

# Investigação da Influência do Material na Precisão Geométrica de Engrenagens Forjadas a Frio

Pedro Malaquias Araújo Stemler <sup>(1)</sup>  
Fabrício Dreher Silveira <sup>(2)</sup>  
Alisson Duarte da Silva <sup>(3)</sup>  
Paulo Roberto Cetlin <sup>(4)</sup>

## RESUMO

Grande parte dos componentes metálicos existentes para os mais diversos sistemas mecânicos depende fortemente de uma precisão dimensional relativamente elevada e, por consequência, da sua alta qualidade objetivada. A conformação mecânica de precisão demanda uma análise conjunta de diversos fatores, incluindo não só a deformação plástica da peça trabalhada, mas também as deformações elásticas da peça e das matrizes, além da variação desse comportamento em função da temperatura, do encruamento do material, dos parâmetros de processo e das condições na interface peça-ferramenta. Logo, trata-se de uma operação de alta complexidade, representando também uma fonte de imprecisões dimensionais. A obtenção de peças de alta precisão via conformação mecânica configura uma tarefa de difícil execução frente às práticas de auxílio convencionais baseadas em testes empíricos e modelos matemáticos analíticos. Portanto, o presente artigo teve como objetivo elaborar um modelo numérico (Método dos Elementos Finitos) para a avaliação da influência de fatores relacionados às geometrias e aos materiais do conjunto peça-ferramenta sobre os desvios de forma que o flanco do dente de uma engrenagem apresenta em relação ao seu perfil teórico. Com foco na análise do desvio de perfil, foi abordado o processo de extrusão a frio de engrenagens de pinhões para impulsores de partida.

Palavras-chave – engrenagem, forjamento, extrusão, precisão, desvio, elementos finitos.

## ABSTRACT

**Most of the metal parts applied to mechanical systems are strongly dependent of a tight dimensional precision and a high quality. Precision forming demands a multi-factor analysis, including either workpiece plastic strain and workpiece and tools elastic strains, which are temperature, strain hardening, process parameters and interface conditions dependent. Therefore, it is a highly complex operation, and also provides a high level of geometric imprecision. The process of high precision parts through forming is not simple when supported by conventional methodologies, *i.e.* empirical and analytical models. The present paper objective was to develop a numerical model (Finite Element Method) for evaluating material and geometry related factors influence on gear tooth profile deviation related to its designed profile. This case study focused on a gear applied to engine starting mechanical systems.**

**Key words — gear, forging, extrusion, precision, deviation, finite elements.**

<sup>(1)</sup> Graduação; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pedrostemlerbh@hotmail.com

<sup>(2)</sup> Especialista; ZEN S.A. Indústria Metalúrgica, Brasil, fabricio.silveira@zensa.com.br

<sup>(3)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, alissonds@ufmg.br

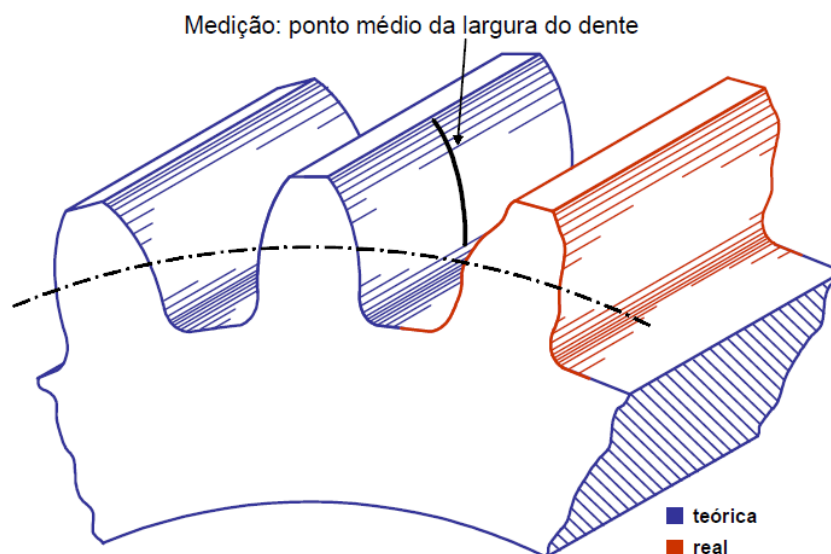
<sup>(4)</sup> Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, pcetlin@demec.ufmg.br

