

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO DE CONCENTRADORES DE  
FLUXO OBTIDOS PELO PROCESSO DE REAPROVEITAMENTO DE MATERIAL

**Daniel Gaedke Santos**

Trabalho de Diplomação

Orientadora: Professora Dra. Célia de Fraga Malfatti

Porto Alegre  
2011



Dedico este trabalho a meu pai Sérgio, minha mãe Marilu, minha irmã Carla, minha namorada Raquel, meus familiares e amigos, que não deixaram de acreditar que essa data chegaria...

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a meus pais, os quais foram fundamentais para minha formação.

A Professora Célia Malfatti pela orientação nesse trabalho.

Ao mestrando do LAPEC, Eng<sup>o</sup> Matias De Angelis Korb, e aos colaboradores do LACOR, em especial ao professor Hugo Veit, pela ajuda na moagem do material.

Ao colega do GDER Conrado Carro, pela ajuda na compactação dos corpos de prova.

Aos amigos, Engenheiros Fernando Ruschell e Rudinei Andreotti, e aos Técnicos Metalúrgicos Henri Signor, Rogério Cardoso, Ricardo Belloli e Alexandre Viana, pela ajuda em todos os ensaios realizados.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	X
RESUMO .....	XI
ABSTRACT .....	XII
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 Tratamentos Térmicos .....	4
2.2 Magnetismo.....	9
2.2.1 Comportamento Magnético.....	10
2.2.2 Materiais Magnéticos Duros e Moles .....	11
2.3 Orientadores de Fluxo Magnético.....	12
2.3.1 Tipos e aplicações do Orientador de Fluxo.....	12
2.3.1.1 Lâminas de aço Silício .....	13
2.3.1.2 Materiais a base de ferro eletrolítico.....	14
2.3.1.3 Materiais a base de ferro carbono .....	14
2.3.1.4 Materiais a base de ferrita .....	15
2.3.2 Vantagens de usar orientadores de fluxo magnético.....	15
2.3.3 FERROTRON ®.....	16
2.3.4 Resinas Fenólicas .....	18
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	19
3.1 Caracterização do resíduo .....	19
3.2 Elaboração dos concentradores de fluxo com material reaproveitado.....	21
3.2.1 Resina CR 2001® .....	23
3.2.2 Resina HRJ 10236®.....	23
3.3 Análise do Material.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	32
4.1 Análise da variação de resinas fenólicas.....	33
4.2 Análise da variação de pressão de compactação.....	34

4.3	Análise da variação do ciclo de cura das resinas .....	36
5.	CONCLUSÕES .....	38
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	39
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:	Orientador de fluxo no formato comercializado .....	02
Figura 1.2:	Orientador de fluxo sendo usinado.....	02
Figura 1.3:	Perdas de material resultantes da usinagem .....	03
Figura 2.1:	Relação entre quantidade de carbono e Dureza dos aços com a quantidade de martensita formada. ....	05
Figura 2.2:	Indutor com concentrador de fluxo em laminas de aço silício.....	13
Figura 3.1:	Carepa de Ferrotron® usinado .....	20
Figura 3.2:	Resíduo de Ferrotron® 559H: a) resíduo bruto, sem peneiramento; b) resíduo moído, passante em peneira 35#; c) resíduo moído, passante em peneira 80#; d) resíduo moído, passante em peneira 140# (RODRIGUES 2009) .....	20
Figura 3.3:	Figura 3.3 Difratoograma do resíduo de material magnético (Ferrotron®) (RODRIGUES 2009) .....	21
Figura 3.4:	Moinho de Bolas CERTEC .....	22
Figura 3.5:	Moinho Orbital TECNAL .....	22
Figura 3.6:	Processo de moagem de um moinho de facas (CATÁLOGO Retsch-2010) .....	22
Figura 3.7:	Misturador utilizado na mistura das ligas resinadas.....	24
Figura 3.8:	Matriz cilíndrica para compactação das amostras.....	24
Figura 3.9:	Prensa Hidráulica Manual BOVENAU.....	25
Figura 3.10:	Forno SANCHIS .....	26
Figura 3.11:	Comparação dos ciclos de cura das resinas fenólicas. ....	27
Figura 3.12:	Corpo de prova após compactação e cura .....	27
Figura 3.13:	Efeito da proporção de oxigênio sobre a temperatura da chama de misturas de combustíveis (MACHADO 1996).....	29
Figura 3.14:	Simulação de aquecimento dos orientadores de fluxo .....	30
Figura 3.15:	Variação de temperatura com acordo com o tamanho da chama de oxiacetileno. (RAMOS) .....	30
Figura 3.16:	Gabinete de jateamento CVM .....	31
Figura 3.17:	Processo de Jateamento .....	31

Figura 4.1: Porcentagem de perda de material por ensaio de limpeza. ....	33
Figura 4.2: Perdas de material variando a resina fenólica .....	34
Figura 4.3: Perdas de material variando a pressão de compactação.....	35
Figura 4.4: Perdas de material variando o ciclo de cura das resinas. ....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Relação entre profundidade de camada na têmpera por indução com a frequência e tempo de aquecimento aplicados.....	8
Tabela 2.2:	Propriedades principais do Ferrotron 559 (FLUXTROL) ....	17
Tabela 3.1:	Especificação técnica da Resina CR2001® .....	23
Tabela 3.2:	Especificação técnica da Resina HRJ 10236® .....	24
Tabela 3.3:	Classificação dos corpos de prova utilizados no experimento. ....	27
Tabela 4.1:	% de perdas de massa após os ciclos de limpeza dos corpos de prova.....	32
Tabela 4.2:	% de perdas de material por ensaio, variando a resina fenólica .....	34
Tabela 4.3:	% de perda de material por ensaio, variando a pressão de compactação.....	35
Tabela 4.4:	% de perda de material por ensaio, variando o ciclo de cura das resinas ....	36

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
kg	Quilograma
HR	Dureza Rockwell
Mm	Milímetro
Hz	Hertz
N	Newton
A	Ampère
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
#	Mesh
Ω	Ohm

## RESUMO

O tratamento de têmpera por indução é um processo muito utilizado em diversos ramos do setor metal mecânico, em especial na fabricação de componentes para automóveis. Isso se deve ao fato de que esse processo permite a têmpera em áreas específicas das peças e, principalmente, pelo baixo custo comparado com outros processos de endurecimento superficial, além, da possibilidade de economia de espaço, alto rendimento, e eficiência.

Para a maior eficiência em têmperas por indução, são utilizados orientadores de fluxo magnéticos, que normalmente são feitos de componentes a base de uma liga ferro, silício e níquel.

São poucas empresas que produzem esses orientadores de alta qualidade. Esse é um dos motivos pelos quais esse material possui um valor bastante elevado, chegando a custar mais de mil reais o kg. Esse material para ser utilizado na indústria, precisa inicialmente ser usinado para ser acoplado nos indutores e, nessa usinagem, dependendo da complexidade da peça, perde-se mais de metade do material.

Diversos trabalhos já foram realizados visando o reaproveitamento do resíduo oriundo na usinagem desse orientador de fluxo (FERROTRON®). Os resultados obtidos indicaram a necessidade de otimização dos parâmetros de processamento desses concentradores de fluxo a partir de material reaproveitado. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo a melhora da resistência ao desgaste por abrasão desses componentes. Para isso, foi realizada a mistura do orientador de fluxo magnético (triturado e moído) com duas resinas fenólicas específicas pré-determinadas a partir de outros estudos. Avaliou-se a influência da pressão de compactação e o ciclo de cura dessas resinas.

Os resultados dos experimentos mostraram que é possível melhorar a resistência ao desgaste dos orientadores de fluxo obtidos com reaproveitamento de material. Essa melhora foi verificada através do aumento da pressão de compactação, e do acréscimo de resina fenólica, em especial da resina HRJ10236. Porém não se pode observar alguma diferença na resistência com a variação dos ciclos de cura das resinas.

## **ABSTRACT**

The treatment of induction hardening is a process that is used in various branches of the metal mechanic sector, particularly in the manufacturing of automotive components. This is due to the fact that this process allows tempering of the parts in specific areas, and especially the low cost compared to other surface hardening processes, in addition, the possibility of space-saving, high performance and efficiency.

For the highest efficiency in induction hardening, are used for guiding magnetic flux, which are usually made of the base components of an alloy iron, silicon and nickel. There are few companies that produce these high quality advisors. This is one of the reasons this material has a very high value, costing more than thousand dollars a kilo. This material to be used in industry must first be machined to be engaged in inducing and that machining, depending on the complexity of the piece, you lose more than half of the material.

Several studies have been conducted to the reuse of waste that originated in the advisor flow machining (FERROTRON ®). The results indicated the need for optimization of processing parameters such concentrators flow from material salvaged. In this context, this work aims at the improvement of abrasion resistance of these components. For this, we performed a mixture of guiding magnetic flux (crushed and ground) with two phenolic specific pre-determined from other studies. We evaluated the influence of compaction pressure and curing cycle of these resins.

The results of the experiments showed that it is possible to improve the wear resistance of guiding the flow of material obtained from recycling. This improvement was verified by increasing the compaction pressure, and the addition of phenolic resin in particular HRJ10236. But one can not observe any difference in resistance to the change of the resin cure cycles.

## 1. INTRODUÇÃO

O tratamento de têmpera superficial é um processo de endurecimento de aços no qual ocorre um aquecimento rápido de apenas uma fina camada da peça, acima da temperatura crítica, seguido de um rápido resfriamento, tendo por consequência a formação de martensita em toda a região que foi austenitizada. Pelo fato de o aquecimento ser apenas superficial, apenas uma fina camada da peça é endurecida, sendo que todo o restante permanece com as características originais.

É bastante utilizada na indústria devido ao fato de ser um processo que pode ser utilizado para se obter um tratamento térmico com precisão, temperar apenas partes de peças e pode ser utilizado em materiais de baixo custo.

