

# MICROCONFORMAÇÃO

Gabriela Gualberto  
Juan Carlos Campos Rubio  
Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Usinagem e Automação  
Campus Pampulha, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG. Cep: 31270-901

Emil Egerer  
University of Erlangen – Nuremberg, Egerlandstr. 11, 91058 Erlangen, Germany

**Resumo:** *A atual tendência à miniaturização de sistema tem levado a indústria a desenvolver novos processos capazes de produzir peças de tamanho reduzido com rugosidade e tolerâncias reduzidas. Exemplos importantes da utilização de micro-componentes são os pinos para montagem de C.I., rebites, micro-parafusos, elementos de conexão, conectores elétricos e mecânicos, entre outros. Neste trabalho será tratado o processo de extrusão lateral em matriz de diâmetro da ordem de 500  $\mu\text{m}$ . A principal motivação é a de analisar e discutir a conformabilidade de peças produzidas por este processo a morno e a frio. Serão ensaiados dois tipos de materiais, X4CrNi8-10 e CuZn15, e os resultados avaliados através do fluxo de material durante a conformação e do acabamento superficial. A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Manufatura, LFT da Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg na Alemanha.*

**Palavras-chave:** *micro-componentes, conformação, extrusão lateral, precisão.*

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia de micro-sistemas tornou-se mundialmente reconhecida como uma das grandes inovações tecnológicas do século XXI. A disseminação da miniaturização é observada em grande número de aplicações desde a biomedicina até a eletrônica. Observa-se no mercado uma demanda cada vez maior por computadores, telefones celulares e componentes eletrônicos de todas as espécies. A cada dia, estes dispositivos vêm sendo produzidos em menor tamanho para proporcionar maior comodidade e portabilidade ao usuário. Por esta razão, aumenta também a necessidade de se fabricar peças que possuam as características adequadas para comporem estes dispositivos. Pode-se citar como exemplos os parafusos, pinos, conectores, rebites, entre outros.

No aspecto técnico, a produção de tais peças por processo de conformação micrométrica apresenta um ganho em função da funcionalidade do processo, além de garantir uma diminuição de consumo de energia e de uso de material, representando também economia de tempo.

Apesar do grande aumento de demanda, e das grandes vantagens tecnológicas proporcionadas, não se observa na indústria uma ampla utilização de processos de conformação de micro-peça. Isto se deve às poucas pesquisas tecnológicas já desenvolvidas na área. Por serem estes, processo em escala micrométrica, os estudos e resultados observados em conformações macrométricas não podem ser transpostos, devido à baixa proporção entre o tamanho das peças e dos grãos que formam a estrutura interna destas. Segundo Engel e Egerer <sup>(1)</sup>, por este motivo o estudo do comportamento de diversos parâmetros, como fluxo do material durante a deformação, rugosidade, conformabilidade e temperatura durante as conformações de tais peças mostra-se de suma importância, justificando o presente trabalho.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo analisar e discutir a conformabilidade de micro-peças produzidas em ligas X4CrNi18-10 e CuZn15, conformadas a 300°C e a 20°C, analisando o fluxo de material durante a conformação e o acabamento superficial destas. O processo de conformação escolhido foi a extrusão lateral. Estas peças são produzidas através de blanks que possuem em média 500 $\mu\text{m}$  de diâmetro. A pesquisa foi desenvolvida nos laboratórios do Departamento de Engenharia de Manufatura, LFT da Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg na Alemanha.

## Conformação micrométrica ou microconformação

Chama-se de conformação micrométrica, a produção de peças metálicas que apresentem pelo menos duas de suas dimensões no tamanho submilimétrico, estas chamadas então de micro-peças.

A conformação micrométrica é uma nova tecnologia utilizada para produzir pequenas peças metálicas. Segundo Egerer e Engel <sup>(2)</sup>, quando comparada a outras tecnologias, a conformação micrométrica apresenta grandes vantagens econômicas, ecológicas, além de permitir a produção de peças com excelentes propriedades mecânicas. Apesar disto, ainda são poucas as aplicações desta nova tecnologia nos dias de hoje.

### Problemas no mundo micrométrico

Os problemas apresentados nas conformações micrométricas são obviamente ligados a problema da própria miniaturização por si. Segundo Geiger et al. <sup>(3)</sup>, para melhor compreensão destes faz-se útil dividir os problemas em quatro grupos.

