pi = 0.5$	$\pi = 0.6$	$\pi = 0.7$	$\pi = 0.8$	$\pi = 0.9$
Numéricos, $p = 1.0 r_m$		31.9	49.3	83.5	137.6
Numéricos, $p = 1.0 r_m$ (corrigidos)	-	1.2	4.0	7.3	29.9

Pela tabela, percebe-se que a correção proposta por Yan funciona bem para os dois casos, uma vez que o erro-ASTM máximo caiu de 138% para 29.9%. No entanto, o resultado não é tão atraente quanto o apresentado em seu artigo, pois o erro-ASTM máximo encontrado por Yan, após a correção foi de apenas 1.8%. No entanto, é importante esclarecer, que no artigo de Yan, o erro-ASTM máximo sem correção foi de 35.4%⁶, ou seja, muito menor que os erros-ASTM encontrados no presente trabalho. Assim, parece ficar claro, que a metodologia proposta por Yan, não é tão robusta quanto a de Beghini e, portanto, não pode ser aplicada diretamente a situações diferentes da apresentada em seu artigo, embora esta afirmação seja feita no artigo. Apesar disto, trata-se de um trabalho de muita importância por apresentar os erros-ASTM encontrados em medições reais. É importante observar que estes erros são menores que os preditos numericamente, o que pode ser um indicativo de que as avaliações numéricas sejam excessivamente severas.

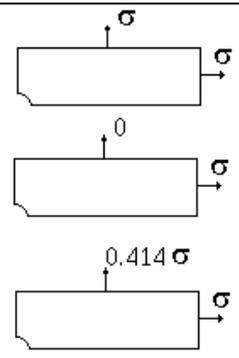
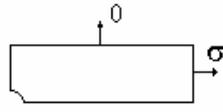
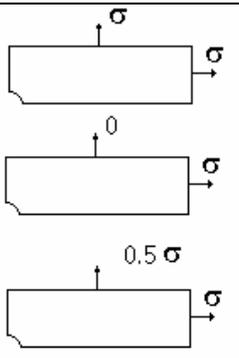
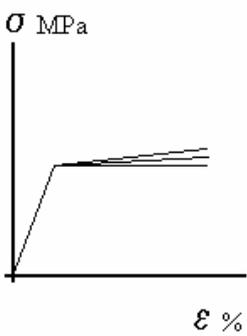
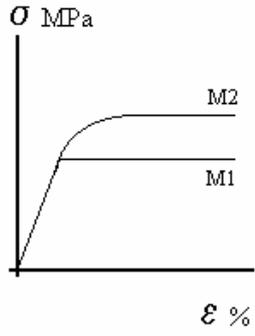
⁵ No final do capítulo pode-se constatar que, no caso de furo-cego, também ocorrem comportamentos inesperados para outras metodologias de correção.

⁶ Yan carregou sua placa até $0.92 S_y$, obtendo para esta situação o erro citado.

Vangi et alli, em 2000, publicaram um artigo no qual é feita uma revisão do trabalho de Yan e concluíram basicamente que tal artigo simplifica e desconsidera itens importantes como a razão de biaxilidade e a orientação da roseta com relação às direções das tensões principais. Apesar de criticar duramente o artigo de Yan, Vangi não propõe nenhuma solução e simplesmente repete o que já tinha sido indicado por Beghini quatro anos antes.

Como foram apresentados duas metodologias de correção e quatro parâmetros a ser variados, apresenta-se abaixo uma tabela-resumo para facilitar na visualização de todos os casos até agora modelados.

Tabela 5.9 – Resumo das propostas de correção até agora apresentados.

Carregamentos		
Beghini	Yan	Este trabalho
		
Materiais		
	<p>Aço doce com $S_y=235\text{MPa}$</p>	
π		
0.3 a 0.9	0.33 a 0.95	0.5 a 0.9
Furo-cego		
Não simulado	Não especificado	$p = 0.2 r_m$ e $p = 1.0 r_m$
Metodologia		
Numérica	Experimental	Numérica

Na tabela 5.10 estão apresentados os erros-ASTM encontrados nos dois artigos apresentados, o de Beghini e o Yan, assim como os erros-ASTM encontrados neste trabalho em situações equivalentes. Apresentam-se também os erros-ASTM obtidos depois das correções, de forma a comparar a efetividade de cada proposta.

Tabela 5.10 – Resumo dos erros-ASTM encontrados antes e depois das correções.

Erros-ASTM Encontrados	
Furo Passante	
Antes das Correções	
Beghini – Metodologia Tradicional	Presente trabalho – Metodologia Tradicional
78,0%	39,0%
Depois das Correções	
6.0 %	2.2%
Furo-cego ($p = 1.0 r_m$)	
Antes das Correções	
Yan	Presente trabalho – Metodologia Tradicional
35.4 %	138,0%
Depois das Correções	
1.8 %	29.9%

Pode-se confirmar que os métodos de Beghini e Yan funcionam muito bem em seus próprios dados, no entanto o método de Beghini teve resultados um pouco melhores quando aplicado a dados diferentes dos seus.

V.5 – Proposta de novas metodologias para avaliar o efeito da plasticidade na técnica do furo-cego.

Conforme dito anteriormente, a obtenção experimental de dados para se avaliar os erros-ASTM cometidos ao se aplicar a técnica do furo em componentes com altas tensões é muito difícil. Portanto, na maioria dos artigos publicados e também neste trabalho foram usadas metodologias numéricas para simular uma placa com altas tensões na qual é usinado um pequeno furo, passante ou cego. Porém, é fundamental que se entenda como o processo de usinagem real ocorre,

para simular numericamente este processo o mais próximo possível da realidade. Seja uma placa real sem furo submetida a um determinado estado de tensões, na qual está colada uma roseta. Ao se usinar um pequeno furo nesta placa ocorre uma mudança no estado de deformações causada pelo alívio de tensão devido a esta usinagem. É importante repetir e ter em mente que a medição indicada pelos extensômetros reais é causada apenas por esta mudança no estado de deformações. Assim, quando se trabalha numericamente, o que se está procurando é a mudança no estado de deformações. Esta é a informação usada para calcular as tensões residuais e em última análise, vai definir a magnitude do erro entre as tensões aplicadas e as tensões calculadas utilizando-se os coeficientes linear-elásticos da Norma ASTM E837, ou seja o erro-ASTM. A metodologia Tradicional, baseada no princípio da superposição, é simplesmente um artifício para se obter o valor da mudança de deformações, uma vez que o estado de deformações inicial é subtraído do estado final. A metodologia funciona bem quando usada em regime elástico, pois o princípio da superposição é válido neste regime e só neste regime. Em contrapartida, ao se ultrapassar o limite elástico, o princípio da superposição não se aplica mais.

Em seu artigo, Beghini [4] já havia chamado a atenção para o fato de que usinar um furo numa placa contendo altas tensões residuais não é exatamente a mesma coisa que carregar com altas tensões uma placa já furada. Portanto naquele artigo, foram propostas três formas de simular o efeito da usinagem de um furo numa placa já carregada. A primeira é a própria metodologia tradicional (embora em nenhum momento Beghini afirme claramente que emprega esta metodologia⁷). Na segunda tem-se uma placa onde um pequeno furo passante é usinado progressivamente até o diâmetro final. E na última, um furo cego tendo $d=d_{\text{final}}$ é usinado, aumentando-se a profundidade até que o furo seja passante. Em seu artigo ele afirma que, pelo menos para materiais elásticos perfeitamente plásticos os três resultados são similares e que por simplicidade usaria a mesma metodologia já usada por pesquisadores anteriores. Entretanto, conforme será

⁷ Esta é mais uma crítica ao trabalho de Beghini [4]; em nenhum momento é dito como a mudança nas deformações é obtida. Por falta de outra opção melhor, conclui-se que a metodologia utilizada é a tradicional.

demonstrado neste trabalho, os resultados não são válidos para materiais cujo limite elástico e de escoamento sejam muito diferentes. Serão apresentadas e comparadas 4 metodologias que visam representar o alívio de tensões medido pelo extensômetro.

- Metodologia Tradicional – a qual já foi explicada no capítulo três.
- Metodologia do Estado Equivalente – na qual as tensões são aplicadas no furo ao invés de serem aplicadas na borda da placa.
- Metodologia Morte de Elementos - na qual a tensão é aplicada na borda da placa e os elementos do furo são eliminados (mortos) em passos consecutivos. Esta metodologia é similar às metodologias 2 e 3 de Beghini.
- Metodologia da Tensão Substituta – na qual são aplicadas tensões de mesmo valor na borda da placa e do furo, sendo que estas últimas simulam as ações que o material (antes de ser retirado) faz sobre a parede limite de usinagem. Num segundo passo, a tensão no furo é retirada de forma gradual, com o objetivo de simular a retirada (usinagem) do material.

Em todas as metodologias, usam-se os coeficientes linear-elásticos indicados pela ASTM ou por Schajer [11] (para o caso de furo-cego) para calcular as tensões a partir das deformações. O que se pretende demonstrar é que os erros – ASTM apresentados por diversos pesquisadores baseados na metodologia tradicional, são diferentes do que os erros-ASTM obtidos com metodologias mais próximas da realidade.

V.5.1 – Metodologia Tradicional.

A metodologia tradicional foi explicada e aplicada no capítulo três, e conforme dito anteriormente, usa o princípio da superposição para encontrar as mudanças no estado de deformações, provocadas pelo alívio de tensões gerado pela usinagem do furo. A figura 5.8 representa esquematicamente esta metodologia.

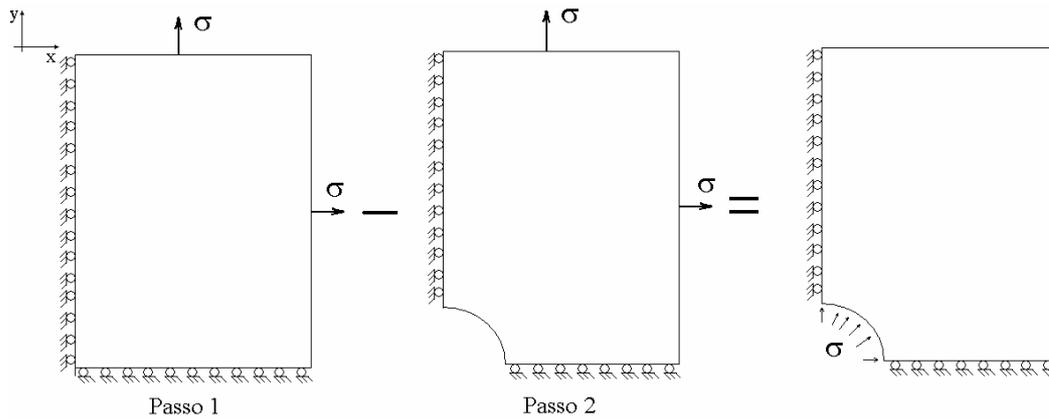


Figura 5.8 – Representação esquemática da metodologia Tradicional

Será discutido agora o motivo pelo qual esta metodologia não pode ser aplicada em regime plástico. Foi simulada uma placa submetida à tração simples, cujo material é muito próximo do perfeitamente plástico⁸, e tem limite de escoamento de 74.7 MPa. A placa foi carregada com $\sigma = 76\text{MPa}$, ou seja, $\pi = 1.02$, apenas para garantir que haveria escoamento e o valor da deformação total foi registrado:

$$\varepsilon_{76} = 0.2899 \%$$

Em novas simulações, nas quais a placa era sempre tomada como virgem, o carregamento foi de $\sigma = 66\text{MPa}$, 56MPa e 10MPa . Os resultados de deformação total são os seguintes:

$$\varepsilon_{66} = 0.0958\%$$

$$\varepsilon_{56} = 0.0813\%$$

$$\varepsilon_{10} = 0.014\%$$

Assim, percebe-se que a deformação total devido à $\sigma = 10\text{MPa}$ não é igual à diferença entre as deformações devidas a $\sigma = 76\text{MPa}$ e $\sigma = 66\text{MPa}$, ou:

$$\varepsilon_{10} \neq \varepsilon_{76} - \varepsilon_{66}$$

pois:

⁸ Uma placa submetida à tração, quando modelada em elementos finitos, apresenta um sério problema de convergência, pois todos os elementos escoam ao mesmo tempo. No caso do material perfeitamente plástico, o problema é ainda pior, pois não é possível aplicar tensões minimamente maiores que a de escoamento. Assim, para contornar estes problemas, o material empregado não é perfeitamente plástico, mas tem a inclinação da parte plástica bastante pequena.

$$\varepsilon_{76} - \varepsilon_{66} = 0.00289 - 0.000957 = 0.00194$$

a qual é diferente de 0.0014, a deformação elástica devida a $\sigma = 10\text{MPa}$.

