



ANÁLISE 3D DO PADRÃO DE RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES E COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO NA CONFORMAÇÃO PLÁSTICA

Gilmar Ferreira Batalha

Departamento de Engenharia Mecânica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - 05508.900 - São Paulo - SP - Brasil
E-mail: gfbatalh@usp.br Fone: 00 55 (0)11 818-5342 Fax: 00 55 (0)11 814-2424

Thomas Neudecker e Ulf Engel

Chair of Manufacturing Technology - LFT , Institut for Manufacturing Science
Friederich-Alexander Universität Erlangen-Nuernberg

***Resumo.** A otimização global dos processos de conformação plástica não considera apenas as propriedades mecânicas dos materiais, mas vem cada vez mais focalizando os parâmetros tribológicos dos processos de conformação plástica; neste sentido as condições de contato na interface peça ferramenta desempenha um papel importante. Este trabalho discute a potencial caracterização superficial tridimensional do padrão de rugosidade superficial e de sua influência sobre o processo de conformação plástica, em ensaios de compressão - torção e de estampagem profunda.*

***Palavras-chave:** rugosidade, atrito, tribologia, conformação plástica*

1. INTRODUÇÃO

Mudanças recentes no setor de manufatura e gerenciamento da produção, com adoção de estoques reduzidos ou nulos, terceirização de alguns setores e a crescente automação das prensas estão reduzindo substancialmente a margem de manobras para os tradicionais pequenos ajustes finos condicionados às mudanças de propriedades das chapas.

A constatação da maior dificuldade de ajuste em tempo real dos processos de manufatura de chapas em função de pequenas variações nas qualidades das chapas, obriga uma discussão e estabelecimento de novos requisitos para o controle de qualidade das chapas fornecidas à indústria automobilística, uma vez que qualquer desvio das especificações estabelecidas perturba uma linha de manufatura automatizada, operando com estoques próximos de zero e com algumas etapas já terceirizadas. Após uma melhora do controle de qualidade das propriedades mecânicas, da lubrificação e de defeitos superficiais tais como: esfoliações, carbono superficial e variações na camada superficial das bobinas; as possibilidades e os efeitos da topografia superficial são neste momento as

variáveis que exibem maior potencial para a otimização do processo de conformação de chapas [Wagner,1993; Prier,1997 e Staeves,1997]. Neste sentido destaca-se também a importância do desenvolvimento de novos métodos para a caracterização da topografia de chapas metálicas [Staeves,1996, Wagner,1993 e DeChifre,1994]. Este trabalho busca a caracterização tridimensional da topografia superficial de chapas metálicas com base em um modelo mecânico - reológico visando correlacioná-la com o comportamento do coeficiente de atrito em ensaios de torção - compressão combinada e em ensaios de estampagem profunda.

2. TOPOGRAFIA SUPERFICIAL DE CHAPAS DE ALUMÍNIO LAMINADAS

Nos processos de conformação de chapas a topografia superficial pode desempenhar as funções de armazenagem, transporte e distribuição de lubrificantes, bem como a retenção e o transporte das partículas de desgaste. Considerando estas funções elas podem ser divididas em [Steinhof,1996]:

- *Superfícies estocásticas* - caracterizadas por uma distribuição aleatória de elementos superficiais não idênticos.
- *Superfícies determinísticas* - caracterizadas por uma distribuição geometricamente regular de elementos superficiais isolados idênticos.
- *Superfícies mistas* - combinações das duas características acima.

A impressão destes padrões de rugosidade, texturizações da superfície, dependem dos padrões de impressão de rugosidade realizados sobre o cilindro de laminação, os tipos mais frequentes são [Weber,1990 e Deutscher,1995]:

- *Jateamento com granalhas* - os cilindros são texturizados através do jateamento com granalhas de partículas duras. As superfícies apresentam uma topografia superficial com uma natureza aleatória (estocástica).
- *Texturização por descarga elétrica* - o cilindro de laminação é texturizado por pequenas descargas elétricas similares ao processo de eletro-erosão. As superfícies apresentam uma topografia superficial com uma natureza aleatória (estocástica).
- *Texturização por laser* - A texturização superficial é conseguida produzindo pequenas crateras no cilindro por meio de um feixe de laser. As crateras apresentam um arranjo alinhado (determinístico)
- *Texturização por feixe de elétrons* - similar à texturização por laser, mas usando um feixe de elétrons para criar um padrão regular de crateras (determinístico).