A têmpera por indução é um processo de aquecimento aplicado a materiais condutores eletricamente, através da geração de um campo magnético que é variável, e que as linhas de força penetram na peça. O campo magnético gerado induz um potencial elétrico, que cria uma corrente elétrica que depende tanto da forma quanto das características elétricas da peça.

Esse processo de aquecimento por indução tem uma grande gama de aplicações que vão desde a soldagem até a fundição. Essa grande quantidade de aplicações é possível pelo fato de todos os metais serem condutores elétricos e pelo menor custo em relação aos demais métodos de endurecimento. Essa vantagem é ainda maior quando a produção é em série, como por exemplo, em montadoras e fábricas de peças para automóveis.

Os orientadores de fluxo magnético são materiais constituídos normalmente por elementos com ferro, níquel, cobre que podem ser puros ou ligados e misturados a resinas fenólicas. Tem por função principal melhorar a eficiência do processo de tempera por indução, reduzindo, o consumo de energia, o tempo de operação e assim facilitando a formação da martensita apenas na superfície da peça.

Esse material é vendido no formato de cilindros (figura 1.1) ou em cubos, sendo na maioria dos casos necessária usinagem (figura 1.2) para que se possa ser adaptado aos diversos modelos de indutores de têmpera. Para peças mais complexas, a perda de material

na usinagem pode passar dos 60%, acarretando grandes perdas de material (figura 1.3), aumentando significativamente o custo do processo, assim como custo para o tratamento desse material.



Figura 1.1: Orientador de fluxo no formato comercializado



Figura 1.2: Orientador de fluxo sendo usinado



Figura 1.3: Perdas de material resultantes da usinagem

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo, o reaproveitamento desse material usinado, através da adição de resinas fenólicas, variação na pressão de compactação e do ciclo de cura das resinas utilizadas.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos empregados em metais ou ligas metálicas são definidos como qualquer conjunto de operações de aquecimento e resfriamento, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir-lhes características pré determinadas.

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos dos aços envolvem:

- Remoção de tensões residuais decorrentes de processos mecânicos de conformação ou térmicos;
- Refino da microestrutura (diminuição do tamanho de grão);
- Aumento ou diminuição de dureza;
- Aumento ou diminuição da resistência mecânica;
- Aumento da ductilidade;
- Melhoria da usinabilidade;
- Aumento da resistência ao desgaste;
- Melhoria da resistência a corrosão;
- Melhoria da resistência a fluência;
- Modificação de propriedades elétricas e magnéticas
- Remoção de gases após operações de recobrimento por meio de processos galvânicos (desidrogenação).

### 2.1.1 Têmpera

Tratamento térmico que visa à formação do microconstituente martensita, que possui a microestrutura com máxima dureza em aços carbono. Tratamento esse que consiste em:

- Aquecimento até a temperatura adequada para se obter uma microestrutura austenítica;
- Manutenção da peça nesse patamar de temperatura por tempo adequado;
- Resfriamento em um meio que resulte em velocidade apropriada para a formação da martensita. (COLPAERTI 2008);

O processo de têmpera é de grande importância devido ao grande aumento de resistência mecânica e dureza nos aços, porém ocorre uma queda elevada de ductilidade e tenacidade, sendo necessário um tratamento complementar (revenimento) para diminuir a fragilidade resultante da têmpera.

Porém o principal problema na aplicação da têmpera é a complexidade em encontrar a temperabilidade ideal, devido a grande variação de composição nos aços. Tanto o carbono quanto os elementos de liga tem papel fundamental nesse processo, sendo que influenciam tanto na temperatura de austenitização quanto na velocidade de resfriamento. Dessa forma, a temperatura de austenitização varia de acordo com a quantidade de carbono e elementos de liga.

A figura 2.1 mostra a dureza que pode atingir os aços em função do teor de carbono e quantidade de martensita formada.

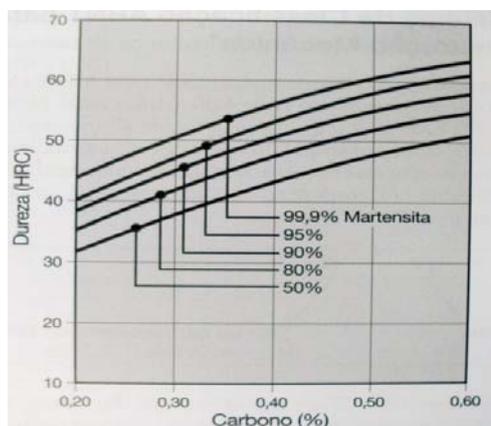


Figura 2.1 Relação entre quantidade de carbono e Dureza dos aços com a quantidade de martensita formada.

A velocidade de resfriamento tem grande importância na têmpera, que deve ser determinada com a finalidade de permitir apenas a formação de martensita. A velocidade não pode ser muito elevada, pois pode ocorrer o empenamento da peça, e também não pode ser muito lenta, pois corre o risco de não formar a martensita, sendo que pode ser controlada pelo meio de resfriamento. Esse resfriamento é feito na maioria dos casos com água, em meios de menor severidade como óleo sem ou com agitação, e em meios mais severos, como salmoura sem ou com agitação.

#### 2.1.1.1 Têmpera por indução

Tratamento utilizado para aquecer metais condutores de eletricidade através da aplicação de campo magnético variável, onde linhas de força entram na peça. Esse campo magnético induz um potencial elétrico que gera corrente elétrica (corrente de Eddy) que é parasita, e que tem por finalidade dissipar energia e produzir calor pelo fluxo contra a resistência de um condutor imperfeito.

O princípio do aquecimento por indução são uma bobina indutiva, uma fonte de corrente, uma fonte de corrente alternada e peça a ser temperada. A bobina é conectada a fonte de corrente alternada, fazendo com que se forme um campo magnético variável pelo fluxo de corrente.

O aquecimento por indução encontra um grande número de aplicações em todos os campos do trabalho com metais. No caso específico de endurecimento superficial, onde temos como exemplos a tempera superficial de virabrequins, eixos de transmissão, juntas universais, engrenagens, sedes de válvulas e trilhos.

A têmpera por indução tem como principal aspecto positivo na Metalurgia a possibilidade de compensar curtos tempos do processo com temperaturas extremamente elevadas. Além disso, este processo tem como vantagem a possibilidade de integração às linhas de produção, minimizando assim o custo do trabalho.

As principais vantagens da utilização da têmpera por indução são:

- Economia de energia:

Quando é usado um forno de tratamento com aquecimento convencional, um lote de peças é colocado no interior do forno, provavelmente em uma bandeja ou em um cesto,

e toda a carga é aquecida até a temperatura necessária.

Utilizando-se as técnicas do aquecimento indutivo, somente as regiões que necessitam de tratamento são aquecidas. Não existe o longo ciclo de espera para o aquecimento do forno, bem como, não existe o consumo de energia para o aquecer as bandejas ou as esteiras e a cesta de transporte. Desta forma é possível constatar que haverá uma economia substancial de energia térmica quando é usado o aquecimento indutivo.

- **Melhora do Meio Ambiente:**

O processo de aquecimento indutivo é inerentemente limpo. Alguma nevoa, a qual pode surgir em função de queima dos elementos existentes na superfície da peça ou dos polímeros especiais, que são utilizados para realizar o choque térmico. Todavia, esta nevoa é facilmente removida por um exaustor com filtro, que é silencioso durante o seu funcionamento.

- **Automação e produção em linha:**

O equipamento de aquecimento por indução possui dimensões reduzidas, portanto é adequado para a produção em linha, condição que permite a sua automação. O equipamento de aquecimento por indução funciona com alta densidade de potência, todavia o equipamento possui dimensões menores que um forno convencional. Geralmente não são necessárias fundações especiais ou poços como no caso dos fornos convencionais.

A quantidade de energia aplicada é controlada tendo por base a potência e o ciclo de aquecimento e assim permitindo que a qualidade do aço permaneça inalterada e que seja obtido o aquecimento uniforme e repetitivo obtendo-se tratamento térmico consistente.

E como o tempo e a potência são pré-ajustados para cada tipo de peça, não é necessário que o operador possua conhecimento específico.

- Dureza:

Embora seja usado para obter uma dureza superficial específica, o processo também pode ser usado para aumentar a resistência e melhorar as propriedades de torção, por exemplo, de um eixo.

A dureza superficial inicialmente é função direta da quantidade de carbono contida na composição química da liga. O aço carbono simples pode ser facilmente temperado, usando o aquecimento indutivo, oferecendo uma alternativa de baixo custo para muitas aplicações.

- Profundidade da Camada Transformada

Enquanto a dureza superficial obtida está diretamente ligada à quantidade de carbono contida na composição da liga, a profundidade da camada transformada é função direta da frequência de ressonância do Gerador de Indução selecionado para a aplicação, da densidade de potência e do tempo de aquecimento, conforme a tabela abaixo.

Tabela 2.1: Relação entre profundidade de camada na têmpera por indução com a frequência e tempo de aquecimento aplicados.

Profundidade da camada (mm)	Tempo de aquecimento segundos e frequência		
	450 kHz	10 kHz	3 kHz
0,5	0,1		
1,0	0,6		
1,5	1,5	0,1	
2,0		0,3	
4,0		3,0	
6,0			1,0
8,0			3,5
10,0			10,0

Para uma determinada densidade de potência e tempo de aquecimento, para camadas com pequena profundidade necessita-se de altas frequências e para uma

determinada frequência, camadas com pequena profundidade são obtidas com pequenos tempos de aquecimento e com altas densidades de potência. (HEAT TREATER'S GUIDE)

## 2.2 Magnetismo

Magnetismo é a capacidade de certos materiais, em especial ferro, níquel, cobalto e algumas de suas ligas e compostos em adquirir um alto e permanente momento magnético. As aplicações de materiais magnéticos são muitas e fazem uso de quase todos os aspectos do comportamento magnético. Existe uma variedade extremamente grande de diferentes tipos de materiais magnéticos e é importante saber primeiro porque estes e somente estes materiais possuem propriedades magnéticas e em seguida saber o que leva a comportamentos diferentes nestes materiais, por exemplo, porque um material carrega um momento permanente enquanto outros não.

