



ANÁLISE NUMÉRICA DE FORÇAS NA ESTAMPAGEM INCREMENTAL DE TAILORED BLANKS

Maria Fernanda Lousada Antunes

mflousada@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Márcio Eduardo Silveira

mesilveira@gmail.com

Universidade Federal de São João Del Rei

Praça Frei Orlando, 170, Centro, 36307-352 São João del-Rei, MG, Brasil

Jánes Landre Júnior

janes@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Lindomar Matias Gonçalves

lindomar.matias@yahoo.com.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

pamerico@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Bernardo de Oliveira Jakitsch

bejakitsch@hotmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500, Coração Eucarístico, 30535901, Belo Horizonte, MG, Brasil

Resumo. *A estampagem convencional de chapas é um processo de conformação mecânica no qual a chapa sofre transformações para que uma nova forma geométrica seja conseguida. O processo de estampagem incremental é uma alternativa ao convencional quando o interesse está em protótipos, pequenos lotes e facilidade com máquinas operatrizes. De forma a melhorar os processos de fabricação o uso de tailored Blanks é cada vez maior nas indústrias, visto que se consegue economia de peso, tempo e custo com uso de chapas mais grossas ou de materiais diferentes em apenas pontos específicos da peça. A fim de otimizar esses processos de produção, a simulação numérica pode ser usada para prever falhas, esforços, tensões, deformações dentre outros. Considerando que a estampagem profunda em tailored blanks ainda tenha poucos estudos na comunidade acadêmica e a estampagem incremental seja uma técnica nova ainda não muito difundida na indústria e universidades, o presente trabalho se propôs a estudar as forças atuantes na estampagem incremental de tailored blanks, modelado numericamente através de descontinuidade material e geométrica, com diferentes espessuras dos materiais SAE1020 e EP04. O estudo foi feito em elementos finitos variando trajetórias helicoidal, incremental e incremental reversa e os próprios Tailored Blanks formados por apenas um material com descontinuidade geométrica, bem como elementos de superfícies e sólidos, analisando as forças de reação. Foi possível notar diferenças nas forças de reação em função da trajetória, da espessura e do material.*

Keywords: *Estampagem Incremental, Tailored Blanks, Simulação Numérica*

1 INTRODUÇÃO

A indústria de transformação metal mecânica está sempre preocupada com a utilização cada vez mais racional de seus recursos materiais e financeiros, bem como no desenvolvimento de tecnologias que acompanhem esta realidade. Processos não convencionais de fabricação surgem da necessidade da economia de recursos. Os novos processos em grande parte das vezes se tornam economicamente inviáveis, a não ser que sejam aplicados em larga escala, face aos altos custos inerentes à sua implantação, mas existe um cenário produtivo que foge a esta regra. No desenvolvimento de matrizes e operações de conformação profunda, principalmente quando há necessidade do desenvolvimento de novos produtos, produção em baixa escala e/ou geometrias complexas, uma solução que tem se apresentado cada vez mais viável e com razoáveis limites de conformabilidade, levando em consideração o material, é a Estampagem Incremental de Chapas (EI), do inglês Incremental Sheet Forming (ISF).

O processo de Estampagem Incremental se trata da conformação de uma chapa plana por meio de uma ferramenta metálica ou não, que segue uma trajetória gerada por um centro de usinagem por comando numérico (CNC), a qual induz pequenas deformações plásticas incrementais localizadas na região de contato da ferramenta com a peça. Os últimos anos têm registrado um crescente desenvolvimento dos processos de deformação plástica incremental, uma vez que suas características se adaptam muito bem a algumas das novas exigências do mercado. Tem-se a produção de pequenos lotes de componentes, a obtenção de peças com elevada complexidade geométrica (as quais se tornariam inviáveis por processos convencionais) e com necessidade da confecção de matrizes de estampagem, protótipos para futura produção em larga escala, dentre outros. Somam-se a estas facilidades o fato de se usar um centro de usinagem, em geral facilmente encontrado, em que seus tempos de programação são pequenos e, para a aplicação deste processo, o ferramental é, via de regra, muito simples.

Indústrias automotivas têm buscado redução de peso nos seus produtos e baixo consumo de energia nos veículos. Um método eficiente para conseguir essa redução de peso é a junção de duas ou mais chapas, onde seu material, espessura e/ou superfície podem ser similares ou diferentes. Essas chapas unidas são chamadas no inglês Tailored Blanks (TB) e existe a expressão blanks soldados, ainda não muito utilizada, e por esse motivo será usado o termo em inglês nesse trabalho, devido à dificuldade na tradução fiel e por também ser o termo utilizado nas indústrias. Os Tailored Blanks podem ser confeccionados durante o processo de laminação, do inglês Tailor Rolled blanks (TRB), unidos por algum processo de soldagem, do inglês Tailor Welded Blanks (TWB), ou ainda por meio de tratamentos térmicos ou reforços em regiões específicas das chapas. Os Tailor Welded Blanks são mais usados devido à facilidade na união de duas chapas por meio de algum processo de soldagem.

O processo convencional de estampagem em TB já vem sendo estudado a mais tempo e o mesmo carrega em si algumas particularidades relativas à solda envolvida no processo. É necessário que a solda feita nos blanks seja de boa qualidade e é importante ressaltar que existe uma baixa ductilidade nas zonas termicamente afetadas e uma distorção do cordão de solda durante o processo. Como vantagens para o processo tem-se eliminação de reforços em pontos específicos da peça e uma consequente otimização do processo de fabricação do produto final.