Esta é apenas uma constatação numérica de que o princípio da superposição não é válido em regime plástico. Por outro lado, para as tensões elásticas este princípio é obviamente verificado:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_{66} - \varepsilon_{56},$$

pois:

$$0.00014 = 0.000957 - 0.000812$$

Neste momento, é importante destacar uma característica do programa *Ansys*: uma vez que se passe ao módulo de pós-processamento (onde são obtidos os resultados) e se retorne ao módulo de solução (onde são aplicados os carregamentos e condições de contorno) os resultados da última simulação são apagados. No exemplo acima, se houve deformação plástica ao se aplicar $\sigma = 76\text{MPa}$, no momento que se inicia uma nova simulação, por exemplo, $\sigma = 66\text{MPa}$, os valores de deformação prévios são perdidos e a placa é de novo uma placa virgem, conforme mencionado. É fundamental que se conheça e se dê atenção a este detalhe, pois do contrário ter-se-á a impressão que os resultados de deformação são automaticamente cumulativos ao longo de várias simulações, quando isto não é verdade. Para que o programa *Ansys* “guarde” os resultados de uma simulação para a outra é imprescindível que as duas simulações sejam executadas uma após a outra, sem que se vá ao módulo de pós-processamento. Voltando ao exemplo acima, ao se aplicar $\sigma = 76\text{MPa}$ tem-se deformação elástica e plástica:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{plas} + \varepsilon_{elas}$$

$$0.00289913 = 0.00179608 + 0.00110350$$

Se forem realizadas duas simulações consecutivas, a primeira com $\sigma = 76\text{MPa}$ e a segunda com $\sigma = 0\text{MPa}$, esta última simulando o descarregamento, a deformação indicada ao final da segunda simulação é:

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon_{plas} + \varepsilon_{elas}$$

$$0.00179608 = 0.00179608 + 0$$

pois a deformação elástica é totalmente recuperada.

Contrariamente, quando a simulação é feita em dois passos independentes, a deformação no final do passo 2 é zero. Esta talvez seja a grande falha da metodologia tradicional, mais do que aplicar o princípio da superposição! Ao separar a solução em duas partes, passo 1 e passo 2, e resolvê-los independentemente, o que se está fazendo é desconsiderar a contribuição que o estado de tensões do passo 1 possa ter ao ser executado o passo 2. Assim, a deformação medida pelo extensômetro virtual no passo 2 é totalmente irreal.

É interessante voltar ao problema da placa com furo para que se explorem mais conclusões relevantes. Foi aplicado um carregamento de $\pi = 0.8$, uniaxial em duas placas com furo passante, cujos materiais eram M1 e M2 respectivamente. Devido à concentração de tensões, houve escoamento localizado na borda do furo nos dois casos. Entretanto, foi observado que a deformação plástica sob o extensômetro 1 da placa de material M1 foi praticamente zero, enquanto que para M2 esta deformação foi marcante, conforme pode ser observado na figura 5.9, na qual a localização do furo e do extensômetro estão destacadas. A luz desta afirmação pode-se começar entender por que Beghini encontrou os mesmos resultados utilizando a metodologia tradicional e simulando a usinagem: de fato, para M1 as deformações indicadas pelos extensômetros são elásticas e, portanto, pode-se subtrair destas as tensões iniciais (da placa sem furo), uma vez que em regime elástico o princípio da superposição tem validade. Além disso, será demonstrado adiante que as tensões finais são as mesmas tanto pela metodologia Tradicional, quanto pelas metodologias Morte de Elementos e Tensão Substituta. No caso do material M2, como já ocorreram deformações plásticas na região dos extensômetros, a metodologia não tem validade. Este gráfico também ajuda a entender por que nas tabelas 5.3 e 5.4 foram indicados erros-ASTM bem menores para M1 do que para M2.

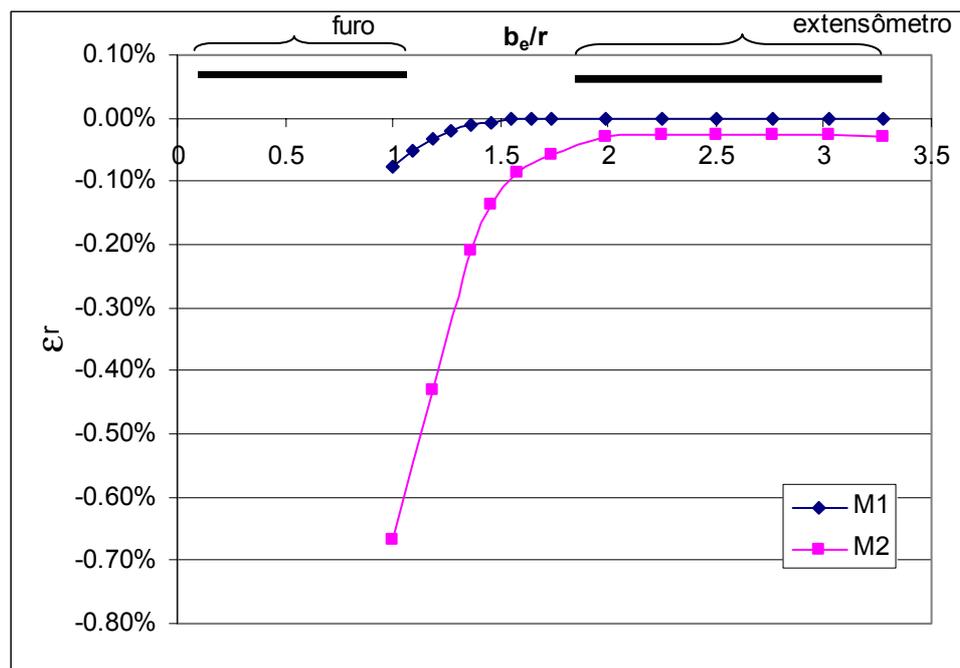


Figura 5.9 – Deformações plásticas na direção do extensômetro 1, para M1 e M2. Tem-se $\pi=0.8$ e $\Omega=0$.

Como foi mostrado neste item, a metodologia Tradicional, gera erros-ASTM que não estão relacionados à técnica do furo-cego. Por este motivo procuraram-se metodologias alternativas para simular o processo de usinagem. Serão apresentadas e discutidas três metodologias com esse objetivo e então os resultados destas metodologias, juntamente como os resultados da metodologia Tradicional, serão comparados. Desta forma, será possível avaliar que metodologia é mais apropriada para avaliar os efeitos da plasticidade na técnica do furo-cego para medição de tensões residuais.

V.5.2 – Metodologia do Estado Equivalente.

Conforme anteriormente explicado, a metodologia tradicional usa o princípio da superposição para simular o estado final da figura 5.8. Assim, Schajer [26] propôs que fosse modelado o próprio estado final, ou seja tensão igual a zero nas bordas da placa e tensão igual a σ_0 na borda do furo, conforme apresentado na figura 510. Desta forma, o estado (c) é “equivalente” a subtração dos estados (a) e

(b), e portanto as deformações indicadas pelos extensômetros serão as mudanças nas deformações, sem a necessidade de subtrair as deformações iniciais das deformações finais.

É importante esclarecer que o interesse de Schajer não era plasticidade e sim uniformidade das tensões residuais com a profundidade, ou seja, ele trabalhou com materiais elásticos. Desta forma, o princípio da superposição é válido e a prova disto é que Schajer obteve resultados muito bons em sua análise⁹. Na presente análise, o que se deseja é justamente evitar o uso do princípio da superposição.

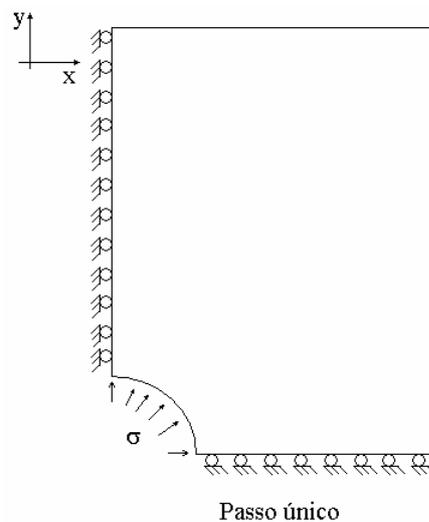


Figura 5.10 – Metodologia do Estado Equivalente

Conforme mostrado nas figura 5.8 e 5.10, é preciso aplicar na região do furo a mesma tensão que estaria ocorrendo nesta região, caso a placa fosse carregada exteriormente. No caso de estado biaxial de tensões, tem-se $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_0$ e portanto a tensão a ser aplicada na borda do furo é a própria σ_0 . Os outros casos são um pouco mais complicados, pois a tensão a ser aplicada não é igual a σ_0 . Deve-se utilizar um procedimento como o círculo de Mohr, para calcular quais são σ'_x , σ'_y e τ'_{xy} equivalentes a σ_0 . Pode-se entender melhor observando a figura 5.11.

⁹ O artigo de Schajer é discutido e reproduzido no Apêndice "A".

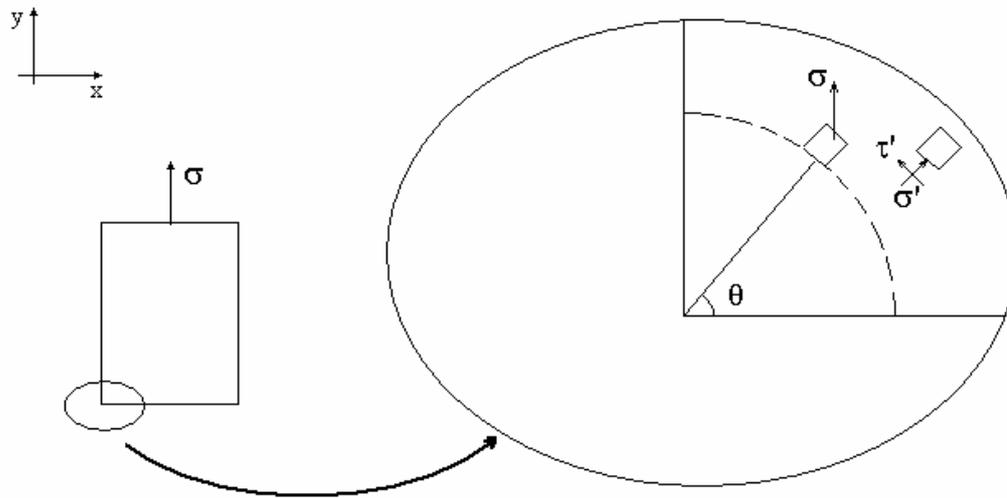


Figura 5.11 – Tensões equivalentes na borda do furo, no caso em que a carga externa é uniaxial.

No detalhe da figura 5.11 apresenta-se em linha tracejada o lugar onde será “usinado” o furo e um elemento adjacente a este, no qual age a tensão σ . No elemento ao lado, mostram-se as tensões equivalentes a σ , designadas por σ' e τ'_{xy} , as quais agem na face do elemento que será tangente ao furo. Entretanto, a aplicação de τ_{xy} no programa *Ansys* não é trivial. Conforme dito anteriormente, o elemento utilizado é o *Solid95* e este elemento não suporta a aplicação de cargas tangenciais. O programa *Ansys* disponibiliza o elemento *Surf154*, que foi especialmente desenvolvido para aplicação de tais cargas. Este elemento é aplicado na superfície do furo, e está representado na figura 5.12.

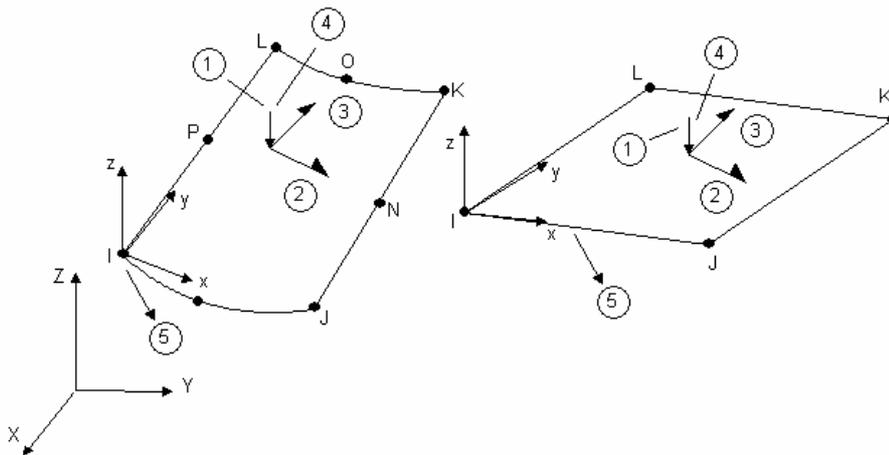


Figura 5.12 – Representação esquemática do elemento *Surf154*.