- Material.
- Processo.
- Ferramentas.
- Máquinas e equipamentos.

Em todas estas áreas efeitos específicos da miniaturização são observados. O comportamento do material é influenciado quando se passa da escala macrométrica para a micrométrica. A tensão de fluxo, ductilidade e os limites da conformação dependem do tamanho da peça ou *blank* e de sua estrutura interna.

Os efeitos provocados no material, obviamente, interferem no processo. Porém, existem efeitos adicionais que também influenciam neste, tais como: forças de conformação, lubrificação, repetibilidade das peças, dispersão dos resultados obtidos.

No que diz respeito ao ferramental, as dificuldades se encontram em fabricar ferramentas que requerem elevada precisão para realizar a operação de conformação. Especialmente em se fabricar os furos centrais nas matrizes de extrusão, que requerem pequenas tolerâncias e alta qualidade superficial.

A maior questão que deve ser resolvida no que se refere ao maquinário utilizado no processo é a precisão requerida em alta velocidade de produção. Uma máquina que produz 300 peças por minuto, com 500µm de diâmetro, deve ser capaz de retirar cada peça da unidade de produção em menos de 0,2 segundo e posicioná-las acima ou abaixo da matriz com grande precisão. Além das dificuldades no manuseio das micro-peças, segundo Egerer e Engel <sup>(2)</sup>.

### Efeitos da miniaturização

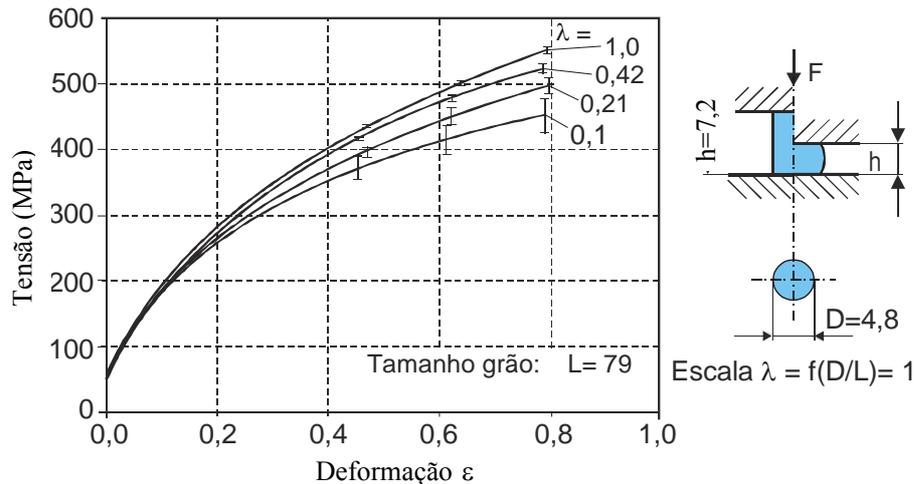
Um efeito muito observado na micro-conformação é o aumento da dispersão à medida que se diminui o tamanho das peças. Isto acontece devido à aleatoriedade da orientação e do tamanho de cada grão que levam o material a se comportar de forma não homogênea (Geiger et al. <sup>(3)</sup>).

Na conformação de metais, os parâmetros mais relevantes que devem ser observados na descrição do comportamento dos materiais são a tensão de fluxo e a curva de fluxo. São estes parâmetros os que controlam as forças durante a conformação; o carregamento da ferramenta e o comportamento do fluxo de material, segundo Geiger et al. <sup>(3)</sup>.

Realizando testes com espécimes de diferentes tamanhos para medir o comportamento do fluxo de material, Geiger et al. <sup>(3)</sup> observaram que a diminuição no tamanho dos corpos de prova provoca, geralmente, a diminuição na tensão de fluxo. Isto pode ser explicado pelo efeito chamado “modelo da superfície livre”, no qual os grãos localizados mais próximos da superfície dos corpos de prova (que não estão completamente circundados por outros grãos), tem seus movimentos de deslocamento menos restritos dos que os localizados no centro destas.

