

# ADI

## UMA SOLUÇÃO EM TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA <sup>1</sup>

André Ricardo de Souza e Sá <sup>2</sup>  
Denilson José do Carmo <sup>3</sup>  
Ioná Macedo Leonardo Machado <sup>4</sup>  
Jean Chaves Araújo <sup>5</sup>  
Roberto Márcio Oliveira Felipe <sup>6</sup>  
Dagoberto Brandão Santos <sup>7</sup>

### Resumo

Desenvolvimento de conjuntos rotativos de redutores de transmissão de potência em ferro fundido nodular austemperado (ADI), com o intuito de reduzir custos de fabricação e aumentar a competitividade no mercado. Notoriamente, em redutores menores, de baixo torque (até 40.000 Nm), produzidos pela FLENDER BRASIL, observa-se alto custo de fabricação, o que está relacionado à mão-de-obra empregada. Com a possibilidade de utilizar o ADI em substituição a aços forjados e cementados, pode-se diminuir os custos de matérias-primas e etapas de fabricação como torneamento, fresamento, retífica de dentes e conseqüentemente uma economia de energia elétrica, mão-de-obra e insumos de produção. Para redutores de médio torque (de 40.000 a 250.000 Nm) a redução de custo com a matéria-prima é o principal foco. Os componentes foram avaliados quanto à composição química, microestrutura, propriedades mecânicas e desempenho. A avaliação foi realizada nas situações de fundido, durante a usinagem, antes do teste de bancada com e sem operação de retífica e depois de teste em bancada. Os resultados são promissores e indicam a necessidade de continuidade das investigações na busca do domínio total do processo de fabricação.

**Palavras-chave:** ADI; Austemperado; Redutor; Engrenagens.

### ADI - A SOLUTION FOR POWER TRANSMISSION

#### Abstract

Development of rotating sets on power transmission gearboxes made of austempered ductile iron (ADI), aiming costs lowering and increasing market competitiveness. On smaller gearboxes with low torque (up to 40.000 Nm) produced by FLENDER BRASIL it is easy to notice high manufacturing costs directly related to the hired manpower. Using ADI instead of forged and carburized steel could decrease raw material costs and reduce production steps such as machining, hobbing and grinding. This would consequently lead to a saving of electricity, manpower and manufacturing input. Cost reduction of raw material is the main focus on gearboxes with intermediate torque (40.000 to 250.000 Nm). The components have been evaluated regarding chemical composition, microstructure, mechanical properties and performance. The analysis has been made in following status: casting, during machining, before working test with and without grinding and after working test. The results stated the improving performance of the power transmission gearboxes and the need of continuous studies leading to the whole understanding of this manufacturing process.

**Key words:** ADI; Austempered; Gearbox; Gears.

<sup>1</sup> Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

<sup>2</sup> Doutorando em metalurgia física pela UFMG, MSc, supervisor de tratamento térmico na empresa Flender Brasil - E-mail: [asouza@flenderbrasil.com](mailto:asouza@flenderbrasil.com) – tel 031 3369 2132

<sup>3</sup> MSc em metalurgia da transformação pela UFMG, pesquisador do SENAI/CETEF, Itaúna, M.G, [djcarmo@fiemg.com.br](mailto:djcarmo@fiemg.com.br) – tel 037 3242 1975

<sup>4</sup> MSc em Ciência e Engenharia de Matérias pela UFMG, pesquisadora do SENAI/CETEF, [iona@fiemg.com.br](mailto:iona@fiemg.com.br) – tel 037 3242 1975

<sup>5</sup> Graduando em Engenharia Industrial Mecânica pela Universidade de Itaúna, pesquisador do SENAI/CETEF, [jean@fiemg.com.br](mailto:jean@fiemg.com.br) – tel 037 3242 1975

<sup>6</sup> Engenheiro Mecânico pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais e Gerente Industrial da empresa Flender Brasil. [rfelipe@flenderbrasil.com](mailto:rfelipe@flenderbrasil.com) – tel 031 3369 2180

