

## ROLETEAMENTO PROFUNDO DE VIRABREQUINS

**Eduardo Francisco Maran Bueno, [eduardomaran@yahoo.com.br](mailto:eduardomaran@yahoo.com.br)<sup>1</sup>**  
**Walter Lindolfo Weingaertner, [wlw@lmp.ufsc.br](mailto:wlw@lmp.ufsc.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário – Trindade, Dpto de Engenharia Mecânica (EMC), Laboratório de Mecânica de Precisão(LMP), Bloco B. Cep: 88040-970 – Florianópolis – SC.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário – Trindade, Dpto de Engenharia Mecânica (EMC), Laboratório de Mecânica de Precisão(LMP), Bloco B. Cep: 88040-970 – Florianópolis – SC.

**Resumo:** Nos últimos anos, novas pesquisas sobre o processo de roleteamento profundo e suas variáveis despontaram em virtude do interesse crescente da indústria automotiva sobre o assunto. Os estudos são direcionados segundo três grandes frentes de análise: Modelos Matemáticos, Simulações Numéricas Computacionais e Testes Práticos. Dentre os estudos desenvolvidos, aqueles que contemplam modelos matemáticos, simulações numéricas computacionais e aqueles que mesclam ambas ferramentas de estudo são mais amplamente investigadas pelos autores, ficando a encargo dos operadores fabris o fornecimento do “feedback” sobre os resultados práticos obtidos. Motivado pela necessidade de um melhor entendimento sobre o processo, foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-UFSC), um equipamento de roleteamento profundo. O mencionado equipamento foi contemplado de forma a possibilitar o controle dos parâmetros de entrada, tais como velocidade de rotação do virabrequim, força de roleteamento e número de revoluções. Os referidos dados, propiciarão a verificação da influência de cada parâmetro sobre as características finais do componente, permitindo assim um melhor entendimento sobre o tema e facilitando o controle das variáveis em prol da otimização do processo.

**Palavras-chave:** Roleteamento Profundo, Virabrequim, Fadiga

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de roleteamento profundo é amplamente utilizado na indústria automotiva com o objetivo de elevar a resistência à fadiga de componentes submetidos a tensões alternantes. Tal elevação da resistência se dá pela inserção de tensões residuais compressivas em camadas na subsuperfície do material, encruando e melhorando o acabamento nas regiões onde o efeito concentrador de tensões é mais evidente (Chien, Pan, Close, e Ho, 2005).

Para o caso específico do virabrequim, a região crítica apontada está localizada nos raios de concordância dos mancais e munhões do componente outrora mencionado, Fig. (1).

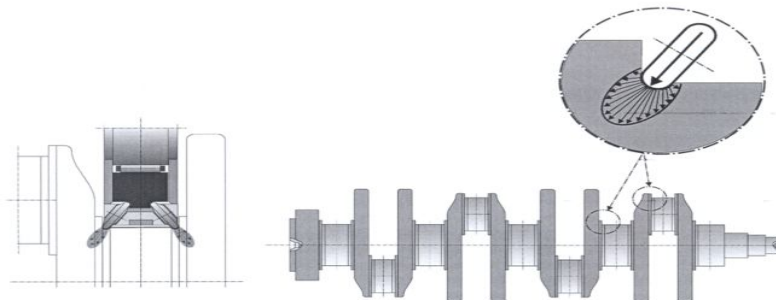


Figura 1 – Região de roleteamento profundo nos virabrequins (Hegenscheidt, 2005)

Durante a operação de roleteamento profundo, a ferramenta move-se de forma circundante ao longo do raio de concordância, utilizando uma pressão de contato com intensidade suficiente para provocar a deformação plástica parcial da região trabalhada (Hegenscheidt, 2005).

A deformação plástica ocasionada durante o processo infere nos seguintes resultados requeridos:

- Aumento da dureza na superfície do material;
- Inserção de tensões compressivas internas;
- Melhoria da qualidade na superfície.

Tais subprodutos da operação conferem ao virabrequim características favoráveis para sua operação. Dentre elas, o aumento da resistência à fadiga apresenta maior significância para o presente estudo, sendo os efeitos da inserção de tensões residuais de compressão, principal vetor para a relatada característica.

## 2. ESTADO DA ARTE

O estudo das variáveis que atuam sobre o processo de roleteamento profundo, é fator preponderante para o entendimento amplo das propriedades finais obtidas no componente. Dessa forma, parâmetros de entradas como força de roleteamento, número de revoluções do virabrequim, geometria do rolete-ferramenta e dimensão do raio de concordância são alguns dos elementos a serem estudados em busca da otimização do processo em questão.

