

# DESENVOLVIMENTO DE AÇO RELAMINADO PARA FABRICAÇÃO DE ESTADORES PARA ALTERNADORES DE ALTA EFICIÊNCIA <sup>(01)</sup>

**Sérgio Favaro** <sup>(02)</sup>  
**Sílvio Dias dos Santos** <sup>(03)</sup>  
**Luis Fernando Maffeis Martins** <sup>(04)</sup>

## RESUMO

A Mangels, em conjunto com a Robert Bosch, desenvolveu uma liga de aço relaminado para fabricação de estadores para alternadores de alta eficiência. A composição química foi otimizada de modo a reduzir as perdas magnéticas próprias do material e também compensar perdas provocadas pela deformação do aço durante processo especial da fabricação dos estadores, que envolve além de outros processos, estampagem e enrolamento da fita de aço. As perdas magnéticas obtidas no estator têm influência direta na potência final do alternador. Um estudo de modificação do tamanho de grão obtida através de modificações no processo de relaminação também foi elaborado para se determinar sua influência na performance final do produto. O fator custo também aparecia como limitante, uma vez que a simples utilização de um aço silício, conhecido por baixa perda magnética, tornava o produto final sem competitividade, impossibilitando sua produção em alta escala e para fornecimento ao exterior

**Palavras-chave: Aço elétrico, estadores, alternadores**

---

<sup>(01)</sup> Trabalho a ser apresentado no 42º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos – Santos – SP – 25 a 28 de outubro de 2005

<sup>(02)</sup> Engenheiro Mecânico; Gerente de Manufatura de Alternadores da Robert Bosch Ltda.

<sup>(03)</sup> Tecnólogo de Processos de Produção; Técnico de Processos da MANGELS

<sup>(04)</sup> Eng.º Metalurgista, Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais; Supervisor de Pesquisa e Desenvolvimento da MANGELS

## 1. INTRODUÇÃO

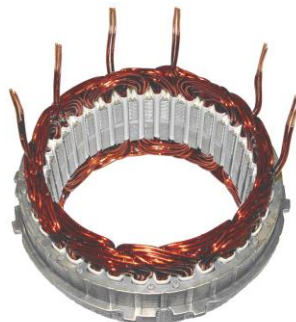
O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de aço para aplicação em estatores para alternadores de alta eficiência. As principais características a serem consideradas para a definição do material ideal são suas perdas magnéticas, que estão relacionadas com a potência do alternador, e o custo da matéria prima, uma vez que um alto custo inviabilizaria a exportação dos alternadores.

Na indústria automotiva, os aços elétricos têm participação vital na fabricação de alternadores que são responsáveis pela geração de energia necessária para o funcionamento dos componentes eletro-eletrônicos dos veículos. Com a crescente demanda de eletrônica embarcada, cresce cada vez mais a exigência de produtos com maior eficiência (produtos menores com maior energia gerada), aumentando assim também a importância dos aços elétricos neste mercado. Os principais subconjuntos de um alternador são o rotor, o retificador e o estator. O aço elétrico é matéria prima principal na fabricação do pacote do estator

O estator é onde se localizam as 3 bobinas (fases) do alternador e onde se gera a corrente alternada do produto, que depois é retificada e distribuída aos consumidores de energia do veículo.



**Alternador**



**Estator**

**Figura 1:** Modelos de alternador e estator comumente utilizados na indústria automotiva

O pacote do estator é o componente, fabricado com aço elétrico, onde se forma o campo magnético para geração da corrente.

O processo de fabricação do pacote consiste na estampagem da fita de aço em ferramental progressivo, seguida do rolamento do material, formando uma espiral, que é posteriormente rebitada.



**Figura 2:** Modelo do pacote do estator desenvolvido neste trabalho. Seu processo de fabricação envolve estampagem em ferramental progressivo e posterior deformação em forma espiral para formação do pacote.

O pacote do estator tem efeito direto na potência gerada pelo alternador, sendo que quanto menores forem as perdas magnéticas do pacote, maior será sua eficiência.

A questão fundamental é achar o melhor custo/benefício na utilização de aços com menores perdas magnéticas até o ponto limitante de perdas produzidas pelo processo de fabricação.

Para se definir a especificação ideal do aço a ser utilizado nos estatores deve-se levar em conta, entre outras características, sua composição química, a espessura da chapa, a dureza do material e o tamanho de grão..

Com relação à composição química, o silício é o principal elemento de liga adicionado aos aços para redução das perdas magnéticas, pois aumenta a resistividade e permeabilidade magnética, resultando em uma menor perda magnética <sup>1,2</sup>.