As pesquisas por materiais magnéticos com melhores características são motivadas pela possibilidade de redução nas dimensões dos equipamentos e diminuição de limitações no desempenho devido à saturação e perdas.

O elétron, cuja dinâmica é tratada especialmente pela mecânica quântica, gera o campo magnético mais simples por meio do movimento giratório em torno do seu próprio eixo em dois sentidos. Esta componente dinâmica, denominada de spin, ocorre simultaneamente com a revolução do elétron em torno do núcleo atômico. Os fundamentos da Física Quântica explicam os fenômenos ocorridos na estrutura atômica

Nos elementos denominados de ferromagnéticos, tais como o ferro, níquel e cobalto, o movimento dos elétrons no orbital não contribui, de forma substancial, para o magnetismo observado. Desta forma, os átomos destas substâncias agem como um conjunto de minúsculos magnetos.

Uma concepção importante no magnetismo é considerar um átomo como sendo um anel de arame infinitesimal, que transporta corrente. Esse movimento gera um campo magnético, que é denominado de dipolo magnético. Por definição, dipolos magnéticos consistem de dois pólos magnéticos antagônicos e conjugados, que geram perturbações magnéticas acentuadas a seu redor, em incessante transmissão entre os referidos dipolos caracterizando o momento magnético. Esta concepção possibilita a visualização do comportamento magnético dos átomos de uma maneira simplificada. O momento

magnético gerado pelo núcleo do átomo, por ser de uma ordem de grandeza de  $10^{-3}$  do momento magnético do elétron, é desprezado e, portanto, o momento magnético de um átomo corresponde à soma dos momentos magnéticos de cada um dos elétrons, incluindo as contribuições tanto ao nível de orbital quanto de spin, considerando-se o cancelamento dos momentos. Uma boa aproximação para descrever o momento magnético de um sólido pode ser feita em termos de sua estrutura eletrônica. A interação dos momentos magnéticos induzidos com um campo magnético externo aplicado resulta nas propriedades magnéticas macroscópicas dos materiais (Othmer – 1983)

### 2.2.1 Comportamento Magnético

Alguns materiais, tal como o ferro, são marcadamente magnéticos, enquanto que outros não o são. De fato, uma das técnicas mais simples de separação de materiais ferrosos dos não-ferrosos é através da comparação de suas propriedades magnéticas. A importância histórica e comercial do ferro como um material magnético deu origem ao termo *ferromagnetismo*, para englobar as intensas propriedades magnéticas possuídas pelo grupo do ferro na tabela periódica.

O ferromagnetismo é resultado da estrutura eletrônica dos átomos. No máximo dois elétrons podem ocupar cada um dos níveis de energia de um átomo isolado e que isso também é válido para os átomos de uma estrutura cristalina. Esses dois elétrons têm spins opostos e, como cada elétron, quando girando em torno de si mesmo, é equivalente a uma carga se movendo, cada elétron atua como um magneto extremamente pequeno, com os correspondentes pólos norte e sul.

De uma maneira geral, em um elemento o número de elétrons que tem um certo spin é igual ao número de elétrons que tem o spin oposto e o efeito global é uma estrutura magneticamente insensível. Entretanto, em um elemento com subníveis internos não totalmente preenchidos, o número de elétrons com spin num sentido é diferente do número de elétrons com spin contrário. Dessa forma esses elementos têm um momento magnético global não-nulo.

Como os átomos ferromagnéticos adjacentes se alinham mutuamente, de forma a terem suas orientações numa mesma direção, um cristal ou grão contém domínios magnéticos. Os domínios geralmente não têm dimensões superiores a 0.05 mm.

Em um material magnético desmagnetizado os domínios estão orientados ao acaso, de forma que seus efeitos se cancelam. Entretanto, se os domínios são alinhados por um campo magnético, o material se torna magnético. O alinhamento de todos os domínios em uma direção origina um efeito aditivo, o qual pode ou não permanecer após a retirada do campo externo.

Para designar quando o alinhamento magnético é permanentemente retido ou não, são usados respectivamente os termos “material magnético duro” e “material magnético mole”; como os materiais mecanicamente duros tendem a ser magneticamente duros, esses termos são adequados. As tensões residuais de um material endurecido evitam a redistribuição ao acaso dos domínios. Um material normalmente perde essa ordenação dos domínios magnéticos quando é recozido, já que a atividade térmica provoca a desorientação dos domínios. (IMATEC)

### 2.2.2 Materiais Magnéticos Duros e Moles

Os materiais magnéticos são classificados em duros e moles, estes últimos também referidos como macios ou doces. Os magnetos duros, também chamados ímãs, são aqueles "permanentes" - o que significa que exigem um forte campo externo para levar sua magnetização à zero. Já os magnetos moles possuem um magnetismo facilmente reversível.

O uso dos materiais magnéticos depende justamente de que eles sejam duros ou moles. Ou, dito de outra forma, algumas aplicações exigem materiais duros e outras aplicações exigem materiais moles. Um ímã de geladeira, por exemplo, deve ser feito de um material magnético duro, para que possa permanecer grudado por muito tempo. Já os motores elétricos exigem materiais magnéticos moles, para que eles possam se adaptar rapidamente às alterações da corrente elétrica alternada.

A característica de material magnético duro ou mole depende do domínio - a menor unidade do material que mantém uma orientação magnética própria. No caso dos materiais magnéticos moles, quando o campo magnético externo é retirado, a orientação magnética dos domínios desaparece. (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA)

## 2.3 Orientadores de Fluxo Magnético

Os orientadores de fluxo em tempera por indução são utilizados em indutores com a finalidade de diminuir a relutância ao caminho a ser percorrido pelo campo magnético, fazendo com que para um menor valor de potencia aplicado, se tenha uma eficiência maior. Para se diminuir essa relutância, a melhor maneira é diminuindo a distância entre o indutor e a peça.

A área externa ao indutor representa a maior região por onde circulam as linhas de fluxo do campo magnético, bem como, na região interior do indutor. O ar tendo permeabilidade relativa igual a um, oferece um caminho fraco para a passagem das linhas de fluxo do campo magnético externo ao indutor. A otimização do caminho fraco para a passagem das linhas de fluxo do campo magnético externo ao indutor poderá ser realizada com um material que forneça maior ou menor relutância ao campo magnético. A permeabilidade deste material deverá ser superior a um. Isto significa que quanto maior for à permeabilidade do material, que irá substituir o caminho de ar externo ao indutor, maior eficiência será obtida durante o processo de aquecimento.

O caminho de ar externo ao indutor, muitas vezes pode ser reduzido através do uso de concentrador de campo magnético. Os concentradores normalmente são construídos em laminas de aço silício, e ligas de pó de ferro silício sinterizado ou moldável. Em algumas aplicações e dependendo de suas características particulares pode-se reduzir o tempo de aquecimento da peça entre 30 e 50%, bem como, ocorre melhora significativa no controle do aquecimento. Quando o aquecimento da peça ocorre em menor tempo, ocorre menor formação de óxidos na superfície sendo significativa também à redução da deformação e distorção da peça. Por fim, ressalta-se também a redução do consumo de energia, para um mesmo ciclo de aquecimento.

### 2.3.1 Tipos e aplicações do orientador de fluxo.

Os materiais normalmente utilizados como concentrador são fracamente magnéticos, ou seja, eles tornam-se magnéticos somente quando são submetidos a um campo magnético. Inicialmente são fracamente magnéticos, pois as linhas de concentração magnética estão aleatoriamente alinhadas (nesta condição o material não é magnético), mas as linhas de concentração magnética auto alinham-se facilmente e rapidamente de acordo com o campo magnético a que são submetidas. Quando todas as linhas de concentração

magnética estão totalmente alinhadas com o campo magnético, ocorre o fenômeno denominado saturação. Não será aceita mais energia magnética quando a saturação é atingida.

Vários tipos de materiais comumente utilizados para concentrar ou controlar o campo magnético em sistemas de aquecimento por indução são as laminas de aço silício, materiais a base de ferro eletrolítico, materiais a base de ferro carbono e materiais a base de ferrita.

### 2.3.1.1 Lâminas de aço silício

As lâminas de aço silício são obtidas a partir de chapas de aço silício, tipo grão orientado, normalmente utilizadas na fabricação de transformadores. Elas devem possuir isolamento entre si, ou seja, são revestidas por uma camada de verniz em ambos os lados e sua utilização depende diretamente da frequência de trabalho do equipamento e de sua espessura que pode variar entre 0,051 mm e 1,520 mm (0,051 mm para frequências em torno de 200 kHz, 0,152 mm para frequências em torno de 10 kHz e 1,520 mm para frequências em torno de 60 Hz).

Estes materiais apresentam certo grau de dificuldade em seu manuseio e preparação, pois além da mão de obra necessária são necessárias muitas peças para montagem de um indutor, fator que muitas vezes inviabiliza o desenvolvimento de um indutor com este tipo de material. São necessárias muitas horas para preparar e montar as chapas no indutor, bem como, a sua desmontagem não é fácil, para reaplicá-las, além de se degradar mais rapidamente com o tempo, em aproximadamente seis meses ou menos. As chapas normalmente são substituídas quando o indutor é restaurado. As duas principais vantagens são que suportam maiores temperaturas e apresenta maior resistência a choques mecânicos.

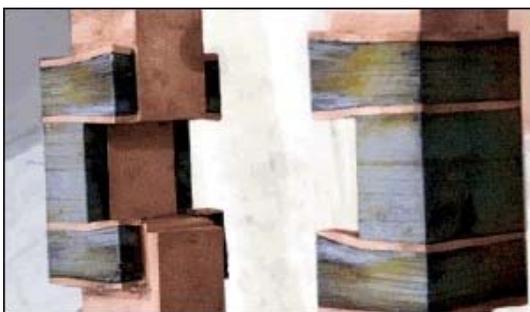


Figura 2.2: Indutor com concentrador de fluxo em lâminas de aço silício.

