



ROTAS DE ESTAMPAGEM DE UM DISCO DE RODA AUTOMOTIVA POR SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Adauto Martins de Assis

Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
EEIMVR / UFF

Avenida dos Trabalhadores nº 420 Vila Santa Cecília Volta Redonda RJ Brasil CEP 27255-125

adauto_assis@uol.com.br, adauto@metal.eeimvr.uff.br

Gustavo Ferran Lorente

Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
EEIMVR / UFF

Avenida dos Trabalhadores nº 420 Vila Santa Cecília Volta Redonda RJ Brasil CEP 27255-125

gustau@uol.com.br

Resumo. *A concorrência entre processos de manufatura causou a necessidade de buscar novas técnicas para desenvolver e implementar novos projetos. Para isto passaram a ser usados recursos computacionais como CAD - Computer Aided Design, CAM - Computer Aided Manufacturing e a Simulação Numérica. Com a simulação, tornou-se possível aprimorar os projetos, tornando visíveis aspectos do processo que dificilmente poderiam ser obtidos por métodos analíticos.*

Este trabalho visou otimizar, pelo ponto de vista do processo mecânico, a conformação de um disco de roda, estampado pela BORLEM em três estágios. As simulações numéricas foram realizadas pelo método dos elementos finitos através do programa OPTRIS - um código de elementos finitos, dinâmico explícito. Esta otimização foi obtida variando alguns parâmetros do processo, como atrito, força aplicada no prende chapa e cinemática do processo. Além disso, analisou-se a sensibilidade do programa às alterações dos coeficientes de anisotropia do material e considerou-se, a mudança da geometria do ferramental.

Após simular várias alternativas para o processo, chegou-se a uma rota alternativa viável, utilizando um material com coeficiente médio de anisotropia maior e o esboço redimensionado. Nessa rota, foram mantidas as características geométricas finais do disco e reduzido o número de estágios necessários à estampagem.

Palavras-chaves: disco de roda, simulação numérica, otimização de processo

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a grande competição no setor de manufatura gerou nas estamparias (setor automobilístico, "linha branca" e outros) a necessidade de se buscar técnicas eficazes para o desenvolvimento de projetos de novos modelos e a execução desses, pois os métodos tradicionais de projetos e ajustes por tentativas (try-out) são muito caros e dependentes da experiência prática de projetistas, de ferramenteiros e de estampadores. Por isso, passaram-se a utilizar os sistemas CAD - projetos assistidos por computadores, em conjunto com a Simulação Numérica, como em (Rojek et al, 1996; Silva et al, 1996; Kawka, 1998; Pasquale et al, 1995), técnicas que potencialmente permitem reduzir o tempo e custo dos projetos.

As indústrias usam, cada vez mais, a Simulação Numérica para detalhar projetos de processo de novos produtos. Assim, é possível acompanhar parâmetros particulares, como fluxo de metal

dentro do ferramental, fluxo de calor gerado, espessura, tensões, deformações e contatos em estágios intermediários do processo. Existem vários programas para o método de elementos finitos, entre eles existem alguns de aplicação específica, como o OPTRIS elaborado pela Dynamic Software (1999) para conformação mecânica de chapa, usado na indústria automobilística, reduzindo o tempo inicial de implementação do processo, chamado corriqueiramente de “Try-out”.

Este trabalho visa ampliar a análise do desempenho do programa OPTRIS na previsão de fatores que influenciam o processo de conformação do disco de roda, iniciado por Dominguez (2000) para simular o processo de conformação de um disco de roda fabricado pela BORLEM, estampado em três estágios nas rotas de estampagem A e B, com um aço de alta resistência. Para tal análise, são analisadas algumas variantes dos parâmetros de simulação numérica, como a geração da geometria do ferramental por desenho em superfície 3D, estudada por Assis (2001). Também são analisados parâmetros do processo - a cinemática do processo, a variação ou mudança do coeficiente de atrito e a mudança dos dados da anisotropia do material, segundo o modelo analítico de Hill in: Hosford (1995).

Ao término dessas simulações, analisa-se a viabilidade de rotas alternativas de estampagem do disco de roda que reduzam o número de estágios de conformação e que mantenham geometria final do disco de roda.

2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO DISCO DE RODA

O disco de roda estudado é fabricado a partir de um esboço não circular sempre da mesma espessura, segundo as etapas de corte e conformação. A Tabela (1), mostrada a geometria dos esboços no fim de cada estagio.