Quando o processo de Estampagem Incremental tem um ponto simples de contato entre a ferramenta de conformação e a chapa ele é chamado SPIF do inglês Single Point

Incremental Forming e (JESWIET, 2005) mostrou as principais vantagens e desvantagens do processo SPIF:

- Vantagens: peças de destinação final podem ser obtidas diretamente de uma interface CAD/CAM, usando-se um centro de usinagem convencional CNC; uma mesma ferramenta de geometria simples pode produzir peças completamente diferentes; pelo caráter incremental; o nível de esforços no processo é baixo, o que minimiza o uso de lubrificantes; o processo não requer uso de matrizes; mudanças em partes específicas do projeto são facilmente implementadas; prototipagem rápida em metais; pequena deformação plástica induzida por incremento; o acabamento superficial é, via de regra, satisfatório; a operação é relativamente silenciosa; o processo permite estampagens profundas.
- Desvantagens: o tempo de conformação é muito maior que um processo de estampagem profunda convencional; a conformação de ângulos retos, via de regra, não se dá em um único passe, mas sim em múltiplos estágios, há a presença de “efeito mola”, ou retorno elástico do material, o que compromete a precisão dimensional dos conformados.

Para (MARTINS et al, 2008), a maioria das investigações de SPIF tem concentrações em aplicações e limites de conformabilidade do processo. As investigações levam a conclusão de que a formabilidade do processo pode ser definida em termos de quatro parâmetros principais: (i) a espessura da chapa; (ii) tamanho do passo vertical durante uma volta; (iii) velocidade (tanto rotação quanto avanço); (iv) o raio da ferramenta de modelagem.

A influência do primeiro parâmetro é comumente explicada pela aplicação da lei do seno em relação à espessura, onde t_f é a espessura final, t_0 é a espessura inicial e θ o ângulo de parede da peça conformada.

$$t_f = t_0 \sin \theta \quad (1)$$

O segundo parâmetro é relacionado de forma inversa sobre a estampabilidade. A velocidade da ferramenta influencia as condições de estampabilidade a partir do momento em que ela é uma medida direta do atrito na interface ferramenta-chapa, ou seja, é uma medida da imposição do estado de tensões aplicado localmente nesta região. No que concerne ao raio da ferramenta, é experimentalmente observado que a conformabilidade aumenta na razão inversa deste raio (concentra a deformação apenas na região de contato), havendo um limite após o qual esta variável impacta apenas na mesma medida que geraria influência em um processo convencional de estampagem (JESWIET, 2005).

Nas últimas décadas (FANG et al, 2013) relataram que o processo de estampagem incremental tem atraído um interesse cada vez maior no campo de conformação de chapas de metal devido a seus méritos exclusivos, como a flexibilidade do processo, redução de custos de ferramentas e aumento da estampabilidade. Comparando com o processo de conformação de chapas convencional, tal como a estampagem profunda, EI tem uma vantagem óbvia na fabricação de pequenos lotes ou produtos personalizados, o que é especialmente verdade no campo do modelo de automóvel e desenvolvimento da indústria aeroespacial.

A investigação de (CENTENO et al, 2012) mostrou o comportamento da fratura no processo de produção incremental do furo de um flange e sugeriram que a alta conformabilidade vem da supressão de estrição antes da fratura. Nas análises, foi discutido que o principal mecanismo de deformação em SPIF é a combinação de dobramento, alongamento e cisalhamento, dependendo das condições do processo.

De acordo com (FIORENTINO et al, 2013) várias tentativas têm sido feitas para melhorar a exatidão da peça a ser conformada, que nem sempre é fiel ao desenho proposto. (MALHOTRA et al, 2012) sugerem estratégias em múltiplas etapas (*multipass*) com uma combinação de diversos caminhos de ferramenta para deformações intermediárias na forma da peça a fim de reduzir o erro geométrico. (DUFLOU JR et al, 2008) demonstraram que, com estratégias em múltiplos estágios, geometrias podem ser obtidas excedendo-se os limites de conformação para um passe único. (HIRT et al, 2004) concentraram seus estudos sobre as estratégias de estampagem sobre o uso de chapas com características diferentes das convencionais utilizadas, os chamados *tailored blanks*, que são chapas de características diferentes unidas por soldagem ou laminação, aumentando assim a espessura da chapa nas áreas de deformação mais elevadas.

Neste trabalho foi feita a análise numérica das forças envolvidas no contato de uma ferramenta com um *Tailored blank* durante um processo de estampagem incremental. Essa análise foi feita por meio de software de simulação por elementos finitos. Os materiais escolhidos para serem unidos em TWB foram: aço SAE 1020 com 1,0 mm de espessura e aço comercial para estampagem profunda de itens automotivos aço EP04 com 0,8mm de espessura.

2 METODOLOGIA

Para o modelamento numérico do processo, foi usada uma chapa com união em TB engastada em todos os nós presentes nas quatro arestas, sem movimento de rotação ou translação simulando o prensa chapas utilizado no processo convencional apresentado. O punção foi modelado como uma esfera indeformável já que a ponta do punção utilizado é semi-esférico. A modelagem numérica pode ser vista na Figura 1.