### 2.3.1.2 Materiais a base de Ferro eletrolítico

Materiais a base de ferro eletrolítico possuem tecnologia mais avançada que os materiais a base de ferro carbono e foram desenvolvidos nos últimos anos especificamente para aplicação em aquecimento indutivo.

São facilmente e rapidamente usináveis por equipamentos convencionais, fabricados em mais de uma centena de dimensões e estão disponíveis em três tipos de liga com permeabilidade acima de 56. Sendo um a liga para altas frequências (200-450 kHz); uma liga para média frequência (10-300 kHz) e outra para baixa frequência (60-50 kHz).

É muito fácil trabalhar com estes materiais, pois eles são usinados em máquinas ferramentas convencionais e também podem ser montados e desmontados rapidamente durante o desenvolvimento do indutor. Normalmente não se deterioram com o tempo podem ser retirados e colocados após o reparo do indutor. Eles também são adaptáveis à indutores do tipo multi-espiras. Algumas chapas podem ser soldadas ao indutor para melhor troca térmica e refrigeração do concentrador de campo. Não é necessária mão de obra intensa para esta aplicação. A profundidade da camada é muito próxima da camada produzida por chapas laminadas em indutores lineares e mais profundas em bobinas circulares.

A desvantagem é que não suportam altas temperaturas (irradiada da peça em aquecimento com ciclos longos; gerada no indutor por refrigeração inadequada) e por choques mecânicos entre a peça e o indutor.

### 2.3.1.3 Materiais a base de ferro carbono

Os materiais a base de ferro carbono, originalmente foram fabricados para aplicação em bobinas de rádios, a cerca de 40 anos atrás. São facilmente usináveis e estão disponíveis em várias dimensões e tem permeabilidade em torno de 14. Esses materiais podem trabalhar na faixa de frequência entre 20 e 40 kHz.

Estes materiais não podem ser soldados, e devem ser tratados por solução ácida. Como normalmente são aplicados em equipamentos de rádio frequência e em indutores multi-espiras, podem causar curto circuito entre as espiras. Possuem as mesmas características de temperatura do material anterior, contudo a profundidade da camada obtida é de 10 a 20% menor que a camada obtida com o material a base de ferro eletrolítico. Não suporta altas temperaturas e choques mecânicos.

### 2.3.1.4 Materiais a base de ferrita

Materiais a base de ferrita são apresentados em duas formas principais. Os fibro cerâmicos, que são quebradiços e somente podem ser usinados com ferramentas de diamante e são fabricados em pequenas dimensões, e os a base de ferrita, usináveis por serem fabricados por um método similar ao material a base de ferro eletrolítico. Esta liga foi desenvolvida para obter-se um material com alta resistência mecânica.

Os produtos a base de cerâmica não podem ser levemente soldados, não necessitam ataque e possuem as mesmas características de temperatura como os outros materiais plásticos.

### 2.3.2 Vantagens de usar orientadores de fluxo magnético

As principais vantagens da utilização dos orientadores de fluxo magnético são as seguintes:

- Facilidade em desenvolver o aquecimento da peça, devido ao melhor controle;
- Melhores resultados metalúrgicos, devido à maior dureza superficial obtida, com uma potência determinada;
- Mais peças por hora, com um indutor existente, devido a melhor eficiência do indutor;

- Menor potência absorvida do gerador de indução, necessária para produzir uma determinada peça;
- Capacidade de produzir peças com maiores dimensões, com um gerador de indução existente;
- Capacidade para selecionar a profundidade da camada na peça;
- Capacidade para bloquear ou aquecer áreas selecionadas e pré-determinadas da peça;
- Proporciona aumento da vida útil do equipamento, pois trabalha com menor densidade de potência;
- Proporciona aumento da vida útil do indutor.

### 2.3.3 FERROTRON®

FERROTRON® é um material magnético não condutor, composto de pó de ferro, silício e outros metais, uniformemente dispersos em um aglutinante de polímero isolante de alto desempenho. As partículas de ferro e dos demais metais extremamente pequenas, juntamente com as propriedades de isolamento do ligante, resultam em alta permeabilidade, baixa perda por histerese e resistência a temperaturas de até 300°C.

É um material bastante dúctil que pode ser facilmente usinado, sem que ocorram rachaduras ou desgaste. A combinação de materiais faz com do FERROTRON® um material ideal para intensificar e tempera por indução, em peças complexas com alto grau de dificuldade para serem tratadas, como engrenagens, componentes de eixos automotivos, etc. (FLUXTROL 2011)

Tem como principais características:

- Alta estabilidade ao choque magnético
- Redução do custo de energia
- Resistentes a temperaturas até 250 ° C
- Não condutividade elétrica
- Fácil Usinagem
- Faixa de frequência 60hz - 50hz
- Tempos de ciclo mais curto

### 2.3.3.1 FERROTRON 559®

Ferrotron 559® possui altíssima resistividade elétrica e é designado para uso em aplicações de alta frequência (50 KHz a 3000 kHz) que solicitem reduções de perdas magnéticas. Esse material tem permeabilidade inicial em torno de 16 e permeabilidade máxima próxima a 18. O mesmo tem como propriedade uma alta estabilidade em uma gama imensa de intensidade de campo magnético e frequência. A densidade de saturação é 1T. Além disso, o FERROTRON 559® é facilmente usinável, tem uma boa resistência à temperatura (250°C por longo período e 300°C por curto tempo). É a indicação ideal para acoplamento a indutores de cobre eletrolítico, para têmpera em mais difíceis peças de alta complexidade, em especial componentes automotivos.

Tabela 2.2: Propriedades principais do Ferrotron 559 (FLUXTROL)

<b>Propriedades</b>	<b>Unidades</b>	<b>H Ferrotron 559</b>
Cor de identificação do Produto		Cinza
Densidade de + / - 2%	g / cm <sup>3</sup>	5.9
Permeabilidade inicial	N/A <sup>2</sup>	16
Máxima permeabilidade	N/A <sup>2</sup>	18
Faixa de frequência operacional	kHz	10--3000
Maior Gama de frequência	kHz	50--1000
Resistência da temperatura	°C	250 (Longo tempo)
	°C	300 (Curto tempo)
Resistividade	kOhm.cm	> 15

### 2.3.4 Resinas Fenólicas

A síntese de resinas fenólicas é realizada pela mistura de formaldeído e fenol. O formaldeído é bifuncional (pode formar duas ligações) e o fenol é trifuncional (podendo formar três ligações). A reação completa dos dois produtos é, portanto, na razão molar de 3:2.

As resinas fenólicas são divididas em dois tipos: novolacas e resóis. As resinas novolacas são conhecidas como de dois estágios, sendo normalmente sintetizadas com

menor quantidade de formaldeído. Para o processo de cura, é necessária a adição de um produto capaz de fornecer o restante do formaldeído ou equivalente para a reação. Invariavelmente, utiliza-se hexametileno tetramina, que age como uma mistura de formaldeído e amônia. O subproduto da reação é normalmente amônia.

As resinas fenólicas do tipo resol são conhecidas como resinas de um estágio e são sintetizadas com catalisadores básicos e com formaldeído na quantidade necessária para permitir reação completa. A reação é interrompida com o resfriamento logo que algumas ligações cruzadas estão presentes, o que representa um risco se a reação é levada a um ponto onde a resina torna-se sólida à temperatura ambiente. Por esse motivo, aplicações destas resinas geralmente usam soluções líquidas ou resinas parcialmente reagidas.

Os catalisadores são componentes importantes na reação de síntese de resinas fenólicas. Catalisadores ácidos não são utilizados para resinas resóis porque não permitem acúmulo de alcoóis fenólicos e éteres dibenzílicos, os quais predominam em resinas resóis. Catalisadores alcalinos são utilizados na síntese de resinas novolacas, mas requerem a presença de excesso de fenol para suprimir a acumulação destes intermediários, que devem ser removidos e reciclados posteriormente. As resinas fenólicas são utilizadas para obtenção de compósitos estruturais, com reforços de fibra de vidro e carbono, devido ao caráter auto-extinguível. Essas resinas também são muito utilizadas como matrizes precursoras de carbono, devido ao seu baixo custo e facilidade de processamento. (NETO 2006).

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Caracterização do resíduo

O material utilizado é a carepa de Ferrotron® 559H (figura 3.1), coletado após usinagem em torno Sanches Blanes MM0254. Esse resíduo foi coletado em uma empresa do setor metal mecânico, entre 28 e 30 de Março de 2011. O Ferrotron® 559H já foi analisado e caracterizado quanto à morfologia (Figura 3.2), onde ficou constatado que o material com menor granulometria (passante em peneira 140#) apresentou maior homogeneidade na distribuição das partículas, comparado com o resíduo bruto e o passante em peneiras com maior abertura, sendo esse comportamento fundamental na elaboração do compósito a ser testado. (RODRIGUES 2009).

No mesmo trabalho, foi feita a caracterização quanto à composição e morfologia do material. A análise da composição foi feita através de um difratograma (Figura 3.3), onde se observou que o material original (Ferrotron®) é composto basicamente por ferro e níquel (kamacita). Este composto de estrutura cúbica de corpo centrado é constituído basicamente de ferro metálico com aproximadamente 7,5% de níquel e tem como características excelentes propriedades elétricas e magnéticas.

A partir de análise da imagem obtida por Microscopia Eletrônica de Varredura (elétrons retro espalhados) é possível observar que o material Ferrotron® original apresenta em sua constituição a presença de uma resina que deve atuar como ligante entre as partículas (Figura 3.3).