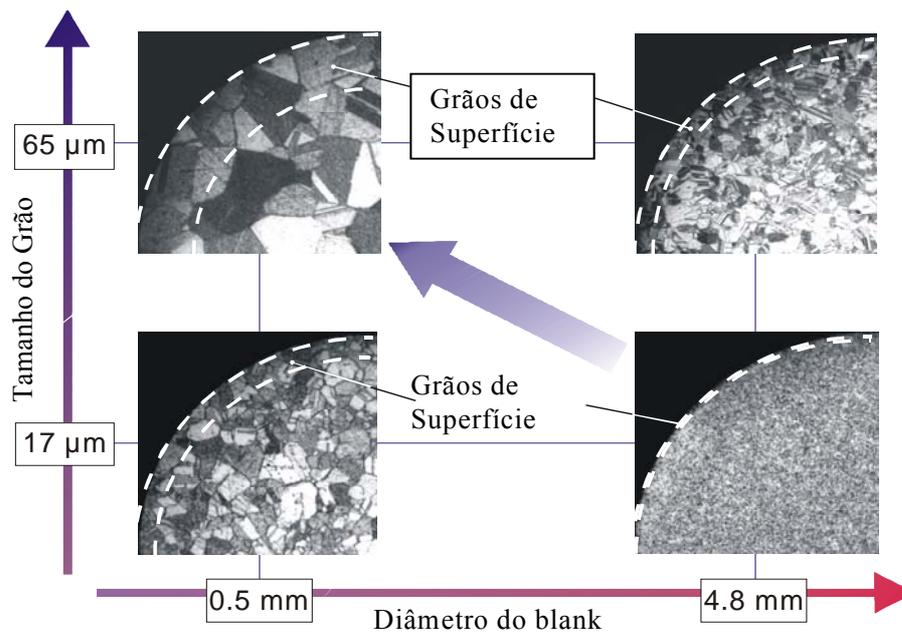
É sabido que grãos de superfície apresentam menor dureza quando comparados aos outros, o que pode ser explicado pelos diferentes comportamentos dos mecanismos de deslocamento e empilhamento. Segundo Geiger et al.<sup>(3)</sup>, o empilhamento durante o deslocamento dos grãos na deformação ocorre nas bordas destes, mas o efeito não é observado nos grãos da superfície livre (borda do espécime). Isto acarreta menor endurecimento e resistência a deformação dos grãos da superfície. Diminuindo o tamanho dos corpos de prova, ou aumentando-se o tamanho dos grãos destes, aumenta-se a proporção entre os grãos na superfície livre da amostra pelo volume total desta, o que leva à diminuição da tensão de fluxo.

A figura 1 ilustra este efeito em uma experiência realizada por Geiger et al.<sup>(3)</sup> utilizando *blanks* de CuZn15 e o mesmo processo de conformação. Variando apenas o diâmetro do *blank*, obteve-se menor tensão de fluxo à medida que se diminuía o tamanho da amostra.



**Figura 1.-** Curva de fluxo de cilindros conformados variando diâmetro do *blank* (Geiger et al.<sup>(3)</sup>).

A figura 2 ilustra o efeito do “modelo da superfície livre”, quando se obtêm estruturas do mesmo material, variando apenas o tamanho do diâmetro do *blank* e o tamanho dos grãos internos do corpo de prova.



**Figura 2.-** Variação da proporção de grãos na superfície livre de corpos de prova em função do tamanho do corpo de prova e do tamanho de grão (Geiger et al.<sup>(3)</sup>).

## Extrusão lateral

Extrusão lateral, segundo Engel et al.<sup>(4)</sup>, é um processo de conformação compressivo onde uma determinada seção transversal será produzida quando um metal é forçado a fluir através de uma matriz aberta, sendo que o material flui no sentido transversal ao movimento do estampo.

### Micro-extrusão lateral

O estado de tensões observado no processo de micro-extrusão lateral, segundo Engel e Egerer<sup>(5)</sup>, é caracterizado por esforços de compressão nos eixos axial e radial, bem como altas tensões nas bordas laterais na área deformada. À medida que o material vai se deformando pela folga localizada entre a matriz superior e o estampo inferior, os esforços de compressão e as tensões tangenciais vão aumentando até atingir seu valor máximo, para depois decair. Se o valor da tensão tangencial atingir níveis muito altos a ponto de igualar-se ao limite de ruptura do material, pequenas trincas (quebras), podem ser observadas nas bordas das peças.

O material tem a vantagem de se deformar sob tensões muito baixas quando comparado às deformações plásticas convencionais, exibindo ótima microconformabilidade. A figura 3 mostra esquematicamente o processo de extrusão lateral e uma micro-peça produzida por este processo.