A espessura da chapa também está diretamente relacionada às perdas magnéticas, sendo que quanto menor a espessura, menores são as perdas, porém também é menor a produtividade na fabricação dos estatores.

A dureza do material deve ser definida de modo a balancear a relação conflitante entre a deformação plástica e a presença de rebarbas. O aumento de dureza leva a maiores perdas magnéticas, porém tem um efeito favorável na redução da rebarba <sup>3</sup>, o que contribui para a redução das perdas magnéticas.

O tamanho de grão também tem influência nas perdas magnéticas, sendo que quanto maior for o tamanho de grão, menores serão as perdas magnéticas <sup>4</sup>.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 – Materiais

Foram avaliadas neste desenvolvimento diferentes composições químicas de aços para fins elétricos, variando-se principalmente os teores de carbono e de silício. A tabela 1 apresenta valores típicos dos aços estudados. Inicialmente foram analisados os aços 1, 2 e 3. Em função dos resultados obtidos, foi posteriormente desenvolvido o aço Eletromax.

**Tabela 1:** Composição química média dos aços utilizados no desenvolvimento do estator

| <b>Aço</b> | <b>%C</b> | <b>%Si</b> | <b>%Mn</b> | <b>%Al</b> | <b>%P</b> |
|------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|
| aço 1      | 0,04      | 0,16       | 0,36       | 0,016      | 0,018     |
| aço 2      | 0,01      | 0,35       | 0,35       | 0,16       | 0,13      |
| aço 3      | 0,01      | 1,06       | 0,17       | 0,36       | 0,17      |
| Eletromax  | 0,03      | 0,25       | 0,38       | 0,008      | 0,017     |

Foi também avaliada a influência do tamanho de grão, tendo sido analisadas as propriedades do aço Eletromax com dois diferentes níveis de tamanho de grão. A tabela 2 apresenta os valores típicos de tamanho de grão encontrados nos aços estudados.

**Tabela 2 –** Tamanho de grão dos aços utilizados no desenvolvimento do estator, conforme norma ASTM E45 – Método A.

| <b>Aço</b>                    | <b>tamanho de grão</b> |
|-------------------------------|------------------------|
| aço 1                         | 8 a 9                  |
| aço 2                         | 6 a 7                  |
| aço 3                         | 4 a 5                  |
| Eletromax – condição normal   | 8 a 9                  |
| Eletromax condição modificada | 5 a 6                  |

### 2.2 – Processo de fabricação da tira relaminada

O processo de fabricação da tira de aço relaminado produzido pela Mangels é o seguinte:

- recebimento da bobina laminada a quente
- decapagem
- corte circular
- laminação de desbaste
- recozimento
- laminação de acabamento
- recorte
- embalagem e expedição

#### Recebimento:

No recebimento da bobina laminada a quente, são conferidas as dimensões e a composição química, verificando-se se estas características estão de acordo com a especificação da bobina.

#### Decapagem:

Em uma linha de decapagem contínua, a bobina é desbobinada e imersa em tanques contendo ácido clorídrico para remoção dos óxidos (carepa) provenientes da laminação a quente. Nesta etapa é também realizada inspeção visual da superfície da bobina.

#### Corte circular:

A bobina é cortada longitudinalmente, por facas circulares, em rolos de largura adequada às limitações dos laminadores. Nesta etapa é realizada inspeção dimensional da bobina, com atenção especial ao perfil transversal, visto que a tolerância de espessura das tiras relaminadas para aplicação em lâminas de motor é bastante restrita.

#### Laminação de desbaste:

Realizada em laminadores reversíveis com rígidos sistemas de controle de espessura, de modo a minimizar a variação resultada do processo de laminação a quente. Os cilindros de laminação são retificados com abaulamento apropriado para reduzir a variação de espessura ao longo da largura da tira, bem como garantir a rugosidade da superfície da tira.

A porcentagem de redução de espessura durante a laminação de desbaste deve ser adequada para que se obtenha as características finais de propriedades mecânicas e de estrutura do material.

#### Recozimento:

Tratamento térmico subcrítico realizado para recristalização do material, com atmosfera controlada com composição de aproximadamente 95% de nitrogênio e 5 % de hidrogênio.

#### Laminação de acabamento:

Etapa final de laminação que define as propriedades mecânicas, condições de forma e de rugosidade do material, além da variação de espessura ao longo do comprimento e da largura do rolo. O perfil transversal deve ser o mais homogêneo possível para garantia da dimensão do estator durante formação do pacote do estator.