Tabela 1. Amostras das peças de cada etapa de conformação

Esboços na conformação	Descrição	Direção	Medida (mm)
	Esboços dos estágios de conformação da rota A	Longitudinal	405
		Diagonal	423
		transversal	406
	Esboços dos estágios de conformação da rota B	Longitudinal	398
		Diagonal	428
		transversal	398
	Proposta de Esboços para nova Rota C	Longitudinal	398
		Diagonal	423
		transversal	398

3. MATERIAIS

Foram usados os dados medidos sobre de uma chapa de aço laminada a quente, produzida pela CSN - Companhia Siderúrgica Nacional, conforme Dominguez (2000) e de um material hipotético, conforme proposto por Assis (2001). Suas propriedades estão listadas na Tab. (2).

Tabela 2. Propriedades dos materiais

Material	Coeficientes de anisotropia			Tensões de escoamento (Mpa)			Parâmetros de Hollomon		Espessura (mm)
	0°	45°	90°	0°	45°	90°	k (MPa)	n	
Material CSN	0,556	1,143	0,664	554	575	543	926,43	0,1562	± 0,020
Hipotético	1,4	1,4	1,4	557	557	557			

4. METODOLOGIAS

Foram medidas as espessuras ao longo das direções longitudinal, transversal e diagonal, nas peças de cada estágio de conformação do disco de roda das rotas A e B, fornecidas pela BORLEM.

As deformações superficiais experimentais foram medidas nas amostras dos estágios de conformação do disco de roda (rota A), a partir das grades de circunferências de diâmetro 10 mm entrelaçadas, gravadas por processo eletroquímico nas duas faces do esboço.

Usou-se um programa de projetos gráficos e o OPTRIS, um código de elementos finitos, dinâmico e explícito, para simular conformação de chapa, sendo a entrada e a saída de dados realizadas com o programa FICTURE, elaborado pela Dynamic Software (1999).

Analizou-se a cinemática de cada estágio das rotas A e B; gerou-se ainda o ferramental para cada estágio a partir dos desenhos "iges 2D" e de superfícies 3D; e definiu-se alguns parâmetros do material (geometria e dimensões, massa, direção de laminação, função de encruamento, tensões de escoamento, coeficientes de anisotropia), do ferramental (geometria, graus de liberdade, posicionamento), do processo (atrimento, carregamento, velocidades) e numéricos (critério de escoamento, tipo de elemento, "refino", mass scaling, tempos, critério de parada) necessários para simulação do processo. Então calculou-se a solução de cada estágio.

A cinemática do processo foi modificada da seguinte forma: 1º Caso - eliminou-se o primeiro estágio, reposicionou-se o ferramental do segundo estágio para receber o esboço plano inicial, e aplicou-se uma força no anel de centragem; 2º caso - usando o mesmo esquema anterior, primeiro subiu-se o repuxo inferior e depois desceu-se o conjunto comandado pelo repuxo superior. Noutra hipótese deste caso foram usados para esboço o diâmetro na diagonal 423 mm e as dimensões longitudinal e transversal de 398 mm; 3º caso - o repuxo superior foi dividido em duas partes, colocando-se a aba do repuxo superior em contato com o esboço mantendo fixa sua posição; 4º caso - foi usado o mesmo esquema anterior, porém o repuxo superior foi dividido em três partes, sendo mantido o contra punção em contato com o esboço e forças verticais aplicadas na aba do repuxo superior e no contra punção; no último estágio, a geometria do ferramental e a cinemática foram sempre iguais e o corte do furo central do esboço foi simulado pela operação de corte, denominado "trimming".

Na simulação numérica uma variável resposta f é uma função de quatro conjuntos de parâmetros, simbolicamente representados na Eq. (1):

$$\phi = f(\text{métodos numéricos, ferramental, processo, material}) \quad (1)$$

A Tabela (3) mostra alguns desses parâmetros que foram modificados e denominados simbolicamente:

(1AA1,2) - 1º Caso, estágio Inicial, rota A, material real;

(1BA1,2) - 1º Caso, estágio Inicial, rota B, material real;

(22BA1,2) - 2º Caso, 2ª hipótese, estágio Inicial, rota B, material real;

(2BA1,2) - 2º Caso, estágio Inicial, rota B, material real;

(3BA1,2) - 3º Caso, estágio Inicial, rota B, material real;

(4BN1,2) - 4º Caso, estágio Inicial, rota B, material hipotético;

(4BN3) - 4º Caso, estágio final, rota B, material hipotético;

(barra) - Ferramental gerado por rotação e translação dos elementos de barra;

(blank) - Dimensões do esboço;

(F.P.C) - Força aplicada no prende chapa;

(Pinch) - Pinch test, se um nó fica preso entre duas ferramentas;

(thinning) - Nível de afinamento máximo;

(diferente) - Atrimento diferenciado por ferramenta: repuxo superior $m = 0,01$, aba do repuxo superior $m = 0,01$, contra punch $m = 0,15$, anel de centragem $m = 0,01$, repuxo inferior $m = 0,15$;

(Ferramenta) - Ferramental básico utilizado nas simulações.