## 1. INTRODUÇÃO

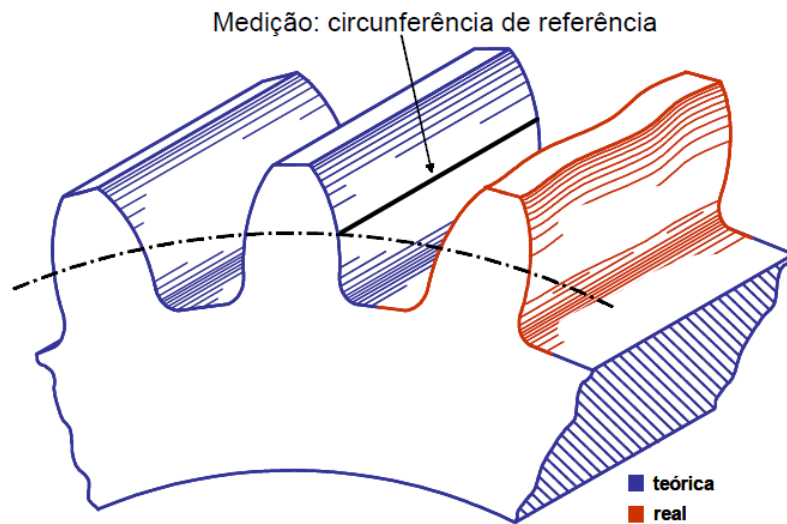
A precisão geométrica de componentes metálicos forjados a frio para a indústria mecânica pode ser determinante para o desempenho de um sistema de acordo com sua aplicação. As etapas operacionais nas quais a precisão é obtida são a conformação mecânica e as posteriores usinagem e tratamentos térmicos. Engrenagens metálicas são componentes usualmente fabricados através dessas etapas e o controle de qualidade com relação às suas dimensões é padronizado por meio da definição de classes de engrenagens [1], sendo menor a classe quanto maior for a precisão dimensional encontrada. A diferença entre uma determinada dimensão obtida após o processo e a sua dimensão nominal, ou seja, prevista em projeto, é denominada desvio e deve determinar a classe da engrenagem. A classe de engrenagem média resultante do processo de conformação mecânica a frio, na indústria brasileira, se encontra entre 7 e 8, havendo um aumento da classe à medida que são realizadas as operações subsequentes de fabricação. No entanto, variações significativas de origens diversificadas, tais como ferramental, maquinário e matéria-prima, demandam projetos de melhoria contínua que devem buscar a redução da classe.

No forjamento de precisão convencional, o material é conformado a frio ou a morno. Para o processo à temperatura ambiente, normalmente a peça de trabalho é pré-conformada através de forjamento em matriz fechada, como extrusão direta ou inversa. A vantagem da extrusão é de fato de as tensões serem triaxiais compressivas, proporcionando grandes deformações sem rupturas [2]. Em geral, parâmetros de processo, temperatura (matrizes e pré-forma), geometria (matrizes e pré-forma), material das matrizes, taxa de deformação, configurações da prensa e as condições de lubrificação e resfriamento influenciam diretamente na precisão dimensional de uma peça forjada. Além disso, a montagem das ferramentas, assim como seu ajuste, consiste em um fator operacional com sensível influência na classe da engrenagem [3;4]. Todos esses fatores podem ocasionar imprecisões dimensionais, as quais prejudicam, principalmente, a transmissão de torque em sistemas mecânicos [5].