<sup>7</sup> Doutor em metalurgia física pela Universidade Federal de Minas Gerais, Professor da Universidade Federal de Minas Gerais. [dsantos@demet.ufmg.br](mailto:dsantos@demet.ufmg.br) – tel 31 3238 1803

## 1 INTRODUÇÃO

A importância industrial do ferro fundido nodular austemperado (ADI) se deve às suas extraordinárias propriedades mecânicas, comparáveis com às dos aços e melhores que as dos ferros fundidos convencionais. Antes da descoberta do ferro fundido nodular (Spherical Graphite Iron - SGI), nos anos 60, os projetistas tinham poucas opções para fabricar componentes de alto desempenho. Podiam usar o ferro fundido maleável, o aço fundido, o aço forjado ou mesmo soldado. Todos eles, no entanto, apresentam limitações tanto quanto ao custo quanto às propriedades mecânicas atingidas. O aparecimento do SGI alterou espetacularmente as possibilidades de aplicação do ferro fundido. Sua notável resistência mecânica e ductilidade, comparadas com o ferro fundido cinzento, juntamente com suas características de fundição, o colocam como um material de engenharia muito competitivo quando comparado aos materiais acima mencionados. No entanto, quando se projetava uma peça que exigia uma combinação de resistência mecânica, tenacidade e resistência ao desgaste, o aço era o material escolhido. Com o surgimento do ADI, esta situação está mudando, pois este material possui propriedades que possibilitam a sua competição com os aços em muitas aplicações.<sup>(1-3)</sup>

Portanto, este trabalho contempla resultados obtidos no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular austemperado (ADI) para componentes de redutores de transmissão de potência (engrenagens e eixos) em substituição ao aço cementado. Atualmente a Flender Brasil utiliza como matéria prima, aço forjado (17CrNiMo6) com diâmetros padronizados, os quais são usinados e fresados para obtenção da forma final de cada componente dos redutores. Após a usinagem e fresamento, estes componentes são submetidos ao tratamento de cementação, em geral, com longa duração em atmosfera controlada seguido de têmpera e revenimento. A dureza superficial da camada cementada é de aproximadamente 59 HRC.

A dureza superficial apresentada no processo de cementação, garante a estes componentes uma alta resistência ao desgaste e a fadiga que, conseqüentemente aumenta a vida útil de seus equipamentos.<sup>(4)</sup> Mas, este processo de fabricação apresenta um alto custo de produção relacionado à mão de obra e matéria prima. Então, o ADI tornou-se uma solução comercialmente, operacionalmente e tecnicamente mais barata. Suas principais vantagens apontadas para aplicação em engrenagens em substituição aos aços são: menores ruídos, menor densidade, efeito de lubrificação da grafita que aumenta a resistência ao desgaste devido a diminuição do coeficiente de atrito<sup>(5)</sup>, boa usinabilidade na condição não tratada, melhores condições de fundibilidade podendo se investir na obtenção de formas fundidas mais próximas da condição final do componente e redução de custos em energia, mão de obra e insumos de produção. Entretanto, a limitação do tamanho das peças em função da austemperabilidade necessária para a obtenção da matriz ausferrítica somada a dificuldades iniciais para o acerto das condições que propiciam melhor desempenho, tem se apresentado como algumas desvantagens para a fabricação deste material. Esta segunda se resume na definição da microestrutura mais adequada ao componente e à sua obtenção.

Então, o principal objetivo deste desenvolvimento é iniciar uma avaliação técnica da possibilidade de minimização dos custos na obtenção dos componentes do conjunto rotativo dos redutores da empresa Flender Brasi, numa parceria com o SENAI/CETEF,