Comparando-se o detalhe da figura 5.11 com a figura 5.12, pode-se concluir que a tensão radial σ'_x deve ser aplicada na direção 1 enquanto a tensão tangencial τ'_{xy} na direção 2. Na figura 5.13 apresentam-se os passos para a aplicação do elemento *Surf154*. Em (a) mostra-se a vista lateral do modelo e na vista (b) uma rotação deste modelo para pronunciar a superfície do furo. Não está mostrada a malha por questão de simplificação. Na figura (c), mostra-se esquematicamente os elementos *Surf154* a serem aplicados, e pode-se de fato pensar neles como uma “capa” que cobrirá a superfície do furo. Finalmente em (d) mostra-se a “capa” já aplicada.

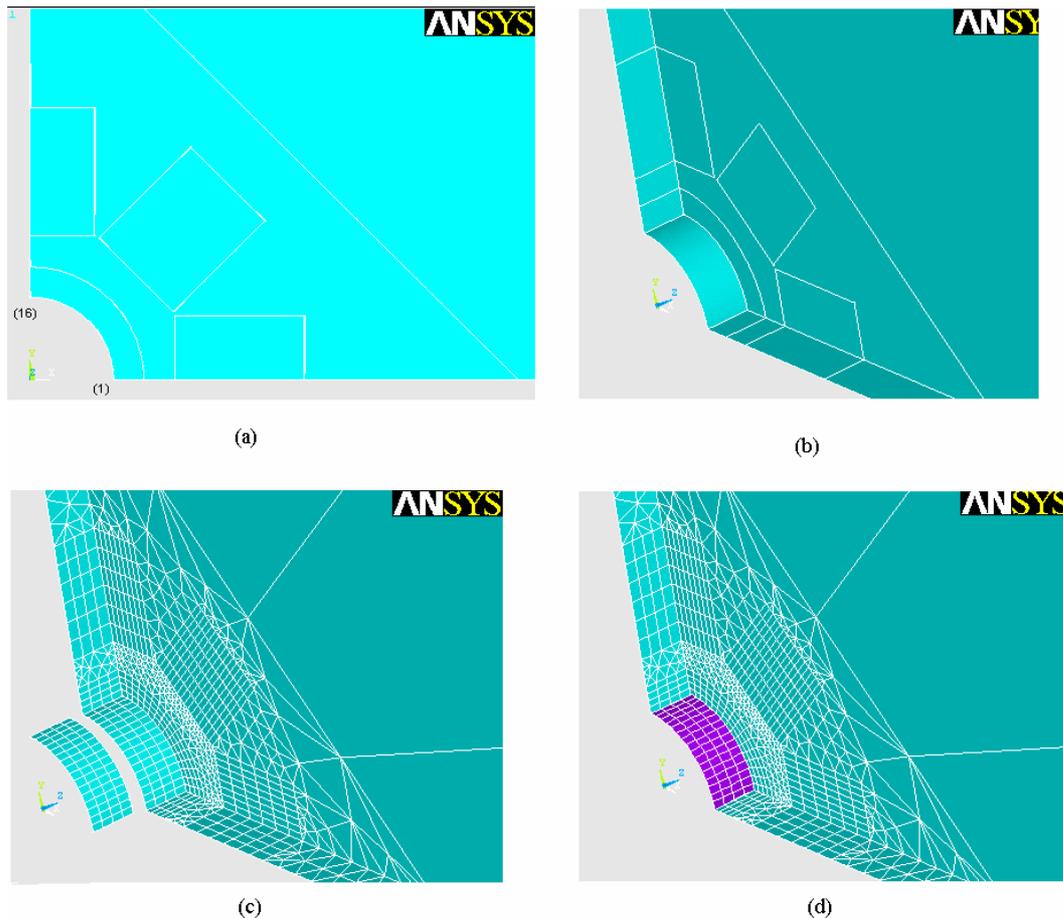


Figura 5.13 – Representação esquemática da aplicação do elemento *Surf154*. (a) vista lateral, onde estão numerados o primeiro e o último nó da circunferência (b) vista girada (c) vista com a malha e no detalhe a “capa” de elementos *Surf154* (d) elemento *Surf154* colado à superfície do furo.

Conforme mostrado nas figuras 5.13 (c) e (d) há quatro elementos ao longo da espessura da placa, formando várias fileiras. Cada fileira recebe diferentes valores de tensão cisalhante e radial, de acordo com sua posição angular, conforme mostrado na figura 5.11. Assim, precisa-se saber as coordenadas dos nós na superfície do furo, para então calcular a suas posições angulares. A tabela 5.9 exemplifica o cálculo das tensões radiais e tangenciais que serão aplicadas. As colunas X e Y são as coordenadas de cada nó ao longo da superfície do furo, obtidas do programa *Ansys*. Em σ_x , σ_y e τ_{xy} estão as tensões que seriam aplicadas externamente no passo 1 da figura 5.8 e σ'_x , σ'_y e τ'_{xy} são as tensões equivalentes que se deve aplicar na borda do furo.

Tabela 5.9 – Cálculo de σ'_x , σ'_y e τ'_{xy} ao longo dos nós da circunferência do furo. O valores de σ_x e σ_y foram escolhidos de forma a generalizar o exemplo. As tensões estão em MPa.

Nó ¹⁰	X	Y	r	θ	σ_x	σ_y	τ_{xy}	σ'_x	σ'_y	τ'_{xy}
1	1,028	0,000	1.028	0,000	-15,500	-31,000	0,000	-31,000	-15,500	0,000
2	1,023	0,101	1.028	0,098	-15,500	-31,000	0,000	-30,851	-15,649	1,512
3	1,008	0,201	1.028	0,196	-15,500	-31,000	0,000	-30,410	-16,090	2,966
4	0,984	0,298	1.028	0,295	-15,500	-31,000	0,000	-29,694	-16,806	4,306
5	0,950	0,393	1.028	0,393	-15,500	-31,000	0,000	-28,730	-17,770	5,480
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
14	0,201	1,008	1.028	1,374	-15,500	-31,000	0,000	-16,090	-30,410	2,966
15	0,101	1,023	1.028	1,473	-15,500	-31,000	0,000	-15,649	-30,851	1,512
16	0,000	1,028	1.028	1,570	-15,500	-31,000	0,000	-15,500	-31,000	0,012

Esta metodologia apresenta erros-ASTM bastante menores em relação à Norma ASTM comparando-se a metodologia Tradicional, o que por si só não significa que esta metodologia seja melhor que a Tradicional. Entretanto, é importante notar, que a total ausência de tensão no material circunvizinho ao furo, não representa totalmente a realidade, pois desta maneira o material da borda do furo não encontra resistência para se deslocar. Conforme explicado extensamente no capítulo 3, a usinagem do furo provoca redistribuição no estado de tensões no material circunvizinho ao furo. Portanto, é fundamental que haja tensões neste material, para que possa haver redistribuição e, por conseguinte, possa ocorrer a mudança correspondente nas deformações. Além disso, o que foi explicado para a metodologia Tradicional se aplica também à metodologia Estado Equivalente; ao simular somente o terceiro passo da figura 5.8, não se leva em consideração a contribuição do estado anterior.

A metodologia do Estado Equivalente só pode ser aplicada para furos-cegos nos casos em que $\Omega = 1$. Para os outros houve grandes disparidades entre as tensões aplicadas e as calculadas mesmo para o caso elástico, o que desqualifica a metodologia nestes casos. É importante esclarecer que o elemento *Surf154* foi aplicado na superfície do furo-cego exatamente da mesma forma que no furo passante. Os resultados foram ruins, independente da profundidade do furo-cego.

¹⁰ A numeração dos nós é puramente ilustrativa.

Finalmente, aumentou-se o número de elementos ao longo da profundidade do furo, também sem nenhuma melhoria perceptível. Conforme dito no capítulo 3, numa versão anterior do programa Ansys, os resultados dos coeficientes de alívio calculados através de simulações que utilizavam o elemento *Solid95*, foram péssimos para o caso de furo-cego, embora tenham sido testados três tipos de construção. Quando se passou para a versão atual, os resultados foram melhores, mesmo usando uma das técnicas “reprovadas” anteriormente. Concluiu-se então, que a utilização do elemento *Surf154* na atual versão do programa *Ansys* para furo-cego, pode não estar perfeitamente implementada, ou ainda, requerer conhecimento mais aprofundado de como operar o programa *Ansys*. Além disso, conforme demonstrado na tabela 5.9, é necessário calcular a tensão equivalente agindo na borda do furo. No caso do furo-cego, para carregamentos diferentes de $\Omega = 1$, o estado de tensões é bastante complicado e talvez a tensão calculada conforme mostrado na tabela 5.9, não seja realmente “equivalente” à tensão que age naquela porção de material, invalidando assim esta metodologia.

V.5.3 – Metodologia Morte de Elementos

Esta metodologia tenta simular da forma mais realista a usinagem do furo. No primeiro passo, tem-se a placa inteira carregada. No segundo passo, o material presente num furo de diâmetro e/ou profundidade menores que os do furo final é retirado, ficando assim a placa com um pequenino furo. Num próximo passo, o diâmetro e/ou a profundidade deste pequeno furo são ligeiramente aumentados. O processo continua até que se atinja o diâmetro e/ou a profundidade finais, figura 5.14. Ao final, subtrai-se as deformações indicadas pelo extensômetro no passo 4, daquelas indicadas no passo 1. A primeira vista, este procedimento pode parecer igual ao da metodologia Tradicional, ou seja, subtrair o estado inicial do final. No¹¹ entanto, a cada estado as redistribuições nos estados de tensão e deformação geradas pelo estado anterior são levadas em consideração.

¹¹ É importante destacar que a ferramenta “Write LoadStep” não pode ser usada concomitantemente a ferramenta “Birth and Death”, sob pena de se perderem as informações do passo anterior. Assim, se isto ocorrer, a metodologia Morte de Elementos corresponderá a metodologia Tradicional.

Conforme discutido no item V.5.1, na metodologia Tradicional, o segundo passo não carrega informações do primeiro, pois são simulações diferentes. Nesta nova metodologia, o passo 2, começa a partir do passo 1, e carrega consigo todas as informações deste. E esta é a grande contribuição desta metodologia, ou seja, perceber que o material não é retirado instantaneamente da placa e, portanto ocorrem redistribuições das tensões no material não retirado (ou ainda não retirado).

Para proceder esta análise é utilizada uma ferramenta do programa *Ansys* chamada “*Birth and Death*” que é empregada exatamente em casos em que há montagens, usinagens, fusão, etc, ou seja, qualquer tipo de problema em que material é acrescentado ou retirado durante a análise. Esta ferramenta evita problemas com instabilidade numérica, o que certamente ocorreria se uma determinada parte de um componente fosse simplesmente apagada durante a análise. Em contrapartida a análise torna-se lenta e não é automática, necessitando que o usuário indique a cada passo, que elementos serão “mortos”.