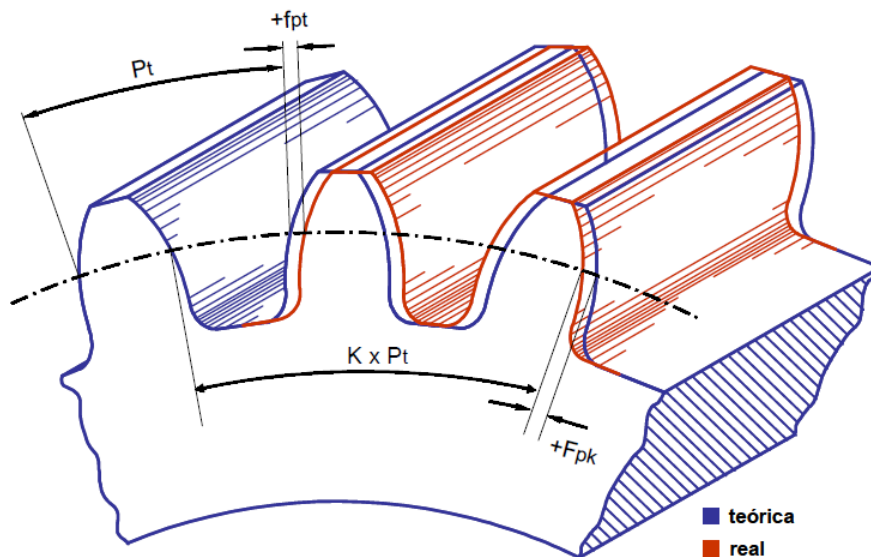
No processo de manufatura de pinhões para impulsores de partida, a engrenagem dos pinhões é produzida por extrusão a frio em aço SAE 10B22 (baixo carbono ligado ao boro). Após a conformação, o produto semi-acabado é usinado e tratado termicamente. A qualidade da engrenagem é definida a partir dos desvios de forma que o flanco do dente apresenta em relação ao seu perfil teórico. Os desvios são classificados em três grandezas, sendo essas: o desvio de perfil (Figura 1), hélice (Figura 2) e passo (Figura 3), medidos em  $\mu\text{m}$ .



**Figura 1:** Representação esquemática do desvio de perfil ( $F_\alpha$ ) [6].



**Figura 2:** Representação esquemática do desvio de hélice ( $F_\beta$ ) [6].



**Figura 3:** Representação esquemática do desvio de passo ( $F_p$ ) [6].

O presente trabalho buscou definir uma metodologia de abordagem dos desvios em função do processo de extrusão a frio de engrenagens para sistemas de impulsores de partida através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Em uma abordagem introdutória e exploratória, considerou-se possíveis influências do material da peça de trabalho e das matrizes, além da geometria de projeto. Ainda, foi definido como foco deste estudo a análise do desvio de perfil.