Em chapas de alumínio, um outro padrão de superfície também pode ser encontrado:

- Textura "mill-finishing" - onde a superfície dos cilindros é texturizada por meio de um processo de retificação na direção tangencial, resultando em um padrão de rugosidade mais fino do que o obtido nos outros processos.

3. MATERIAL E ARRANJO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados com corpos de prova chapas de liga de alumínio Al 6016-T4 (Al Mg 0,4 Si 1,2) com espessura média de 1,2 mm, com três diferentes topografias de texturização superficial: texturização por laser (LT), "mill finishing" (MF) e

texturização por descarga elétrica (EDT). A avaliação quantitativa da topografia superficial foi realizada de dois modos: medições de rugosidade convencionais com um sensor mecânico conforme DIN 4768, resumidas na Tabela 1, e parâmetros tridimensionais para a caracterização superficial da rugosidade, apresentados no próximo ítem.

Um dispositivo de ensaio de tração - compressão combinadas, foi usado para investigar o coeficiente de atrito em função da tensão normal e do caminho deslizado. Os corpos de prova foram solicitados a 40, 80, 120 e 160 N/mm² respectivamente, após o que são submetidos a torção sob carga constante, com uma velocidade da matriz rotativa de 2.36 mm/s. Visando uma compreensão mais ampla da influência das diferentes texturizações das superfícies sobre o comportamento tribológico, a conformabilidade das três superfícies texturizadas foram estudadas através de um ensaio de estampagem profunda.

Tabela 1 - Parâmetros convencionais de rugosidade para as chapas de Al 6016-T4.

Parâmetros de rugosidade DIN 4768	Un.	LT	MF	EDT
R _a (longitudinal)	μm	1.11	1.06	1.13
R _a (transversal)	μm	0.79	1.10	1.24
R _z (longitudinal)	μm	4.37	5.89	7.99
R _z (transversal)	μm	4.49	5.51	6.95
R _{max} (longitudinal)	μm	7.32	7.17	11.29
R _{max} (transversal)	μm	6.06	7.16	9.73

4. ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DA RUGOSIDADE - MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO

A topografia superficial foi mapeada usando um sensor ótico dentro de um rugosímetro Rodenstock RM600. Um sensor ótico mapeia a superfície usando um feixe de laser focado sobre a superfície. Baseado nas medições, a fração de contato pode ser calculada em uma área constante através da variação da penetração da superfície de 0 a 100%, ou para uma determinada penetração através de uma redução numérica da área medida. A qualificação da superfície via uma análise tridimensional é feita no programa SAM (Surface Analysis Module). Este modelo assume a carga sobre uma superfície sendo transmitida por três diferentes tipos de frações de contato: contato sólido, bolsões de lubrificação estática e bolsões de lubrificação dinâmica. Como descrito em maiores detalhes em [Sobis,1996; Geiger,1995 e 1996; Staeves,1996; Pfestorf,1997 e Batalha,1998] este modelo é usado para a obtenção de novos parâmetros de caracterização das superfícies, mais apropriados para o caso de superfícies em contato sob um regime de lubrificação mista. Este modelo assume que a carga sobre uma superfície sendo transmitida por três tipos de frações de contato (Figura 1): (a) contato sólido, correspondente à área real de contato; (b) os bolsões de lubrificação hidrostáticos, regiões o lubrificante está isolado, sem conexão com os extremos da área aparente de contato e (c) os bolsões hidrodinâmicos, onde o lubrificante pode fluir. Como mostrado na Figura 2, este modelo foi usado para obter novos parâmetros tridimensionais para caracterizar de regimes de lubrificação mista.

Não obstante, a ampla gama de parâmetros atualmente sugeridos para a caracterização tridimensional de superfícies, visando uma coerência entre parâmetros e o comportamento tribológico, este trabalho, adotou a evolução da fração de área dos bolsões fechados α_{clm} e o volume dos bolsões fechados V_{clm} , para uma correlação com o atrito nas três superfícies.