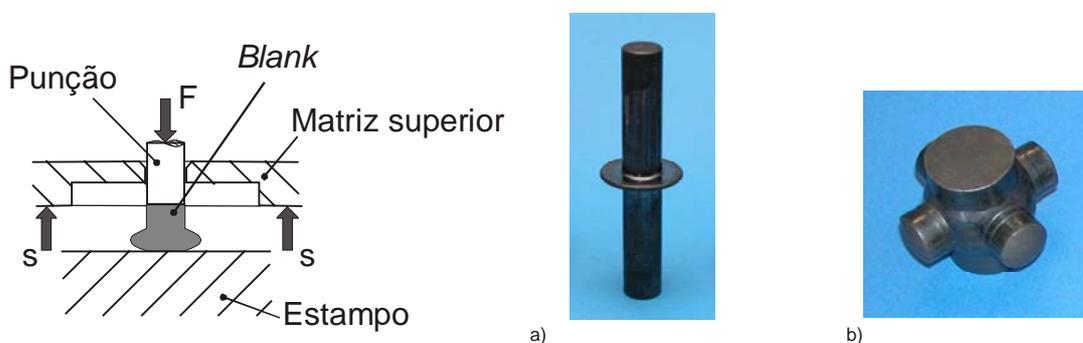


Figura 3.- Processo de Extrusão lateral e peças produzidas por este processo.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Serão produzidas micro-peças por conformação de dois materiais diferentes, de ligas X4CrNi18-10 e CuZn15, conformados a temperatura ambiente de 20°C e a 300°C a partir de *blanks* cilíndricos que sofreram tratamento térmico de recozimento. Após a produção de tais peças, será feita uma análise da conformabilidade, rugosidade e circularidade destas, buscando descobrir como a temperatura de conformação afeta estes parâmetros.

CuZn15 é uma liga muito utilizada em micro-peças destinadas a compor dispositivos microeletrônicos devido as suas favoráveis propriedades mecânicas e elétricas. Por ser composta por uma rede cristalina do tipo CFC (cúbico de face centrada), espera-se obter uma boa conformabilidade durante sua conformação. X4CrNi18-10 é uma liga de aço que oferece boas propriedades mecânicas, sendo por isso amplamente utilizada na produção de micro-peças destinadas ao uso em áreas de tecnologia mecânica e na área médica. Os componentes químicos de ambas ligas, segundo a norma DIN 17660 podem ser observados na tabela 1.

Tabela 1.- Composição química das ligas CuZn15 e X4CrNi18-10, segundo a norma DIN 17660.

CuZn15	Cu	Ni	Sn	Al	Fe	Pb	Outros	Zn
Composição %	84 - 86	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,1	Resto

X4CrNi18-10	Cr	Ni	C	Fe
Composição %	17 - 19	8,5 - 10,5	≤ 0,07	Resto

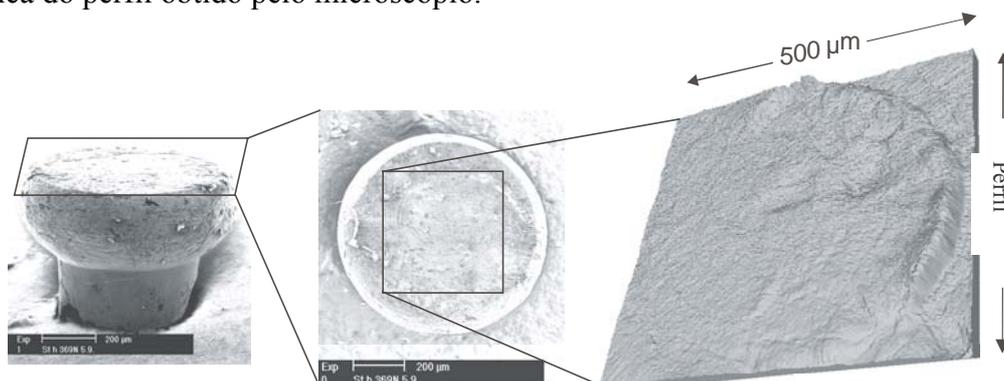
Para todas as experiências descritas neste trabalho foi utilizado um equipamento de teste de compressão e tração da companhia MTS *Synergy GmbH*, modelo *Synergy 100*, que pode ser observado na figura 4. A máquina permite um carregamento máximo de teste de 500N, com resolução de 0,01N. A velocidade de avanço do punção pode variar entre 0,001 mm/min e 1 mm/min.