## 2. METODOLOGIA

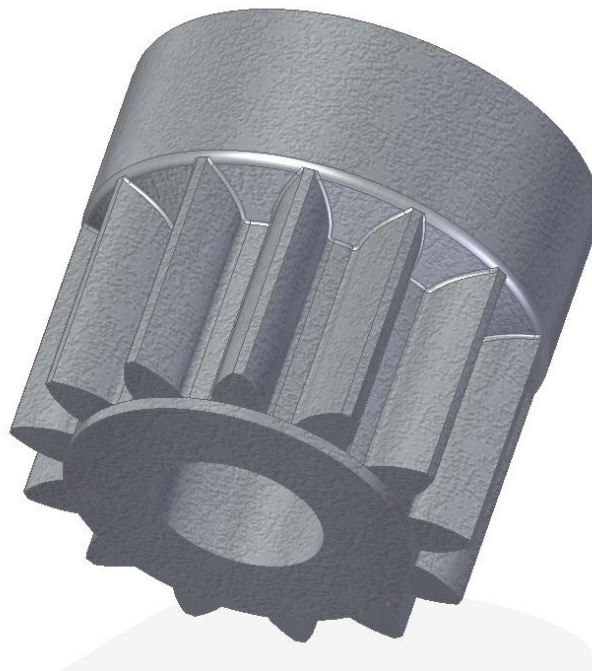
Foram definidos três tipos diferentes de aço para a peça de trabalho, conforme descrito na Tabela 1. Os dados relacionados às propriedades mecânicas e ao comportamento sob tensão dos materiais em função da variação da temperatura e da taxa de deformação, incluindo as regiões elástica e plástica, foram obtidos por simulação através do programa JMatPro, v8 (Sente Software Ltd., Reino Unido). Além da composição química de cada material [7], determinou-se o Limite de escoamento [8] de cada um, assumindo-se uma taxa de deformação de 0,02/min. Para as matrizes, utilizou-se dois materiais distintos: SAE H13 e WC (15% de Cobalto) com Módulos de Young de 210 e 524 GPa,

respectivamente [9].

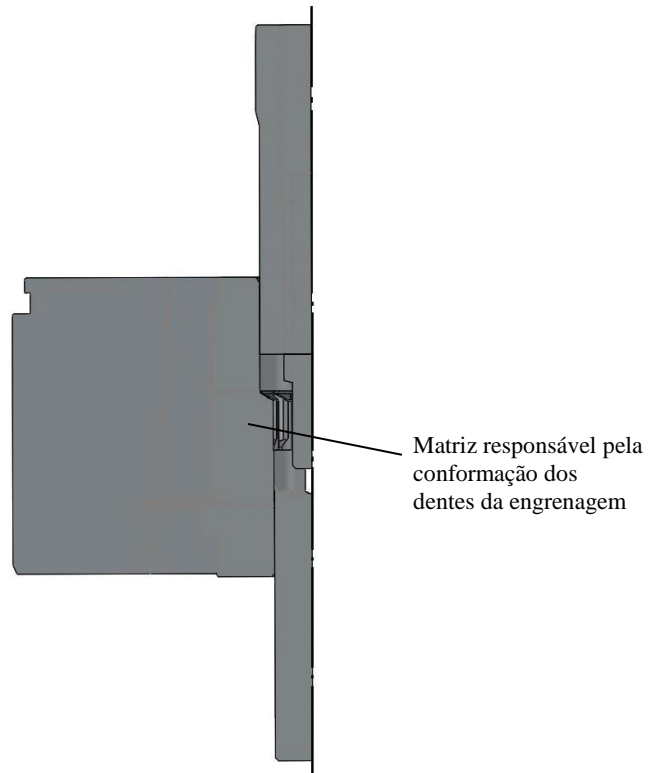
**Tabela 1:** Dados de entrada para simulação via JMatPro.

Material	Limite de Escoamento (MPa)	Composição Química (%)				
		C	Mn	P	S	B
SAE 10B22	331	0,22	0,85	0,02	0,03	0,002
SAE 1040	369	0,40	0,75	0,02	0,03	-
SAE 1080	486	0,80	0,75	0,02	0,03	-

A engrenagem abordada é mostrada na Figura 4. Já o conjunto de matrizes se mostra posicionado conforme Figura 5. A simulação do processo de extrusão a frio foi realizada através do programa DEFORM-3D, v10.2 (Scientific Forming Technology Corporation, Columbus, Ohio, EUA). Buscando aumentar a eficiência da simulação, a primeira etapa consistiu na condução do processo no regime plástico, sendo as matrizes consideradas geometrias rígidas. Esta etapa foi realizada 3 vezes, variando-se o tipo de material da peça de trabalho. A segunda etapa da simulação foi desenvolvida de maneira a transformar as geometrias extrudadas no regime plástico para o regime elasto-plástico, observando-se a ocorrência do retorno elástico e uma possível influência desse no desvio de perfil dos dentes da engrenagem. Finalmente, uma terceira etapa foi conduzida de maneira a interpolar os esforços da peça extrudada sobre a matriz no regime elástico, obtendo-se a variação das dimensões da matriz e, por consequência, o aumento do desvio da engrenagem.