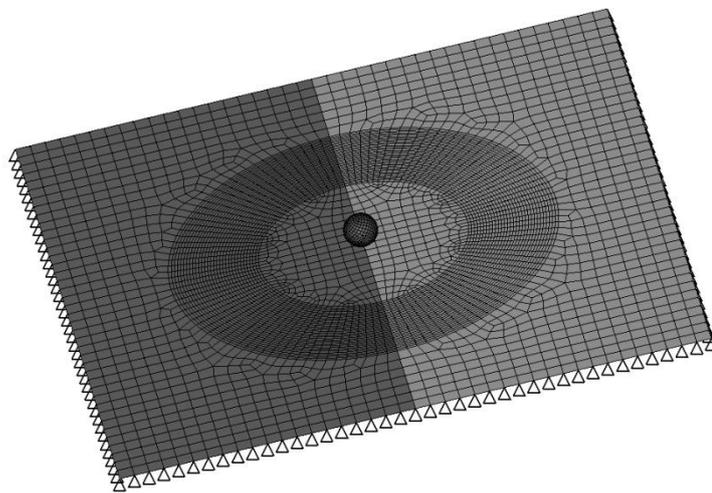


Figura 1 – Modelamento no pré-processamento da chapa em TB e punção em formato de esfera.

O *Tailored Blank* principal utilizado no trabalho é uma placa composta por duas placas menores que representam as chapas, sendo essas unidas através dos nós o que representaria uma solda perfeita, sem levar em conta os efeitos térmicos decorrentes da aplicação da soldagem no material.

- 1ª chapa: Retangular 200x100mm de Aço SAE 1020 com 1,0 mm de espessura
- 2ª chapa: Retangular 200x100mm de Aço de estampagem FEP04 com 0,8 mm de espessura

A Figura 2 mostra uma representação esquemática da união das duas chapas.

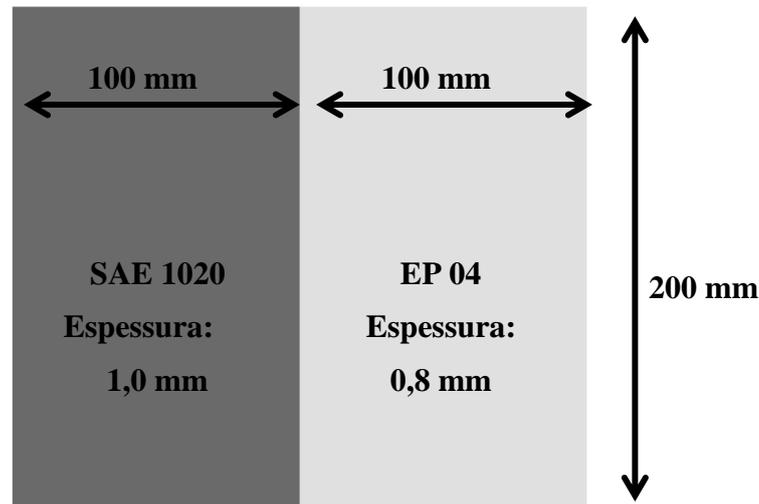


Figura 2 – Representação Esquemática do Tailored Blank com FEP04 e Aço SAE 1020

Simulações também foram feitas com *taylor welded blanks* de um mesmo material (SAE 1020 ou EP04) variando apenas as espessuras sempre com 1,0 mm do lado esquerdo e 0,8 mm do lado direito.

Para realização de simulação numérica da EI do material, o Aço SAE 1020 e EP 04 foram considerados isotrópicos com características elasto-plásticas. O modelo utilizado para representar a fase plástica do material foi feito utilizando Johnson-Cook, devido a facilidade de entrada de dados em software, dada por:

$$\sigma = \left(a + b\varepsilon_p^n \right) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - T^m) \quad (2)$$

Onde σ é a tensão plástica verdadeira, ε_p é a deformação plástica verdadeira, a é tensão de escoamento, b é o módulo de encruamento, n o expoente de encruamento c é o coeficiente da taxa de deformação, $\dot{\varepsilon}$ a taxa de deformação, $\dot{\varepsilon}_0$ a taxa de deformação de referência e m o expoente de temperatura.

A fase elástica foi definida pela Lei de Hooke: $\sigma = E\varepsilon$, onde σ é a tensão, E o módulo de elasticidade e ε é a deformação.

Na Tabela 1 são mostrados todos os valores de entrada utilizados para a simulação numérica.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais utilizados no trabalho.

Propriedades	SAE 1020	EP04
Densidade	$7,87 \times 10^{-9}$ ton/mm ³	$7,87 \times 10^{-9}$ ton/mm ³
Poisson	0,29	0,29
Módulo de Young	205000 Mpa	205000 Mpa
Tensão de escoamento	259 Mpa	140 Mpa
Parâmetro de encruamento	490 Mpa	428 Mpa
Expoente de encruamento	0,76	0,38

Neste presente trabalho serão utilizadas três definições de caminhos a serem percorridos pela esfera durante a estampagem incremental: uma trajetória helicoidal onde o incremento vertical em z é feito a cada mudança de ponto a ponto, uma trajetória incremental onde o decréscimo vertical é feito a cada passe circunferencial sempre na mesma direção angular e uma trajetória incremental reversa, similar a incremental salvo que a trajetória é feita um passe circunferencial em sentido horário e outro em sentido anti-horário. Na Figura 3 tem-se um esboço do caminho feito pela trajetória helicoidal.