Figura 3.1: Cavaco de Ferrotron® usado

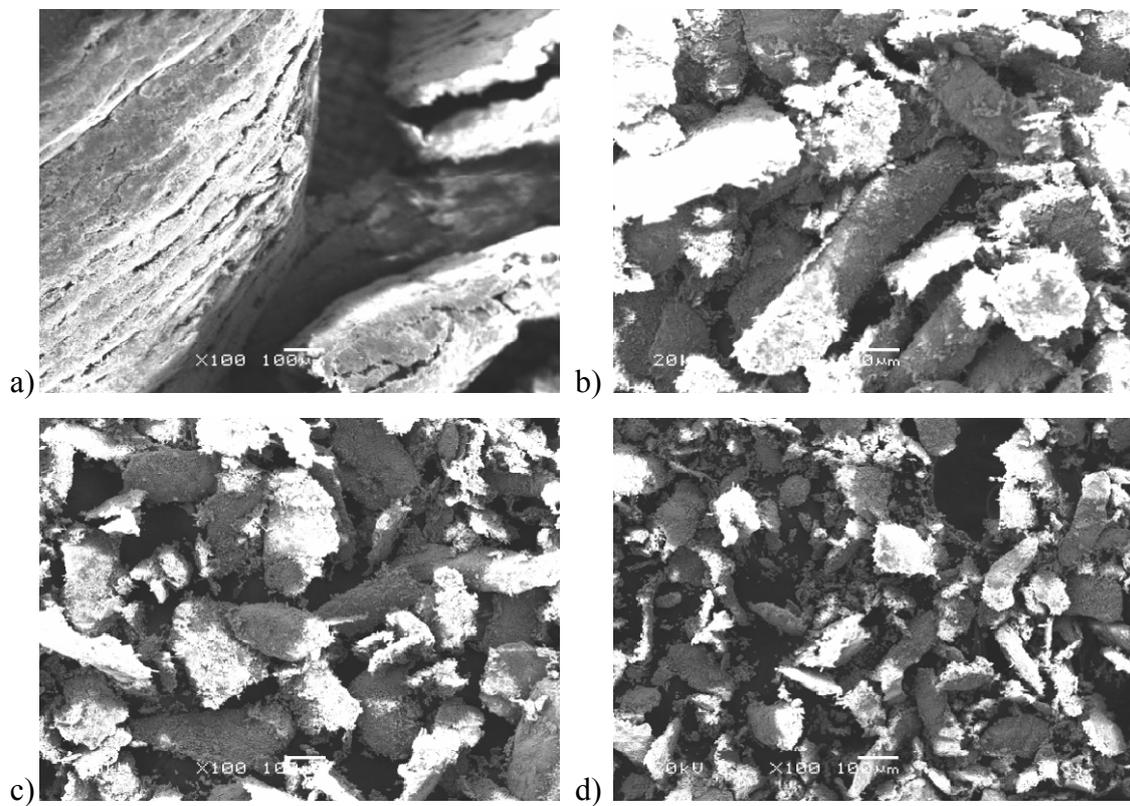


Figura 3.3: Resíduo de Ferrotron® 559H: a) resíduo bruto, sem peneiramento; b) resíduo moído, passante em peneira 35#; c) resíduo moído, passante em peneira 80#; d) resíduo moído, passante em peneira 140# (RODRIGUES 2009)

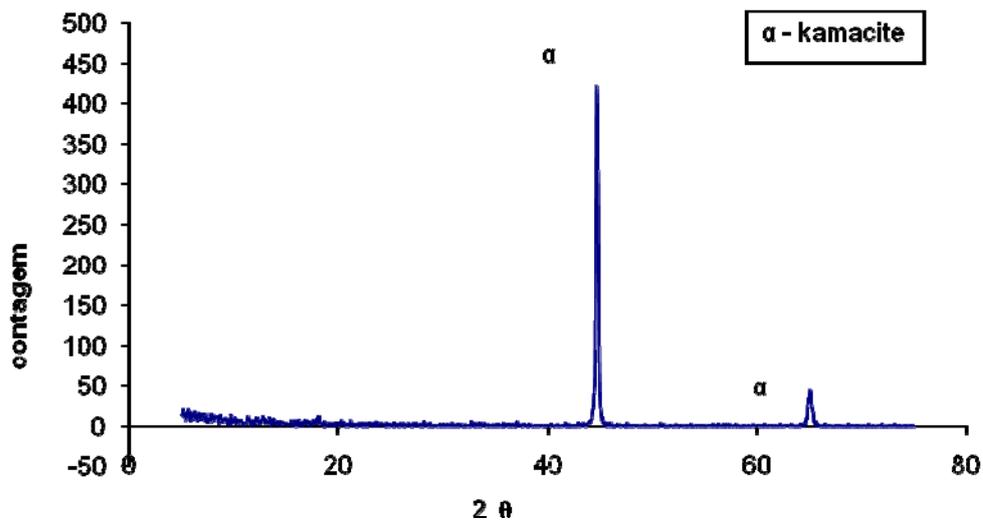


Figura 3.3 Difratoograma do resíduo de material magnético (Ferrotron®) (RODRIGUES 2009)

### 3.2 Elaboração dos concentradores de fluxo com material reaproveitado

O resíduo foi submetido inicialmente a vários processos para se conseguir uma redução na granulometria. Primeiramente foi submetido a uma moagem em um moinho horizontal de bolas, marca CERTECH (figura 3.4), com esferas metálicas com rotação fixa de 100 rpm, durante 30 minutos. Posteriormente, foi submetido a um moinho de Disco Orbital TECNAL (figura 3.5), moído por 10 ciclos de 2 minutos, com disco cerâmico, mas ambos os procedimentos se mostraram pouco eficiente devido à maleabilidade do resíduo, devida principalmente a resina fenólica presente nele.



Figura 3.4: Moinho de Bolas CERTECH      Figura 3.5: Moinho Orbital TECNAL

Então a moagem foi realizada em um moinho de facas, modelo NETZSCH SM 2000, inicialmente usando peneira de 0,5 mm e posteriormente uma de 0,25 mm. O material foi triturado por meio de corte e cisalhamento. Como demonstrado na figura 3.6, material é captado pelo rotor apoiado em dois mancais e é triturado entre este e as barras picadoras instaladas no corpo do moinho. O rotor de seis discos trabalha com placas picadoras reversoras de metal duro dispostas em espiral, por meio de corte seqüencial.



Figura 3.6: Processo de moagem de um moinho de facas (CATÁLOGO Retsch-2010)

Esse procedimento se mostrou o mais eficiente de todos, sendo repetido por mais três vezes com todo material ainda não passante, até todo material ser passante em peneira 140#.

Para essa aplicação existem várias resinas recomendadas, mas várias propriedades precisam ser avaliadas para a escolha da resina ideal, como: dureza; resistividade; ductilidade, etc.

Em estudos anteriores (RODRIGUES 2009), foi visto que havia duas resinas com propriedades mais indicadas para serem utilizadas nesse material.

### 3.2.1 Resina CR 2001®

A Resina CR2001®, é uma resina fenólica, modificada com epóxi, que é normalmente utilizada como ligante na fabricação de discos de corte, e abrasivos em geral. Ela pode ser usada sozinha, ou associada a outras resinas em pó, para aumentar a dureza final, e resistência a altas temperaturas do compósito, e tem sua especificação técnica descrita na tabela 3.1. (BOLETIM TÉCNICO 2008)

Tabela 3.1: especificação técnica da Resina CR2001®

Especificação	Medida
Fluxo à 125°C	20 - 40 mm
Cura à 154°C	40 - 60 s
Teor de Hexametileno tetra-amina	8,5 - 9,5 %
Granulometria (M#200)	mín. 97%
Ponto de fusão capilar	75-90 °C

### 3.2.2 Resina HRJ 10236®

A Resina HRJ10236® é uma resina fenólica em pó, indicada principalmente na fabricação de lonas de embreagem e discos de freio. Ela propicia coeficiente de atrito mediano, estabilidade térmica, e baixa perda por atrito. Também é usada em abrasivos, em discos de corte e rebolos em geral, tendo sua especificação na tabela 3.2. (BOLETIM TÉCNICO 2004)

Tabela 3.2: especificação técnica da Resina HRJ 10236®

<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>MEDIDA</b>
Fluxo à 125°C	20 - 45 mm
Cura à 154°C	50 - 90 s
Teor de Hexametileno tetra-amina	7,5 - 8,5 %
Granulometria (M#200)	mín. 97%

Com base nos resultados obtidos em trabalhos anteriores (RODRIGUES 2009 e KORB 2009), nesse estudo foi utilizado o resíduo oriundo do processo de usinagem do Ferrotron® compactado com a resina HRJ 10236®, e com a resina CR 2001®, na proporção de 97% de material usinado e 3% de resina.

Essa mistura foi realizada em um misturador (figura 3.7) a 120 rotações por minutos, durante 30 minutos, a temperatura ambiente. Para a compactação, foi utilizada uma Matriz cilíndrica (figura 3.8) de 18 mm de diâmetro.



Figura 3.7: Misturador utilizado na mistura das ligas resinadas.



Figura 3.8: Matriz cilíndrica para compactação das amostras

A lubrificação do molde foi feita com estearato de sódio. Em seguida foi feita a pesagem tanto do material quanto da resina e distribuição do material na matriz. Foram utilizadas três pressões diferentes para compactação. Primeiramente foi utilizada a pressão de 600 MPa, a qual foi usada como parâmetro em estudos anteriores (BARBOZA 2008, e RODRIGUES, 2009), uma pressão maior (700 Mpa) e outra menor (500MPa), compactadas em uma prensa hidráulica manual de 30 toneladas, marca BOVENAU (figura 3.9) .