#### Recorte:

Etapa onde os rolos relaminados são recortados longitudinalmente com a largura do produto final..

#### Embalagem e expedição:

Etapas finais cujo objetivo é garantir a entrega do material no cliente nas condições em que foi especificado.

## 2.3 - Processo de fabricação do pacote do estator

Visando um maior aproveitamento do material, com menor geração de sucata, a Robert Bosch desenvolveu um processo de fabricação em que a tira é estampada em ferramenta progressiva e posteriormente é enrolada na forma de espiras ficando com a forma de uma mola. O pacote do estator é formado pela sobreposição de sucessivas espiras, conforme figura 2.

Esta forma de processamento é extremamente favorável com relação ao aproveitamento do material, porém apresenta o inconveniente de deformar plasticamente o material na forma de espira, o que diminui seu desempenho, aumentando suas perdas magnéticas.

## 2.4 - Método de análise do desempenho do material

Para se avaliar os diferentes tipos de aço, foram feitas análises das perdas magnéticas dos materiais através do ensaio de Epstein. Foram também produzidos pacotes do estator com os diferentes aços e montados os alternadores. Foi então analisada a corrente gerada pelos alternadores, comparando-a com a especificação do produto. Usualmente os alternadores têm como especificação a corrente mínima que é gerada a diferentes níveis de rotação, medida com a peça a quente, o que simula seu desempenho durante o uso

O alternador que foi desenvolvido destina-se a exportação para o mercado europeu cujas especificações estão listadas na tabela 3.

**Tabela 3** – Especificação de corrente mínima a quente para diversos níveis de rotação.

| Rotação (rpm) | Corrente mínima (A) |
|---------------|---------------------|
| 1600          | 50                  |
| 1800          | 65                  |
| 6000          | 120                 |

## 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 – Perdas magnéticas

Foram realizados ensaios de perdas magnéticas nas tiras de aço utilizadas para a produção do pacote do estator, conforme dados apresentados na tabela 4. Estes dados são dos materiais conforme laminados a frio, e servem apenas de referência, visto que, durante a produção do estator, o material é deformado plasticamente, o que aumenta as suas perdas magnéticas.

**Tabela 5** – Resultados médios de perdas magnéticas (W/kg – 1T – 60Hz) encontrados nos materiais conforme fornecidos à Robert Bosch, na condição de laminado a frio.

| <b>aço</b>         | <b>perdas magnéticas (W/kg)</b> |
|--------------------|---------------------------------|
| aço 1              | 9,9                             |
| aço 2              | 3,8                             |
| aço 3              | 2,9                             |
| Eletromax – TG 8/9 | 9,3                             |
| Eletromax – TG 5/6 | 6,9                             |

Como pode-se notar nos dados da tabela 5, comparando-os com os dados das tabelas 1 e 2, o material com menores perdas magnéticas é o aço 3, em razão de seu alto teor de silício, seguido pelo aço 2, com teor de silício intermediário. Ambos materiais também apresentam como vantagem o baixo teor de carbono e o tamanho de grão elevado, fatores que também melhoram seu desempenho.

Com relação aos demais aços, o aço 1 apresenta as maiores perdas magnéticas em razão do baixo teor de silício e pequeno tamanho de grão, além do maior teor de carbono. Comparando-se o aço 1 com o Eletromax com tamanho de grão 8/9, temos uma melhora no rendimento do material, com menores perdas magnéticas, o que ocorre em função do maior teor de silício deste material. Comparando-se as duas condições de tamanho de grão do Eletromax, nota-se a grande influência do tamanho de grão. Ao se reduzir o tamanho de grão de 8/9 para 5/6, houve uma significativa redução das perdas magnéticas.

Analisando-se apenas as perdas magnéticas poderíamos definir que o aço com maior teor de silício seria a melhor alternativa para a produção do estator, porém deve-se lembrar que as perdas magnéticas aqui analisadas referem-se ao material antes da deformação plástica ao qual é submetido durante a rolagem da tira de aço para produção do estator. Após a deformação há um aumento de perdas magnéticas, o que deve ser ainda mais pronunciado no material com maior teor de silício, em função de sua maior taxa de encruamento. Estes dados não foram medidos, mas podem ser analisados através da potência gerada pelo alternador, pois quanto maiores as perdas magnéticas do estator, menor será a corrente gerada pelo alternador.

### **3.2 Corrente gerada pelo alternador**

Todos os materiais foram utilizados para produção dos pacotes dos estatores e montagem dos alternadores para avaliação da corrente gerada pelo alternador, sendo que os processos de fabricação e montagem dos alternadores foram os mesmos em todos os casos, garantindo que outras variáveis não pudessem influenciar o estudo comparativo dos aços elétricos.