A Figura (1) mostra os conjuntos de ferramentais para os casos simulados: 1º caso (1AA1,2;

1BA1,2), 3º caso (3BA1,2), 4º caso (4BN1,2 e 4BN3).

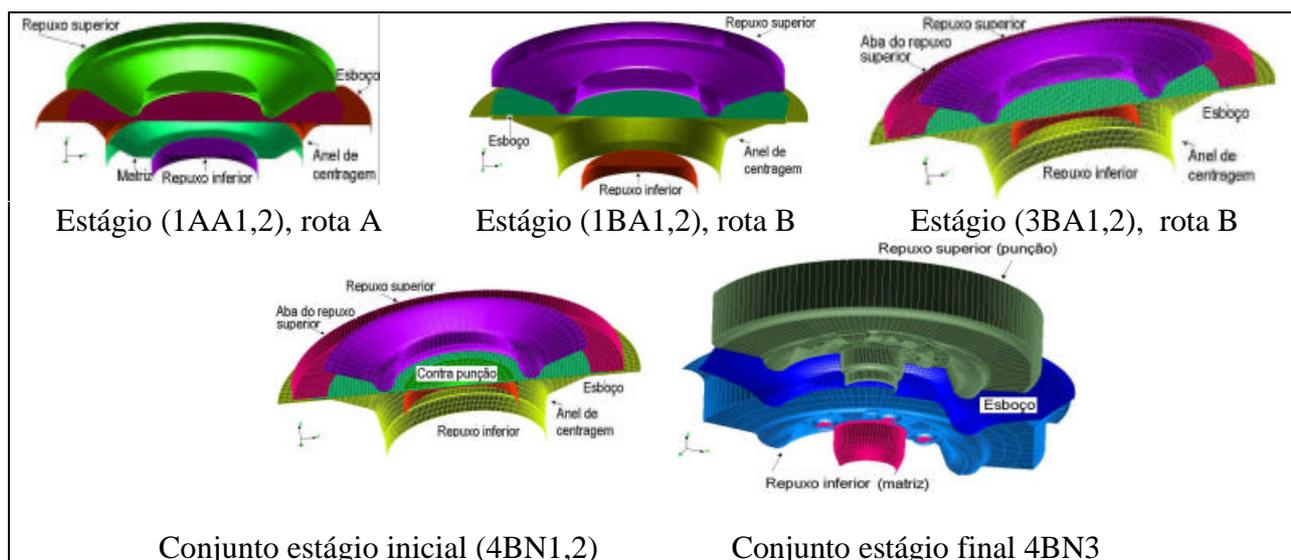


Figura 1. Conjunto dos ferramentais simulados.

Tabela 3. Relação do conjunto de parâmetros dos casos e estágios simulados

Casos			1º		2º		3º	4º	
Estágios			1AA1,2	1BA1,2	2BA1,2	22BA1,2	3BA1,2	4BN1,2	4BN3
Numéricos	Geração	barra	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim
		3D	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Não	Não
	Velocidade		5	5	5	5	5	8	8
	mass scaling		1,5	1,5	1,5	1,5	2,5	2,5	3,5
	Refino		Não	1	2	2	Não	Não	1
Parada		Pinch	Pinch	Pinch	Pinch	Pinch	Pinch	Pinch	thinning
Ferramental	Rota A		Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não
	Rota B		Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Material	Real		Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não
	Hipotético		Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim
	blank		A	B	B	C	C	C	C
Processo	atrito	0,05	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
		diferente	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim
	Cinemática		A	B	B	B	4	4	B
	F.P.C		250	500	450	450	Não	350	Não

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Forças Resultantes no Ferramental

Tabela 4. Comparação de força resultante máxima para cada parte do ferramental

Estágio		4BN1,2	4BN3	2º estágio	3º estágio
Forças		Resultante no Ferramental - kN		Indicadas BORLEM -kN	
Parte do ferramental	Repuxo superior	2.500	8000	3.200	10.000
	Anel de centragem	2.500		320	
	Repuxo inferior	1.500	4.000	3.200	

As forças resultantes no ferramental (Tab. (4)) foram comparadas aos valores previstos pelo fabricante, notou-se que seus máximos excederam à previsão, isto ocorreu tal vez devido ao critério de parada: pinch test ou thinning, conforme Dynamic Software (1999). Esses valores foram retirados de gráficos força x tempo simulados para cada parte do ferramental no OPTRIS para cada etapa.