**Figura 4.-** Equipamento de ensaio de compressão e tração.

### **Análise da Rugosidade**

Para a medição da rugosidade das peças foi utilizado um microscópio da companhia *NanoFocus*, desenvolvido especialmente para permitir a medida de rugosidade. Devido ao tamanho da peça, não é possível realizar a medida através de apalpadores convencionais que permitem contato direto com a superfície. A medida foi obtida através de um método óptico onde feixes de luz incidem sobre a superfície das peças possibilitando o mapeamento da topografia. O equipamento permite um aumento de 20 vezes com uma resolução vertical de  $30\text{nm}$  e um campo de medidas de  $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ . Foram obtidos cerca de 80 perfis de cada corpo de prova, e a rugosidade foi computada e depois definida através do WinSAM, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia de Manufatura da *Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg*. O programa calcula diversos parâmetros de rugosidade e corrige o erro dos valores obtidos pelo método óptico. Utilizou-se para as medidas 13 peças de X4CrNi18-10 produzidas a  $300^\circ\text{C}$  e 13 produzidas a  $20^\circ\text{C}$  e 8 peças de CuZn15, 4 produzidas a  $20^\circ\text{C}$  e outras 4 manufaturadas a  $300^\circ\text{C}$ . Foi escolhido para análise o parâmetro de rugosidade média  $R_a$ . A figura 5 mostra a forma de obtenção e a característica do perfil obtido pelo microscópio.



**Figura 5.-** Perfil da topografia de uma peça obtida por microscópio óptico.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Análise da conformabilidade do aço X4CrNi18-10

Ao se realizar a extrusão lateral do X4CrNi18-10 a 300°C observou-se um menor carregamento à medida que o punção foi avançando quando comparado com o processo à temperatura ambiente, como se observa na figura 6. O efeito pode ser explicado devido a diminuição do fluxo de tensão necessários para produzir a deformação quando aumentada a temperatura, assim como também ocorre em escala macrométrica. Nenhuma trinca foi então observada em nenhuma das temperaturas.

Devido às condições do equipamento que limita o carregamento máximo em 500N, não foi possível seguir com a deformação a frio. A curva obtida para a deformação a morno parece ser ideal pois se poderia continuar o processo de deformação, sem a necessidade de se aumentar o carregamento, mas isto não pode ser verificado devido ao tamanho do *blank*.