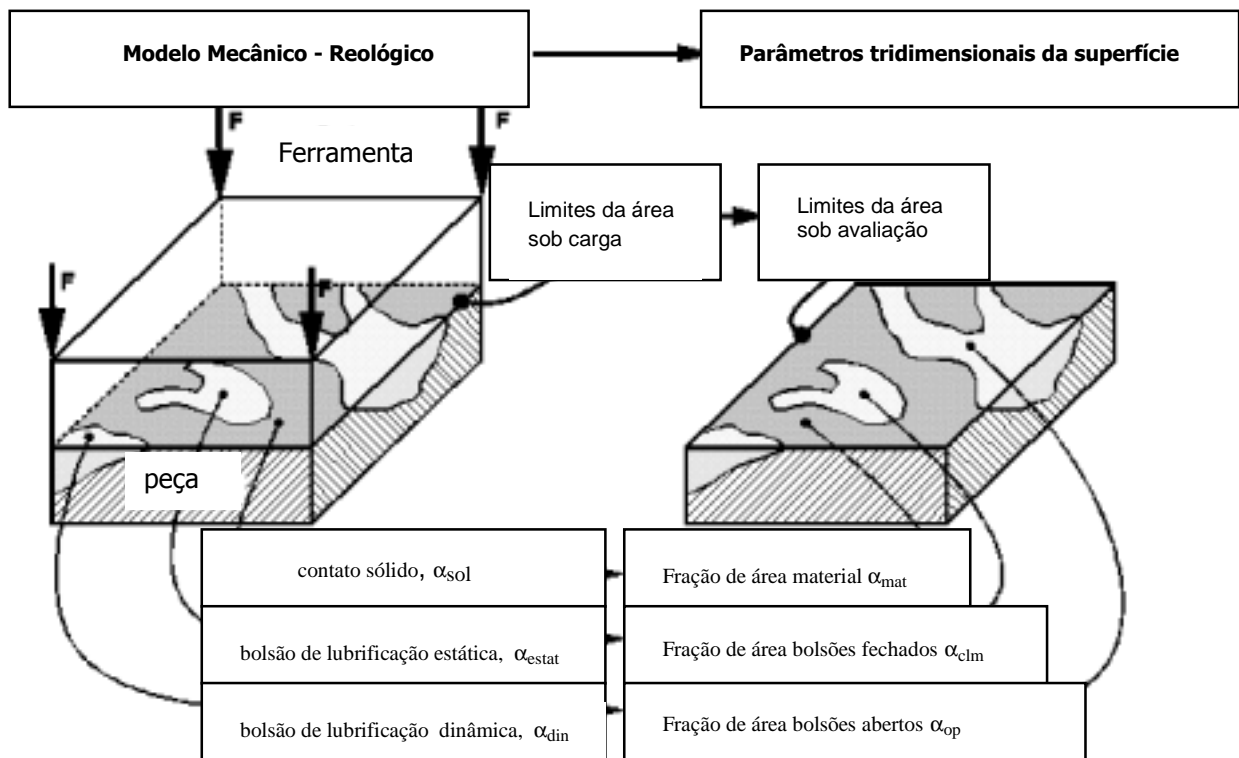


Figura 1. Definição de parâmetros 3D baseados em um modelo mecânico - reológico.