### 2.1. Força de Roleteamento

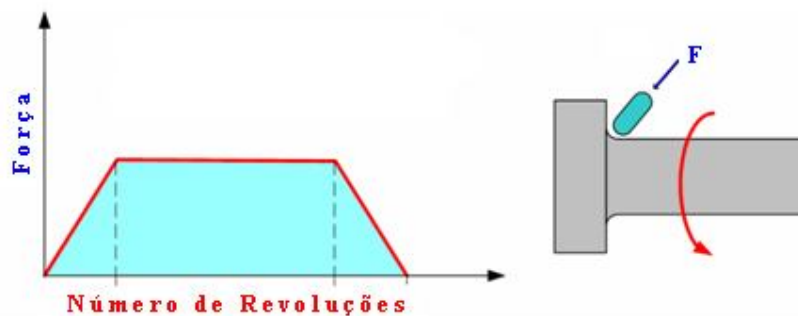


Figura 2 - Cinemática do processo de roleteamento de virabrequins (Casarin, 2007)

A Figura (2) descreve o modo de aplicação da força no processo de roleteamento profundo. No início da operação, a força de roleteamento tem sua intensidade elevada gradualmente até um valor nominal predeterminado, em um dado intervalo de tempo ou número de revoluções. Após atingir este nível, mantém-se a força constante durante um número estabelecido de rotações do virabrequim. Por fim, a força é reduzida gradualmente.

Como resultado do aumento da força de roleteamento, observa-se um aumento da vida do componente, Fig. (3). Entretanto, após atingir um valor máximo de força, a vida do componente novamente tende a diminuir.

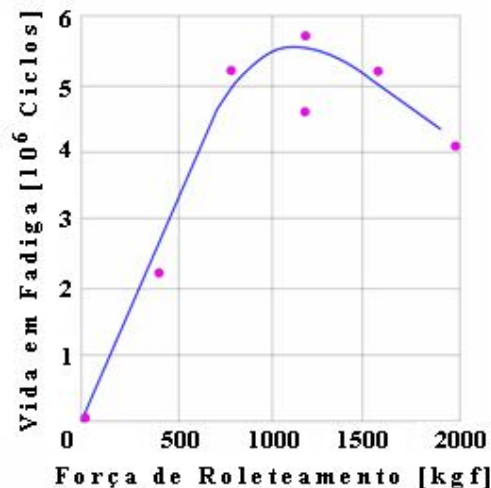


Figura 3 - Influência da força de roleteamento sobre a vida em fadiga (Wright, Willn e Love, 1964)

### 2.2. Número de Revoluções

No processo de roleteamento distinguem-se os ciclos de revoluções pelas etapas de aplicação de força referidas no tópico anterior. O número de rotações da peça em cada um dos ciclos é função do material e da geometria do componente. Como exemplo típico do número de revoluções no processo pode-se citar o roleteamento 6 – 10 – 6, ou

seja, seis rotações até atingir a força máxima, dez rotações em força máxima constante e mais seis rotações no sentido de redução da força, até atingir o seu valor mínimo (Casarin, 2007).

O número de revoluções utilizado é menos crítico que a influência da força de roleteamento aplicada. Entretanto, vale observar que a primeira revolução da ferramenta em torno do componente, sob a aplicação de uma força constante, já apresenta uma influência significativa sobre o aumento da resistência à fadiga da peça, como demonstrado na Fig. (4).

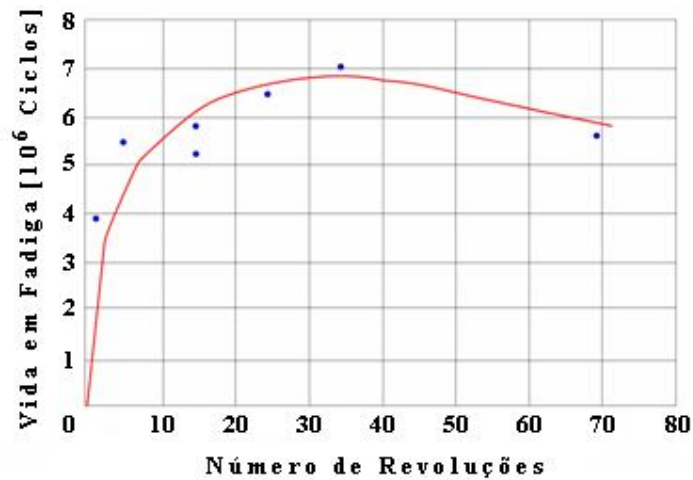


Figura 4 - Influência do número de rotações sobre a vida em fadiga de um componente de ferro fundido no processo de roleteamento (Wright, Love e Nixon, 1960)