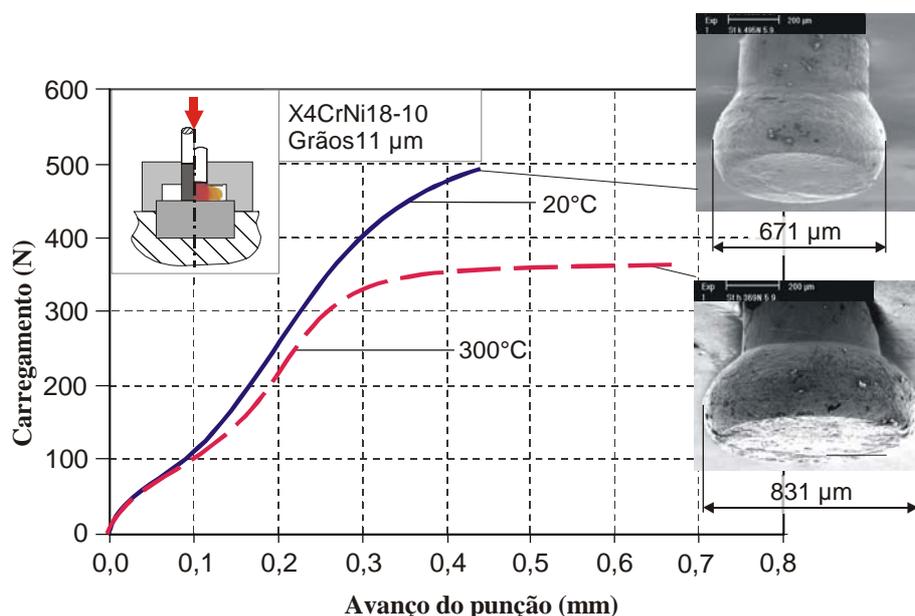
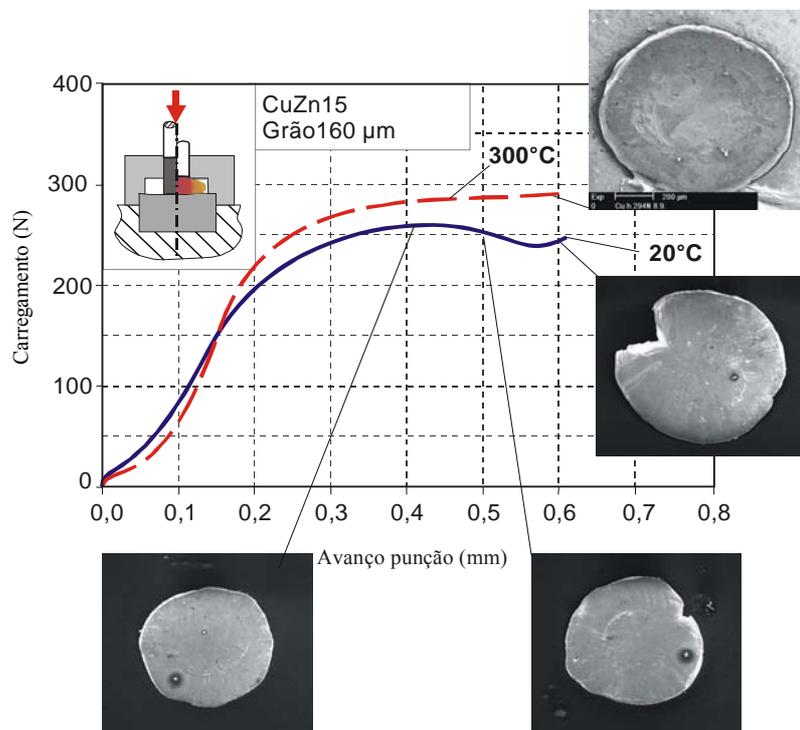


Figura 6.- Curva carregamento versus avanço do punção para o X4CrNi18-10.

#### Análise da conformabilidade da liga CuZn15

O ponto de partida da experiência foi identificar em que ponto do processo começava as trincas nas bordas das peças de CuZn15 produzidas. Para tanto, foram feitos diversos experimentos com diferentes valores de carregamento. No início do processo, a curva de carregamento versus avanço do punção é praticamente linear e sua inclinação vai diminuindo gradualmente até se tornar paralela ao eixo e começar a apresentar uma inclinação negativa. E neste ponto de paralelismo que se iniciam as trincas. Comparando o processo a frio e a morno, na figura 7, pode-se observar que no início as curvas são praticamente idênticas. Mas, à medida que o punção vai avançando, o carregamento observado na peça produzida a 300°C é maior do que o da peça a 20°C, o que não acontece na escala macrométrica, onde a tensão é menor a temperaturas mais altas. Não há decremento do carregamento, portanto, não é constatada nenhuma trinca na amostra final de 300°C, diferente do que acontece com as peças produzidas a 20°C, onde são observadas trincas.

Isto pode ser explicado pelo aumento do efeito adesivo, a 300°C, entre o CuZn15 e o material do punção que é de tungstênio com carbono. Devido à não diminuição da força durante o processo a morno, pode-se supor que maior deformação poderia ser obtida, no entanto devido a limitações do processo, como por exemplo, as dimensões do *blank*, não é possível comprovar esta previsão.



**Figura 7.-** Curva carregamento versus avanço do punção para a liga CuZn15.

### Análise da Rugosidade

Depois de processados pelo programa WinSAM, os dados sobre a rugosidade média das peças foram armazenados, e alguns deles são apresentados na tabela 2, onde são apresentados os valores das médias dos valores de Ra e sua dispersão percentual.