5.2. Espessuras

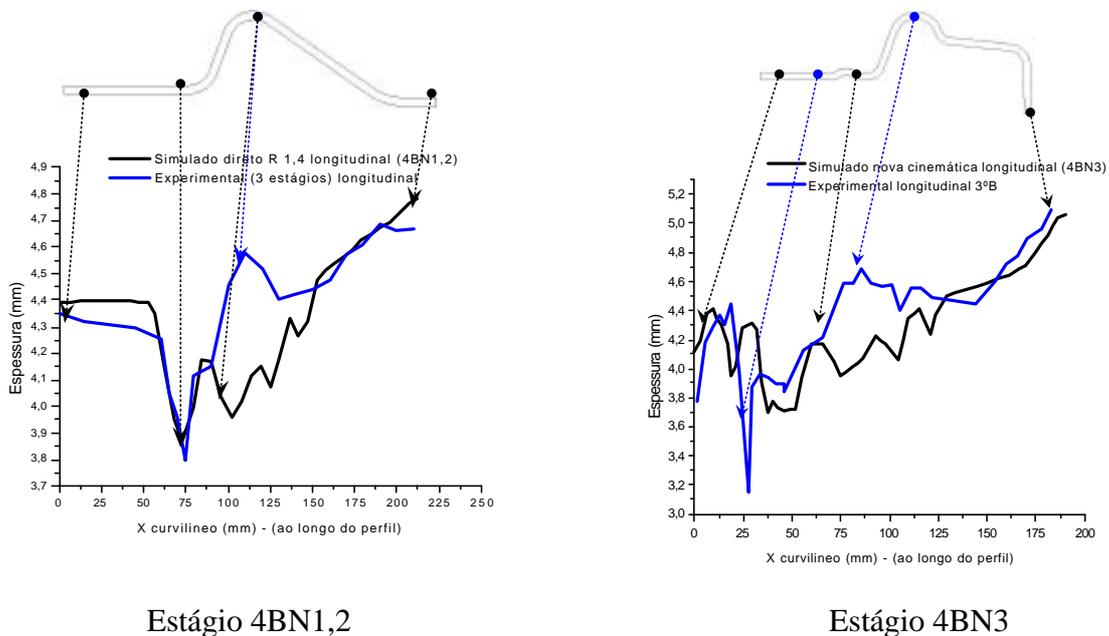


Figura 2. Distribuição de espessura na direção longitudinal à direção de laminação

A Figura (2) mostra as distribuições de espessura na direção longitudinal à direção de laminação nos estágios 4BN1,2 e 4BN3, onde o eixo das abscissas representa a distância em milímetros do centro ou da borda interna no estágio 4BN3 sobre o perfil do esboço e o eixo das ordenadas a espessura em milímetros. Nestas figuras as espessuras simuladas (cor preta) são comparadas às medidas experimentais dos 2º e 3º estágios da rota B (cor azul).

No estágio 4BN1,2, a espessura simulada apresentou uma diferença máxima de 0,6 mm em relação aos valores experimentais, na região 80 a 150 mm do perfil do esboço, ficou na faixa 3,9 a 4,8 mm na direção longitudinal; e no estágio 4BN3, foi mantida a diferença máxima de 0,6 mm entre as espessuras simuladas e experimentais, porém as medidas do perfil foram tomadas a partir da borda interna. Então, a região de maior diferença ficou na faixa de 65 a 120 mm e a espessura foi subestimada na região dos furos na direção diagonal (40 mm).

A espessura foi utilizada como um parâmetro de comprovação, por apresentar medições experimentais relativamente simples, permitindo comparar diretamente esses valores com os simulados.

5.3. Deformações Superficiais

A Tabela (5) mostra as deformações superficiais experimentais. As medidas foram feitas em pontos sobre o perfil de cada estágio conforme Fig. (3). Essas deformações apresentam dispersões devido às dificuldades encontradas na medição manual e na baixa resolução das circunferências gravadas.

As deformações superficiais foram analisadas nas faces superior e inferior do esboço, no estágio 4BN1,2 mostradas na Fig. (4). A Figura (5) mostra algumas deformações superficiais do estágio 4BN3. Essas deformações são representadas no eixo das ordenadas e o eixo das abscissas representa as distâncias do centro ou da borda interna sobre o perfil do esboço. Tais deformações

podem ser comparadas a valores experimentais pontuais representados nas mesmas figuras.

As deformações superficiais no estágio 4BN1,2 ficaram na faixa de: [1] 0 a 25% na face inferior, na direção diagonal; [2] na direção transversal 0 a 17% na face inferior e 0 a 32% na na face superior. Concordou com valor experimental na posição 100 mm na direção diagonal.