### 2.3. Raio de Concordância e Ferramenta de Roleteamento

As características macro e micro-geométricas do raio de concordância do virabrequim merecem atenção quando da especificação do projeto de fabricação. A dimensão do raio de concordância influencia a resistência à fadiga do virabrequim. De acordo com *Wright et al* (1960), melhores resultados de vida em fadiga são obtidos no roleteamento de componentes com pequeno raio de concordância, como demonstrado na Fig. (5).

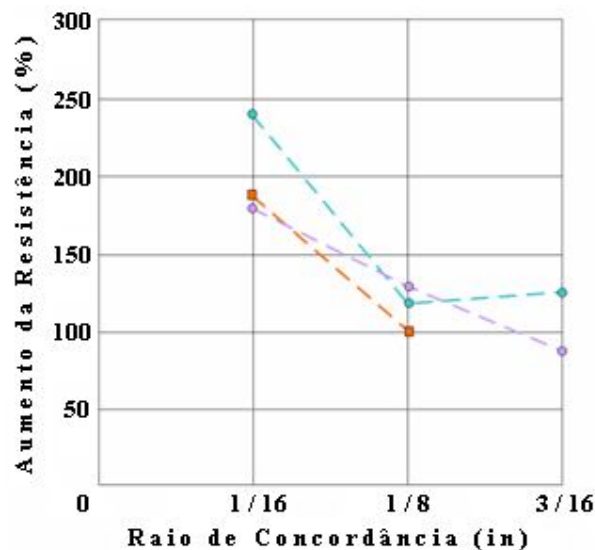


Figura 5 – Efeito do tamanho do raio de concordância sobre a resistência à fadiga (Wright, Love e Nixon, 1960)

Já a geometria dos roletes deve ser adequada à operação de roleteamento desejada. O raio do rolete deve ter um valor menor do que o raio de concordância do virabrequim. Isto é necessário para que não ocorra o travamento dos roletes e sua conseqüente quebra.

## 3. EQUIPAMENTO DE ROLETEAMENTO PROFUNDO

Para abranger o estudo amplo do processo, foi desenvolvido no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP-UFSC) um Equipamento de Roleteamento Profundo, Fig. (6).

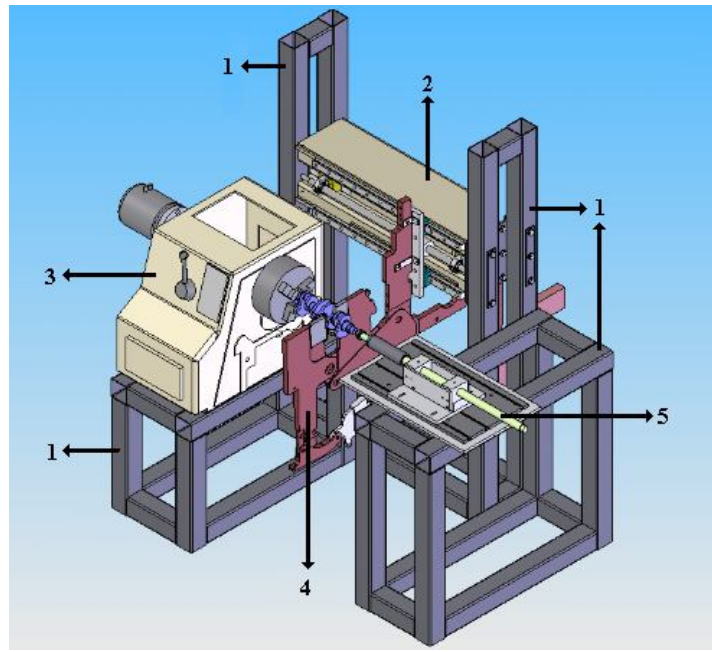


Figura 6 – Equipamento de Roleteamento Profundo (Casarin, 2007)

O equipamento é composto pelas seguintes partes acompanhadas de suas funcionalidades:

- 1 – **Estrutura**: confere rigidez ao equipamento e proporciona sustentação às demais partes;
- 2 – **Base de Deslocamento**: propicia o deslocamento lateral do braço de roleteamento profundo;
- 3 – **Cabeçote Principal**: responsável pela fixação e revolução do virabrequim durante o processo;
- 4 – **Braço de Roleteamento Profundo**: realiza a operação de roleteamento profundo propriamente dita, mediante a atuação de sistemas diversos;
- 5 – **Contraponto**: confere estabilidade ao virabrequim durante o processo;
- 6 – **Unidade Hidráulica Principal\***: habilita o sistema hidráulico do braço de roleteamento;
- 7 – **Unidade Hidráulica Secundária\***: habilita o sistema hidráulico do cabeçote principal;
- 8 – **Unidade Pneumática\***: alimenta o sistema pneumático do braço de roleteamento;
- 9 – **Painel Elétrico\***: comporta os componentes elétricos, eletrônicos e de controle do equipamento;
- 10 – **Unidade Computacional\*\***: Ajusta os dados de entrada e armazena as respostas obtidas durante o processo.

Tal equipamento permite o controle dos parâmetros observados no processo usual. A seguir, algumas das funções pertinentes ao maquinário são abordadas sob formas gerais.

### 3.1. Sistema de Abertura/Fechamento do Braço de Roleteamento Profundo

Antes de iniciar a aplicação da força de roleteamento, é necessário que o braço posicione as ferramentas sobre a região de trabalho, imprimindo sobre o corpo a denominada “Força de Contato”. Para que isso ocorra, um cilindro hidráulico posicionado na parte frontal do braço é acionado, propiciando a movimentação da alavanca primária mediante o avanço/reco do êmbolo do cilindro. Tal movimentação resulta na abertura ou no fechamento da garra de roletagem, determinando respectivamente, a posição estacionária ou a posição de contato no braço, Fig. (7).

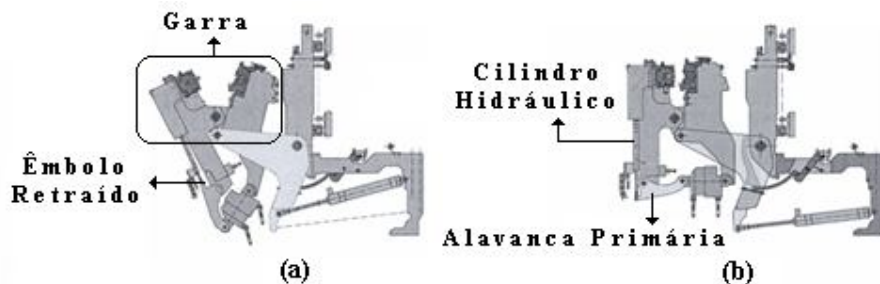


Figura 7 – Posição estacionária (a) e de contato (b) (Adaptado de Hegenscheidt, 2005)

\* Partes não contempladas na Figura 6 (Equipamento de Roleteamento Profundo).

\*\* Em fase de implementação.

A posição estacionária é caracterizada pelo relaxamento do cilindro hidráulico e da alavanca primária, Fig. (7a), enquanto a posição de contato define a atuação de ambos, bem como o posicionamento dos roletes de apoio e roletes-ferramenta sobre o raio de concordância do virabrequim, Fig. (7b) e Fig. (8).

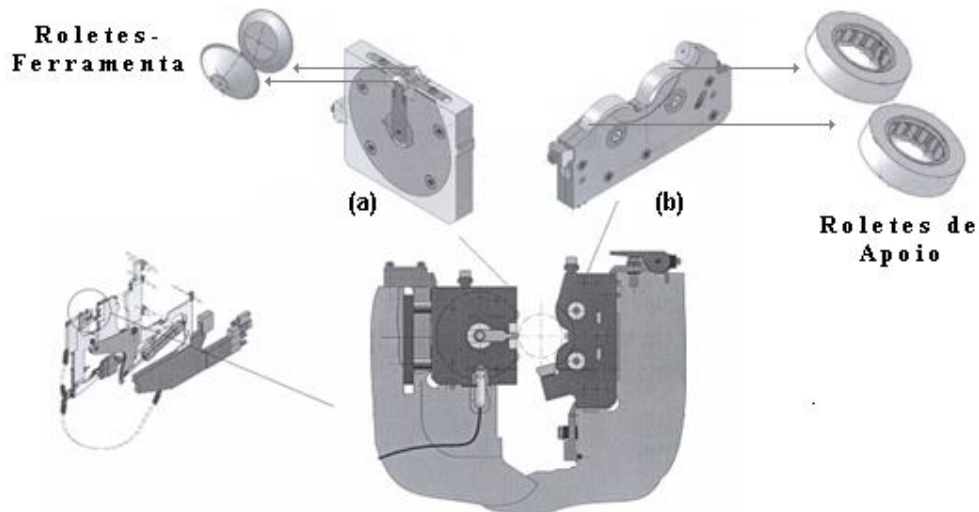


Figura 8 – Cabeçote de Roleteamento Profundo (a) e Cabeçote de Apoio (b) (Adaptado de Hegenscheidt, 2005)