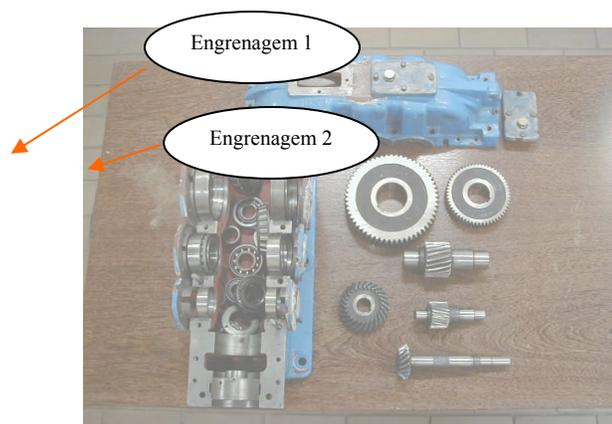
Centro de Fundição de Itaúna e contando com a participação da UFMG através de seu Departamento de Engenharia metalúrgica e de materiais.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se um redutor Flender de baixo torque do tipo KZN 112 com redução de 13,89, potência nominal de 19kW, rotações de entrada 1800 rpm e saída 129,9 rpm. O redutor utiliza pares de engrenagem e pinhão helicoidais sendo um par cônico (Figura 1). As peças foram obtidas a partir de duas fusões em forno a indução, sendo a primeira de 127 kg e a segunda de 50 kg. Na primeira fusão a carga metálica foi constituída de 90% de gusa e 10 % de sucata de aço. Na segunda fusão foram utilizados 20% de retorno da primeira fusão, 10% de sucata de aço e 70% de gusa. Em ambas fusões foram feitas correções de Si no forno utilizando FeSi75% e a nodularização pelo método *sandwich* com FeSiMg, 45% de Si e 8,5%Mg. Como inoculante foi utilizado 0,5% de FeSi75%. As temperaturas de nodularização do ferro fundido e de vazamento foram 1480°C e 1300°C e de 1500 °C e 1350°C para a primeira e segunda fusão respectivamente. A variação da temperatura de vazamento está relacionada com a espessura dos fundidos.

Posteriormente à obtenção das peças fundidas, realizou-se o processo de usinagem e fresamento que antecederam o tratamento térmico. Depois do tratamento térmico, efetuaram-se as operações de retífica e de lapidação dos dentes (operação utilizada para os pares cônicos), para acabamento final. Durante o tratamento térmico utilizou-se uma temperatura de austenitização de 900°C com tempo de manutenção de 2 h. A temperatura de austêmpera foi definida em 320°C com um tempo de manutenção de 90 min.

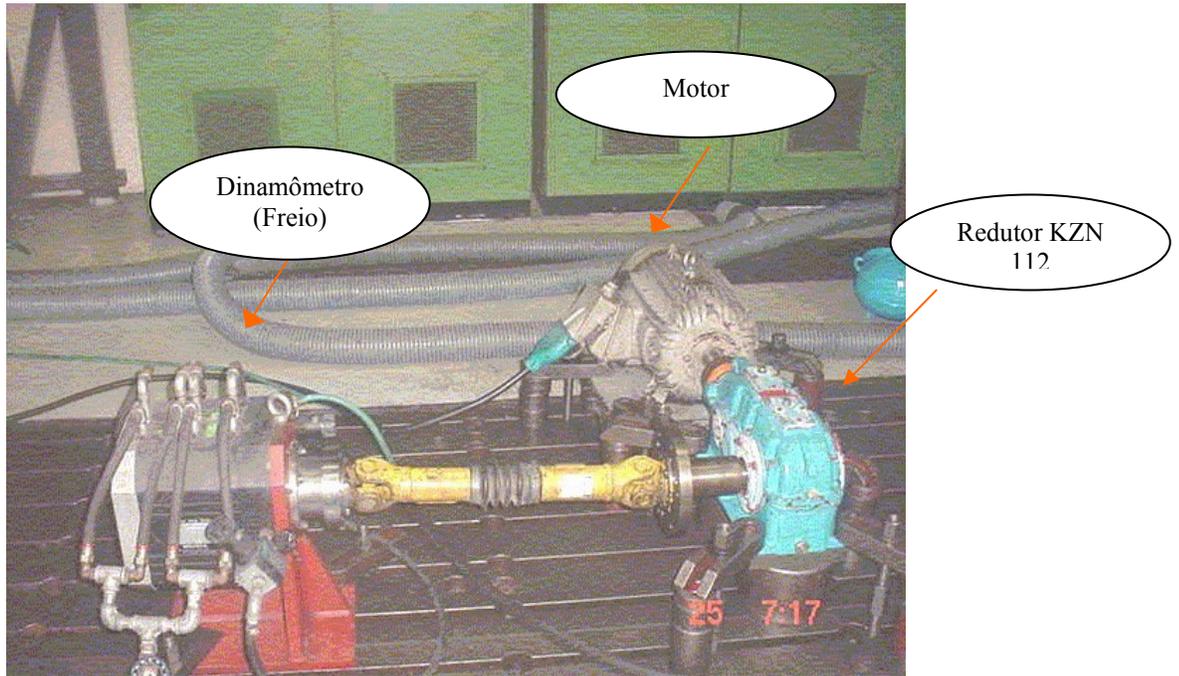
Os processos de torneamento, fresamento e retífica foram avaliados quanto à facilidade de corte e o aparecimento defeitos que possam ser inerentes a estes processos (Ex. trinca de retífica ou durante o torneamento) em comparação com os aços 17CrNiMo6.