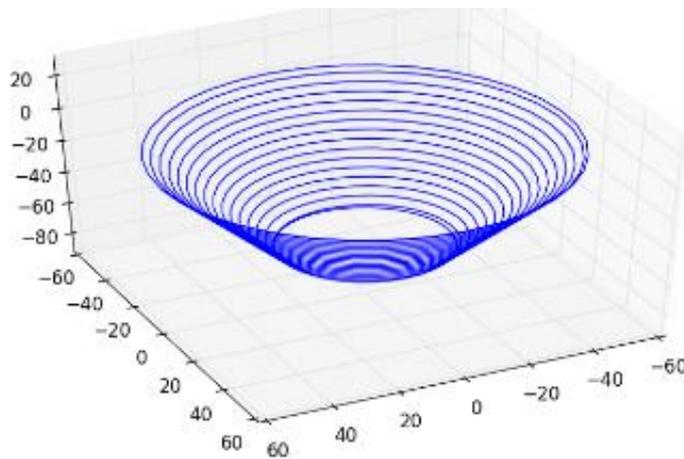


Figura 3 – Caminho adotando trajetória helicoidal.

Na Figura 4 tem-se um esboço da trajetória feita utilizando o método incremental. Neste caso a coordenada z se mantém constante a cada volta circunferencial dada pelo punção. O punção movimenta-se sempre no sentido horário.

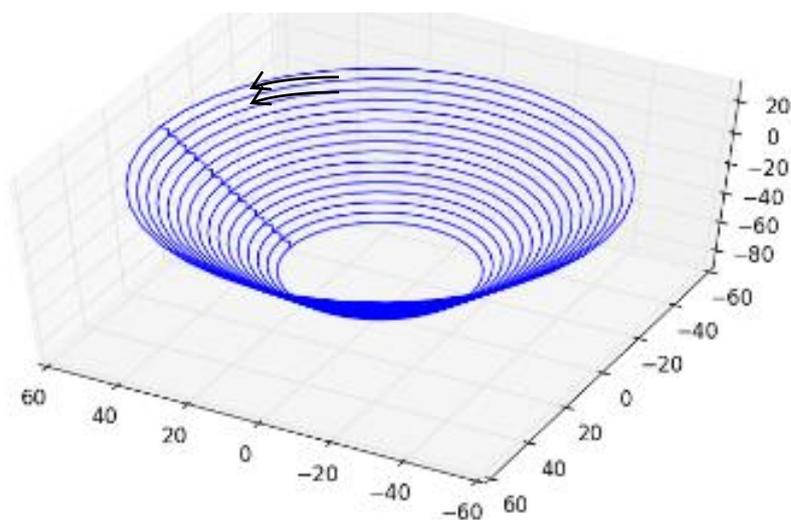


Figura 4 – Caminho adotando trajetória incremental.

Na Figura 5 tem-se um esboço da trajetória feita utilizando o método incremental reverso. Neste caso a coordenada z se mantém constante a cada volta circunferencial dada pelo punção. O punção movimenta-se uma volta no sentido horário e a próxima volta no sentido anti-horário.

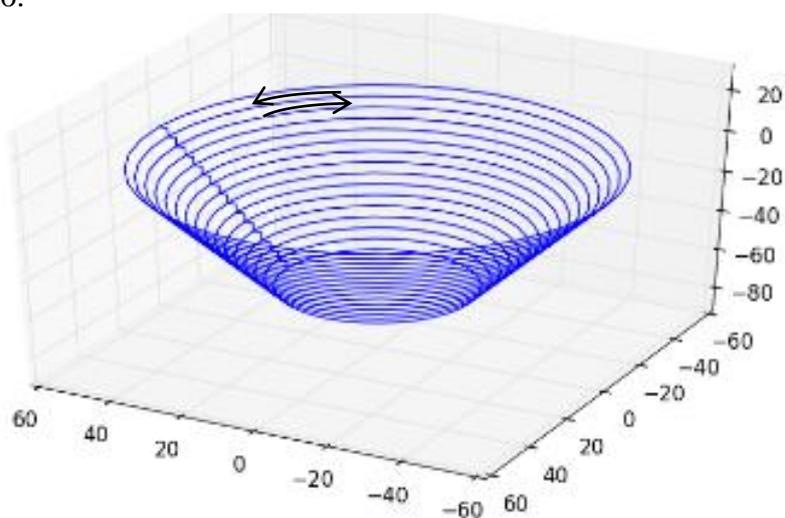


Figura 5 – Caminho adotando trajetória incremental reversa.

As simulações numéricas foram realizadas em microcomputadores com a seguinte configuração:

- Processador: Intel ® Core™ i5-3330 CPU @ 3.00GHz 64 bits com 4 núcleos
- Memória RAM: 8 GB
- Placa de Vídeo Nvidia Geforce GT430 2GB
- Windows 7 Home Basic

As quantidades de nós e elementos das malhas utilizadas bem como tempo médio de simulações 2D e 3D são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidades de nós e elementos das simulações

Parâmetros	2D	3D
Nós	5782	29431
Elementos	5698	23238
Tempo Médio Simulação	11h	64h

3 RESULTADOS

Um dado importante para controle do processo são as forças envolvidas no mesmo. O gráfico representado na Figura 6 mostra que independente da trajetória utilizada, as forças resultantes do contato inerentes ao processo são similares, e vão aumentando de acordo com o caminho percorrido no cone. À medida que o punção vai se aprofundando a forma de contato da esfera muda, sendo inicialmente um contato pontual, passando a ter uma maior área de contato, se utilizando de uma força maior para prosseguir no caminho. A trajetória helicoidal tem mais pontos no caminho do que as outras duas trajetórias incremental e incremental reversa e por esse motivo, tem uma sequência um pouco maior ao final do gráfico.