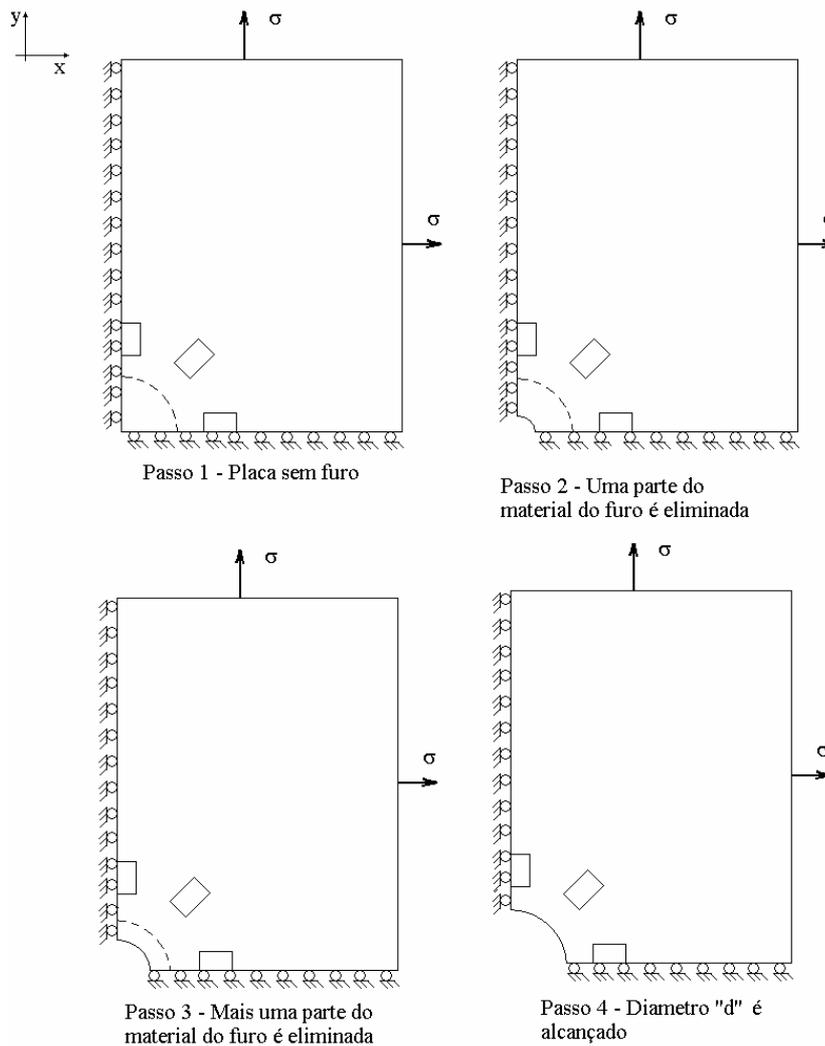


Figura 5.14 – Representação esquemática da metodologia Morte de Elementos

A metodologia Morte de Elementos foi aplicada por Beghini¹² em seu trabalho que simulou placas com diâmetros e profundidades progressivas. A conclusão obtida foi que os resultados da metodologia Tradicional, do diâmetro progressivo e da profundidade progressiva são os mesmos. À luz do que foi discutido no item V.5.1 é possível entender o porquê desta conclusão. Como o material usado era perfeitamente plástico, as deformações na região dos extensômetros eram elásticas (como ocorreu naquele item) e iguais tanto pelo princípio da superposição quanto pelas metodologias diâmetro progressivo e

¹² Mais uma vez, não é dito claramente que Beghini usou a ferramenta "Birth and Death" do Ansys, mas é certo que ele foi eliminando elementos consecutivamente até atingir o diâmetro ou a profundidade finais.

profundidade progressiva. Isto está mostrado na figura 5.15, para a Metodologia Morte de Elementos com diâmetro progressivo.

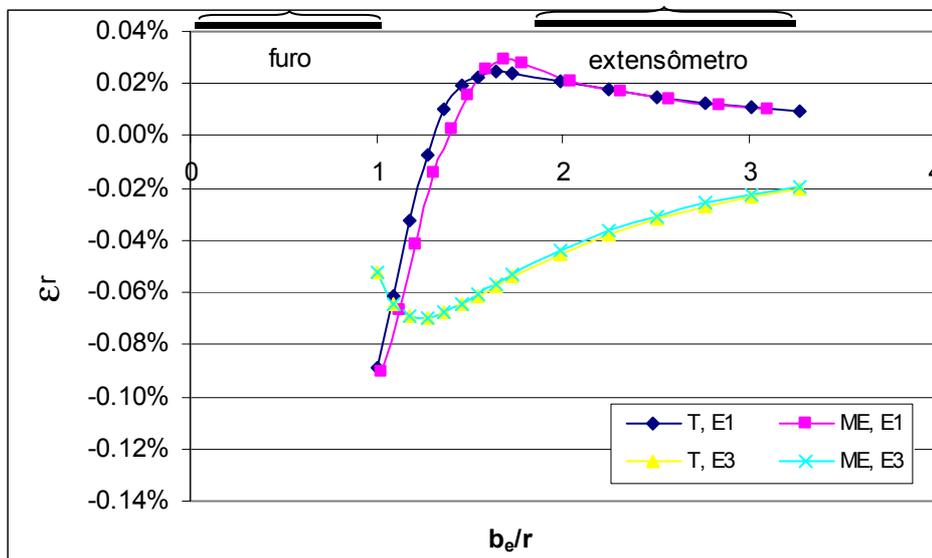


Figura 5.15 – Mudança nas deformações radiais dos extensômetros 1 e 3, para as metodologias Tradicional e Morte de Elementos. Tem-se material M1 e $\pi = 0.7$.

No caso do material M2, as deformações medidas no passo quatro da figura 5.14, não são iguais às encontradas no passo final da metodologia Tradicional, conforme mostrado na figura 5.16. Por este motivo, os resultados finais de deformação assim como os erros-ASTM encontrados em cada uma das metodologias são diferentes.

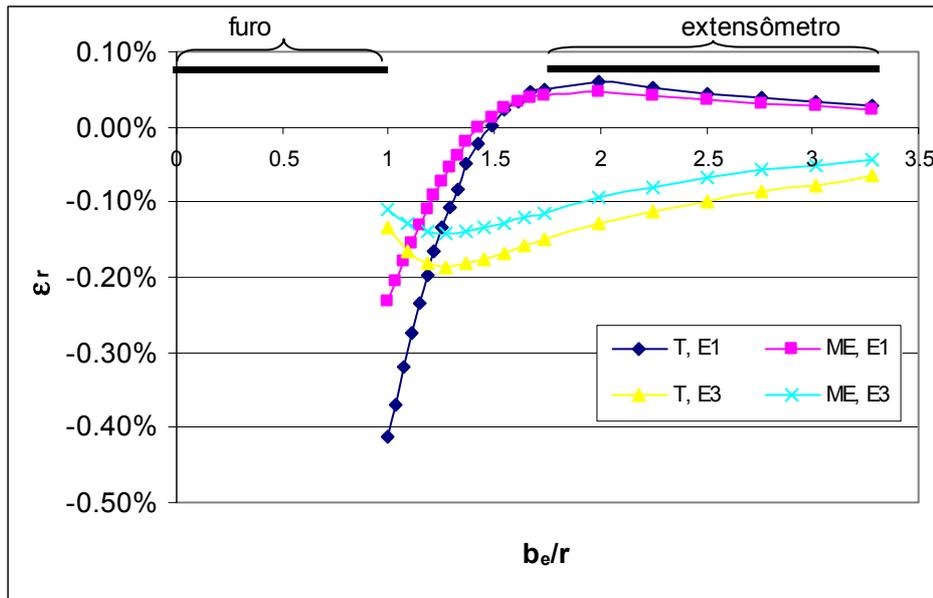


Figura 5.16 – Mudança nas deformações radiais dos extensômetros 1 e 3, para as metodologias Tradicional e Morte de Elementos. Tem-se material M2 e $\pi = 0.7$.

Além do processo mostrado na figura 5.14, no qual o raio do furo foi aumentando até chegar ao raio final, pode-se se aproximar ainda mais da usinagem real da seguinte forma: faz-se um furo-cego tendo a profundidade crescente até que se atinja a espessura da placa, no caso de furo passante, ou a profundidade final, no caso de furo-cego, conforme mostrado na figura 5.17. Foram realizadas algumas simulações com as duas metodologias e os resultados foram bastante parecidos. Por motivos construtivos, no caso do furo passante optou-se por fazer diâmetros progressivos enquanto para furo-cego, profundidades progressivas.

Além disso para as duas metodologias Morte de Elementos, a saber, diâmetro progressivo e profundidade progressiva, foram analisados o número ótimo de elementos a serem mortos em cada passe. Por exemplo, no caso do diâmetro progressivo, foram realizadas simulações bastante refinadas, intermediárias e grosseiras. No primeiro caso apenas uma fileira de elementos era “morta” a cada passe, e no caso mais grosseiro o furo era executado em apenas três passes: placa inteira, metade do diâmetro do furo e diâmetro total. Neste caso, os resultados foram bastante próximos aos da metodologia Tradicional, indicando ser uma simulação grosseira e insuficiente. Analisando os resultados mais

refinados, observou-se que para um número de passes superior a quatro não havia diferença entre os resultados obtidos e portanto este foi o número de passes ótimo. Considerações semelhantes foram tecidas para o método profundidade progressiva, chegando-se ao número cinco como o ótimo para profundidades.

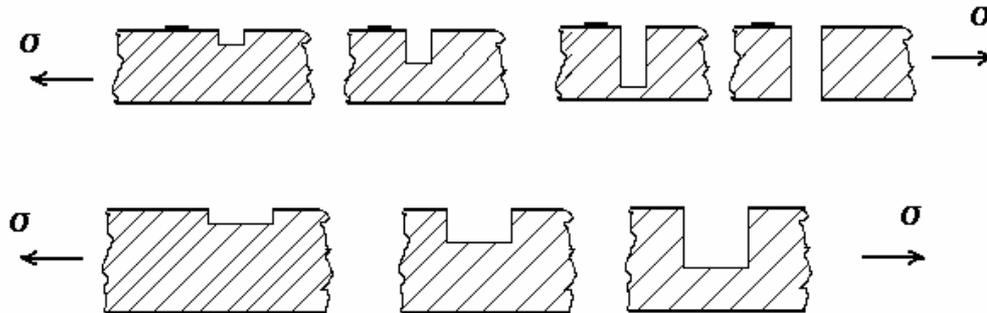


Figura 5.17 – Metodologia Morte de Elementos, profundidade progressiva.

V.5.4 Metodologia Tensão Substituta

Como foi explicado no item anterior, a ferramenta “*Birth and Death*” empregada na metodologia Morte de Elementos, torna a análise muito lenta. Além disso, a sintaxe desta ferramenta é complicada e por isso levou-se muito tempo para que resultados confiáveis fossem obtidos. Desta forma, com o objetivo de contornar os problemas numéricos da metodologia Morte de Elementos, foi criada a metodologia da Tensão Substituta. Nesta metodologia, o material que vai ser retirado pela usinagem é substituído pela tensão nele aplicada, ou seja, aplicam-se tensões iguais na borda da placa e na borda do furo. Desta forma, a tensão na borda do furo age exatamente como agiria o material do furo. Num segundo passo, esta tensão é retirada gradualmente simulando-se assim o alívio de tensão causado pela usinagem do furo. A representação esquemática da metodologia está apresentada na figura 5.18. Conforme aconteceu no metodologia do Estado Equivalente, a aplicação da tensão substituta requer cuidados, nos casos em que $\sigma_x \neq \sigma_y$, e para possibilitar a aplicação de tensões cisalhantes, utilizou-se novamente o elemento *Surf154*. Similarmente ao que ocorreu na metodologia do Estado Equivalente, esta metodologia não pôde ser aplicada a furos-cegos nos casos em que $\Omega = 0$ e $\Omega = 0.5$.

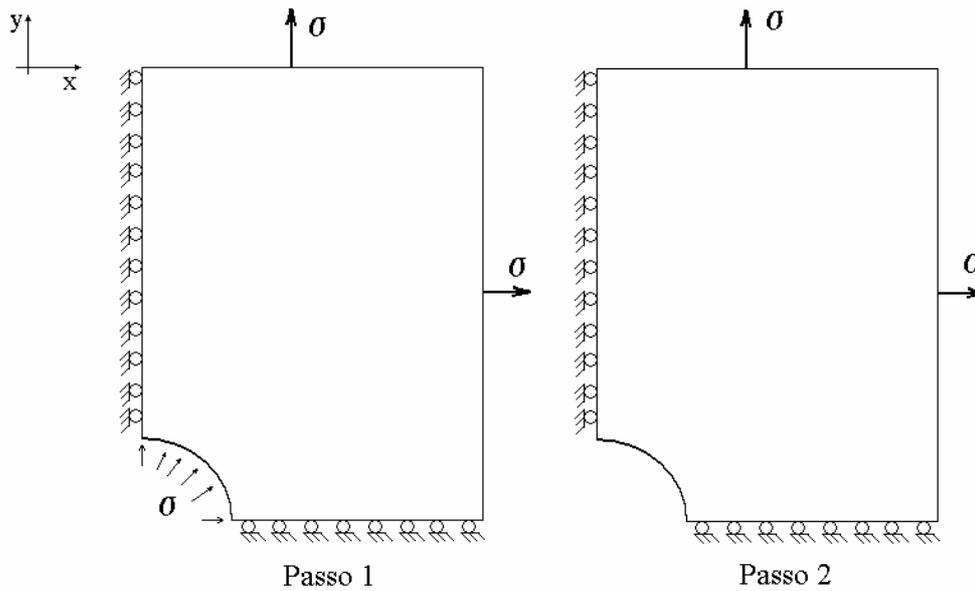


Figura 5.18 – Metodologia Tensão Substituta.