No Estágio 4BN3, as deformações superficiais ficaram na faixa de -5 a 45% na face superior na direção diagonal, concordando com os valores experimentais na posição 115 mm, mas não na posição 160 mm. Na face inferior na direção transversal ficou na faixa de -10 a 40%, aproximando-se do valor experimental na posição 40 mm, mas não na posição 85 mm (Assis (2001)).

As oscilações das espessuras apresentadas pelos resultados simulados podem ser consequência não apenas do processo físico de estampagem mas também do processo de cálculo, tamanho de elementos e do intervalo de tempo para integração.

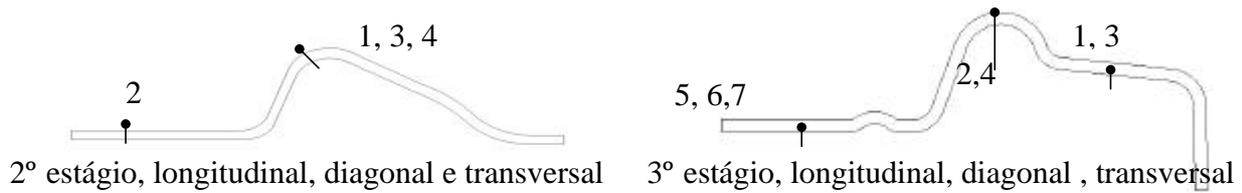
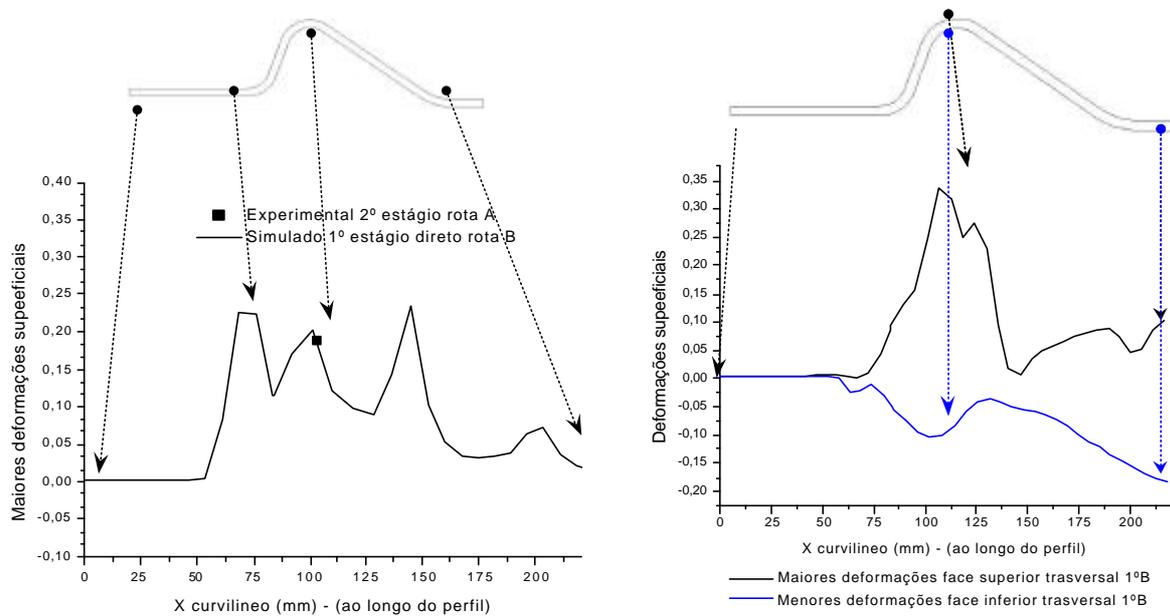


Figura 3. Perfis dos 2º e 3º. estágios da rota A para localizar as deformações



Maiores, direção diagonal, face inferior

Variação, direção transversal

Figura 4. Deformações superficiais no estágio 4BN1,2

Tabela 5. Deformações superficiais experimentais 2º e 3º estágios

2º estágio	Pontos				3º estágio	Pontos										
	Face		1	3		3	4	superior			inf	6	7			
	Direção		90°	45°				0°		45°		Trap 0°		Trap.90°		
	distância mm		102	86		103	113	163	130	156	115	63	70	54	83	42
o	Deforma- ção %	e ₁	26	28	21	32	7	26	10	32	7	1	3	-1	-1	
		e ₂	-13	-13	-9	-7	-10	-6	-12	-19	1	-4	0	-3	-7	

A deformação superficial é um parâmetro importante do processo, como descrito por Hosford et

al (1993), mas para geometria complexa do disco de roda com espessura relativamente grande, é difícil sua medição experimental.