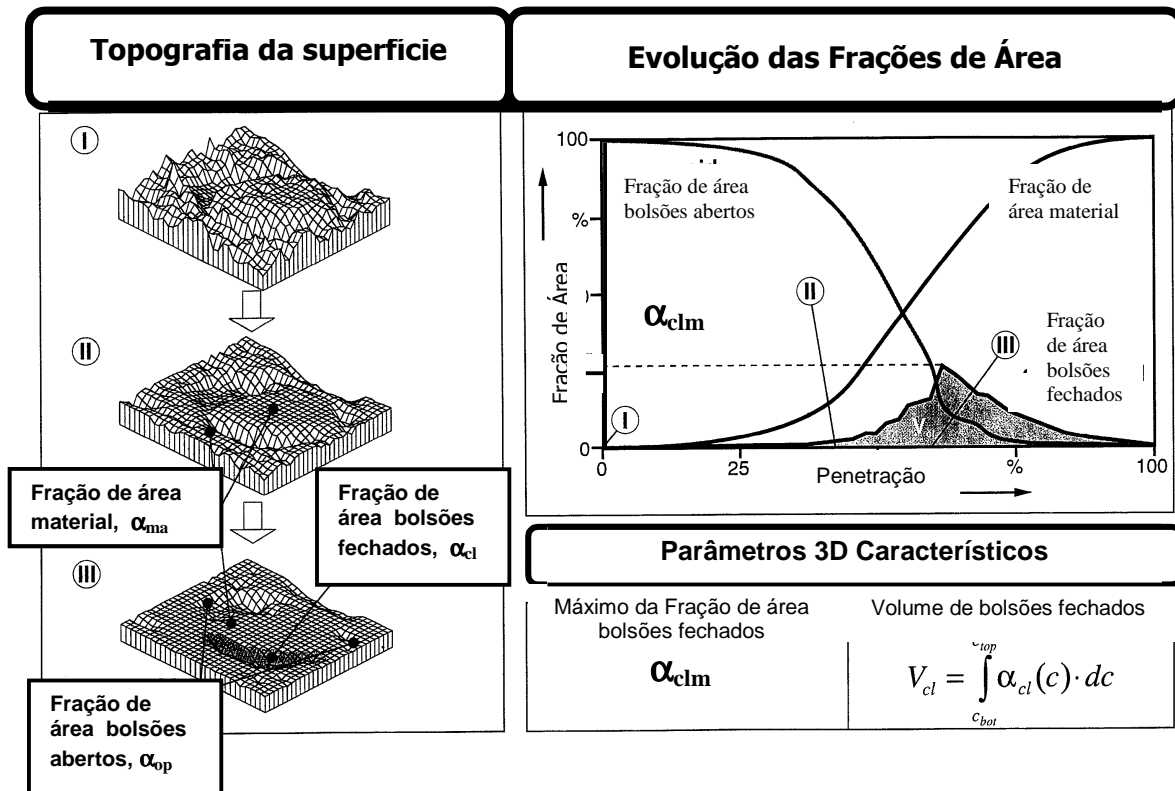


Figura 2 - Parâmetros 3D resultantes da caracterização de uma superfície texturizada por laser (LT).

4.1 Caracterização das topografias superficiais originais

Os aspectos da topografia superficial original (micrografia ótica, 50x) para as três superfícies, estão mostradas na Figura 3a - chapa textura LT, estrutura determinística com crateras separadas; Figura 3b - chapa com textura EDT, arranjo superficial com relevo estocástico e na Figura 3c, uma chapa com estrutura mista com aspectos de acabamento "mill finishing"; nas chapas de alumínio, este tipo de impressão de rugosidade é geralmente conseguido na última etapa de laminação a frio, com reduções de espessura próximas de 5-10%, o que costuma dispersar o padrão de rugosidade originalmente na direção tangencial, mantendo os traços do padrão de laminação anterior [Emmens,1996 e Dinkel,1997].

Os parâmetros 3D obtidos pelo módulo de análise superficial SAM para estas superfícies são mostrados na Figura 3 e Tabela 2, onde pode destacar-se que os resultados da chapa LT, mostram uma superfície anisotrópica e determinística, com um padrão de crateras com diferentes intervalos para cada uma das direções. Os parâmetros da análise 3D neste caso, apresentam a com a estrutura com maior volume de bolsões de lubrificação fechados, bem como com a maior fração de área de bolsões fechados. A estrutura EDT caracteriza-se como estocástica e isotrópica, com um volume de bolsões fechados menor e uma fração de área de bolsões fechados, também menor. A estrutura MF ("mill finish"), aqui apresentando um aspecto misto, mostra-se como uma superfície estocástica, contudo anisotrópica, devido sua forte dependência da orientação, mostrada aqui apenas para efeito de comparação.

Tabela 2 - Análise 3D dos três tipos de chapas de alumínio *Al 6016-T4*

Parâmetros 3D (*)	Unidade	LT	MF	EDT
Máximo da fração de bolsões fechados, α_{clm}	%	51	43	40
Volume dos bolsões fechados, V_{clm}	mm ³ /m ²	1345	1007	944

(*) média de três medidas a 45° da direção de laminação, processadas com filtro retangular.