Na figura 5.18 observa-se que no passo 1 tem-se um estado idêntico ao que se teria numa placa sem furo.

Do exposto, percebe-se que a metodologia Morte de Elementos é equivalente à Tensão Substituta. Conforme será discutido adiante, os resultados das duas metodologias são bastante similares desde que os passos em cada uma delas sejam divididos em números equivalentes de sub-passos.

V.6 – Resultados e Discussão.

Serão apresentadas agora comparações entre os resultados obtidos pelas quatro metodologias apresentadas: Metodologia Tradicional (T), Metodologia do Estado Equivalente (EE), Metodologia Morte de Elementos (ME) e Metodologia Tensão Substituta (TS). Em todas as metodologias o procedimento foi o mesmo: obtiveram-se os valores da mudança na deformação para os três extensômetros, e utilizaram-se esses valores juntamente com os coeficientes indicados pela norma ASTM E837 para calcular as tensões aplicadas. Finalmente as tensões aplicadas foram comparadas com as calculadas e foram obtidos então os erros-ASTM de cada metodologia.

V.6.1 – Furo Passante

Os primeiros resultados a serem apresentados são referentes a furo passante. Da mesma forma que ocorreu no capítulo três, estes resultados servem como referência para os resultados de furo-cego. Embora não seja o caso de maior aplicabilidade da técnica do furo usinado, o furo passante tem a solução mais fácil que o furo-cego e é mais econômico computacionalmente. Além disso, não há restrição de carregamento para furo passante e, portanto pode-se ter pelo menos uma idéia do comportamento esperado nos casos em que as metodologias Estado Equivalente e Tensão Substituta não se aplicam. Assim, nas figuras 5.19 e 5.20 apresentam-se os erros-ASTM encontrados para as quatro metodologias no caso dos materiais M1 e M2, respectivamente.

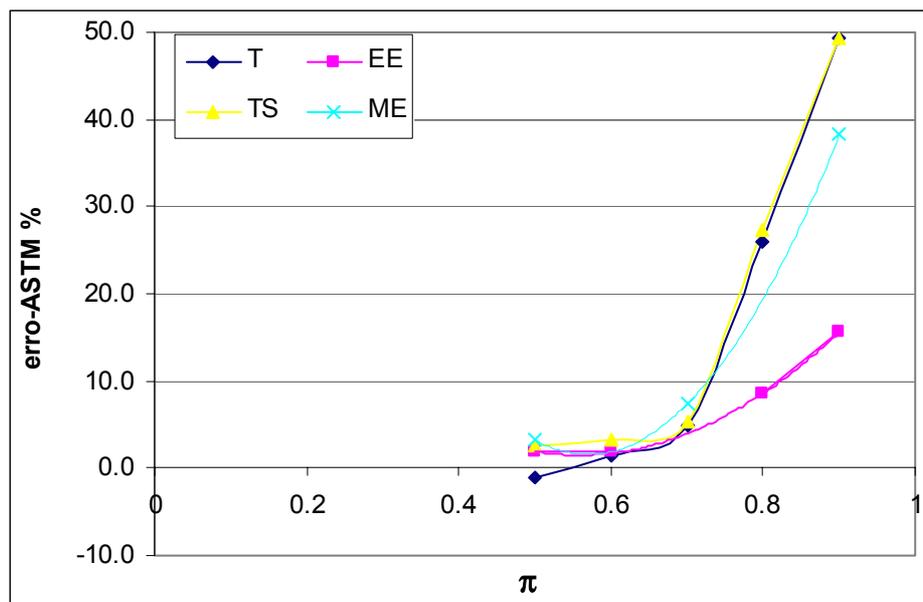


Figura 5.19 – Comparação entre os erros-ASTM encontrados pelas quatro metodologias para M1 e $\Omega = 1$.

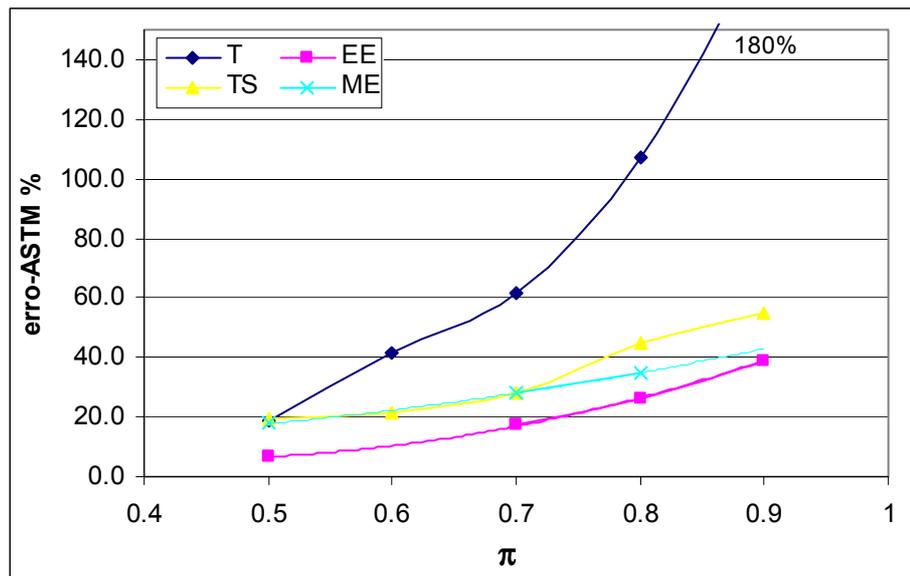


Figura 5.20 – Comparação entre os erros-ASTM encontrados pelas quatro metodologias para M2 e $\Omega = 1$.

Comparando-se as figuras 5.19 e 5.20 percebe-se que os erros-ASTM para o material M1 são bem menores que M2. Além disso, para M1 os erros-ASTM das metodologias Tradicional, Morte de Elementos e Tensão Substituta são muito próximos, o que está de acordo com o que Beghini concluiu em seu trabalho, ao passo que a metodologia do Estado Equivalente exibe resultados bastante diferentes dos demais. Esta diferença não era esperada, pois para M1 ocorre pouca deformação plástica sob os extensômetros e os resultados das quatro metodologias deveriam ser muito próximos. Para o material M2, somente as metodologias Morte de Elementos e Tensão Substituta têm resultados parecidos, o que reforça a idéia de que estas são equivalentes. Em extremos opostos, estão as metodologias Tradicional e Estado Equivalente com os maiores e menores erros-ASTM, respectivamente.

As figuras 5.21 e 5.22 mostram os erros-ASTM encontrados quando o carregamento é uniaxial, para os materiais M1 e M2, respectivamente.

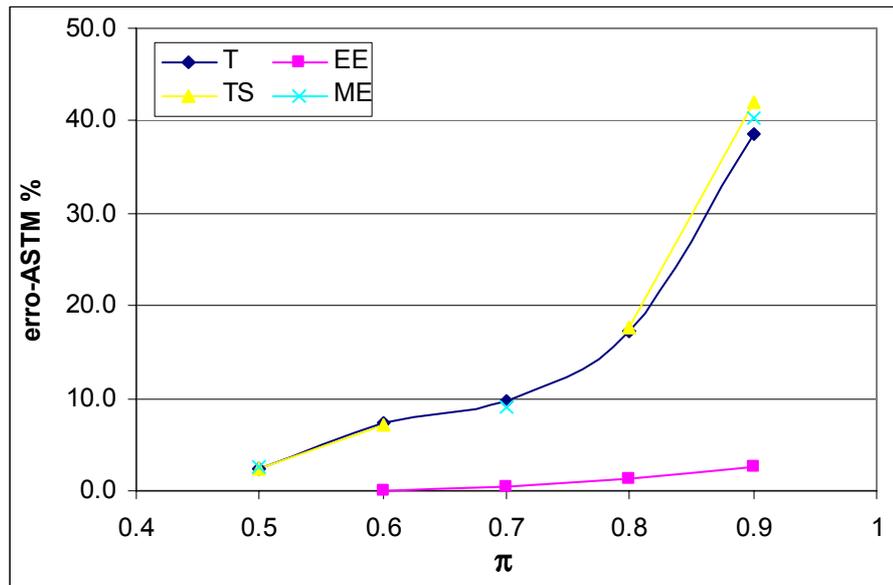


Figura 5.21 – Comparação entre os erros-ASTM encontrados pelas quatro metodologias para M1, no caso de furo passante e $\Omega = 0$.

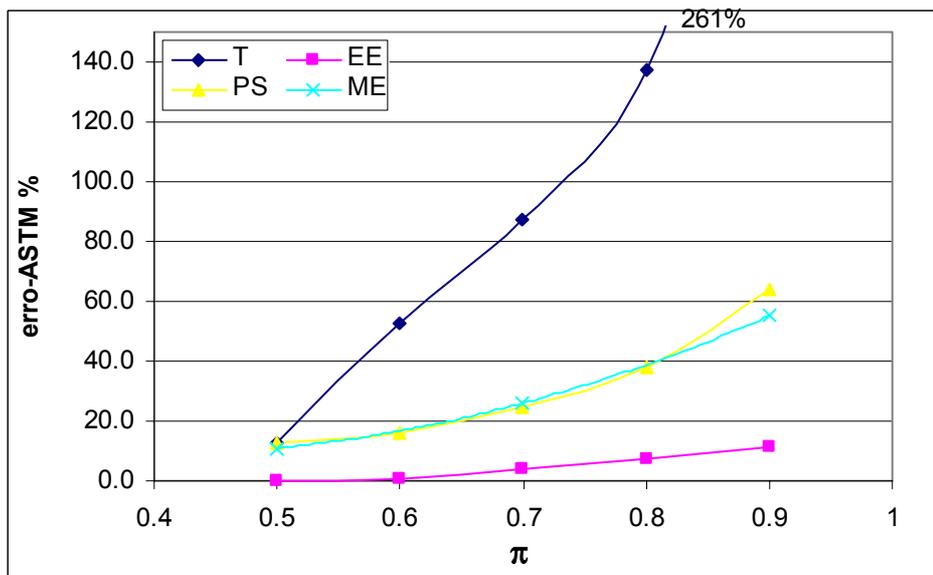


Figura 5.22 – Comparação entre os erros-ASTM encontrados pelas quatro metodologias para M2, no caso de furo passante e $\Omega = 0$.

O padrão geral de erros-ASTM é similar ao encontrado para o carregamento biaxial $\Omega = 1$; os erros encontrados no material M1 são quase idênticos para todas as metodologias à exceção da metodologia do Estado Equivalente. Para M2, os resultados das metodologias Morte de Elementos e Tensão Substituta são iguais e novamente a metodologia do Estado Equivalente teve resultados dissonantes e a

metodologia Tradicional teve os maiores erros-ASTM. Comparando-se os materiais M1 e M2, percebe-se claramente que M1 teve erros-ASTM menores.

Finalmente, nas figuras 5.23 e 5.24 apresentam-se os erros-ASTM para M1 e M2 no caso em que $\Omega = 0.5$.

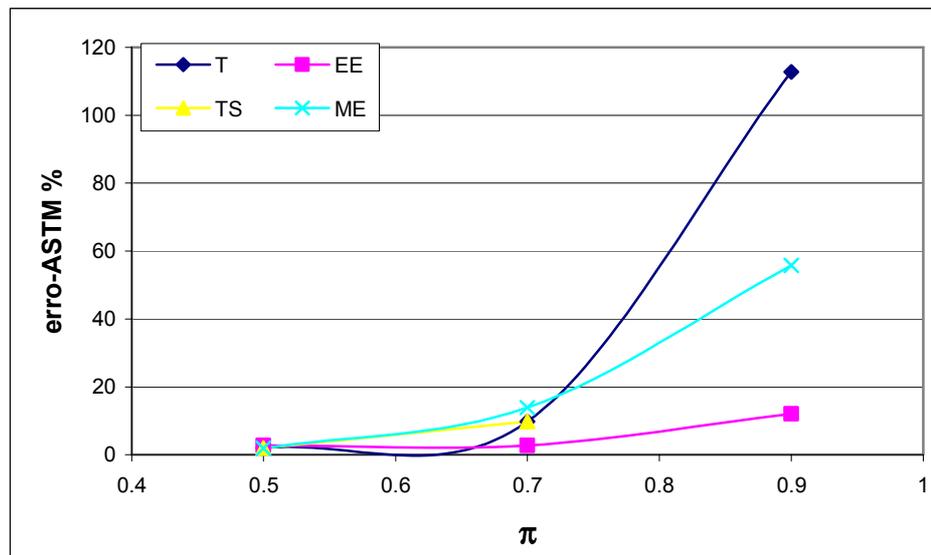


Figura 5.23 – Comparação entre erros-ASTM encontrados pelas quatro metodologias para M1, furo passante e $0 < \Omega < 1$.