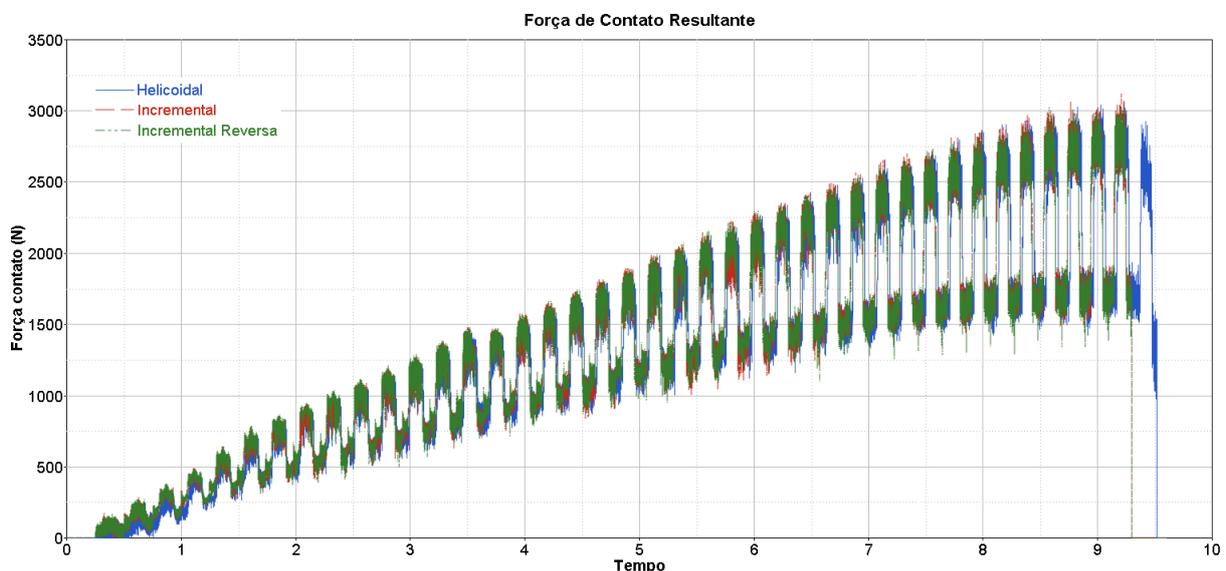


Figura 6 – Magnitude das forças de contato observadas nas três trajetórias: helicoidal, incremental e incremental reversa.

Para se ter uma análise mais detalhada sobre o gráfico anterior foi feito um corte entre 4,7s e 5s mostrado na Figura 7. É possível observar que há uma pequena diferença de fase entre a trajetória helicoidal e as outras. Isto é explicado devido a diferença dos pontos

utilizados nas trajetórias e na helicoidal a quantidade de pontos é um pouco maior. É possível observar também a presença de regiões de máximo e de mínimo para as forças no contato. Esses máximos ocorrem no SAE 1020 de 1,0 mm de espessura e os mínimos no EP04 com 0,8 mm.

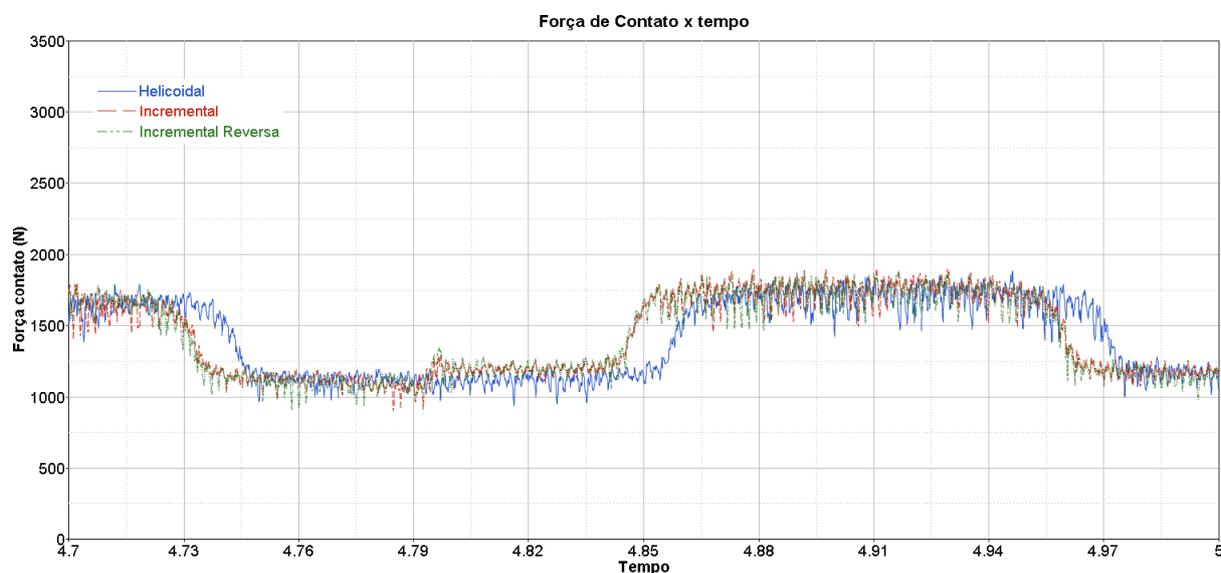


Figura 7 – Magnitude das Forças de contato observadas nas três trajetórias: helicoidal, incremental e incremental reversa 4,7s – 5s.

Aumentando um pouco mais o nosso gráfico para entre 4,8s e 4,82s na Figura 8, pode-se ver que a tensão helicoidal detém forças um pouco menores do que as outras duas e isso é explicado pela característica inerente à trajetória onde o incremento em z é feito a cada ponto.