4.2 Caracterização das topografias superficiais após ensaio de compressão - torção

Utilizou-se uma configuração do ensaio de compressão - torção combinada, discutido em maiores detalhes em [Batalha,1998]. O corpo de prova, das chapas de alumínio *AL 6016 T4* foi ensaiado sob uma tensão de 10, 20, 40, 60, 80, 100 e 120 MPa, correspondentes a uma área de 530,14 mm², e então submetidos a um cisalhamento superficial a 2,36 mm/s. O resultado das medidas do coeficiente de atrito para os três tipos de superfícies das chapas é mostrado na Figura 4. O resultado dos parâmetros α_{clm} e V_{clm} medidos nas superfícies após os ensaios de compressão - torção são mostrados nas Figuras 5a e 5b. Os três tipos de rugosidades ensaiados (LT, EDT e MF) mostram um comportamento semelhante. A superfície EDT, caracteriza-se por uma rugosidade mais elevada e menor área de bolsões de lubrificação fechados, contrasta com a superfície LT, cujo padrão determinístico de crateras evidenciam uma maior possibilidade de lubrificação hidrostática adicional, o que acaba justificando o menor coeficiente de atrito ao longo da faixa de tensões ensaiada. A chapa com acabamento MF, com aspectos mistos, devido a um padrão de ranhuras orientadas na rugosidade, mostram uma dependência da orientação, que quando ensaiada no ensaio de compressão - torção resultam em um valor médio ponderado do coeficiente de atrito, incluído aqui, apenas para efeito comparativo. Os efeitos da velocidade interfacial, viscosidade e da quantidade de lubrificante estão sob investigação.

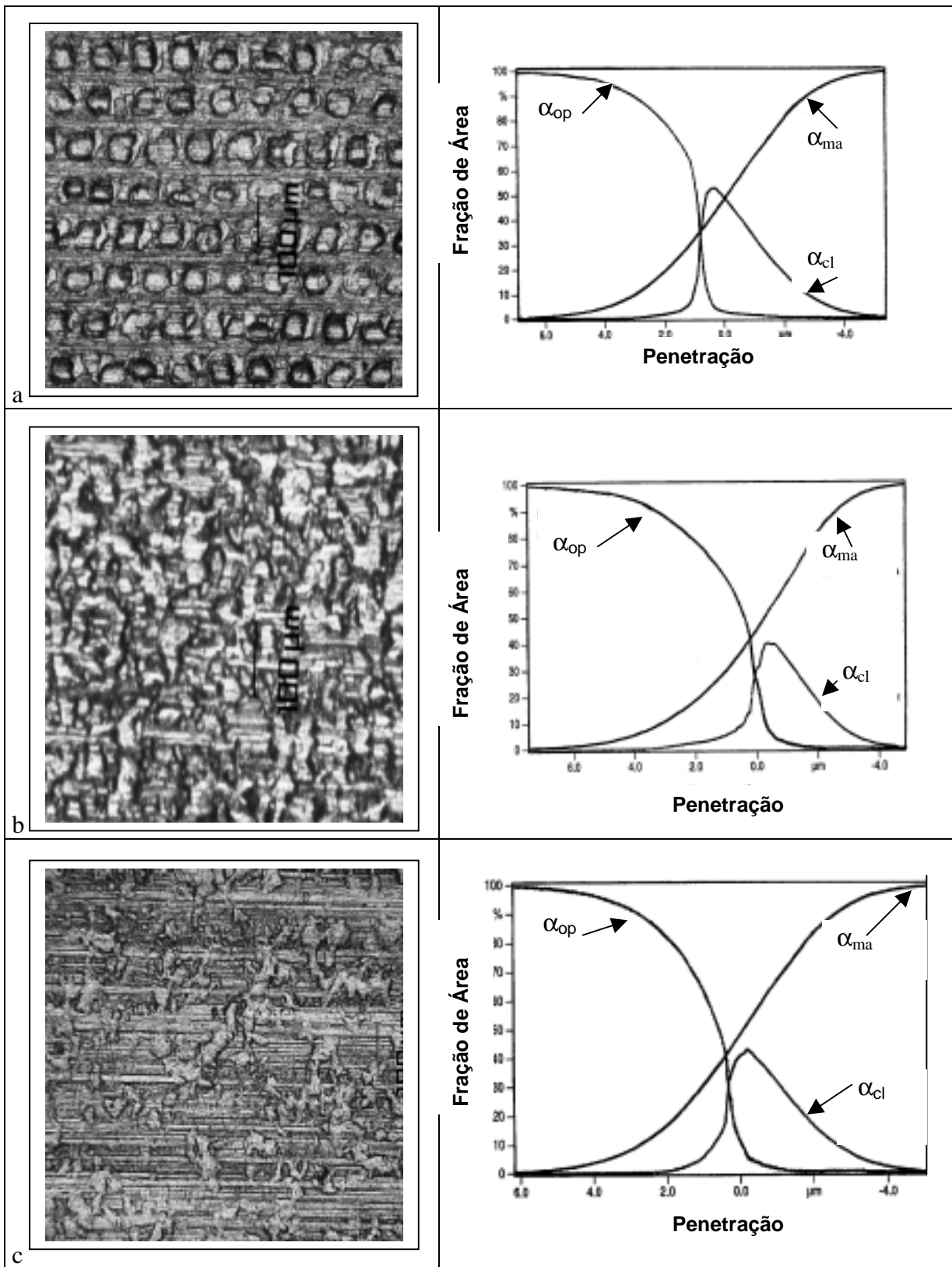


Figura 3 - Topografia superficial e respectivos parâmetros de caracterização superficial 3D.
 (a) superfície com texturização LT.
 (b) superfície com texturização EDT.
 (c) superfície com texturização MF, mista.