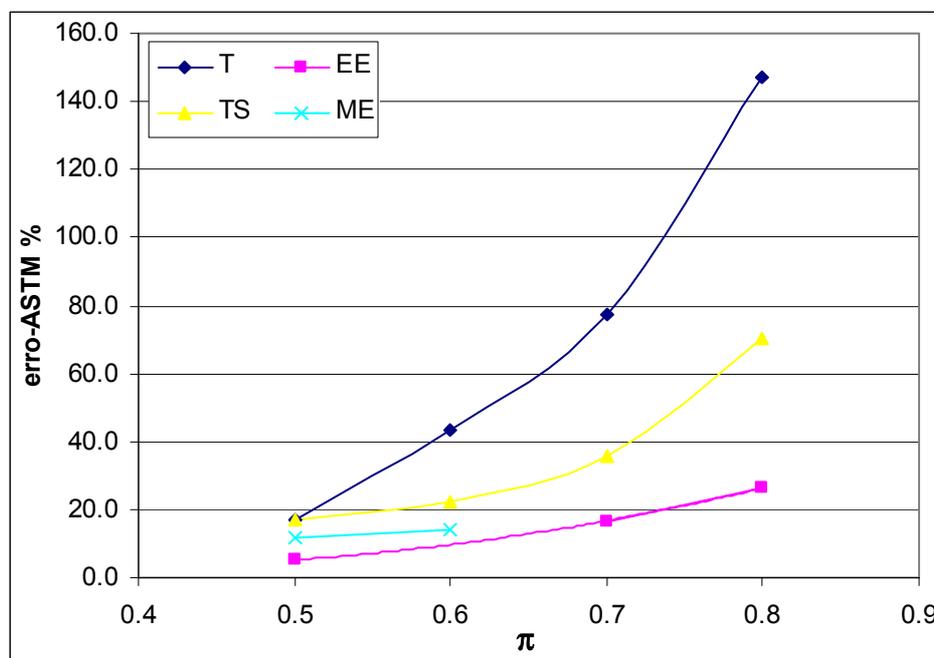


Figura 5.24 – Comparação entre erros-ASTM encontrados pelas quatro metodologias para M2, furo passante e $0 < \Omega < 1$.

Novamente, têm-se resultados similares aos dos casos $\Omega = 0$ e $\Omega = 1$.

De uma forma resumida pode-se concluir que, para furo passante:

- os erros-ASTM encontrados para o material M1 são menores que os de M2. Este comportamento está de acordo com o discutido no item V.2.2., ou seja, como o material M1 tem $S_e = S_y$, enquanto M2, tem $S_e < S_y$ e π está definido segundo S_y , ao se atingir $0.5 S_y$ para em cada um dos materiais, a deformação plástica de M2 será maior que a de M1.
- a metodologia Tradicional gera resultados bastante diferentes daqueles obtidos para Morte de Elementos e Tensão Substituta, e por conseguinte os erros-ASTM são também diferentes, conforme o esperado com base na discussão V.5.1. É importante enfatizar, que a expectativa não era, no entanto, que os erros-ASTM da metodologia Tradicional fossem os maiores.
- as metodologias Tensão Substituta e Morte de Elementos têm erros-ASTM similares, o que está de acordo com o esperado, uma vez que a primeira é apenas uma alternativa da última.
- a metodologia do Estado Equivalente teve resultados diferentes da demais, inclusive para o material M1. Este resultado não era esperado, pois para este material todas as metodologias geram resultados muito próximos, uma vez que a região dos extensômetros praticamente não sofreu deformação plástica. Isto pode levar a duas conclusões opostas; que esta metodologia gera os melhores ou os piores resultados. Baseado na discussão apresentada no item V.5.2 onde fica claro que esta metodologia, assim como a metodologia Tradicional, não considera plastificação prévia, conclui-se que a metodologia do Estado Equivalente está errada sendo, portanto, a mais errada entre as quatro. A partir de agora esta metodologia será abandonada.

Na figura 5.25 é apresentada uma comparação dos resultados dos três carregamentos para a metodologia Tensão Substituta, a qual foi escolhida por ter mais dados disponíveis que a metodologia Morte e Nascimento. Percebe-se que a tendência da metodologia Tensão Substituta, para os três carregamentos é similar,

sendo que para $\Omega = 0.5$, o comportamento é um pouco pior, pois os erros-ASTM chegam a 70% já em $\pi = 0.8$, ao passo que esse valor nem sequer é atingido para as outras razões de biaxialidade.

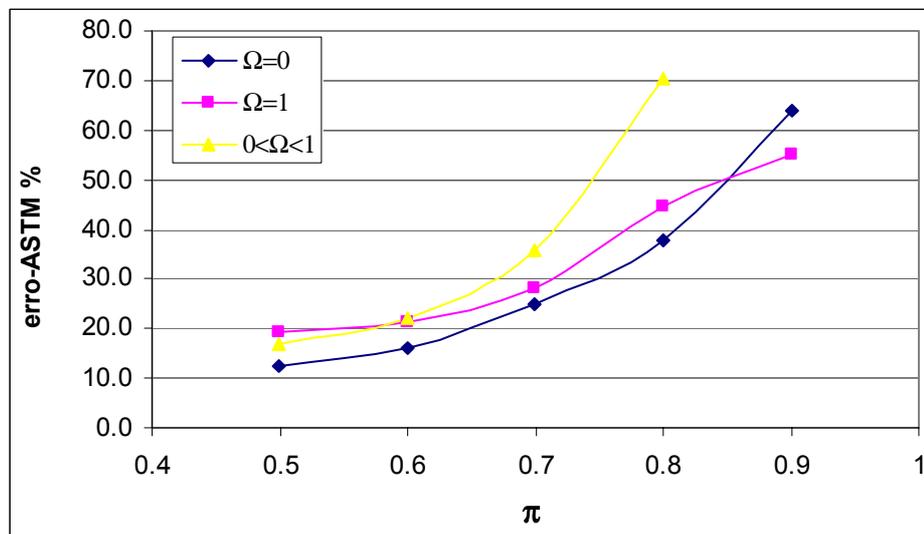


Figura 5.25 – Comparação entre erros-ASTM encontrados pela metodologia Tensão Substituta para M2, furo passante para os três carregamentos.

V.6.2 – Furo-cego.

Os resultados apresentados no item anterior serão repetidos para furo-cego com $p = 0.2$ e $1.0 r_m$ repetindo-se a mesma seqüência de passos descrita naquele item. Para que seja possível comparar os novos resultados com a literatura, serão apresentados os resultados obtidos com a metodologia Tradicional em todos os carregamentos. Além disso, é importante lembrar que a metodologia Tensão Substituta não pôde ser aplicada a furos-cegos no caso em que os carregamentos foram $\Omega = 0$ e $\Omega = 0.5$. Desta forma, por haver menos dados a serem apresentados, serão mostrados apenas um gráfico para cada profundidade e material.

Para $p = 0.2 r_m$ e o material M1, os erros-ASTM de $\Omega = 0$ e $\Omega = 0.5$ foram bastante baixos, no máximo 3%, para as metodologias Morte de Elementos e Tradicional. Para $\Omega = 1$, houve um comportamento diferente, pois os erros foram de 9.5% para as três metodologias. O resultado é destoante, no entanto, a simulação foi repetida encontrando-se os mesmos resultados e além disso os

valores foram os mesmo para as três metodologias o que diminui a possibilidade de erro. Como todos os resultados foram próximos entre si, não vale a pena apresentá-los num gráfico. É importante dizer, que os resultados continuam de acordo com o encontrado por Beghini, ou seja, para o material perfeitamente plástico os erros-ASTM são os mesmos, independente da metodologia usada.

Na figura 5.26 são apresentados os erros-ASTM encontrados para $p = 0.2r_m$ e o material M2.

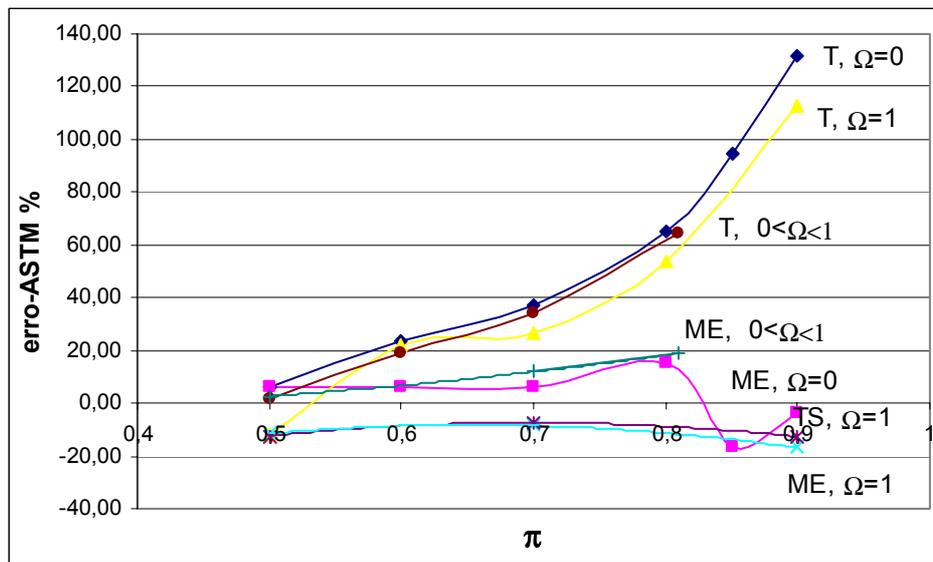


Figura 5.26 - Comparação entre os erros-ASTM encontrados para M2, no caso de $p = 0.2 r_m$ para todos os carregamentos.

Imediatamente, percebe-se que os erros-ASTM gerados pela metodologia tradicional são maiores para os três carregamentos. Para o carregamento $\Omega = 1$ obtiveram-se os mesmos resultados para metodologia Morte de Elementos e Tensão Substituta. É importante destacar que os erros-ASTM são pequenos, porém negativos, ou seja, a tensão calculada é menor que a aplicada. Para os carregamentos $\Omega = 0$ e $\Omega = 0.5$ não foi possível aplicar a metodologia Tensão Substituta, conforme dito na seção V.5.4. Desta forma é difícil tirar conclusões confiáveis por falta de dados para comparação. Para $\Omega = 0.5$ os resultados foram menores que os da metodologia Tradicional e seguiram um padrão razoável, aumentando-se o erro-ASTM à medida que π aumenta. Por outro lado, no caso de $\Omega = 0$, os resultados tiveram comportamento inesperado a partir de $\pi = 0.8$; depois

deste valor o erro-ASTM cai rapidamente e ocorre uma inversão de sinal. As simulações foram repetidas e os resultados foram verificados.

A seguir serão apresentados alguns resultados relativos a $p = 1.0 r_m$. Esta profundidade não foi muito explorada para as novas metodologias pois, como é um dos casos de furo-cego, a metodologia Tensão Substituta só é aplicável para $\Omega = 1$. Para os outros carregamentos, somente pode-se empregar a metodologia Morte de Elementos. No entanto, como há vários incrementos a serem eliminados esta metodologia torna-se muito lenta. Por tudo isso, há poucos dados disponíveis para $p = 1.0 r_m$ neste trabalho. Mesmo assim, serão apresentados, na figura 5.27, alguns resultados que trazem informações relevantes.