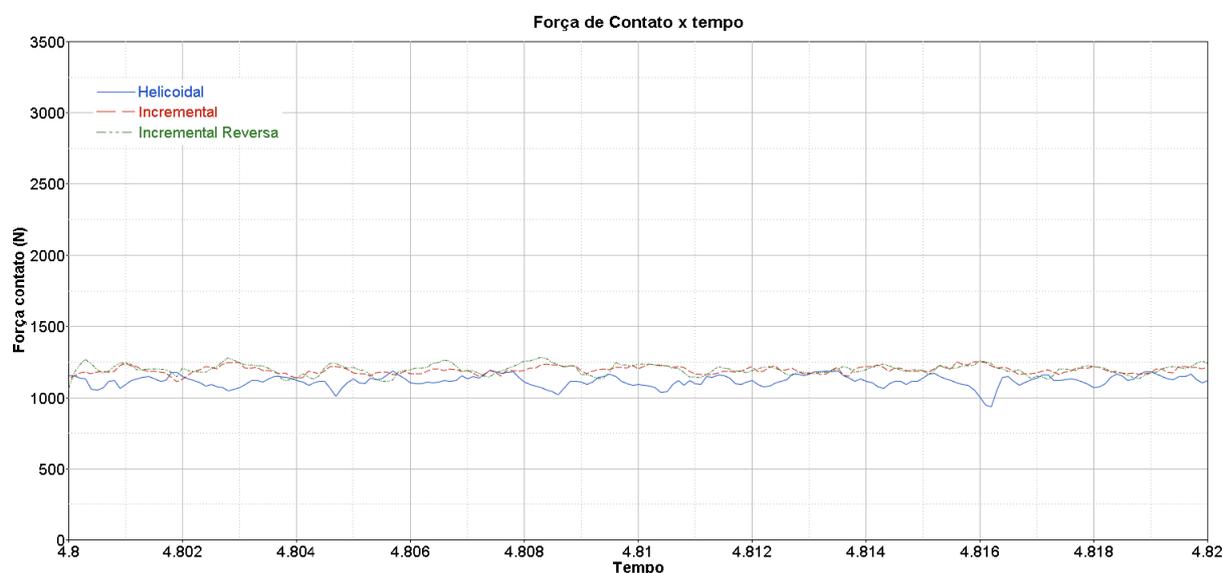


Figura 8 – Magnitude das Forças de contato observadas nas três trajetórias: helicoidal, incremental e incremental reversa 4,8s – 4,82s.

Para análise das forças nas direções XX, YY e ZZ usou-se apenas a trajetória helicoidal. Na Figura 9 é possível ver a comparação destas forças.

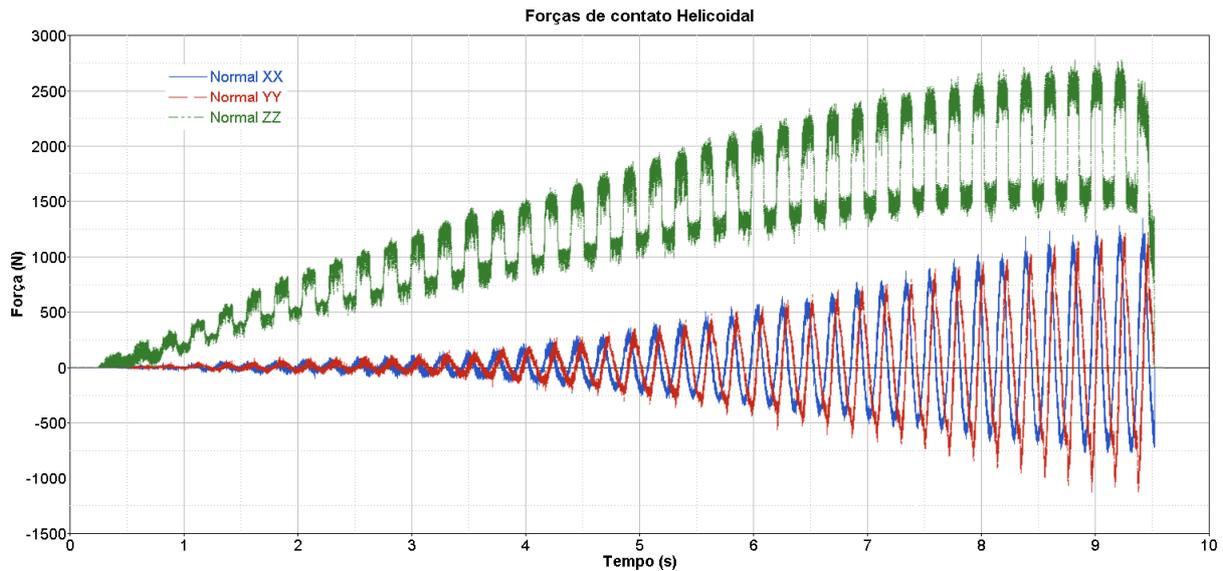


Figura 9 – Magnitude das Forças de contato na direção XX, YY e ZZ para uma mesma trajetória: helicoidal.

Como era de se esperar a força normal na direção ZZ é maior em relação às outras já que o incremento vertical do processo ocorre no eixo z. Para as forças XX e YY há um caráter periódico em torno do 0, tendo forças positivas e negativas.

A Figura 10 mostra as forças na direção ZZ, trajetória incremental para o modelo 2D e 3D. Foi escolhida a ZZ devido a mesma ser a maior. É possível verificar que apesar de ambas seguirem uma mesma cronologia, a força observada no modelo 3D é um pouco maior.