**Figura 1.** Componentes (engrenagens e eixos) em ADI do redutor KZN 112.

O redutor foi montado e levado para o teste em bancada, como mostra a Figura 2, onde permaneceu em operação por 90 dias, trabalhando com 72% da potência nominal (13,68 kW) e um torque 1008 Nm. Após o teste de bancada o redutor foi

desmontado e seus componentes avaliados quanto à composição química, microestrutura, microdureza e desempenho (ruído e desgaste). Para se avaliar o desgaste foram feitas medições, utilizando-se de um micrômetro, i.e. durante o teste de bancada em cotas sujeitas ao desgaste. As contas foram avaliadas em 150, 369, 420 h de funcionamento e os componentes do redutor utilizados para realizações destas análises foram as engrenagens 1 e 2 da Figura 1, cujas medidas das cotas são 72,6 mm e 46.68 mm respectivamente.



**Figura 2.** Redutor montado na banca de teste acoplado em um motor transmitindo potência de entrada e em um dinamômetro que executa a condição de torque de 1008 N/m.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Composição Química

A Tabela 1 mostra os valores de composição química. Notam-se as composições similares para as duas fusões com o carbono equivalente praticamente eutético. Os teores de Ni e de Cu têm a função de se obter a austemperabilidade necessária para evitar a perlita após austêmpera.

**Tabela 1.** Composição química das duas fusões realizadas

Fusão	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cu	%Ni	Mg	C.E.
01 ferro base	3,66	0,89	0,04	0,08	0,013	0,67	1,07	-	3,96
01 final	3,51	2,40	0,05	0,07	0,009	0,67	1,0	0,055	4,31
02 ferro base	3,59	1,17	0,035	0,077	0,014	0,68	1,10	-	3,98
02 final	3,43	2,54	0,069	0,08	0,015	0,65	1,05	0,044	4,27

### 3.2 Resultados da Usinagem e Fresamento.

Observou-se que durante o torneamento e fresamento dos componentes (sem o tratamento térmico de austêmpera), como era esperado, existiu uma maior facilidade na remoção de material resultando em um menor desgaste das ferramentas de corte. Esta propriedade de usinabilidade do ferro fundido nodular gera menores tensões internas em relação ao aço 17CrNiMo6 que contribui para menores distorções durante o tratamento térmico de austêmpera, conseqüentemente resulta em menores tempos nos processos de retífica e de lapidação.<sup>(6)</sup>

### 3.3 Microestrutura dos Componentes Austemperados

As análises microestruturais foram realizadas nas engrenagens 1 e 2 demonstrando a pior e a melhor situação de austêmpera para estes componentes. A melhor situação acontece na engrenagem 2 e a pior situação na engrenagem 1 devido ao maior diâmetro e massa. A Figura 3 mostra as regiões analisadas.