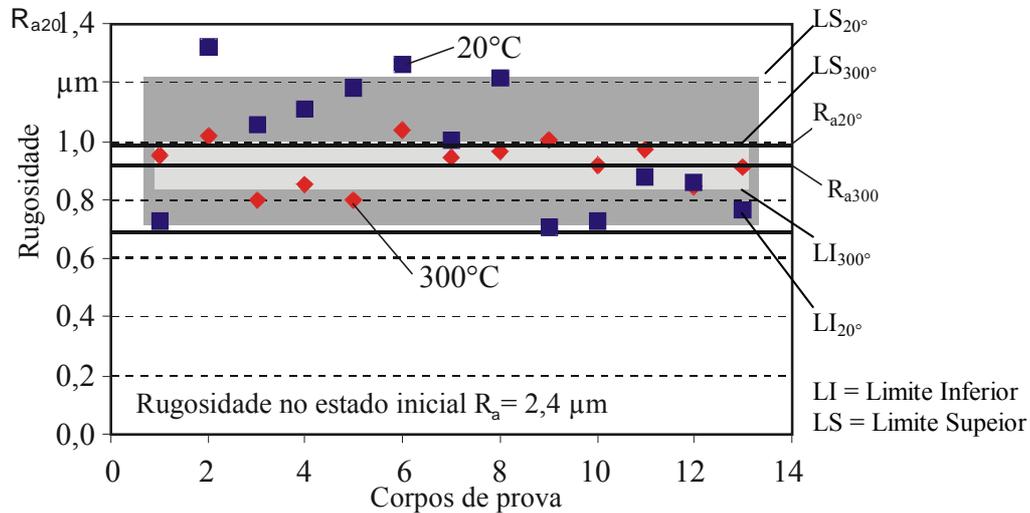
**Tabela 2** Rugosidade das peças de CuZn15 e X4CrNi18-10 produzidas a 20 e 300°C.

Material**	Temperatura (°C)	Valores de Rugosidade média Ra (µm)				Média (µm)	Dispersão
CuZn15	300	0,72	0,64	0,55	0,78	0,68	10%
CuZn15	20	0,77	0,93	0,74	0,80	0,81	8 %
X4CrNi18-10	300	0,95	1,01	0,80	0,85	0,92	8%
X4CrNi18-10	20	0,72	1,32	1,06	1,11	0,99	22%

\*\*Rugosidade Inicial Ra=2,4 µm

A partir dos dados obtidos, calculou-se o valor médio da rugosidade e a dispersão destes tanto para o X4CrNi18-10, quanto para o CuZn15. No caso do X4CrNi18-10, observou-se uma diminuição do valor da rugosidade, quando realizada a deformação a morno. Para o caso do aço a média observada foi  $R_a = 0,99\mu\text{m}$  para as peças produzidas a 20°C e  $R_a = 0,92\mu\text{m}$  para as manufaturadas a 300°C. Já no caso do CuZn15 os valores foram  $R_a = 0,81\mu\text{m}$  para peças a frio e  $R_a = 0,68\mu\text{m}$  para peças a morno. No entanto, a diminuição não é considerável a ponto de poder-se afirmar que a temperatura influencia este parâmetro do processo. Outro fator relevante para se chegar a esta conclusão é a dispersão observada nos valores das medidas tanto para as peças produzidas a frio quanto a morno, ambas ultrapassam os limites inferiores e superiores marcados no gráfico (figura 8). Para o X4CrNi18-10 observou-se que a dispersão diminui de 22,3% para 9,7% quando realizada a operação a morno, o que poderia garantir uma maior repetibilidade de resultados. Quando observada a dispersão dos resultados, pode-se concluir que ambas pertencem à

mesma população amostral, uma vez que o limite inferior e superior da rugosidade das peças conformadas a 20°C engloba todos os resultados observados para a rugosidade das amostras conformadas a 300°C. Já no caso do CuZn15, a dispersão foi praticamente a mesma, sendo de 8% para as peças manufaturadas a 20°C e de 10% para as produzidas a 300°C, mas não é possível julgar a interferência da temperatura neste caso. Seria necessário fazer os testes com maior número de amostras para se obter um resultado mais seguro.



**Figura 8.-** Valores de  $R_a$  obtidas para peças em X4CrNi18-10 produzidas a 20°C e 300°C.

#### 4. CONCLUSÕES

Utilizando o processo de extrusão lateral é possível estudar o efeito da temperatura na conformabilidade e rugosidade de micro-peças produzidas em X4CrNi18-10 e CuZn15, que como já citado neste trabalho possui características diferentes das conformações macrométricas convencional.

Ao examinar o processo de deformação das peças, pode-se observar que no caso do X4CrNi18-10, a tensão necessária para a deformação foi menor quando conformado a 300°C. Como no caso do CuZn15, poderia-se esperar maior deformação das peças. Quando conformadas a 20°C as peças não apresentaram grandes deformações, pois era necessário maior carregamento para que isso acontecesse. O que não foi possível devido às limitações da máquina.