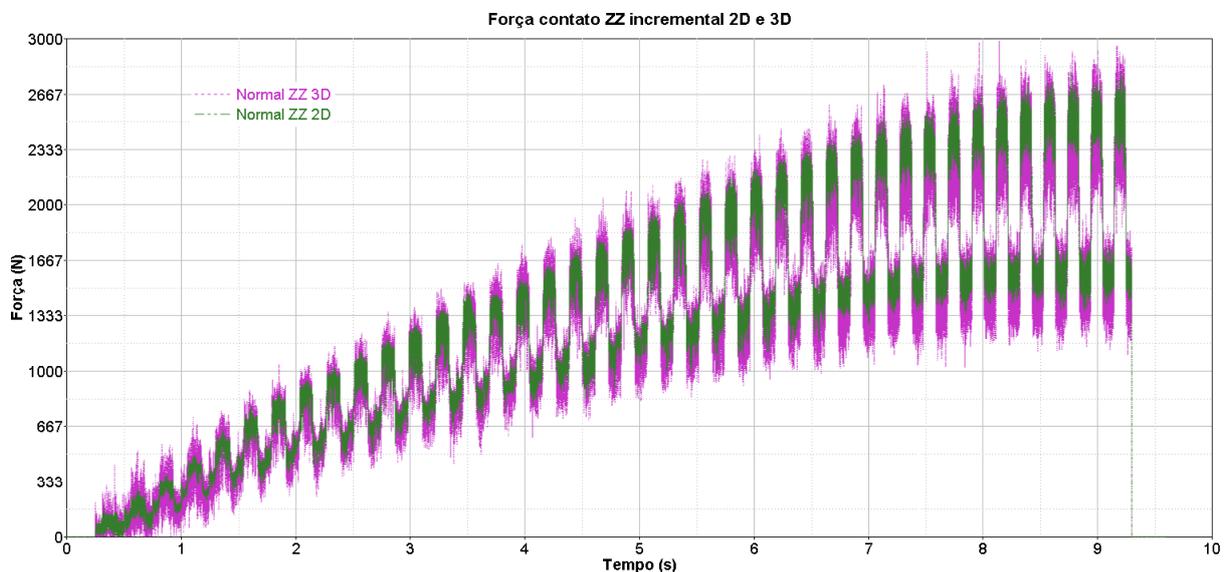


Figura 10 – Magnitude das Forças de contato na direção ZZ trajetória incremental 2D e 3D.

Para se ter uma comparação do comportamento das forças mediante diferentes tailored blanks foi feito o gráfico mostrado na Figura 11. Nele há uma mesma trajetória incremental no modelo 2D, sendo que o primeiro TB é composto apenas de SAE 1020 com 2 espessuras:

1,0mm e 0,8mm, o segundo é SAE 1020 1,0mm e EP04 0,8mm e o terceiro apenas EP04 com 1,0mm e 0,8mm de espessura.

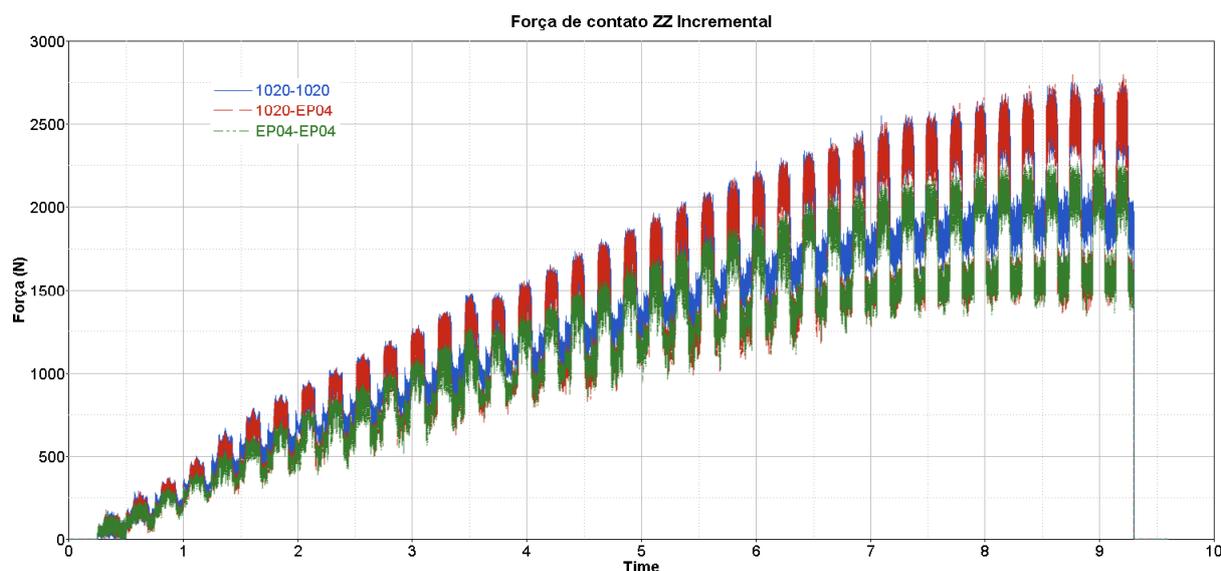


Figura 11 – Magnitude das Forças de contato na direção ZZ para 3 TB.

É possível verificar pelas figuras anteriores que as forças no SAE 1020 são maiores e isso pode ser observado também pelas características do material, que é mais difícil de ser conformado.