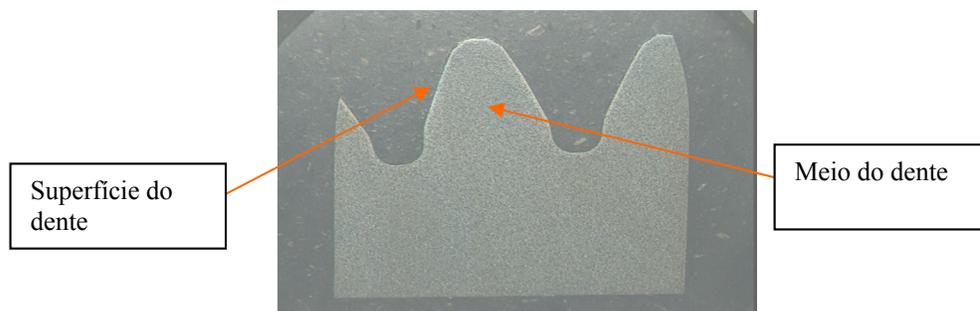


Figura 3. Perfil de amostragem utilizada nos ensaios e análises.

As Figuras 4 e 5 mostram que nas duas peças as estruturas da superfície e meio do dente apresentam-se ausferríticas.

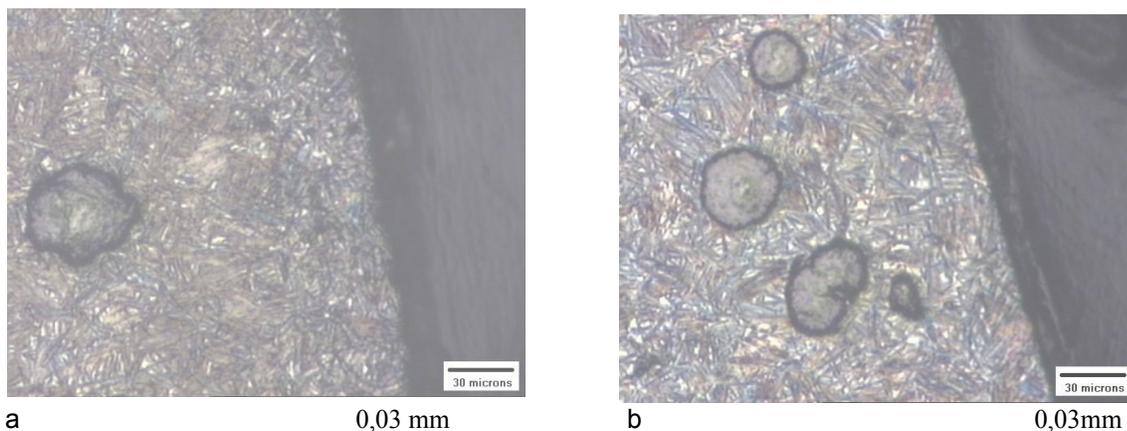
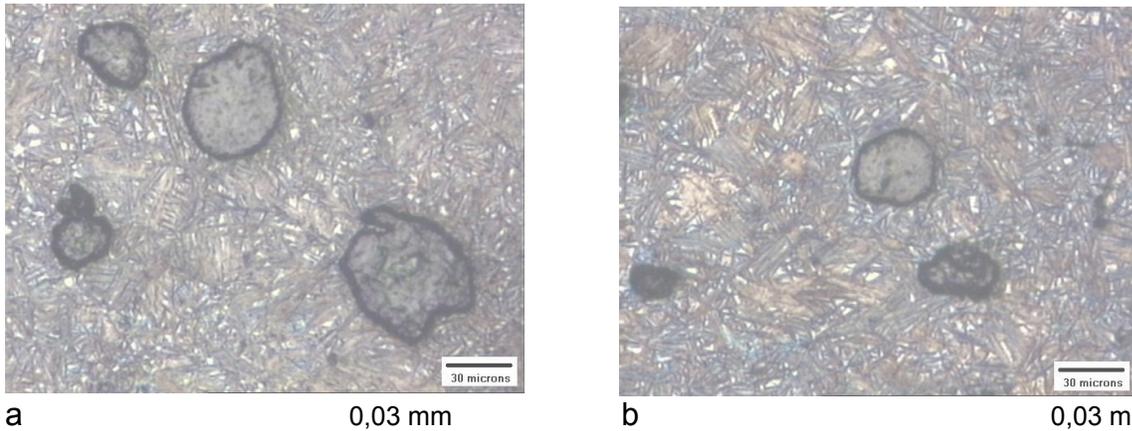


Figura 4. Superfície do dente após teste em bancada (ataque nital 2%) – (a) Engrenagem 1 e (b) Engrenagem 2.