Os roletes-ferramenta atuam diretamente no processo de roleteamento profundo, realizando a conformação dos raios de concordâncias nos munhões e mancais do virabrequim. São os responsáveis diretos pela inserção da tensão residual de compressão no componente.

Já os roletes de apoio dão estabilidade ao virabrequim durante o processo, evitando que o mesmo se desloque pela atuação da força de roleteamento, impelida pelos roletes-ferramenta. Tal deslocamento ocasionaria a ineficiência da força aplicada, impedindo que o limite de deformação plástica requerido do material fosse alcançado.

### 3.2. Sistema de aplicação/Medição da Força

A força de roleteamento apresenta grande importância sobre o processo. Pequenas variações na sua intensidade geram resultados finais distintos sobre o componente roletado. Assim, um controle preciso sobre essa variável é imprescindível para o estudo fino da operação. No equipamento fabricado, o sistema de aplicação da força de roleteamento está inerente ao braço e é composto por uma gama diversificada de componentes, Fig. (9).

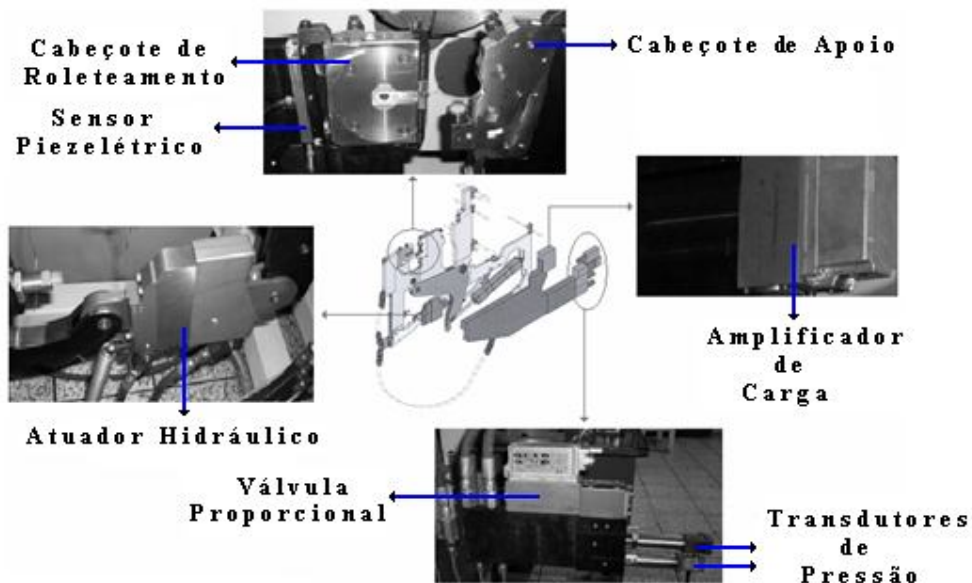


Figura 9 – Fotos pontuais dos componentes do sistema de aplicação/medição de força

Todos os componentes demonstrados na Figura 9 apresentam grande relevância no sistema de aplicação e medição da força empregada sobre os mancais e munhões do virabrequim.





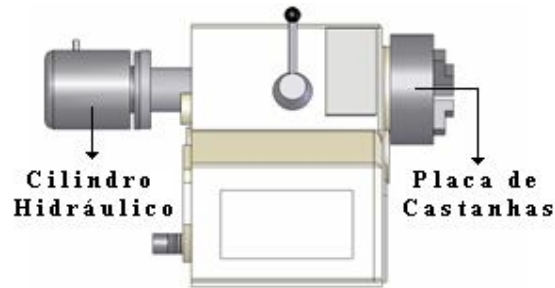


Figura 11 – Componentes responsáveis pela fixação do virabrequim

A fixação do virabrequim ocorre através do acionamento de uma válvula direcional manual, tipo alavanca, situada na parte frontal do equipamento. Tal alavanca habilita a abertura/fechamento da placa de castanhas através do cilindro hidráulico de duplo efeito demonstrado na Fig. (11).