Figura 3.9: Prensa Hidráulica Manual BOVENAU

A cura foi realizada em um forno sem atmosfera controlada, marca SANCHIS (figura 3.10), de duas maneiras. Na primeira, a cura foi feita de acordo com o fabricante das resinas, que recomenda que seja feita uma pré-cura até 50°C com patamar de 2 minutos, e posterior aquecimento a 200°C com patamar de 2 minutos (Figura 3.9, Série 1). No segundo, foi feita uma pré cura até 90°C com patamar também de 2 minutos, e posteriores aquecimentos a 155°C e 220°C (Figura 3.11, Série 2)



Figura 3.10: Forno SANCHIS

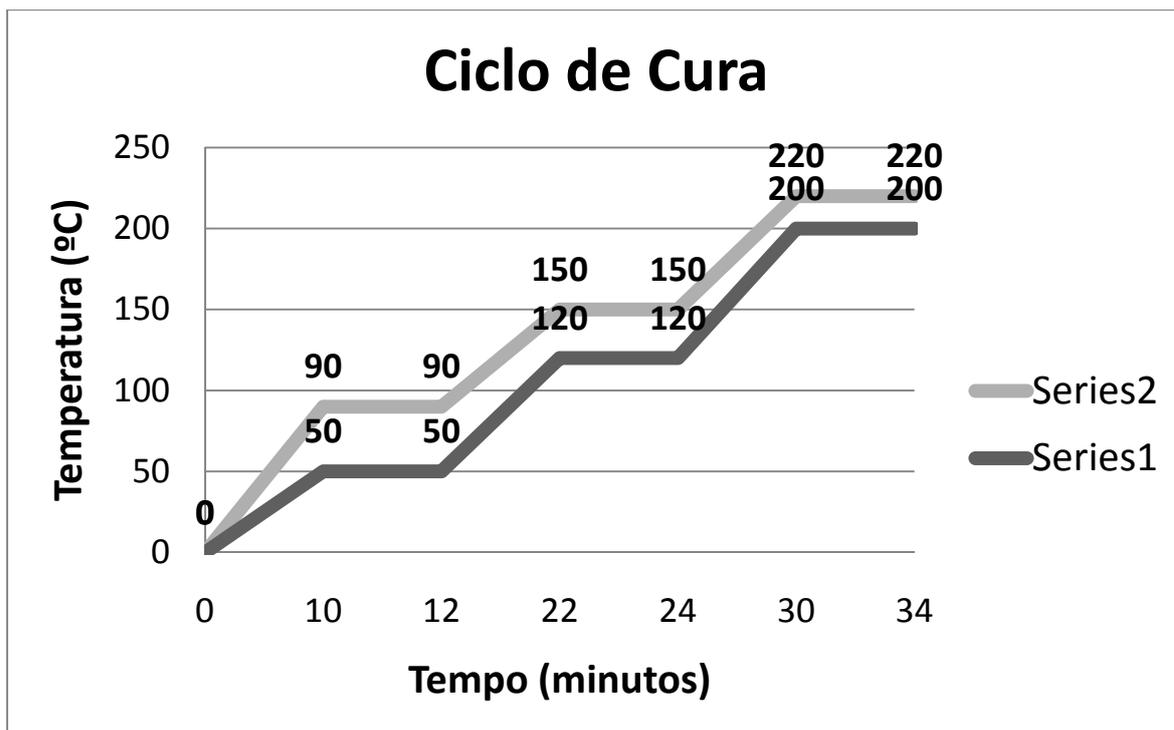


Figura 3.11: Comparação dos ciclos de cura das resinas fenólicas.

Foram confeccionados 12 corpos de prova cilíndricos de 22 milímetros de altura e 18 de diâmetro (figura 3.12), sendo seis com cada resina anteriormente especificada, onde foram variadas as pressões de compactação e cura da resina, classificados na tabela 3.3. Foi confeccionado também um corpo de prova de FERROTRON® original, usinado e com peso similar às demais amostras.



Figura 3.12: Corpo de prova após compactação e cura

Tabela 3.3: Classificação dos corpos de prova utilizados no experimento.

CORPO DE PROVA	RESINA FENÓLICA	TEMPO DE MISTURA	PRESSÃO COMPACTAÇÃO	TEMP MÁX DE CURA	PESO (Gramas)
1	HRJ 10236	30 MINUTOS	600 MPa	220°C	29,833
2	HRJ 10236	30 MINUTOS	700 MPa	220°C	29,925
3	HRJ 10236	30 MINUTOS	500 MPa	220°C	28,872
4	HRJ 10236	30 MINUTOS	600 MPa	200°C	32,979
5	HRJ 10236	30 MINUTOS	700 MPa	200°C	29,886
6	HRJ 10236	30 MINUTOS	500 MPa	200°C	29,455
7	CR 2001	30 MINUTOS	600 MPa	220°C	29,922
8	CR 2001	30 MINUTOS	700 MPa	220°C	29,871
9	CR 2001	30 MINUTOS	500 MPa	220°C	29,596
10	CR 2001	30 MINUTOS	600 MPa	200°C	29,910
11	CR 2001	30 MINUTOS	700 MPa	200°C	29,767
12	CR 2001	30 MINUTOS	500 MPa	200°C	29,775
13	FERROTRON ORIGINAL				33,553

### 3.3 Análise do Material

O presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a resistência dos concentradores de fluxo em condições que simulem o desgaste por abrasão em operação. Esse desgaste se dá principalmente devido ao processo de limpeza empregado. Dessa forma, os componentes elaborados foram testados simulando condições de uso, na própria empresa.

Foi realizada a simulação do processo de limpeza dos orientadores de fluxo, procedimento esse que é realizado sempre quando o indutor encerra a produção estabelecida, apresenta algum defeito, sofre alguma avaria ou perde o rendimento.

O processo inicia com a limpeza do indutor com detergente industrial alcalino, marca GIRASSOL, altamente concentrado, que contém Ácido Sulfônico, Soda Cáustica, Silicato de Sódio Alcalino, com pH 11, utilizado na proporção 1:10 com água. Esse

produto é utilizado juntamente com um pincel para a retirada dos detritos maiores, e a sujeira mais espessa tanto em indutores quanto em duchas de resfriamento.

Em seguida, na maioria dos casos, são retirados os orientadores de fluxo dos indutores, através de um breve aquecimento com chama de oxi-acetileno, a qual pode chegar a temperaturas superiores a 3000\_°C (figura 3.13). Porém no procedimento de retirada do orientador de fluxo do indutor, usa-se o bico da tocha de solda com maior diâmetro, e liberada maior quantidade de oxigênio, a fim de se conseguir uma chama mais branda com maior cone interno de chama acetilênica. O valor exato da temperatura de chama não pode ser precisado, mas contando que apenas a ponta da chama teve contato com a peça (figura 3.14), e de acordo com a figura 3.15 pode-se concluir que variou entre 600°C e 1200°C. Após o aquecimento, com a ajuda de um alicate, são retirados os orientadores para verificar se o indutor está com algum vazamento.

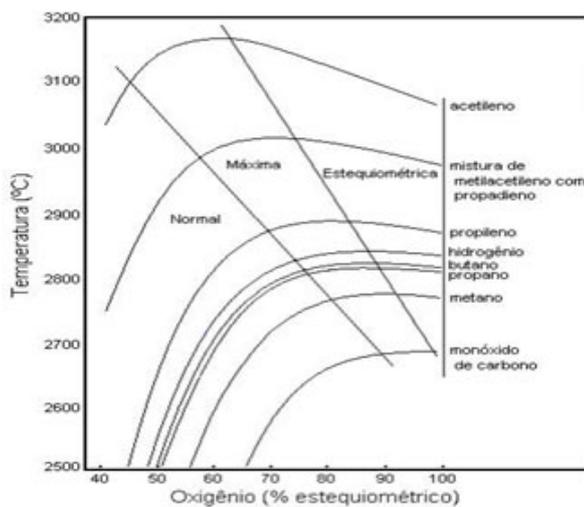


Figura 3.13: Efeito da proporção de oxigênio sobre a temperatura da chama de misturas de combustíveis (MACHADO 1996)



Figura 3.14: Simulação de aquecimento dos orientadores de fluxo

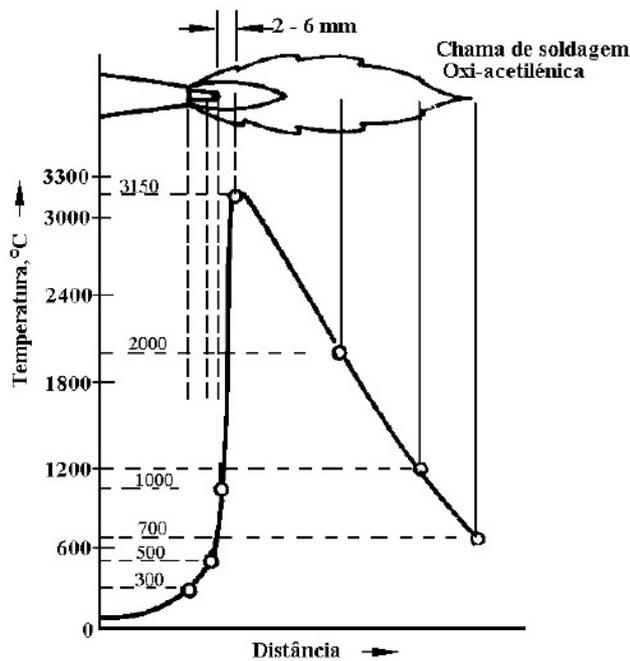


Figura 3.15: Variação de temperatura com acordo com o tamanho da chama de oxiacetileno. (RAMOS)

E por último ocorre uma limpeza com jato abrasivo que é feito com o objetivo de se conseguir uma limpeza mais profunda do indutor. Essa limpeza é feita em um gabinete de jateamento por sucção, marca CMV (figura 3.16), com micro esferas de vidro. Essas micro esferas são constituídas de vidro incolor do tipo Soda-Cal, com granulometria entre 150 e 250 microns, teor de sílica nunca inferior a 65%, e não contendo chumbo, o que o

faz um material inerte e atóxico. O jateamento foi feito em toda a superfície da peça, em um período não superior a 20 segundos em cada ciclo de limpeza (figura 3.17).