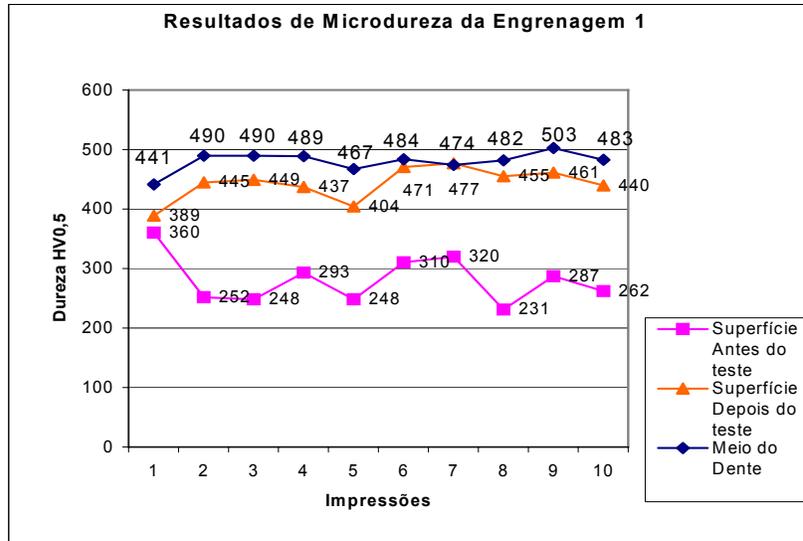


a 0,03 mm b 0,03 mm  
**Figura 5.** Meio do dente após teste em bancada (ataque nital 2%) – (a) Engrenagem 1 e (b) Engrenagem 2.

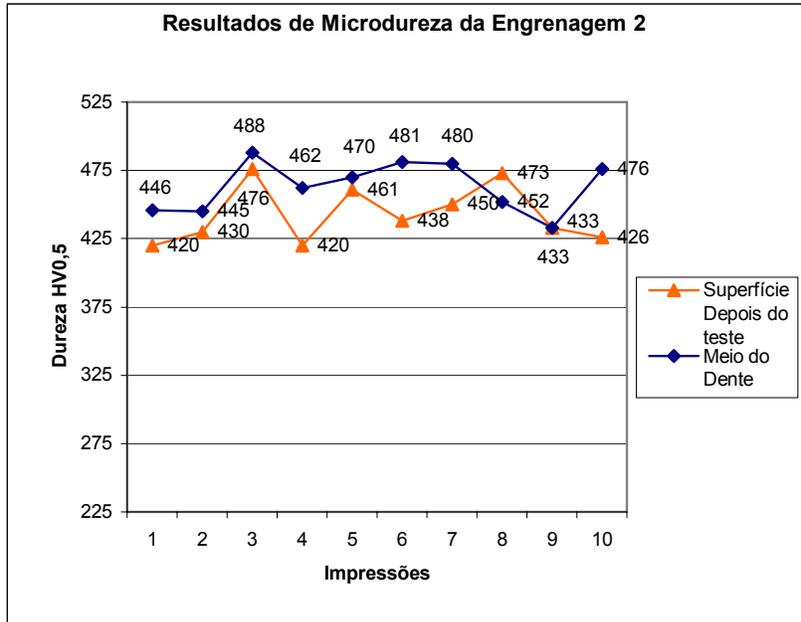
### 3.4 Microdureza

As Figuras 6 e 7 mostram os resultados do teste de microdureza realizados nas superfícies dos dentes das engrenagens 1 e 2 respectivamente.

Para se analisar o efeito do encruamento, foram feitas impressões de dureza na engrenagem 1 antes e depois do teste de bancada.



**Figura 6.** Resultado de dureza da engrenagem 1 antes (sem o processo de retífica) e depois do teste de bancada na superfície e meio do dente.