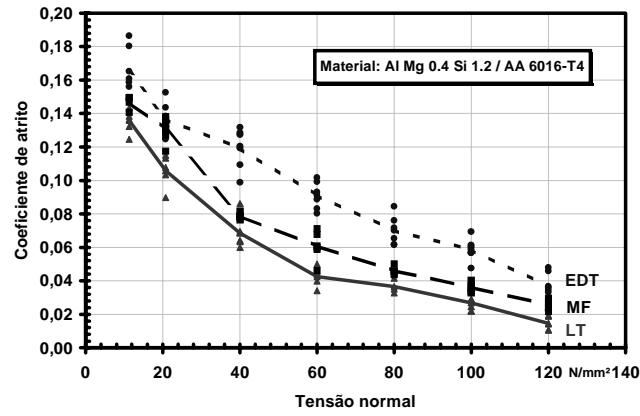
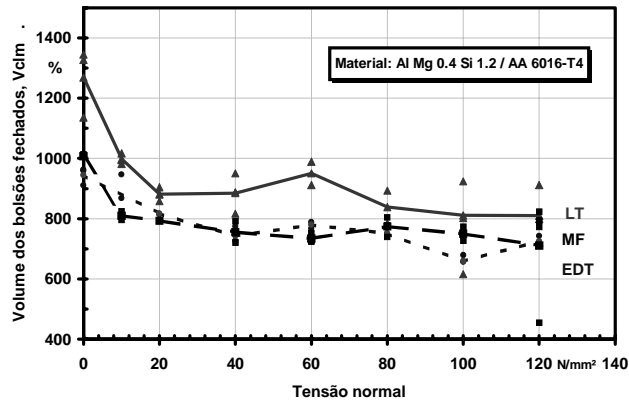


Figura 4 - Coeficiente de atrito vs. tensão normal no ensaio de compressão torção.

(a)



(b)

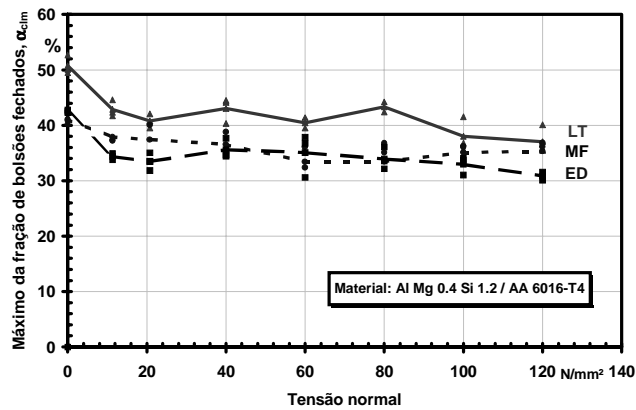


Figura 5 - Comportamento dos parâmetros 3D da topografia superficial após o ensaio de compressão - torção. (a) volume dos bolsões de lubrificação fechados (b) máxima fração de área dos bolsões de lubrificação fechados.

5. ENSAIO DE ESTAMPAGEM PROFUNDA

Visando investigar a influência da textura superficial sobre o processo de estampagem profunda, mediu-se a força de estampagem em um punção cilíndrico de 50 mm para um "blank" de 102 mm de diâmetro, i.e.: um limite de estampagem igual a 2,04. As principais fontes desta força são o atrito na área do prensa - chapas e a deformação plástica do material que está sendo estampado. O atrito depende basicamente do atrito no prensa chapas e do raio e superfície da matriz. As forças de deformação plástica são determinadas pelas propriedades mecânicas.