Figura 3.16: Gabinete de jateamento CVM



Figura 3.17: Processo de Jateamento

Foi simulada a limpeza desse material em todos os corpos de provas. Foram empregados três ciclos de limpeza. No primeiro e segundo ciclos, foi feita inicialmente a limpeza com o detergente industrial por 1 minuto, e após secagem com uma pistola de ar comprimido, e após, foi feita a limpeza no gabinete de jateamento. No terceiro ciclo, antes da limpeza com o detergente e no gabinete, foi simulada a retirada do orientador de fluxo do indutor, com a chama de oxiacetileno.

Foi feita a pesagem do material após cada ciclo de limpeza, em balança eletrônica com precisão de 0,001g.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Depois de concluídos os três ciclos de limpeza dos orientadores de fluxo, as porcentagens de perdas de massa foram somadas e descritas na tabela 4.1, e figura 4.1.

Tabela 4.1: % de perdas de massa após os ciclos de limpeza dos corpos de prova.

CORPO DE PROVA	PESO (Gramas)	PESO APÓS 1º CICLO DE LIMPEZA	% DE PERDAS	PESO APÓS 2º CICLO DE LIMPEZA	% DE PERDAS	PESO APÓS 3º CICLO DE LIMPEZA	% DE PERDAS
1	29,833	27,928	6,39	26,353	11,66	26,046	12,69
2	29,925	28,992	3,12	27,161	9,24	26,912	10,07
3	28,872	27,212	5,75	24,523	15,06	23,959	17,02
4	32,979	31,581	4,24	29,552	10,39	28,352	14,03
5	29,886	28,634	4,19	27,185	9,04	26,291	12,03
6	29,455	27,301	7,31	25,607	13,06	24,489	16,86
7	29,922	28,082	6,15	25,297	15,46	23,497	21,47
8	29,871	27,476	8,02	24,893	16,66	24,369	18,42
9	29,596	27,147	8,27	23,841	19,45	22,866	22,74
10	29,910	28,19	5,75	24,782	17,14	23,323	22,02
11	29,767	27,984	5,99	26,176	12,06	24,879	16,42
12	29,775	27,558	7,45	25,394	14,71	23,648	20,58
13	33,553	32,533	3,04	32,078	5,29	31,053	7,45

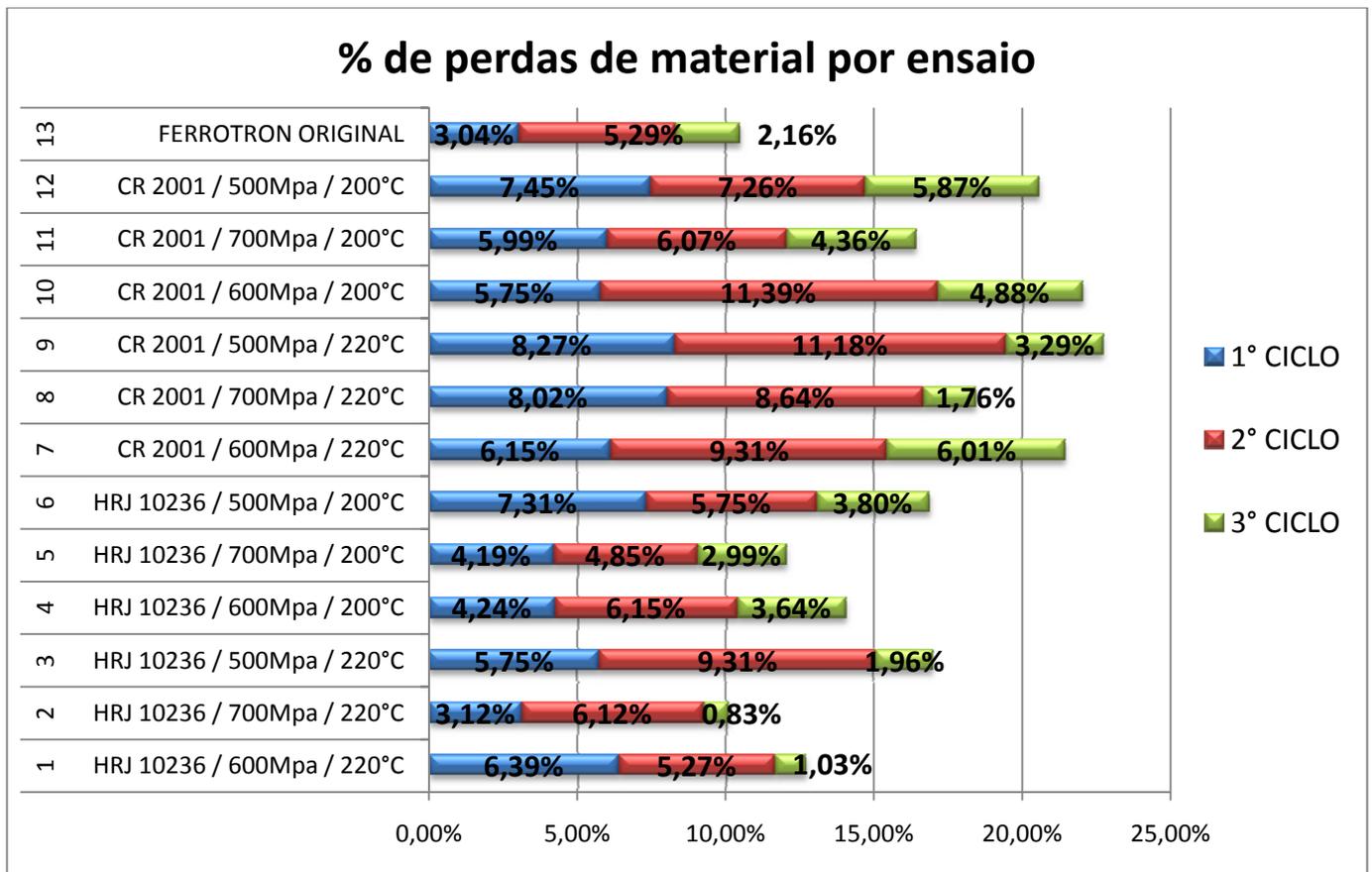


Figura 4.1: Porcentagem de perda de material por ciclo de limpeza.

De acordo com a tabela 4.1, o corpo de prova com perda mais próxima do FERROTRON® original (corpo de prova N°13) foi o corpo de prova N° 2, o qual foi elaborado com a resina HRJ 10236, com pressão de 700 MPa, e com o ciclo de cura de resina com temperatura máxima de 220°C.

#### 4.1 Análise da Variação de Resinas Fenólicas

Foi feito o comparativo entre as resinas utilizadas, a pressão de compactação e o ciclo de cura dessas resinas, representados na tabelas 4.2, e na figura 4.2

Tabela 4.2: % de perdas de material por ciclo de limpeza, variando a resina fenólica

	1º CICLO DE LIMPEZA	2º CICLO DE LIMPEZA	3º CICLO DE LIMPEZA
HRJ 10236	5,17%	11,41%	13,78%
CR 2001	7,44%	16,65%	21,52%
FERROTRON	3,04%	5,29%	7,45%

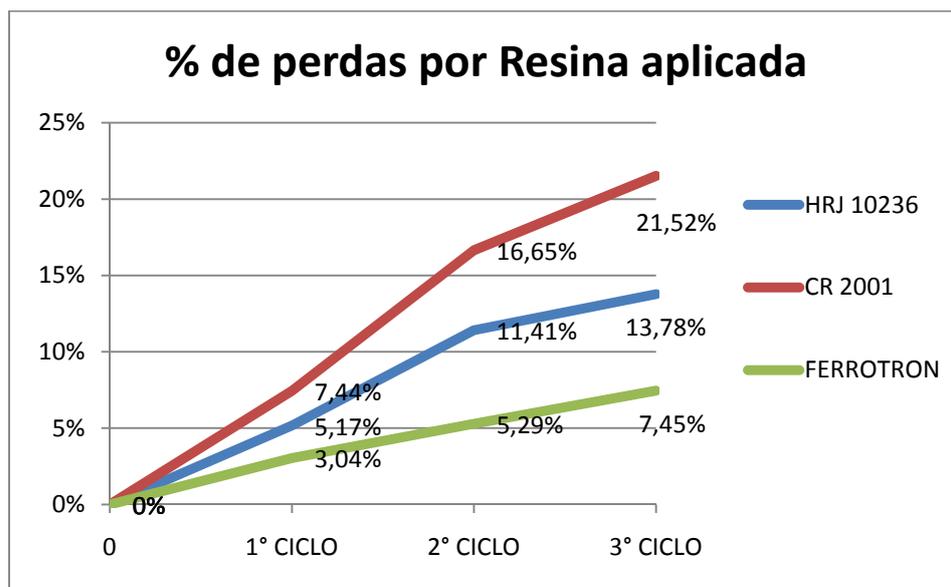


Figura 4.2: Perdas de material variando a resina fenólica

Nesse comparativo ficou constatado que com relação ao FERROTRON original usinado, a resina HRJ 10236 tem poder aglomerante muito superior a CR 2001, pois ficou constatado que nos três ciclos de limpeza sofreu menor perda de massa, sendo, portanto a mais indicada, principalmente em pressões de compactação mais elevadas, mas com perdas significativas em relação ao FERROTRON® original.

#### 4.2 Análise da Variação de Pressão de Compactação

Nessa análise foi feita a média das perdas, considerando apenas a pressão de compactação dos corpos de prova, representados na tabela 4.3, e na figura 4.3.