O controle da velocidade é realizado pelo servoconversor SCA 05 da WEG, que opera com altíssima precisão o servomotor do equipamento, Fig. (12). Ambos os componentes são os responsáveis diretos pelo acionamento do cabeçote principal.

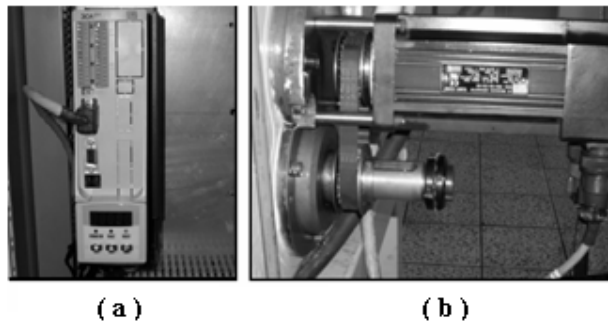


Figura 12 – Componentes responsáveis pelo acionamento do cabeçote principal: (a) servoconversor e (b) servomotor.

O Servoconversor pode ser programado via IHM ou via computador, já que o mesmo apresenta comunicação serial. Esse tipo de dispositivo permite ao operador o controle exato sobre o posicionamento, a velocidade e a aceleração do eixo servomotor. A dinâmica de acionamento obedece a seqüência demonstrada na Fig. (13).

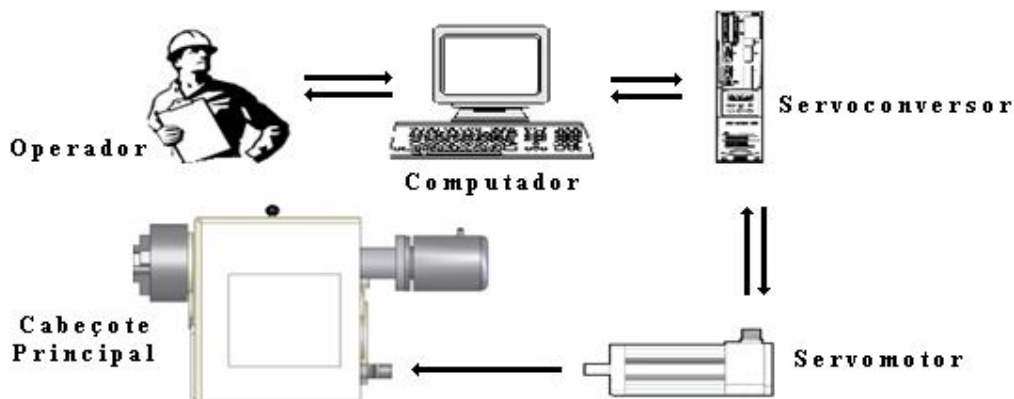


Figura 13 – Controle da velocidade/rotação da placa de castanhas

Como demonstrado na figura acima, o operador é o responsável pelo ajuste da velocidade de rotação, da rampa de aceleração/desaceleração e do número de revoluções requeridas no processo. Uma vez referenciada no computador, o "software" repassa a informação ao servoconversor que comanda o funcionamento do servomotor. Este último, por conseguinte, realiza a rotação do eixo primário do cabeçote através de um conjunto de polias. Conhecendo a relação de transmissão de rotação do eixo primário para a placa de castanhas tem-se a quantificação da velocidade de rotação do virabrequim durante o processo de roleteamento.

Ainda no sistema mencionado, há a constante averiguação dos parâmetros do servomotor por parte do SCA 05. Essas informações são apresentadas ao operador por interface gráfica na tela do computador, permitindo a visualização instantânea da velocidade de rotação do virabrequim e do número de revoluções imprimido sobre o mesmo.

### 3.4. Sistema de Compensação do Movimento Excêntrico dos Munhões do Virabrequim

Como mencionado anteriormente, o processo de roleteamento aplica tensões de compressão sobre o raio de concordância dos mancais e munhões do virabrequim. Como a operação não se restringe apenas aos mancais, o braço de roletagem deve apresentar condições que permitam o acompanhamento do movimento excêntrico característico dos munhões, para que a conformação dos concentradores de tensão dessa região seja efetuada.

Para solucionar essa problemática, o braço de roleteamento dispõe de um cilindro pneumático para suavizar o movimento que o braço imprime sobre a alavanca secundária quando um dos munhões está sendo processado, Fig. (14).