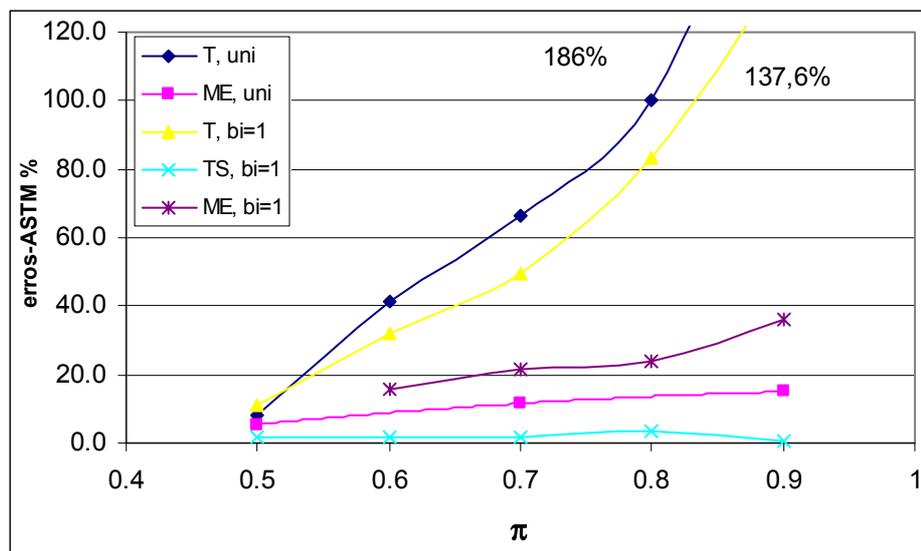


Figura 5.27 - Comparação entre os erros-ASTM encontrados para M2, no caso de $p = 1.0r_m$ para os carregamentos $\Omega = 0$ e $\Omega = 1$.

Há duas considerações importantes sobre a figura 5.27: a metodologia Morte de Elementos gerou resultados progressivamente maiores, tanto para $\Omega = 1$ quanto para $\Omega = 0$, conforme o esperado. Este resultado é diferente do que ocorreu para $p = 0.2 r_m$, no qual a partir de $0.8S_y$ os resultados começaram a cair. O outro ponto importante é que para $\Omega = 1$ os resultados são bastante diferentes para as metodologias Morte de Elementos e Tensão Substituta. À primeira vista pode parecer incongruente, entretanto conforme dito anteriormente a metodologia Morte de Elementos é muito lenta quando se tem que eliminar vários elementos. Assim, por diversas vezes escolheu-se passos grandes o que gerou diferença entre

as duas metodologias, as quais são aparentemente equivalentes. Para verificar esta afirmação, ao invés de realizar mais e mais incrementos na metodologia Morte de Elementos, optou-se pelo contrário: foi simulado um exemplo com a metodologia Tensão Substituta, tendo pouquíssimos sub-passos e obtiveram-se resultados muito próximos aos obtidos por Morte de Elementos. Isto parece indicar que os resultados de uma metodologia tende para o da outra desde que se use o número adequado de incrementos. E finalmente observa-se que a metodologia Tensão Substituta gerou erros-ASTM baixíssimos para $\Omega = 1$ e pequenos para os outros carregamentos. Pode parecer que a profundidade $p = 1.0 r_m$ é “ótima” para ser utilizada pela técnica do furo-cego em presença de altas tensões. No entanto, observando as figuras 5.26, 5.22 e 5.27 (nesta ordem) observa-se que os erros-ASTM são os seguintes:

$$p = 0.2r_m, \text{ erro-ASTM} \approx -17\%$$

$$p = 1.0r_m, \text{ erro-ASTM} \approx -0.5\%$$

$$\text{Passante, erro-ASTM} \approx 55\%$$

Assim, parece claro que quando se passa de furo-cego para passante ocorre uma inversão no valor do erro-ASTM, e para tanto tem de haver uma passagem pelo erro-ASTM zero. No entanto, como o perfil dos erros-ASTM é instável não é aconselhável que se utilize esta profundidade como “ótima”.

Com base no que foi apresentado, pode-se concluir que, no caso do furo-cego:

- os erros-ASTM encontrados são menores que os para furo passante. Como o K_t do furo-cego é sempre menor que o do furo passante, este resultado era de se esperar e já havia sido mostrado nas tabelas 5.3 e 5.4, para a metodologia Tradicional. O mesmo foi verificado para as outras metodologias, nos casos aplicáveis.
- Mais uma vez os erros-ASTM encontrados para a metodologia Tradicional são maiores que os demais.
- Para $p = 0.2 r_m$ os resultados da metodologia Tensão Substituta e Morte de Elementos são muito parecidos. O mesmo não ocorreu para $p = 1.0 r_m$,

mas é provável que se diminuindo o número de elementos mortos por subpasso, os resultados se aproximem novamente.

- O comportamento do furo-cego é muito mais difícil de ser modelado que o do furo passante.

Assim, recomenda-se que num futuro trabalho, sejam analisadas mais profundidades de forma a perceber se há ou não inversões no valor dos erros-ASTM.

V.7 – Comparações entre as deformações radiais medidas pelos Extensômetros para as metodologias Tradicional, Morte de Elementos e Tensão Substituta.

No capítulo três foram apresentados alguns resultados, em forma de figuras e gráficos, a respeito da variação da tensão σ_y e da deformação radial para furos passantes e cegos em regime elástico. Serão apresentados resultados similares para regime plástico. Não serão apresentados resultados referentes à tensão σ_y , pois como há diversas situações (carregamentos, tipo de material, etc), haveria muitas figuras, o que tornaria a leitura tediosa. Ademais, a análise das tensões é interessante, porém não é fundamental. Ao invés disso, serão apresentadas as mudanças nas deformações radiais, para as três metodologias pesquisadas (uma vez que a metodologia do Estado Equivalente foi descartada). A idéia é visualizar o quão diferentes são os resultados destas metodologias. Cabe lembrar que se chama de “mudança nas deformações” à redistribuição das deformações causada pelo alívio de tensões devido a usinagem do furo e que esta é obtida subtraindo-se as deformações medidas no primeiro passo (antes da usinagem de qualquer furo) daquelas medidas no último passo. Finalmente, para facilitar a interpretação dos resultados, vale esclarecer que as deformações foram medidas desde a borda do furo até o final do extensômetro e em todos os gráficos a posição do furo e do extensômetro são destacadas.

Na figura 5.28 apresenta-se as mudanças nas deformações para o furo passante, caso elástico, para a metodologia Morte de Elementos com raio progressivo, na qual o furo foi executado em três fases.

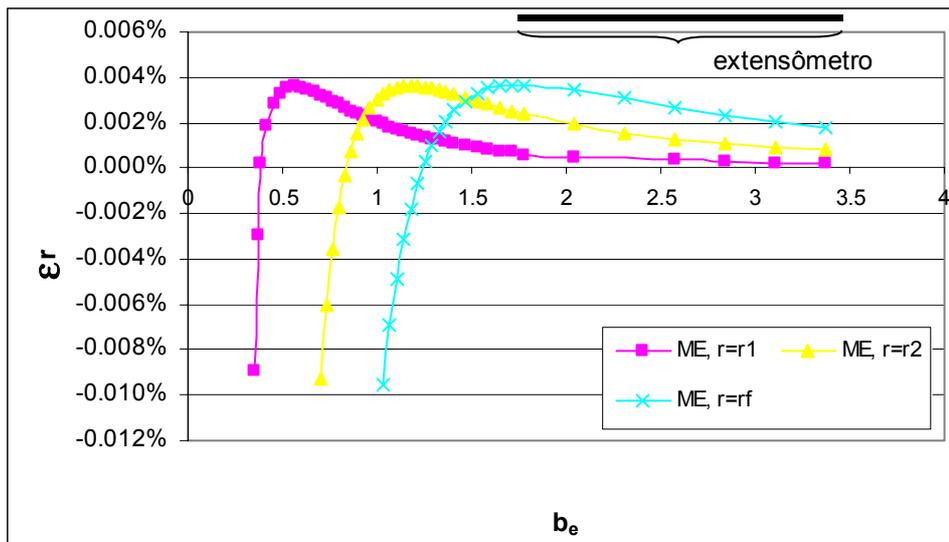


Figura 5.28 – Mudanças nas deformações elásticas radiais na direção do extensômetro 1, para as várias fases da metodologia Morte de Elementos com raio progressivo. (r_1 e r_2 são os raios iniciais e r_f é o raio final).

Pode-se notar que para cada um dos diâmetros progressivos, o valor máximo (absoluto) da mudança na deformação é praticamente o mesmo e o formato da curva das é bastante similar. A diferença entre as curvas é que à medida que o diâmetro aumenta, ocorrem decaimentos mais suaves da curva mudança na deformação medida.

Na figura 5.29 são apresentados os mesmos resultados acima, sendo que a “morte dos elementos” foi simulada aumentando-se progressivamente a profundidade do furo em quatro fases.

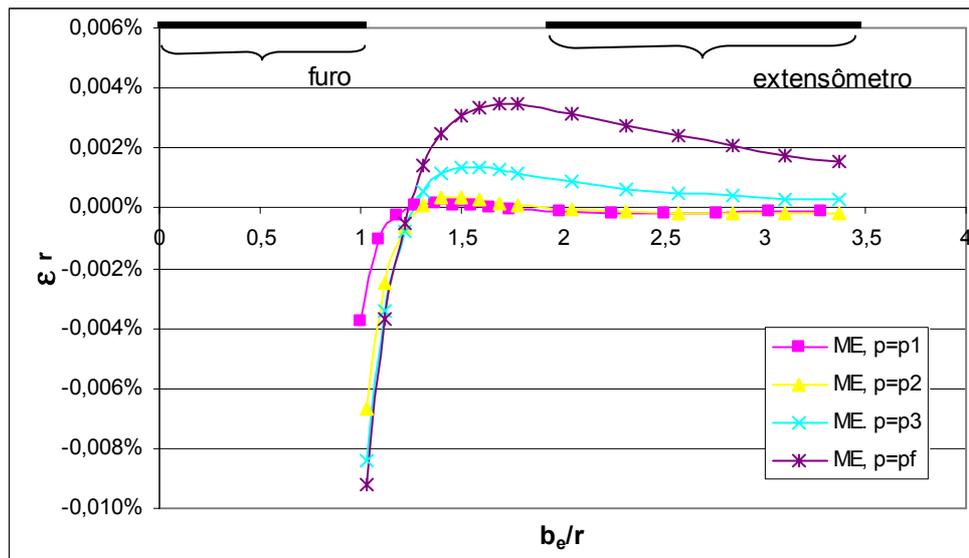


Figura 5.29 – Mudanças nas deformações elásticas radiais na direção do extensômetro 1, para as várias fases da metodologia Morte de Elementos com profundidade progressiva. (p1, p2 e p3 são as várias profundidades e pf é a profundidade final)

Observa-se que para a primeira profundidade o valor da deformação máxima é bastante baixo em comparação com as outras profundidades e cai rapidamente para um valor próximo de zero na região do extensômetro. Este resultado está de acordo com a idéia de que o K_t , fator de concentração de tensão, do furo-cego é menor que o K_t do furo passante, assim para uma profundidade bastante pequena, a concentração de tensão é bem suave. Na figura 5.30 apresentam-se as últimas fases da Morte de Elementos com diâmetro e profundidade progressivos, juntamente com os resultados da metodologia tradicional, ou seja, um furo executado de uma só vez.

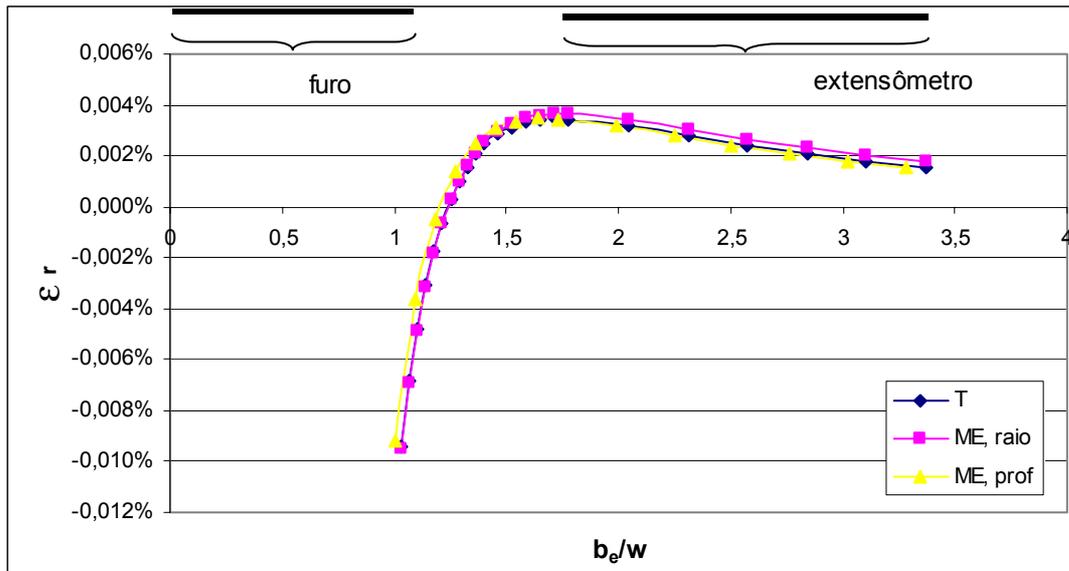


Figura 5.30 – Mudanças nas deformações elásticas radiais na direção do extensômetro 1, para a última fase da metodologia Morte de Elementos com diâmetro e profundidade progressiva e para a metodologia tradicional.