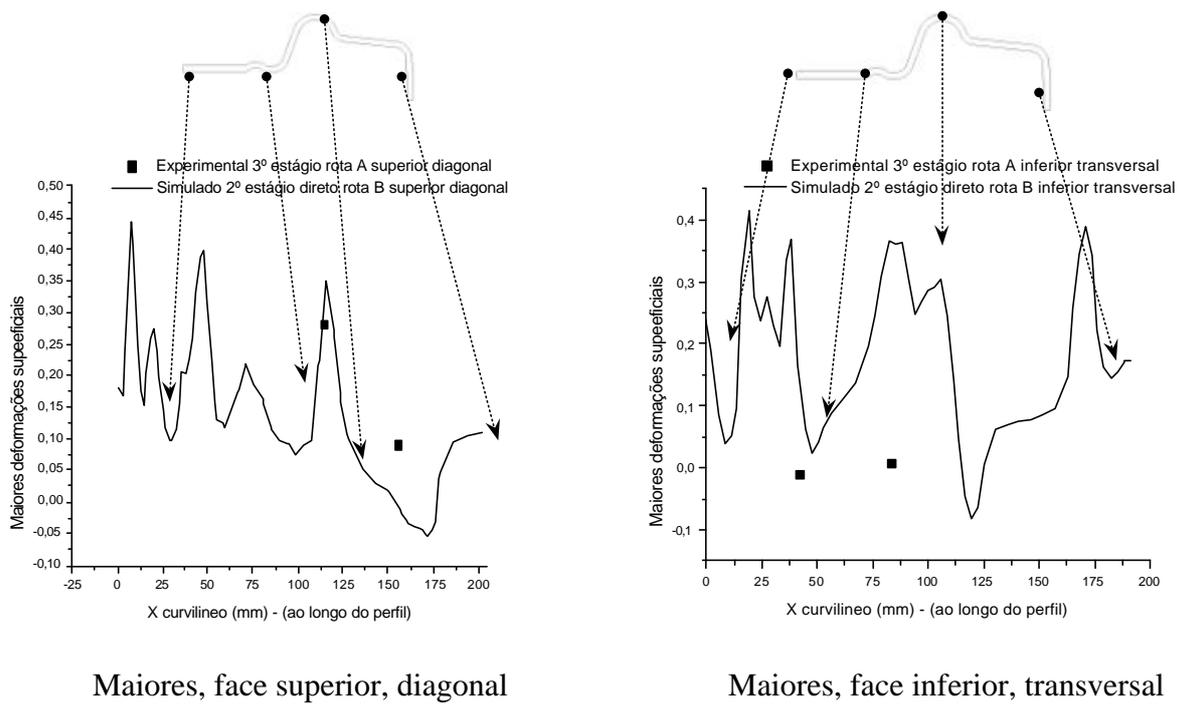


Figura 5. Deformações Superficiais estágio 4BN3

5.4. Trajetórias de Deformação

Os gráficos das trajetórias de deformações (Fig. (7) e Fig. (8)) têm as maiores deformações e_1 no eixo das ordenadas e as menores deformações e_2 no eixo das abscissas. Nesses, as linhas tracejadas indicam o estágio 4BN1,2 e as cheias o estágio 4BN3. As posições dos elementos com referência ao centro do esboço plano inicial e a equivalência dos dois estágios estão na Tab. (6). A Figura (6) localiza os pontos no perfil do esboço do estágio 4BN3.

As Figuras (7) e (8) representam alguns elementos nas direções indicadas durante o processo.

Tabela 6. Equivalências dos elementos dos estágios 4BN1,2 e 4BN3.

Direção	diagonal				transversal			
	central	curva	reta	borda	central	curva	reta	borda
Posição final	central	curva	reta	borda	central	curva	reta	borda
Dist. esboço plano (mm)	48	105	151	203	50	92	153	196
Nº elemento .est. 4BN1,2	72535	71887	71239	70672	73013	73000	72991	72982
Nº. elemento .est. 4BN3	42464	41473	40900	40561	43176	43163	43154	43145



Figura 6. Perfil final para localização dos pontos deformados.

Ao traçar os gráficos das trajetórias de deformações Fig. (7) e Fig. (8), notou-se que os pontos finais dessas trajetórias não coincidiram com as localizações dos valores experimentais, tal como tinha sido observado por Wang (1995). Esta discrepância pode ser atribuída a dois fatores: [1] ao

emprego dos elementos de casca do tipo Belytschko C°, explicados por Bathe (1982) e Cook (1987), que utilizam o estado plano de tensões não desenvolvendo gradientes de tensões e deformações pela espessura. Porém, pela Fig. (8), pode-se notar a existência desses gradientes, o que pode levar a valores inexatos de deformações ou das variáveis respostas; [2] à imprecisão das medidas experimentais.