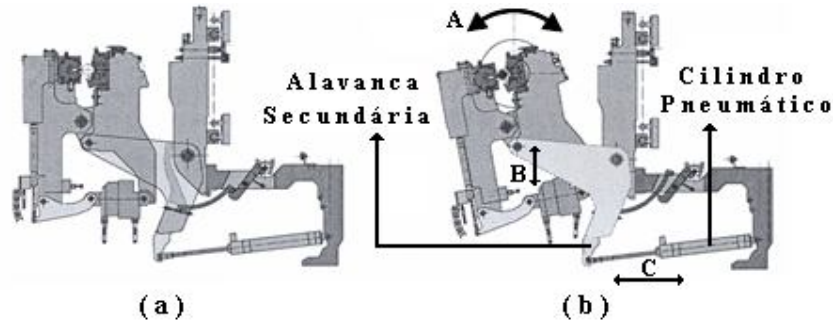


Figura 14 – Posição do braço no roleteamento em (a) mancais e (b) munhões de virabrequins (Adaptado de Hegenscheidt, 2005)

No roleteamento profundo de mancais, a alavanca secundária e o cilindro pneumático mantêm-se estáticos enquanto o processo se desenvolve. Já na usinagem dos munhões ocorre a movimentação (seta A) do braço em decorrência da excentricidade apresentada pela parte roletada, durante a rotação do virabrequim. O mencionado movimento excêntrico resulta no deslocamento da alavanca (seta B) que é compensada e absorvida pelo cilindro pneumático posicionado na parte posterior do braço (seta C).

### 3.5. Sistema de Limpeza da Região Trabalhada

O processo de usinagem que antecede a roletagem não possui a finalidade de gerar acabamento na superfície do virabrequim. Sendo assim, quando o virabrequim entra na estação de roleteamento profundo, sua superfície apresenta picos de rugosidade, característicos do processo anterior. Durante a roletagem do raio de concordância esses picos são conformados pelos roletes-ferramentas e, em decorrência da força aplicada, ocorre a ruptura de alguns dos cumes mencionados. O material liberado durante a ruptura pode se alojar na região de trabalho, ocasionando a perda da qualidade na superfície do componente e a deteriorização da ferramenta de trabalho.

Para que as desconformidades acima não sejam inseridas, o equipamento de roleteamento profundo apresenta um sistema de limpeza sobre a região trabalhada, Fig. (15).



Figura 15 – Sistema de limpeza da região trabalhada

Assim, com a alimentação contínua de ar comprimido sobre o componente, o material desprendido é instantaneamente expulso da região de trabalho, eliminando a influência dos resíduos sobre a qualidade final da peça.

### 3.6. Equipamento Completo

Como mencionado anteriormente o equipamento ainda dispõe de duas unidades hidráulica, unidade pneumática, painel elétrico e uma unidade computacional. Todas as partes mencionadas são contempladas na Fig. (16), que apresenta o equipamento de roleteamento profundo implantado no LMP na sua forma final.