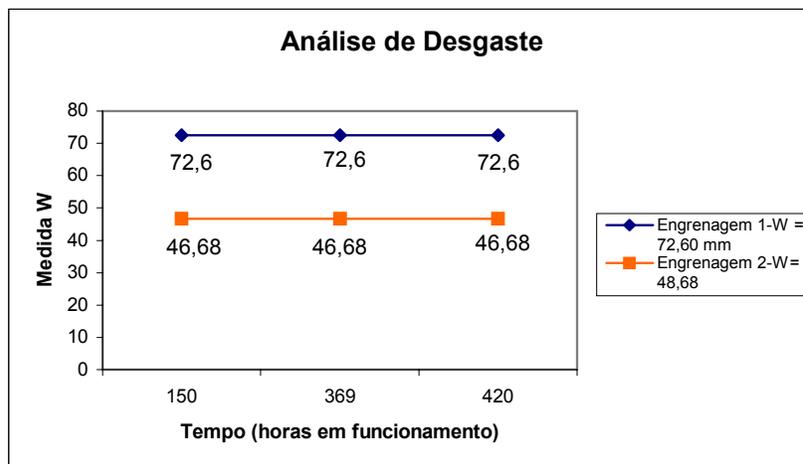
**Figura 7.** Resultado de dureza da engrenagem 2 depois do teste de bancada na superfície e meio do dente

### 3.5 Análise de Ruído e Desgaste Durante o Teste de Bancada

Durante o teste de bancada observou-se os itens descritos na Tabela 2 e Figura 7.

**Tabela 2.** Análise de Ruído durante o teste em bacanda

Análise de Ruído medido em decibéis	
Ferro Fundido Nodular Austemperado	Aço 17CrNiMo6
77	90



**Figura 8.** Análise de desgaste das engrenagens 1 e 2 durante o teste de bancada

## 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Durante a usinagem e o fresamento de dentes, conforme previsto, verificou-se uma facilidade de corte maior quando comparado com o aço 17CrNiMo6. Estes processos foram realizados antes do tratamento térmico de austêmpera. Após tratamento térmico, os componentes do redutor passaram pelo processo de retíficas para correções de possíveis deformações e acabamento final nos dentes. Observou-se que as deformações foram desprezíveis para estes componentes em comparação com o aço em questão.<sup>(7-9)</sup> Ainda, durante o processo de retífica, foi possível aumentar a velocidade do rebolo sem prejudicar a microestrutura e/ou danificar a superfície dos dentes com o aparecimento de trincas ocasionadas por um superaquecimento na superfície retificada. As Figuras 4 e 5 mostram que a microestrutura da superfície e meio do dente das engrenagens 1 e 2 caracterizam uma estrutura ausferrítica sem qualquer impurezas (óxidos e/ou inclusões) que certamente foram eliminados durante a retífica de dentes. Estas “impurezas” detectadas foram relacionadas a um problema de descarbonetação devido à falta de neutralidade do banho de sais. Assim, a Figura 6 mostra um aumento de dureza na superfície do dente da engrenagem 1 após o teste de bancada. Mas, no entanto, o aumento se deve a eliminação das impurezas como citado acima e não da ocorrência de encruamento como se esperava. Conclui-se que não houve o encruamento superficial devido aos resultados de microdurezas das engrenagens 1 e 2 comparando a superfície e meio do dente após teste de bancada (Figura 6 e 7), as durezas superficiais estão bem próximas as do meio do dente não demonstrando sinais de encruamento.

Um dado importante no funcionamento de um redutor é o nível de ruído gerado. Então, durante o teste de bancada foram realizadas medições e conforme Tabela 2 o ADI tem níveis menores de ruídos do que o aço 17CrNiMo6.

A Figura 8 mostra que o desgaste não ocorreu nos componentes medidos, podendo-se atribuído, apesar da menor dureza em comparação ao aço, à presença do filme de grafite que pode reduzir o coeficiente de atrito e a temperatura de funcionamento.