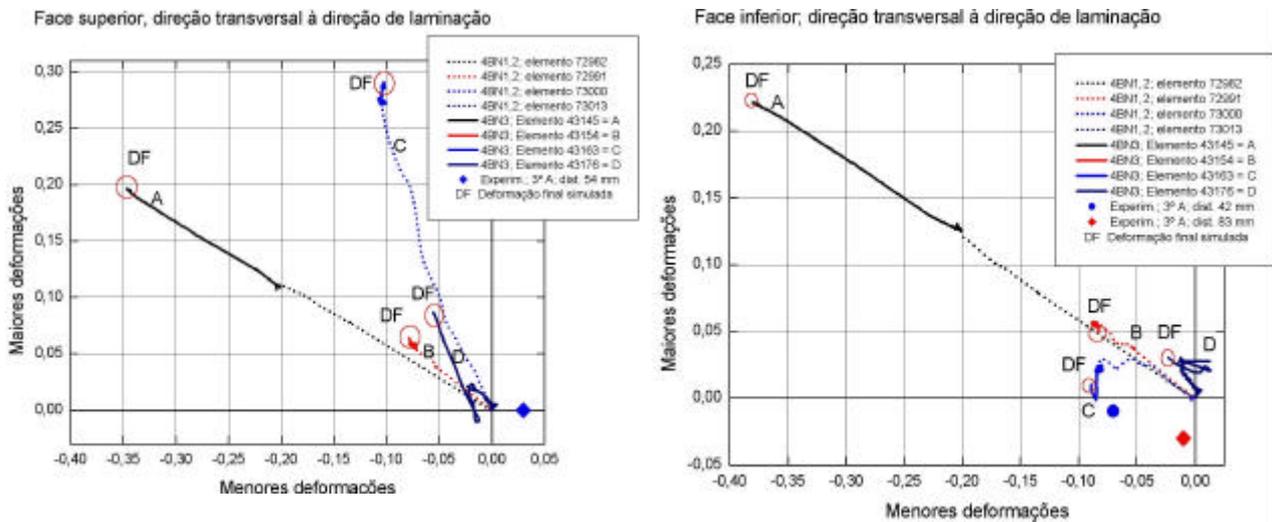


Figura 7. Trajetórias de deformações na direção trnsversal à direção de laminação

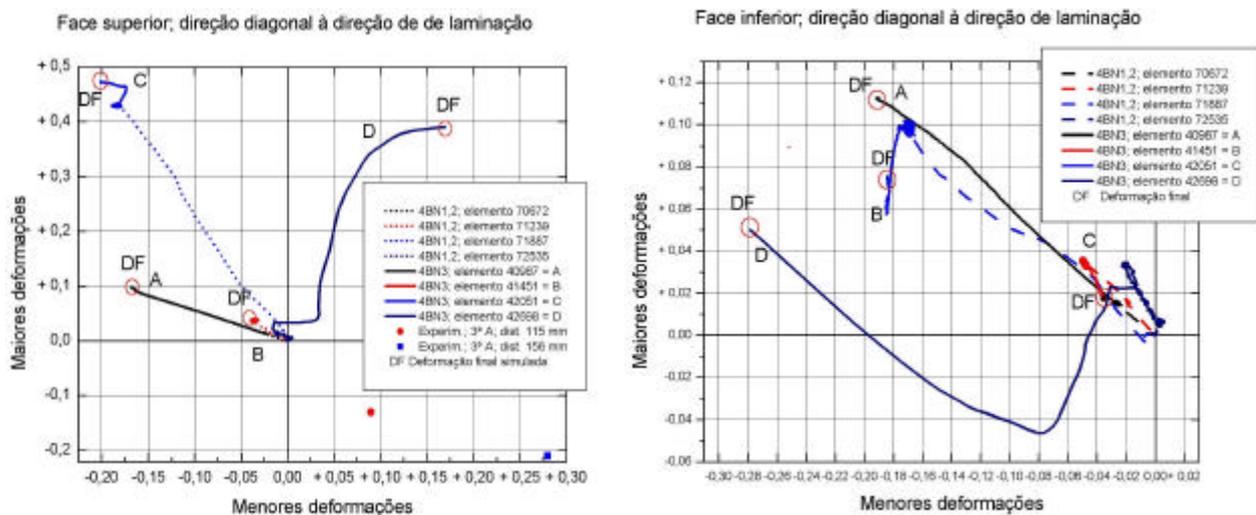


Figura 8. Trajetórias de deformações na direção diagonal à direção de laminação

6. CONCLUSÃO

Considerando os valores de espessuras e de deformações superficiais numa face, os resultados das simulações mostraram uma boa aproximação com as medidas experimentais, especialmente levando em consideração a aproximação do programa e a imprecisão das medidas experimentais.