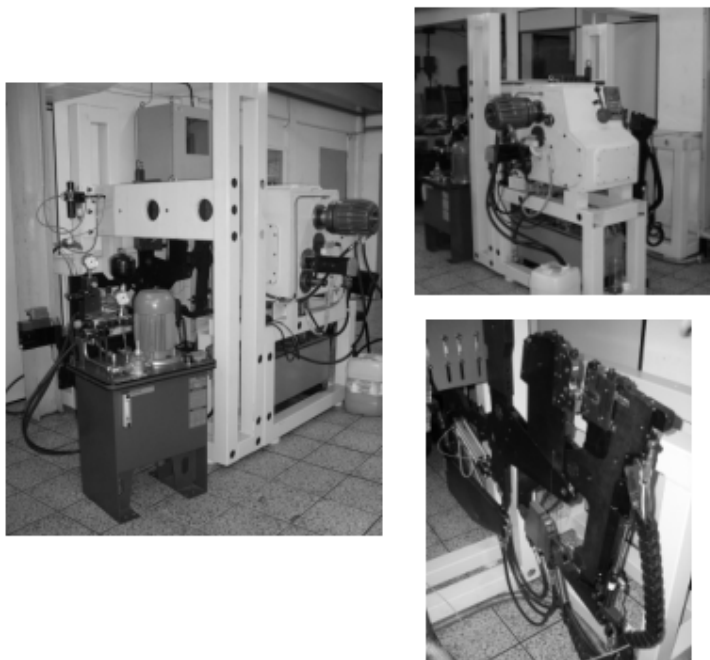


Figura 16 – Equipamento de roleteamento profundo fabricado

#### 4. CONCLUSÕES

Os autores do presente artigo optaram por uma abordagem funcional do Equipamento de Roleteamento Profundo, fabricado no LMP, por entenderem que a multidisciplinariedade envolvida no processo construtivo já representa por si só uma experiência digna de ser compartilhada no meio acadêmico. Apesar do projeto não abordar, em um primeiro momento, testes efetivos em corpos de prova, entende-se que o presente feito apresentará grande relevância para a elucidação do processo como um todo, principalmente em virtude da quase inexistente literatura aprofundada sobre o assunto.

A gama de recursos propiciada pelo equipamento fomentará a análise ampla das variáveis envolvidas no processo, inferindo na possibilidade de validação de modelos e simulações matemáticas publicadas anteriormente sobre o assunto em questão.

Além disso, com a validação do equipamento de roleteamento, o laboratório passa a dispor de uma estrutura capaz de reproduzir as condições de trabalho encontradas na linha de produção de virabrequins. Com isso, a parceria entre universidade e indústria e a consequente troca de informações entre pesquisadores e operadores experientes poderá ser estreitada, motivada principalmente pela possibilidade de otimização que uma máquina dedicada única e exclusivamente à pesquisa pode propiciar.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Casarin, Joviano J., 2007, “Roleteamento de Virabrequins”. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina.
- Chien, W. Y., Pan J, Close D, Ho S., 2005, “Crankshaft fatigue crack propagation analysis with consideration of residual stresses”. *Int J Fatigue*.
- Chien, W. Y., Pan, J., Close, D. and Ho, S., 2005, “Fatigue Analysis of Crankshaft Sections Under Bending With Consideration of Residual Stresses”.
- Hegenscheidt – MFD, 2005, “Crankshaft – Deep Rolling and Straightening Machine”, Erkelenz, Germany.
- Ho, S., Lee, Y., Kang, H.T. e Wang, C.G., 2008, “Optimization of a crankshaft rolling process for durability”. *Int J Fatigue*
- Spiteri, P, Ho, S. e Lee, Y, 2006, “Assessment of Bending Fatigue Limit for Crankshaft Sections with Inclusion of Residual Stresses”. *Int J Fatigue*.
- Wright, D. H., Love, R. J. and Nixon, J., 1960, “Improvement of Fatigue Strength by Fillet Rolling – Five Cast Irons and a Cast Steel”. MIRA Report.
- Wright, D. H., Willn, J. E., and Love, R. J., 1964, “Equipment and Techniques for Cold Rolling”. A summary of MIRA work.

## **6. DIREITOS AUTORAIS**

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.  
The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.



**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
*August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil*

## **CRANKSHAFT DEEP ROLLING**

**Eduardo Francisco Maran Bueno, [eduadomaran@yahoo.com.br](mailto:eduadomaran@yahoo.com.br)<sup>1</sup>**  
**Walter Lindolfo Weingaertner, [wlw@imp.ufsc.br](mailto:wlw@imp.ufsc.br)<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário – Trindade, Dpto de Engenharia Mecânica (EMC), Laboratório de Mecânica de Precisão(LMP), Bloco B. Cep: 88040-970 – Florianópolis – SC.

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Universitário – Trindade, Dpto de Engenharia Mecânica (EMC), Laboratório de Mecânica de Precisão(LMP), Bloco B. Cep: 88040-970 – Florianópolis – SC.

**Abstract:** *In recent years, new research about the deep rolling process and its variables emerged because of growing interest of the automotive industry on the subject. The studies are focused on three major analysis fronts: Mathematical Modeling, Computational Numerical Simulations and Practical Tests. Among the studies conducted, those that include mathematical models, computational simulations and those that mix both are most widely investigated by the authors, having been the incumbency of the operators manufacturer the supply of the feedback about the practical result.. Motivated by the need for a better understanding of the process, was developed at the “Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP – UFSC)”, a deep rolling equipment. The aforementioned equipment was included in order to enable control of parameters such as crankshaft speed rotation, roller force and revolutions numbe. These data will propiate verification of the influence of each parameter on the final characteristics of the component, thus allowing a better understanding on the subject and facilitating the control of the variables for the sake of process optimization.*

**Keywords:** *Deep Rolling, Crankshaft, Fatigue*