Tabela 4.3: % de perda de material por ciclo de limpeza, variando a pressão de compactação

	1° CICLO DE LIMPEZA	2° CICLO DE LIMPEZA	3° CICLO DE LIMPEZA
500 MPa	7,20%	15,57%	19,30%
600 MPa	5,63%	13,66%	18,39%
700 MPa	5,69%	12,41%	15,27%
FERROTRON	3,04%	5,29%	7,45%

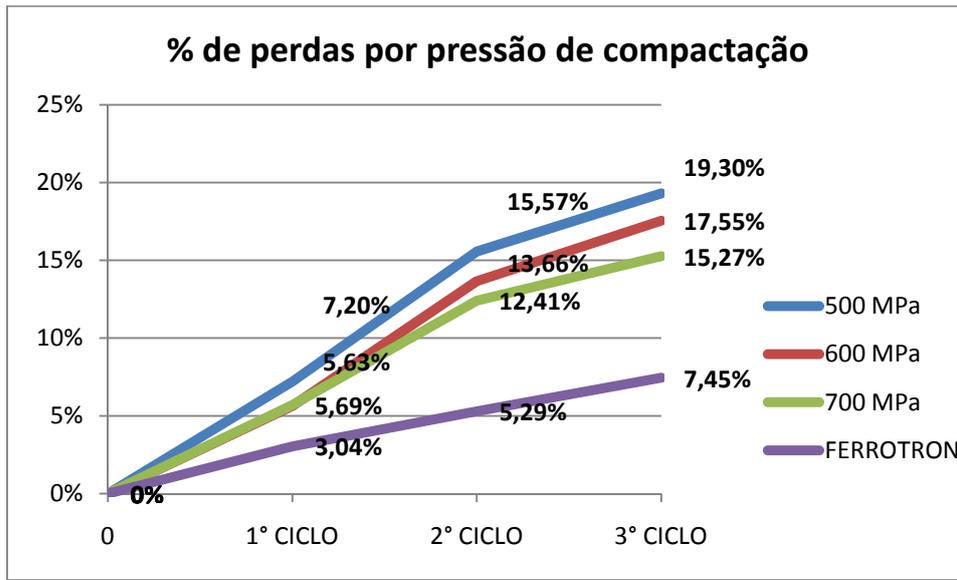


Figura 4.3: Perdas de material variando a pressão de compactação.

Nesse experimento ficou constatado que existe uma tendência a aumentar a resistência do material, aumentando sua pressão de compactação, sendo em todas as variações, sempre o corpo de prova que sofreu compactação de 700 MPa teve menor perda, a maior compactação não se mostrou eficiente apenas nos ensaios nº 10 e 12, os quais apresentam uma maior perda de material em um corpo de prova compactado a 600 MPa em relação a outro compactado a 500 MPa.

### 4.3 Análise da Variação do Ciclo de Cura das Resinas

Nessa análise foi considerada apenas a média de perdas considerando os dois ciclos de cura das resinas fenólicas adotadas, representados na tabela 4.4, e na figura 4.4.

Tabela 4.4: % de perda de material por ciclo de limpeza, variando o ciclo de cura das resinas

	1° CICLO DE LIMPEZA	2° CICLO DE LIMPEZA	3° CICLO DE LIMPEZAO
200°C	5,82%	12,74%	16,99%
220°C	6,28%	14,59%	17,63%
FERROTRON	3,04%	5,29%	7,45%

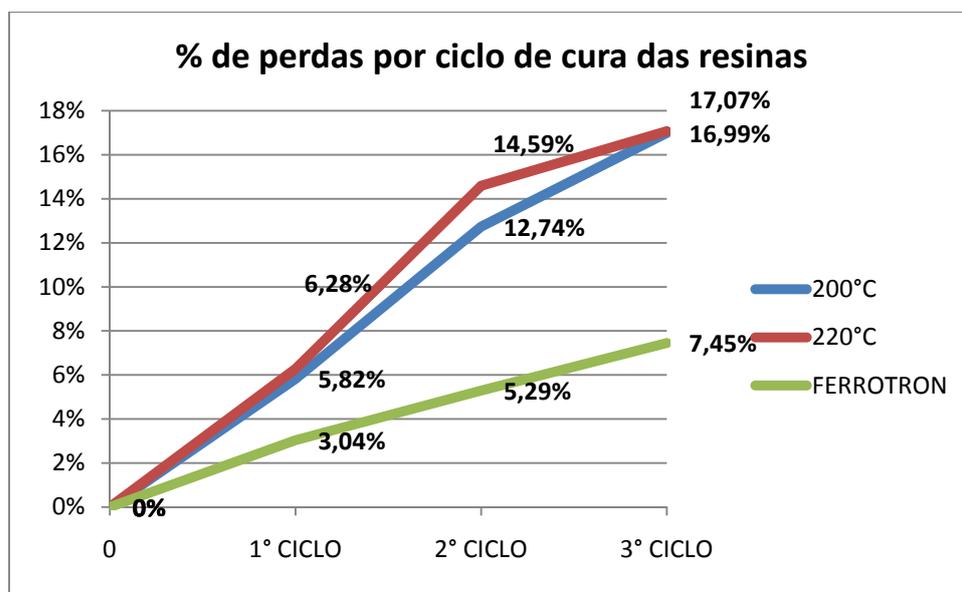


Figura 4.4: Perdas de material variando o ciclo de cura das resinas.

Nesse último comparativo, não se pode chegar à conclusão de que o ciclo de cura das resinas fenólicas represente alguma vantagem com relação à resistência do material compactado. Os dois ciclos de cura apresentaram comportamento similar ao final dos três ciclos de limpeza, no segundo, os corpos de prova que sofreram ciclo de cura da resina com temperatura máxima de 220°C tiveram perda de massa um pouco menor que os que

tiveram ciclo com temperatura máxima de 200°C, porém no terceiro ciclo de limpeza, ocorreu o contrário, os corpos de prova com ciclo de 200°C sofreram maiores perdas.

## 5. CONCLUSÕES

Verificou-se que é possível melhorar a resistência ao desgaste por abrasão dos concentradores de fluxo obtidos a partir do reaproveitamento do resíduo da usinagem de FERROTRON® com escolha da resina adequada, otimização do processo de cura e pressão de compactação.

Quanto à resina utilizada, foi constatado que o material compactado com a resina fenólica HRJ 10236 se mostrou mais eficiente do que aquele obtido com a resina fenólica modificada com epóxi CR 2001.

Com relação à pressão de compactação, observou-se o aumento da resistência ao desgaste com o aumento da pressão de compactação, sendo que os melhores resultados foram obtidos para os corpos de prova compactados com pressão de 700 MPa (a pressão e compactação empregadas no presente trabalho).

Com relação ao ciclo de cura das resinas fenólicas utilizadas, para avaliação em três ciclos de limpeza, não foi possível tirar conclusões sobre um efeito importante do ciclo de cura.

Dessa forma, os resultados dos experimentos mostraram que é possível melhorar a resistência ao desgaste dos orientadores de fluxo obtidos com reaproveitamento de material. O melhor resultado foi obtido para a resina HRJ10236, aumentando da pressão de compactação. Contudo, não foi possível observar um efeito importante sobre resistência ao desgaste dos componentes com a variação dos ciclos de cura da resina.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variar a temperatura quando for feita a compactação (compactação a quente);
- Aumentar a pressão de compactação;
- Testar os concentradores de fluxo com melhor desempenho em máquinas de têmpera por indução para verificar sua eficiência;

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos Siderúrgicos Comuns**. 4 ed., 2008

KWIETNIEWSKI, C.E.F; KISS, F.J. **Metalografia e Tratamentos térmicos de Aços e Ferros Fundidos**. 1 ed. 2009

TUDBURY, C.A. **Basics of Inducting Heating**. New York. 1st ed. 1960.

ASM INTERNATIONAL. **Heat Treater's Guide – Practices and Procedures for Irons and Steels**. 2<sup>nd</sup> ed, 1995

MACHADO, I.G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**. 1<sup>a</sup> Edição, 1996.

LEE, H; NEVILE, K. **Handbook of epoxy resins**. 2<sup>nd</sup> ed. New York, 1968.

RUFFINI, R.S. **Production and Concentracion of Magnetic Flux for Induction (Eddy Current) Heating Applications** - Industrial Heating Magazine - 1994.

NETO, F.L; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais , Ciência e Tecnologia** – São Paulo – Ed. Edgard Blutcher – 2006

OTHMER, K.; “**Magnetic Materials**”, **Encyclopedia of Chemical Technology**, John Wiley & Sons, Inc., Interscience, 1983.

MILES, D.C. & BRISTON, J.H. – **Tecnologia dos Polímeros** – São Paulo, Polígono/EDUSP, 1975.

BARBOZA, J.S.; SCHAEFFER, L.; Esswein. J. A. L. Jr.; Cerva. L. L.; Dias. M. M.; **”Influência da variação do teor de resina nas propriedades magnéticas de compósitos magnéticos macios aplicados a núcleos de máquinas elétricas”** in:18 CBECIMAT - Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais, Porto dos Galinhas - PE, 2008.

**Albatherm.** <[http://www.albatherm.com.br/principios\\_basicos\\_aquecimento.asp](http://www.albatherm.com.br/principios_basicos_aquecimento.asp)>  
Acessado em Abril de 2011

**Bay Plastics.** <<http://www.bayplastics.co.uk/ferrotron.htm>> Acessado em Maio de 2011

**Fluxtrol** <<http://fluxtrol.com/products/product-types/ferrotron-559h>> Acessado em Abril de 2011

**Inovação Tecnológica** <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/artigo=010160070806>>  
Acessado em Março de 2011

**Imatec** <<http://blog.imatec.ind.br/2008/11/19/materiais-magneticos>> Acessado em Abril de 2011

**SIGroup Crios** - Propriedades da Resina CR2001. Boletim técnico, 2008.

**Schenectady Brasil** - Propriedades da Resina HRJ-10236. Boletim técnico, 2004.

**Retsch** <<http://www.retsch.com/products/milling/cutting-mills>> Acessado em Abril de 2011

**Girassol Química** <<http://www.girassolquimica.com.br/>> acessado em Maio de 2011

RODRIGUES, V.I.S; **Elaboração e Caracterização de Compósitos Magnéticos.**  
Dissertação de Mestrado. UFRGS. 2009

BARBOZA, Juliano. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas.** Dissertação. PPGEM. UFRGS, 2009.

RAMOS, Douglas Machado. **Apostila Disciplina Tecnologia Mecânica II – Soldagem a Gás (Oxiacetileno) – Universidade de Brasília, UnB - 2005**