O programa OPTRIS é uma boa ferramenta para simular conformação mecânica de chapa, principalmente para processos realizados em chapas finas ou folhas metálicas, nos quais as espessuras finas fazem que o estado de tensão se aproxime do estado plano de tensões.

Foi mostrada a viabilidade do processo de conformação do disco de roda em apenas dois estágios, precisando para isto dispor de um material que possua anisotropia plástica média de 1,4 e também utilizar um atrito diferenciado entre as faces do esboço e cada parte do ferramental.

7. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Borlem S.A. Empreendimentos Industriais, que nos forneceu todos os subsídios para realização de trabalho. Também ao Eng. Oséias Moraes Domingues pela cessão dos resultados de seu trabalhos e ainda, ao Centro de Pesquisa da CSN e ao pessoal de apoio da EEIMVR/UFF. Ainda à CAPES e ao CNPq pelas bolsas de mestrado e Incentivo à Pesquisa concedidas aos autores.

8. REFERÊNCIAS

- Assis, A. M., 2001, "Utilização da Simulação Numérica para o Desenvolvimento de Rotas Alternativas de Estampagem de Disco de Roda", Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica), Universidade Federal Fluminense Volta Redonda, Brasil.
- Bathe, K. J., 1982, Finite element Procedures in Engineering analysis, PTR, New Jersey, USA.
- Cook, R. D.; Malkus. D. S., Plesha, M. E., 1987, Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Third Editon, John Wiley & Sons, Madison,USA.
- Dominguez, O. M., 2000, "Simulação Numérica do Processo de Conformação de um Disco de Roda Automotiva", tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica), Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, Brasil.
- Dynamic Software, 1999, OPTRIS The Virtual Press, User's Guide, Version 6.0, France.
- Hosford, W. F. , 1995, The Mechanics of Crystals and Textured Polycrystals Oxford Engineering Science Series, Oxford University Press, Oxford, England, p.139 -162.
- Hosford, W.F; Caddell, R. M, 1993, Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Second Editon , PTR Prentice-Hall, New Jersey, USA, p. 286 -326.
- Kawka, M; kakita, A; Makinouchi, A, 1998, "Simulation of Multi-Step Sheet Metal Forming Processes by Static Explicit FEM Code", Jounal Materials Processing Tecnology vol 80 p.54-9.
- Pasquale, E ; Ferran, G.; Yamashita, E.; 1995,"A Simplified Numerical Simulation of Deep Drawing a Car Wheel Disk by Simex".
- Rojek, J; Joviceviv, J; Onate, E, 1996, "Industrial application of Stamping Simulation Using New Finite Elements Models", Jounal Materials Processing Tecnology vol 60. p 243 - 247.
- Silva, L. A. C; Sauer, F. M.; Borges, R. N., 1996, "Friction Models "Applied to Sheet Metal Forming Numerical Simulation", Brasinca Industrial S.A/ AS, Brazil.
- Wang, Y; Aaeedy, S. A ; Majlessi, S. A; Beard, J. E., 1995, "Strain Path Effects on the Modified fld Caused by Variable Blank Holder Force", Automotive Stamping Technology SP 1067 p.35 - 44.

STAMPING ROUTES OF AN AUTOMOTIVE WHEEL DISK BY NUMERICAL SIMULATION

Adauto Martins de Assis

Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
EEIMVR / UFF

Avenida. dos trabalhadores. 420 Vila Santa Cecília Volta Redonda RJ Brazil CEP 27255-125

adauto_assis@uol.com.br ; adauto@metal.eeimvr.uff.br

Gustavo Ferran Lorente

Universidade Federal Fluminense - Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda
EEIMVR / UFF

Avenida dos trabalhadores. 420 Vila Santa Cecília Volta Redonda RJ Brazil CEP 27255-125

gustau@uol.com.br

***Abstract.** The industrial evolution required new techniques to develop new projects. Computational Resources such as CAD - Computer Aided Design, CAM - Computer Aided Manufacturing and Numerical Simulations were introduced to assist this demand. With the simulation, it became possible to improve manufacturing projects showing some processing features too difficult to obtain by analytical methods.*

The aim of this work is to optimize the forming process of a wheel disk, stamped by BORLEM in three stages. . The numerical simulations were made by the finite elements method through the OPTRIS program - a dynamic explicit code. The optimization was done for some parameters, such as friction, force applied to the blankholder and kinematics. Furthermore the sensibility to the anisotropy material coefficients and the tools geometry were analysed..

After simulating several alternatives for the process, a efficient simplified route was found, using a material with a larger anisotropy coefficient with the blank resized. The final geometrical features of the disk were maintained and reduced the number of stamping stages to the wheel disk forming process.

keywords-: wheel disk, numerical simulation, optimization process