Observa-se que os resultados são idênticos, conforme o esperado, pois no caso elástico o estado inicial e final das três metodologias é o mesmo e, portanto a diferença entre estes dois estados tem que ser igual.

A seguir serão apresentados resultados similares para o caso em que há plastificação. Serão apresentados apenas os resultados para o material M2, pois para M1, a diferença entre as metodologias é pequena, segundo a discussão apresentada no item V.2.2. Todos os resultados são referentes a $\pi = 0.7$ e furo passante, por dois motivos; em primeiro lugar dispõe-se de poucos dados de furo-cego ademais, com base no que foi discutido anteriormente, estes resultados se mostraram instáveis.

Na figura 5.31 são apresentadas as mudanças de deformação para metodologia Morte de Elementos com raio progressivo. Observa-se que na borda do furo, os resultados para as três fases são diferentes, enquanto na região do extensômetro são praticamente iguais. Comparando-se esta figura com a figura 5.28 (que apresenta a mesma situação, porém em regime elástico), percebe-se que as deformações são muito maiores no caso plástico, mesmo considerando que naquela situação tinha-se $\pi = 0.07$ e agora tem-se $\pi = 0.7$.

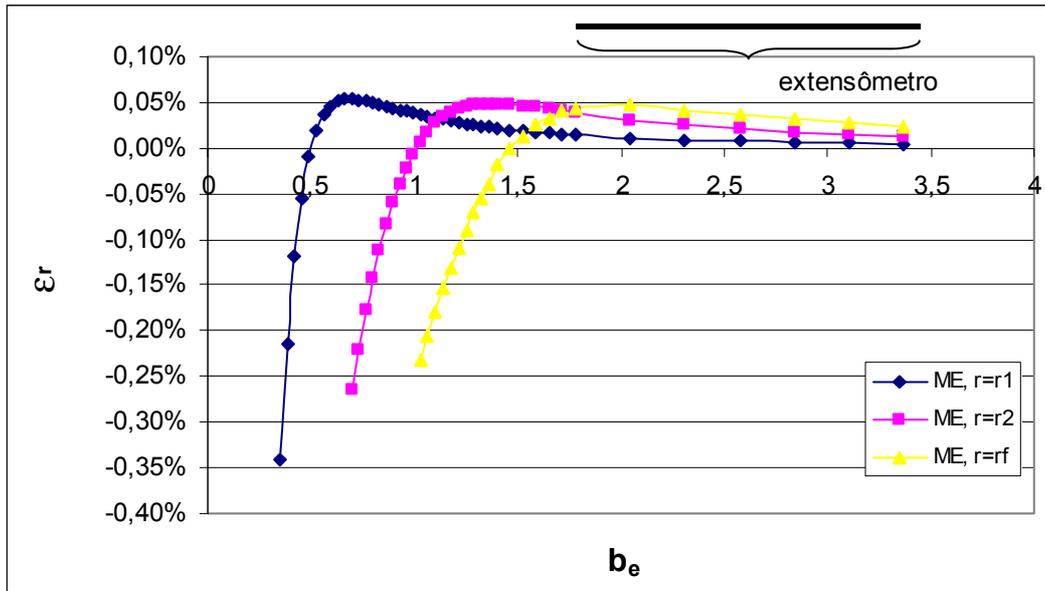


Figura 5.31 – Mudanças nas deformações plásticas radiais na direção do extensômetro 1, para as várias fases da metodologia Morte de Elementos com raio progressivo

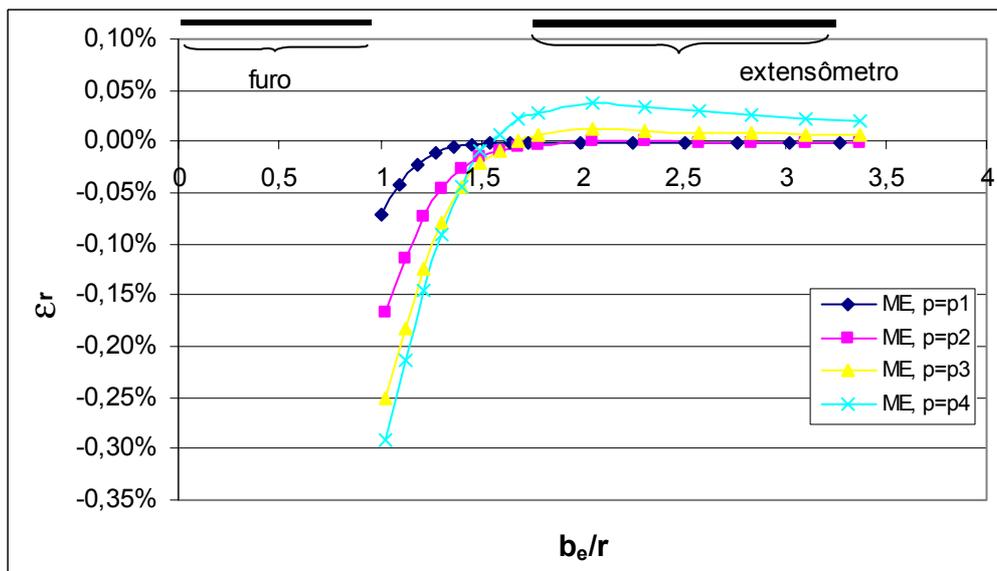


Figura 5.32 – Mudanças nas deformações plásticas radiais na direção do extensômetro 1, para as várias fases da metodologia Morte de Elementos com profundidade progressiva.

Na figura 5.32 são apresentados os resultados de mudança na deformação para metodologia Morte de Elementos com profundidade progressiva. Similarmente ao que ocorreu no caso elástico, as mudanças nas deformações aumentam de acordo com o aumento da profundidade do furo. Novamente observa-se que o valor da mudança nas deformações é bem mais alto no caso plástico.

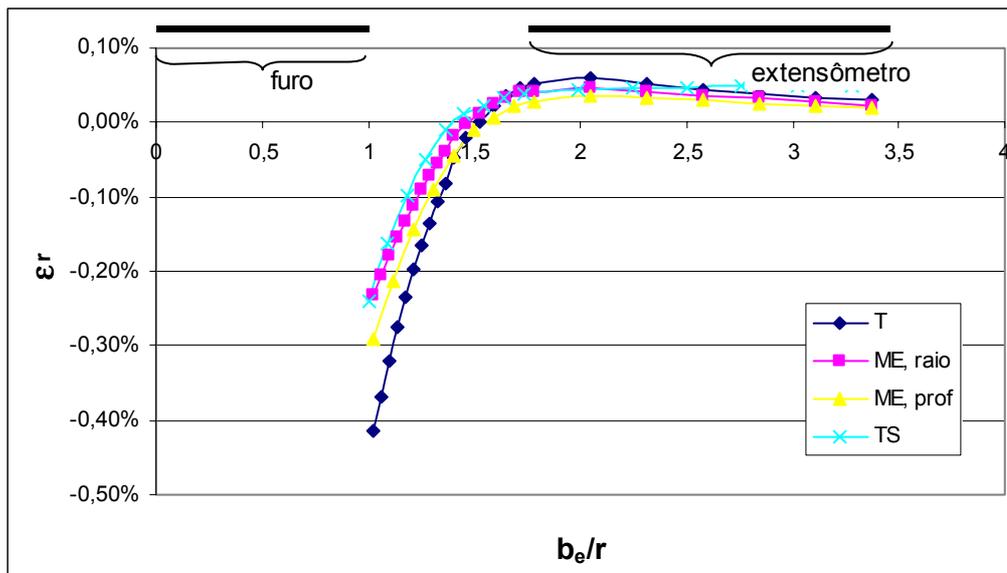


Figura 5.33 – Mudanças nas deformações radiais no extensômetro 1, para as metodologias Tradicional, Morte de Elementos com raio e profundidade progressivos e Tensão Substituta.

Na figura 5.333 são apresentados os estados finais para as duas metodologias Morte de Elementos, a metodologia Tensão Substituta e metodologia Tradicional. Embora os resultados na borda do furo sejam diferentes, na região do extensômetro a diferença é bastante pequena. Com base neste gráfico, não é possível entender por que os resultados de tensão calculados por cada metodologia são diferentes. Assim foram estudadas as mudanças na deformação para o extensômetro três (todos os resultados até agora foram para o extensômetro 1). Os resultados são apresentados na figura 5.34 que é equivalente à 5.33, para o extensômetro três.

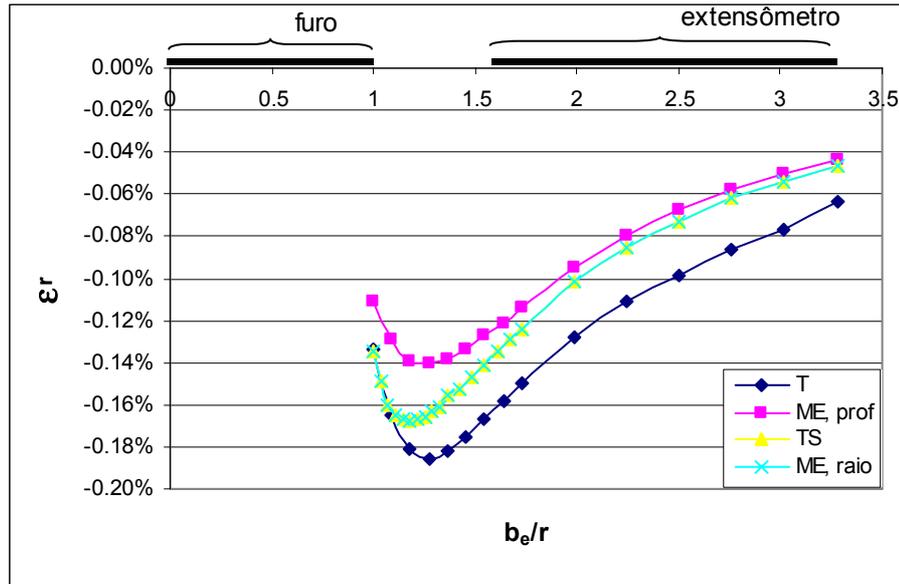


Figura 5.34 - Mudanças nas deformações radiais no extensômetro 3, para as metodologias Tradicional, Morte de Elementos com raio e profundidade progressivos e Tensão Substituta.

Nesta figura, observam-se diferenças muito mais marcantes que aquelas observadas na figura anterior. Pode-se perceber que as duas metodologias Morte de Elementos e a metodologia Tensão Substituta têm resultados similares, enquanto os resultados da metodologia Tradicional são os mais diferentes.

É importante ressaltar que não foi comprovado que os valores de tensão calculados pelas metodologias Tensão Substituta e Morte de Elementos sejam de fato melhores que os da metodologia Tradicional. O fato isolado de que os erros-ASTM encontrados são menores para estas metodologias não é definitivo para provar que se trata de metodologias melhores. No caso da metodologia do Estado Equivalente, os erros-ASTM encontrados foram os menores entre todas as outras metodologias. No entanto, conforme discutido no item V.6.1, esta metodologia não leva em consideração o efeito que a plastificação ocorrida ao longo do processo de usinagem tem no estado final de deformação. As análises feitas nos itens V.2.2, V.5.1, V.5.3 e V.5.4 mostram que estas duas metodologias são mais consistentes que a metodologia Tradicional e modelam de forma mais realista o processo de usinagem de um furo passante ou cego. Apenas com base nestas análises, e não no valor dos erros-ASTM, é que se pode afirmar que as metodologias Morte de Elementos e Tensão Substituta são mais confiáveis que as metodologias Tradicional e Estado Equivalente.

No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.