As liga CuZn15 conformadas a 20°C apresentaram rachaduras. Indicando que a curva tensão versus deformação atingiu o limite de ruptura do material. Já quando as peças foram conformadas a 300°C, a tensão necessária para se deformar foi maior, não ocorrendo diminuição do carregamento, o que permitiria que se obtivesse maior deformação, se não fossem os limites do processo. Este comportamento se difere do observado na conformação macrométrica, onde as tensões são menores quando se aumenta a temperatura de processamento.

Realizando experimentos para a medida da rugosidade das peças produzidas a frio e a morno, observou-se que a temperatura não tem grande influência no parâmetro. Para o caso do CuZn15 os valores obtidos foram  $R_a = 0,68\mu\text{m}$  para 300°C e  $R_a = 0,81\mu\text{m}$  para 20°C. Apesar da diminuição, estes números não permitem determinar o efeito real da temperatura sobre a rugosidade, pois seria necessário maior número de amostras para um resultado mais confiável. No caso do X4CrNi18-10, os valores foram  $R_a = 0,92\mu\text{m}$  para peças produzidas a 300°C e  $R_a = 0,99\mu\text{m}$  para as produzidas a 20°C. O que se pode concluir é que conformando a morno, pode se obter maior reproducibilidade do processo. O resultado foi bastante positivo, pois quando se trabalha a frio, o acabamento superficial é geralmente melhor do que quando se processa a maiores temperaturas. Isto não foi observado nos experimentos. Portanto, deformando a morno, mantém-se o mesmo padrão de rugosidade superficial.

Conclui-se pelas experiências realizadas que a conformação de micro-peças pelo processo de extrusão lateral realizada a morno melhora todos os parâmetros do processo estudados no caso do X4CrNi18-10. Apesar de certas dificuldades na sua execução, devido à temperatura de trabalho e do maior tempo gasto para a produção de peças, é recomendado o uso da conformação micrométrica a morno. No caso do CuZn15, seriam necessários maiores estudos para se obter conclusões mais precisas.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia de Manufatura da LFT da Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg pelo auxílio na realização deste trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS

1. ENGEL, U.; EGERER, E.: Basic research on cold and warm forging of microparts. **Materials Engineering**, 2002, p. 449-455.
2. EGERER, E.; ENGEL, U.: Process Characterization and Material Flow in Micro-forming at Elevated Temperatures: **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 5, N°1, 2004.
3. GEIGER, M.; KLEINER, M.; ECKSTEIN, R.; TIESLER, N.; ENGEL, U.: Microforming. **Annals of the CIRP**, Vol.50/2, p. 445-462, 2001.
4. ENGEL, U.; EGERER, E.; GEIGER, M.: Production of Microparts by Cold and Warm Forming. **Annals of the CIRP: SEMINAR ON MICRO AND NANO TECHNOLOGY**, 2003, Technical University Copenhagen, Dinamarca, Novembro 13-14, 2003.
5. ENGEL, U.; EGERER, E.: Material behavior in microforming at elevated temperature. In: **ASPE "WINTER TOPICAL MEETING 2003"**, Gainesville (USA), 2003.

## MICROFORMING

Gabriela Gualberto e Juan Carlos Campos Rubio  
Universidade Federal de Minas Gerais - Laboratório de Usinagem e Automação  
Campus Pampulha, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG. Cep: 31270-901

Emil Egerer  
University of Erlangen – Nuremberg, Egerlandstr. 11, 91058 Erlangen, Germany

**Abstract:** *The current trend to the miniaturization of system has led the industry to develop new processes capable to produce parts of reduced size with low roughness and tolerances. Important examples of the use of micro components are the bolts for assembly of integrated circuits., rivets, micro screws, electric and mechanical elements of connection, connectors, among others. In this work, was chosen the lateral extrusion process using dies with diameter of 500 µm. The main motivation was to analyse and to discuss the formability of parts produced through this process in warm and in cold. Two types of alloys (X4CrNi18-10 and CuZn15) were tested, and the results evaluated based on material flux and surface finishing. It was concluded that when warm process was carried out, the evaluated parameters were better or similar comparing to the cold conformation. The research was developed in the laboratories of the Department of Manufacture Engineering of the Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg in Germany.*

**Keywords:** *micro devices, forming, lateral extrusion, precision.*