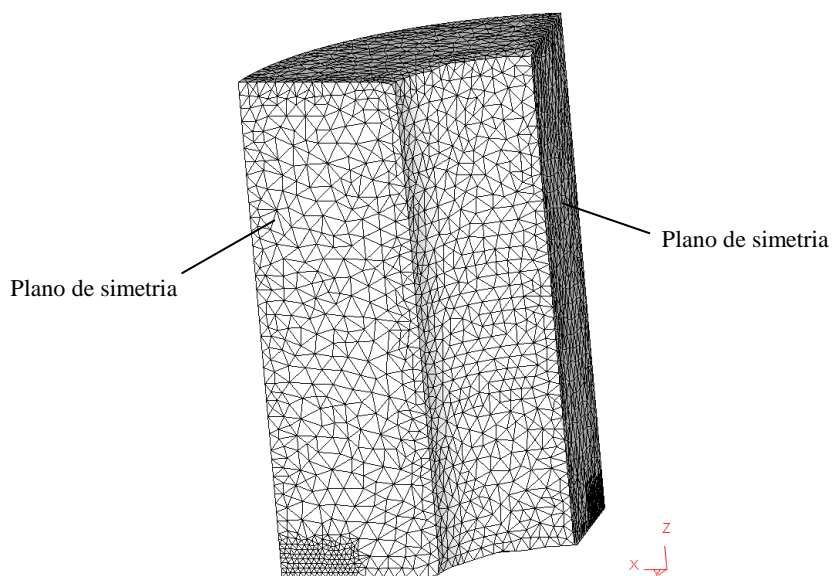


**Figura 4:** Engrenagem projetada.

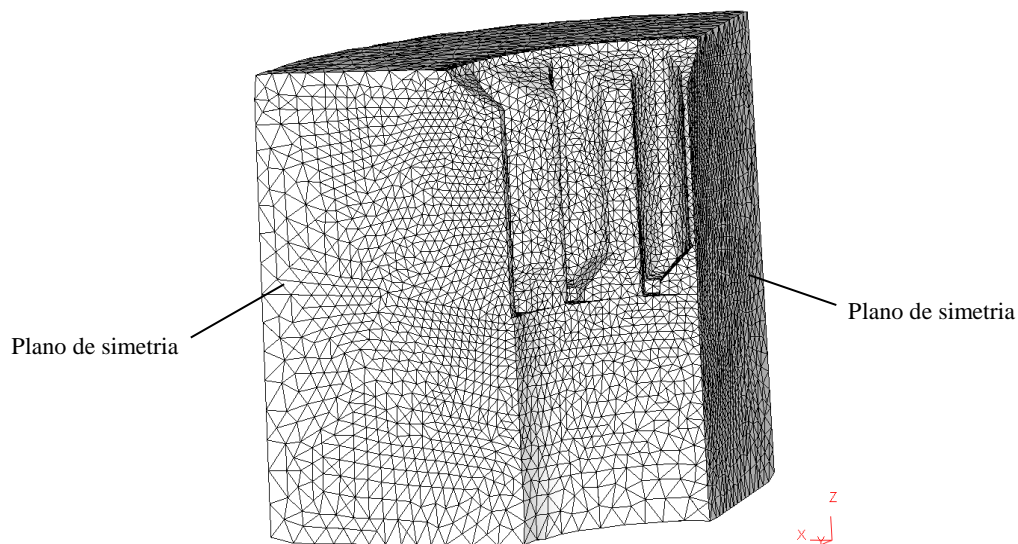


**Figura 5:** Conjunto matrizes.

A geometria utilizada como pré-forma para a simulação do processo de extrusão a frio está apresentada na Figura 6. Foram definidos dois planos de simetria com o objetivo de reduzir o tempo de cálculo computacional, mantendo a análise com base em 3 dentes da engrenagem. Todas as matrizes