A tabela 6 apresenta as correntes geradas pelos alternadores montados com diferentes aços elétricos.

**Tabela 6** – Resultados médios da corrente gerada pelos alternadores nos testes a quente a diferentes rotações.

| aço                | rotação (rpm) |           |           |
|--------------------|---------------|-----------|-----------|
|                    | 1600          | 1800      | 6000      |
| especificação      | mín. 50 A     | mín. 65 A | mín.120 A |
| aço 1              | 46,8 A        | 62,5 A    | 123,2 A   |
| aço 2              | 48,4 A        | 64,2 A    | 125,7 A   |
| aço 3              | 48,2 A        | 64,6 A    | 127,9 A   |
| Eletromax – TG 8/9 | 50,5 A        | 66,3 A    | 124,0 A   |
| Eletromax – TG 5/6 | 50,3 A        | 65,6 A    | 125,8 A   |

Analisando-se os dados, notamos que a altas rotações (6000 rpm) todos os alternadores atendem à especificação de corrente mínima de 120A, porém a baixas rotações os alternadores produzidos com os aços 1, 2 e 3 não atendiam à especificação. Nota-se também que grande diferença obtida nos resultados de perdas magnéticas do material na condição de laminado a frio não resultam em diferenças da mesma ordem na corrente gerada pelos alternadores. A partir desses resultados, a Robert Bosch decidiu por não trabalhar com materiais com maiores teores de silício, mesmo porque o alto custo inviabilizaria a exportação do produto.

Foi então decidido fazer estudos no sentido de melhorar o desempenho do aço 1, tendo sido definida então a composição química do Eletromax, com um pequeno aumento no teor de silício. Os alternadores produzidos com o aço Eletromax apresentaram bom desempenho, atingindo-se a especificação de corrente.

Foi também analisada a possibilidade de se modificar o processo de fabricação do Eletromax, de modo a aumentar o tamanho de grão do material. Foi produzido um lote com tamanho de grão aumentado para 5/6, mas como pode ser observado nos dados apresentados, esta modificação não gerou melhores resultados no desempenho final dos alternadores, além de representar aumento de custo.

#### **4 – CONCLUSÕES**

Foi desenvolvido o aço denominado Eletromax, de composição próxima ao do aço SAE 1006, porém com maior teor de silício, cujo desempenho possibilitou o atendimento às especificações do alternador.

A grande variação das perdas magnéticas encontradas nos diferentes graus de aços elétricos não foi refletida na potência do alternador em razão do processo de fabricação do pacote do estator, que provoca deformação plástica no material.

A parceria entre Mangels e Bosch no desenvolvimento do aço Eletromax e do alternador viabilizou a produção deste item no Brasil e, em razão do baixo custo e bom desempenho do produto, seu fornecimento ao mercado europeu.



## 5 – BIBLIOGRAFIA

(1) ANDRADE, A.H.P; VEIGA,S.M.B.; MONTEIRO, W.A. Aço silício de grão não orientado. In: SEMINÁRIO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS, 1987, S.Paulo, SP. São Paulo: ABM, 1987. p.71-87

(2) BAIN, E.C; PAXTON, H.W. Alloying elements in steel, Ohio: American Society for Metals, 1961

(2) ALLEGHENY LUDLUM STEEL CORPORATION, Fabrication. In: Electrical Materials Handbook, Pittsburg 1961. cap.16, p XVI.1-XVI.8

(3) METALS HANDBOOK, Ohio: American Society for Metals, 1985, Desk Edition, Cap.20, p.20.1 – 20.48

# DEVELOPMENT OF A COLD ROLLED STEEL FOR STATOR PRODUCTION OF HIGH EFFICIENCY ALTERNATORS <sup>(01)</sup>

## ABSTRACT

Mangels, together with Robert Bosch, has developed a cold rolled steel composition for stator production of high efficiency alternators. The chemical composition was optimized to reduce the magnetic losses of the material and also to compensate losses due to the deformation of the steel during special manufacturing process of the stators, that involves besides other processes, stamping and coiling of the steel strip. The magnetic losses obtained in the stator has direct influence on final alternator output. A study of modification of the grain size obtained through modifications in the cold rolling process was also elaborated to determine its influence on final performance of the product. The factor cost also appeared as restriction, once the simple use of a silicon steel, known by low magnetic losses, turned the final product without competitiveness, disabling series production for exportation market.

**(01) 42<sup>nd</sup> Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products – 25 to 28 October 2005, Santos, SP, Brazil**

---