Nos resultados dos ensaios de estampagem profunda mostrados na Figura 6, pode ser vista uma influência da topografia superficial sobre o comportamento força vs. deslocamento do punção. Nos casos estudados, a força no punção aumentou com o aumento da rugosidade; a estrutura EDT, não obstante uma maior rugosidade, apresenta menores valores do máximo do volume de bolsões de lubrificação fechados e da fração de área dos bolsões de lubrificação fechados, bem como a superfície MF com valores da rugosidade próximos, apresentam um comportamento semelhante da força vs. deslocamento do punção durante a estampagem, contrastando com valores menores da força no punção registrados para a chapa LT, cujo arranjo determinístico de crateras, estão associados com valores mais elevados do volume de bolsões de lubrificação fechados (V_{clm}) e da fração de área dos bolsões de lubrificação fechados (α_{clm}), o que significa fisicamente uma formação mais fácil de bolsões de lubrificação hidrostáticos, e em consequência menores coeficiente de atrito e forças no punção. Os efeitos da força medida no punção sobre o processo de estampagem profunda ou sobre o produto estampado são complexos e influenciados principalmente pelas propriedades do material e as mudanças no atrito. Sob força constante no prensa - chapas, foi determinado um limite máximo de estampagem $\beta_{max} = 2,06$ aproximadamente igual para as três superfícies. Na estampagem profunda de peças mais complexas, a ação simultânea de diferentes mecanismos hidrostáticos ou hidrodinâmicos, resultam na necessidade de um maior detalhamento dos ensaios, na determinação da topografia superficial tribologicamente mais indicada.

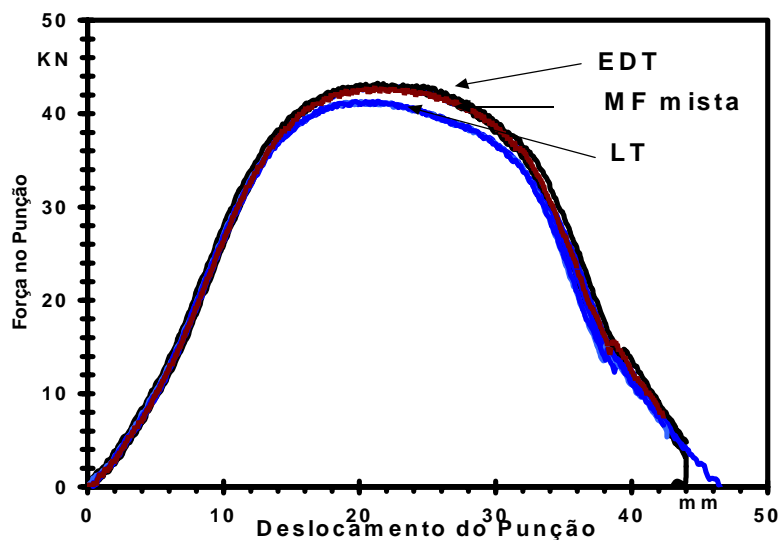


Figura 6 - Força vs. deslocamento do punção no ensaio de estampagem profunda, $\beta=2,04$.

6. CONCLUSÕES

- Os parâmetros α_{clm} (máximo da fração de área dos bolsões de lubrificação fechados) e V_{clm} (volume dos bolsões de lubrificação fechados) mostram-se neste trabalho adequados para uma caracterização tridimensional da topografia superficial bem para uma correlação com o comportamento tribológico durante a conformação, tanto para superfícies determinísticas (Ex.: LT) como para superfícies estocásticas (Ex.: EDT).
- O ensaio de compressão - torção combinadas, configurado para corpos de prova de chapas, forneceu uma possibilidade de estudo do comportamento do atrito para os três tipos de superfícies da chapa de alumínio *Al 6016-T4* estudados.
- A estrutura EDT mais rugosa e com menor fração de área e volume de bolsões de lubrificação fechados apresentou um coeficiente atrito maior tanto nos ensaios compressão - torção e uma maior força no punção nos ensaios de estampagem profunda. A estrutura LT caracterizada por um padrão determinístico de bolsões de retenção de lubrificante, apresentam um menor coeficiente de atrito no ensaio de torção e compressão e menores forças no punção durante estampagem profunda.
- Os efeitos de uma forte anisotropia da topografia superficial como a das chapas MF, onde o atrito depende também da orientação do movimento, não pode ser estudado completamente através do ensaio de compressão - torção combinadas, sendo neste caso, os resultados considerado como uma média ponderada.
- Quando comparando os resultados dos ensaios de compressão - torção com os ensaios de estampagem profunda, pode ser estabelecido que na procura de um menor coeficiente de atrito, valores maiores α_{clm} e V_{clm} são vantajosos.