envolvidas na operação foram definidas conforme os mesmos planos de simetria, estando a matriz responsável pela forma dos dentes da engrenagem representada na Figura 7. A Tabela 2 resume os principais parâmetros utilizados nos modelos por elementos finitos.



**Figura 6:** Malha da pré-forma a ser conformada via simulação.



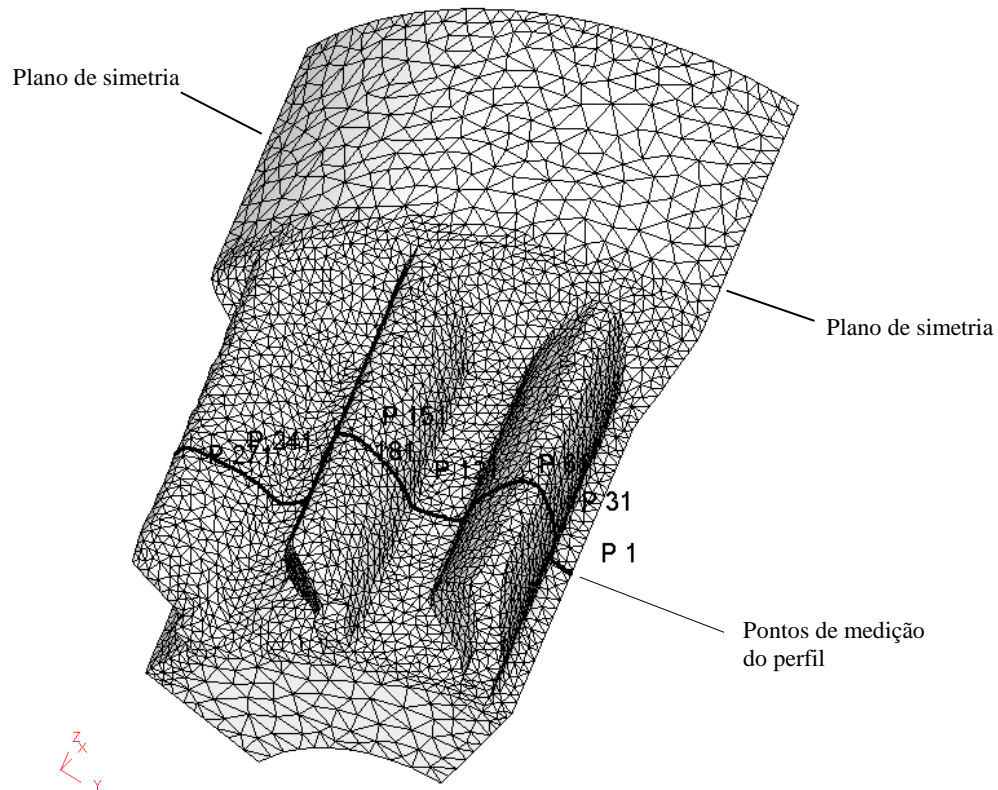
**Figura 7:** Malha da matriz para a conformação dos dentes da engrenagem.