Foi feita uma ampliação no gráfico da Figura 11 entre 5s e 5,4s mostrado na Figura 12 de forma a melhor compreender o comportamento dos TB. É possível observar os mesmos picos de máximo e mínimo mesmo para ao TB compostos por mesmo material e isso é explicado pela diferença de espessura, já que um material de 1,0 mm de espessura exige mais do que um de 0,8mm. É possível observar também que a força exercida no EP04 de 1,0mm é maior do que a exercida no SAE 1020 de 0,8mm o que mostra a influência destes dois parâmetros na estampagem da chapa.

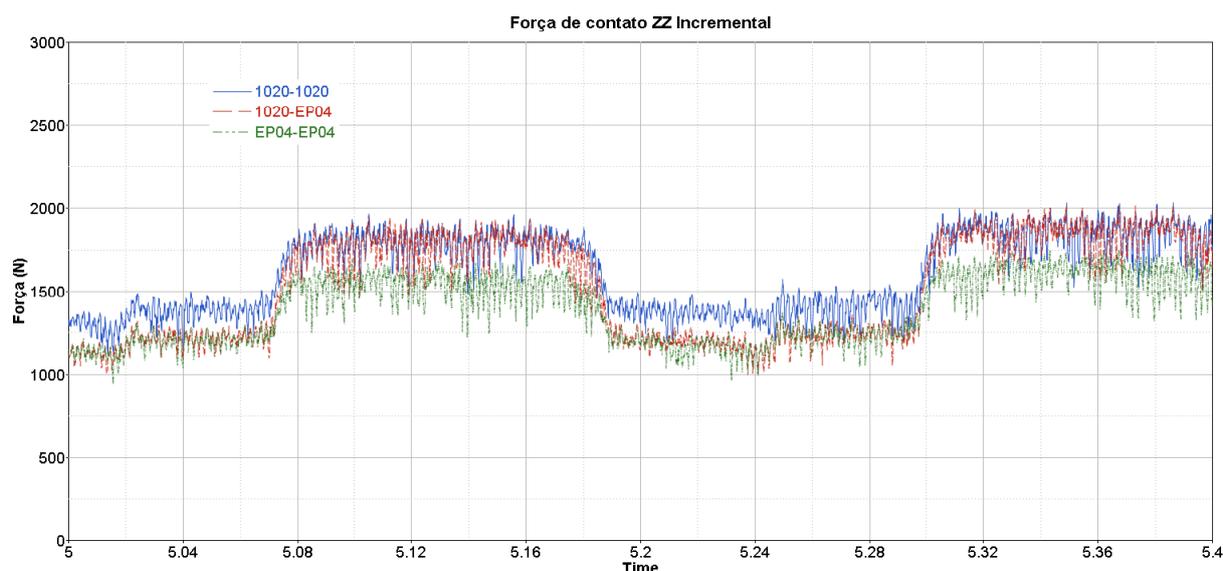


Figura 12 – Magnitude das Forças de contato na direção ZZ para 3 TB entre 5s e 5,4s.

4 CONCLUSÃO

Na análise das forças de reação da esfera na chapa, foi possível ver que as forças não só estão ligadas ao material utilizado como também a espessura deles. Com relação as trajetórias analisadas, em relação às forças, não houve diferenças significativas entre as trajetórias helicoidal, incremental e incremental reversa, mas, foi possível observar que elas foram menores na trajetória helicoidal. As forças encontradas no modelo de duas dimensões, com elementos de casca de quatro nós, são menores do que no modelo de três dimensões, com elementos hexagonais de oito nós, onde neste último, se pode encontrar um estado triaxial de tensões. Dessa forma, a análise 2D pode nos dar uma boa dimensão das forças envolvidas por um menor custo computacional, no entanto, para uma visão melhor da intensidade das forças o elemento 3D será necessário. A trajetória a ser escolhida não terá influência significativa sobre os resultados finais de forças na estampagem incremental de *tailored blanks*.

5 AGRADECIMENTOS

Os AUTORES generosamente agradecem o apoio da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – e a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais – FAPEMIG.

6 REFERÊNCIAS

- Jeswiet, J., et al. *Asymmetric single point incremental forming of sheet metal*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v..54, Issue 2, p. 88-114. 2005
- Martins, P. A. F.; Bay, N.; Skjoedt, M.; Silva, M. B. *Theory of single point incremental forming*, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 57, p. 247-252. 2008.
- Fang A, Y.; Lua, B.; Chena, J.; Xua, D. K.; Ou, H. *Analytical and experimental investigations on deformation mechanism and fracture behavior in single point incremental forming*, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 214, p. 1503-1515. 2014.
- Centeno, G., Silva, M.B., Cristino, V.A.M., Vallellano, C., Martins, P.A.F., *Hole-flanging by incremental sheet forming*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 59, 46–54. 2012.
- Fiorentino, A. *Force-based criterium in incremental sheet forming*, *Int J Adv Manuf Technol*, v. 68, p. 557-563, DOI 10.1007/s00170-013-4777-4, 2013.
- Malhotra, R., Xue, L., Belytschko, T., Cao, J.,. *Mechanics of fracture in single point incremental forming*. *Journal of Material Processing Technology* 212,1573–1590. 2012.
- Duflou Jr, Verbert J, Belkassam B, Gu J, Sol H, Henrard C, Habraken Am *Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths*. *CIRP Ann* 57(1):253–256 (2008).
- Hirt A, G.; Amesa, J.; Bambacha, R.; Kappb, R. *Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming*, 2004.