## 5 CONCLUSÕES

- Não se observam dificuldades adicionais ou defeitos de fabricação, como trincas, nas etapas de usinagem, fresamento, retífica, tratamento térmico e montagem do redutor quando se comparam os materiais ADI e o aço tradicionalmente utilizado pela Flender Brasil.
- Devido a menores distorções durante o tratamento térmico apresentado por este material pode-se diminuir o sobremetal deixado nas peças em comparação aos deixados nos aços convencionais de cementação, diminuindo custo e tempo de retífica. O sobremetal é deixado nas peças para se corrigir as deformações resultantes durante o tratamento térmico e para se efetuar um melhor acabamento nos dentes das peças.
- Não se observam efeitos de encruamento provenientes da retífica, lapidação ou do teste de bancada indicando a possibilidade que o material nas condições em que foi desenvolvido e/ou testado na bancada de teste não apresenta tal capacidade.

- Observa-se notória variação nos valores de microdureza. Deve-se se ressaltar que o ADI por apresentar a mistura de ferrita e austenita além dos esferóides de grafita não deve apresentar “homogeneidade” observada em uma camada cementada. Por outro lado este tipo de microestrutura tem apresentado vantagens na inibição de processos de fadiga e também maior resistência ao desgaste que materiais concorrentes de maior dureza devido a propriedade de autolubrificação (filme de grafita).
- Os níveis de ruídos gerados são menores que nos aços 17CrNiMo6 proporcionando melhores ambientes de trabalho.

Acredita-se que os dados levantados, em especial a análise de resistência ao desgaste, são promissores e servem de subsídios à Flender Brasil na continuidade do desenvolvimento de componentes de redutores em ADI em substituição ao aço forjado e cementado.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem à Flender Brasil, em especial aos Srs. Marcelo Silva e Roberto Felipe pelo incentivo prestado e ao SENAI/CETEF-ITAÚNA por toda a colaboração no trabalho.

### **REFERÊNCIAS**

- 1 VACCARI, John A. Cresce o interesse por fundidos em ADI nas indústrias. **Fundição Serviços**. São Paulo: Aranda, v.26, n. 297, p. 60 - 65, out.1990
- 2 CARMO, Denílson J. SILVA, Ana P. MACHADO, Ioná M. L. PARREIRAS, Clésio S. Aplicação do ferro fundido nodular austemperado (ADI) em máquinas para implementos agrícolas. **57º CONGRESSO ANUAL DA ABM - Internacional**, São Paulo, 697-700p, julho de 2002.
- 3 CARMO, Denílson J. Desenvolvimento do Processo de obtenção do ferro fundido nodular austemperado. Dissertação de mestrado. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 180p, 2003.
- 4 Prime, Michael B., Prantil, Vincent C., Rangaswamy, Partha, Garcia, Felix P., “Residual Stress Measurement and Prediction in Hardened Steel”, Material Science Forum, vols. 347-349, 223-228p, 2000.
- 5 Y., Ariura, M., Goka. “A Fundamental Study on the Surface Durability of Austempered ductile Iron (ADI) Gears (Surface Durability of ADI Rollers under Minimal Quantity Lubrication (MQL) Condition)”. Power Transmission conference, 1-6p, Varna – Bulgaria, september 2003.
- 6 SOSA, A. D., ECHEVERRÍA, M. D., MONCADA, O. J. " Machining and Heat Treatment Effects on Residual Stresses an industrial Application of ADI ". ISIJ international, vol. 44, n ° 7, 1195-1200p - 2004.
- 7 Echeverría, Maria D., Moncada, Osvaldo J., Sikora, Jorge A. "Influence of Dimensional Change, and Its Dispersion, on the Fabrication Size Tolerances of Austempered Ductile Iron (ADI) Parts: Comparison with SAE 4140 Steel". ISIJ International, v. 41, n° 1, 25-30p – 2001

- 8 PRA, DAI A. L., ECHEVERRÍA, M. D., SCANDURRA, A., MONCADA, O., SIKORA, J. " Dimensional change prediction in austempered ductile iron parts using fuzzy modelling. Latin American Applied Research ". 35: 197-204p - 2005.
- 9 SOSA, D. A., Echeverría, M.D., Moncada, O. J., Sikora, A. J. " Efectos del mecanizado y de una ferritización previa sobre la distorsión y variación dimensional en engranajes de ADI ". Jornadas SAM - CONAMET, 475 - 484p - 09/2001