**Tabela 2:** Configurações para os modelos por elementos finitos.

Operação	Parâmetro	Variável	
1 - Forjamento	Módulo	DEFORM-3D	
	Pré-forma:	geometria	Figura 6
		tipo	Plástico
		materiais	SAE 10B22, 1040 e 1080
	Matriz:	geometria	Figura 5
		tipo	Rígida
Velocidade		100 mm/s	
Temperatura		20 °C	
2 - Retorno Elástico	Módulo	DEFORM-3D	
	Pré-forma:	geometria	Engrenagem
		tipo	Elasto-plástico
		materiais	SAE 10B22, 1040 e 1080
	Temperatura		20 °C
Operação anterior		1 - Forjamento	
3 - Deformação das matrizes	Módulo	DEFORM-3D	
	Matriz:	geometria	Figura 7
		tipo	Rígida
		materiais	SAE H13 e WC
	Temperatura		20 °C
Operação anterior		1 - Forjamento	

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

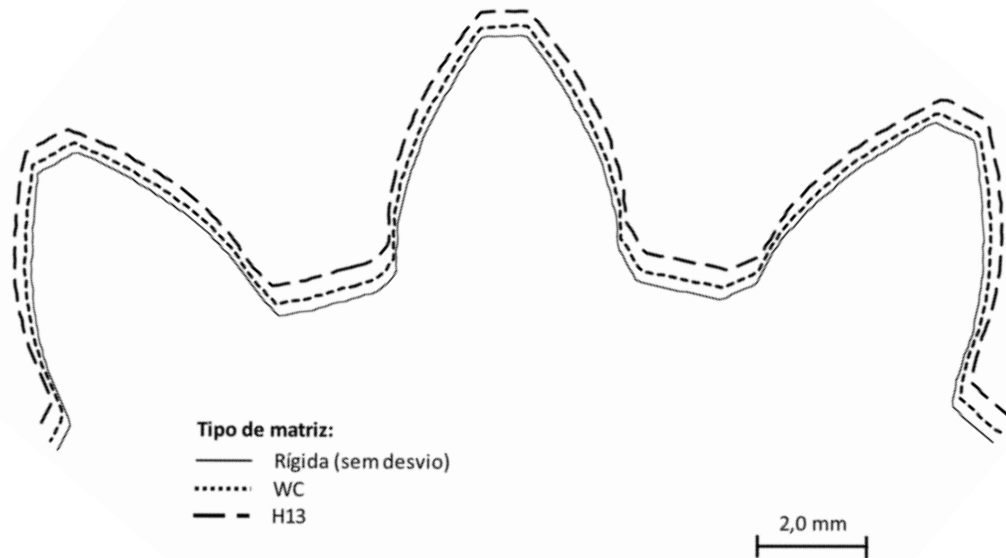
A geometria obtida após a simulação da extrusão a frio (Operação 1) pode ser visualizada na Figura 8 (a). Foram traçados 301 pontos em linha ao longo da superfície da engrenagem para a obtenção das coordenadas do perfil da engrenagem. Portanto, as coordenadas obtidas após a Operação 1 representam o perfil de projeto (sem desvios), uma vez que a peça de trabalho foi simulada no regime plástico, as matrizes se mantiveram rígidas e a montagem do ferramental foi considerada perfeitamente precisa. Assim, foi estabelecido um perfil de base para comparações a partir da geometria simulada.



**Figura 8:** Engrenagem obtida via simulação; posicionamento dos pontos (301) para a obtenção do perfil.

O desvio de perfil em razão do retorno elástico das engrenagens foi medido após a simulação da extrusão a frio. A engrenagem obtida na Operação 1 foi transformada para o regime elastoplástico e, após a retirada das matrizes, foi conduzida a simulação de retorno elástico desse componente metálico (Operação 2). No entanto, para os três materiais simulados, não foi observado desvio de perfil significativo. Logo, as simulações sugerem que o material da peça, por si somente, não possui influência significativa na classe de engrenagens forjadas a frio.

A partir da Operação 1, transformando as matrizes rígidas em elásticas, foi possível obter o desvio de perfil em razão da deformação das matrizes (Operação 3). A Figura 9 mostra os desvios obtidos para o processo com ambos os materiais propostos para as matrizes. Quantitativamente, os desvios calculados podem estar superestimados. Isso seria esperado, uma vez que o conjunto de matrizes não foi montado com interferência e que a carga imposta ao final da extrusão (Operação 1) pode ter sido excessiva. Contudo, qualitativamente, observou-se que os desvios se apresentam maiores quanto menor for o Módulo de Young do material da matriz.