Agradecimentos

Agradece-se a CAPES pela bolsa de pós - doutorado na Lehrstuhl für Fertigungstechnologie – Prof. Dr. Ing. Dr. h. c. Manfred Geiger, na Friedrich-Alexander Universitaet Erlangen-Nuernberg.

REFERÊNCIAS

- BATALHA, G. F. - Some Aspects of Surface Qualification and its Relationship to Metal Sheet Forming, **Anais I Workshop FINEP-RECOPE - Desafios, Experiências e Expectativas sobre a Rugosidade de Chapas para a Indústria Automobilística**, São Paulo 21 de outubro de 1998, Dept. de Engenharia Mecânica da EPUSP, 1998, p. 30-8.
- De CHIFFRE, L., CHRISTIANSEN, S., SKADE, S. - Advantages and Industrial Application of Three-dimensional Roughness Analysis, **CIRP Annals**, 43, 1, 1994, 473-8.
- DEUTSCHER, O. Verschiedene Verfahren zur Einstellung einer gezielten Rauheit am Kaltband, **Stahl und Eisen**, 115, n. 7, 1995, 39-45.
- DINKEL, F., HOFFMAN, H., KOPIETZ, J. - Einfluß der Oberflächenrauheit auf die Umformung von Aluminiumblechen, **Blech Rohre und Profile**, Juli 7/8, 1997, 36-40.
- EMMENS, W. C., SCHOEPEN, F. - Some Frictional Aspects of Aluminum in Sheet metal forming. **Proc. 19th IDDRG**, Eger, 10-14 July, 1996, 487-96.

- GEIGER, M., PFESTORF, M. , ENGEL, U. - 3D-Oberflächenanalyse bei Feinblechen, **Stahl und Eisen**, 115, 7, 1995, 47-53.
- GEIGER, M., PFESTORF, M. ENGEL, U. - 3D-Kennwerte zur Beschreibung technischer Oberflächen, **Tagungsband IX Int. Oberflächenkolloquium**, 29-31.1.1996, Chemnitz, 159-70.
- PFESTORF, M. - **Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**, Fertigungstechnik-Erlangen 72, Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997.
- SOBIS, T., **Beitrag zur Mechanik der Mischreibung in der Wirkfuge umformtechnischer Prozesse**, Reihe PSU Prozesssimulation in der Umformtechnik, Bd. 10, Berlin, Springer Verlag, 1996.
- PRIER, M., STAEVES, J. - **Bedeutung der Oberflächenfeingestalt in der Blechumformung**. "20 Jahre Umformtechnik in Darmstadt", Meisenbach Verlag, Bamberg, 1997
- STAEVES, J. - **New 3D Roughness Parameter and their Relationship to the tribological behavior of Sibetex Sheet**. Proc. SIBETEX 3, 24.10.1996, OCAS, Zelzate, Belgien.
- STAEVES, J., SCHMOEKEL, D. - **Topography of Sheet Metal and its Relationship to the Tribological Behavior during the Forming Process**, Proc. 1st ICTMP, 1997, Gifu, Japan, 340-3.
- STEINHOF, K., RASP, W., PAWELSKI, O. - Development of Deterministic-Stochastic Structures to Improve the Tribological Conditions of Sheet Forming Processes, **J. Mater. Proc. Tech.**, 60, 1996, 355-61.
- WAGNER, S. - Three-dimensional Sheet Surface Analysis, **Production Engineering**, 1, 1993, 1, 53-6.
- WEBER, F. - Aktuelle Entwicklung in der Kaltwalzherzeugung, **Stahl und Eisen**, 110, n. 3, 1990, 45-51.

TRIBOLOGICAL BEHAVIOR IN METAL FORMING AND 3D SURFACE ANALYSIS OF ROUGHNESS PATTERN

Abstract

Nowadays an overall optimization of metal forming processes does not only regard the mechanical properties, but is increasingly focused on tribological parameters of forming processes; therefore, the contact conditions and the surface treatment at tool-workpiece interface is growing considerably in importance. In this work three different surface textures of an aluminum alloy Al 6016-T4 were characterized by 2D and 3D surface analysis methods, and based on an experimental method that allows the measurement of the friction coefficient in dependence on the normal stress and relative sliding length. The effects of the workpiece surface topography on the friction at the tool-workpiece interface were investigated.

Keywords: Surface, Friction, Aluminum, Metal Forming