**Figura 9:** Desvios de perfil para diferentes materiais das matrizes.

Com base na investigação do presente estudo, é possível compreender que a incidência de erro no produto possui origem na fabricação das matrizes, incluindo o material e a precisão geométrica. O fenômeno da deformação na região elástica da matéria-prima do ferramental é aliado ao controle de fabricação desse. Por fim, a deformação na região elástica do ferramental torna-se plástica no produto conformado, contribuindo para o aumento do desvio no flanco dos dentes.

Embora o desvio obtido nesta investigação se apresente homogêneo, desvios variados podem ser obtidos em razão dos aspectos de controle da fabricação das matrizes, do paralelismo na montagem do sistema e do posicionamento inicial da pré-forma. Logo, desvios irregulares de perfil podem ocorrer, conforme apresentado na Figura 1.

#### 4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Foi possível concluir que a classe de uma engrenagem forjada a frio, obtida após o seu processo de conformação mecânica, possui origem nas características das matrizes, incluindo fatores como o seu material e a sua precisão geométrica. O projeto de uma engrenagem deve contemplar uma correta seleção do material da matriz, além da compensação geométrica dessa em razão da sua deformação elástica. Finalmente, a atividade de fabricação da matriz, combinada com o seu projeto, representa o fator de maior impacto na classe da engrenagem. Em resumo, este estudo indica que a elaboração de um preciso projeto das matrizes, aliado a um acerto no processo de fabricação dessas, pode resultar na redução da classe de engrenagem.

Estudos posteriores devem ser realizados com foco em medições experimentais. A redução da classe da engrenagem passa não somente pela correta seleção do material das matrizes, mas principalmente por um controle rigoroso do processo de confecção das matrizes.

As simulações deverão incluir a montagem com interferência das matrizes do sistema e um ajuste preciso dos parâmetros da prensa. Assim, uma validação do modelo por elementos finitos deve ser realizada com base nas medições experimentais, propiciando correções no projeto das ferramentas.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da ZEN S.A. (Brusque, Santa Catarina, Brasil) e do Sente Software Ltd. (JMatPro; Reino Unido).

## REFERÊNCIAS

- [1] ABNT. Engrenagem Cilíndrica de Evolvente – Precisão Dimensional. 36p., 1989.
- [2] Gronostajski, Z.; Hawryluk, M. The Main Aspects of Precision Forming. Archives of Civil and Mechanical Engineering, n.2, v.VIII, p.39-55, 2008.
- [3] Xu, B.; Shimizu, Y.; Ito, S.; Gao, W. Pitch Deviation Measurement of a Involute Spur Gear by a Rotary Profiling System. Precision Engineering, v.39, p.152-160, 2015.
- [4] Honma, Y. Standard AC Motor V Series with Lower Noise. Oriental Motor, 9p., 2015.
- [5] Fernández, A.; Iglesias, M.; de-Juan, A.; García, P.; Sancibrián, R.; Viadero, F. Gear Transmission Dynamic: Effects of Tooth Profile Deviations and Support Flexibility. Applied Acoustics, v.77, p.138-149, 2014.
- [6] Gemaque, M. J. A. Abordagem para Solução de um Problema Metrológico na Indústria – Medição de Engrenagens. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina. 132p., 2004.
- [7] SAE International. Chemical Compositions of SAE Carbon Steels. 11p., 2001.
- [8] Van Tyne, C.J.; Walters, J. Materiais de Forjamento: Aço-Carbono e Aços de Baixa-Liga. Forge, p.18-21, Setembro de 2011.
- [9] SFTC. DEFORM Material Data Library. Scientific Forming Technology Corporation, v10.2, 2015.