

PROJETO DE DOUTORADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

Título do Projeto: Ligas de Fe-Co-Ti-Cr para aplicações em máquinas elétricas de alta performance energética.

Candidato: Engº Fernando Froes

Orientadora: Profª Drª Cristina Bormio Nunes

Escola de Engenharia de Lorena - USP

Departamento de Engenharia de Materiais

Julho - 2021

1. INTRODUÇÃO

Dentre as ligas magnéticas macias a que é a mais apropriada em aplicações que necessitam de alta densidade de fluxo são as ligas a base de Fe e Co. Especialmente as ligas binárias de composição no intervalo entre 25% e 60% em % massa de Co⁽¹⁾, apresentam polarização magnética em torno de 2,45 T e temperaturas de Curie que variam no intervalo entre 920 e 985 °C. Algumas aplicações envolvendo ligas Fe-Co são em: transformadores de alto desempenho, polos para ímãs de campo alto, atuadores acionados magneticamente em impressoras de impacto, diafragma em aparelhos telefônicos, válvulas solenoides, transdutores magnetostrictivos, peças para orientação de fluxo magnético em contadores de velocidade indutiva, bicos de entrada e escape controlados eletromagneticamente e acionador de partida interno / gerador em aeronave (CHIN; WERNICK, 1980) (GOLDMAN, 1999).

Os motores existentes, geralmente feitos com núcleos de aço silício, são projetados para operar em velocidades nas quais as perdas de energia na forma de calor são dificilmente toleráveis. Não é possível torná-los menores ou girá-los mais rápido para converter mais energia elétrica em energia mecânica porque seus materiais aquecem a ponto de o motor ser danificado. Mas as ligas de Fe-Co possuem temperaturas de Curie muito mais altas que as Fe-Si, da ordem de 200°C maiores, além de altas induções magnéticas de saturação, o que superaria estas limitações dos aços elétricos. Além disto, é necessário o desenvolvimento de materiais magnéticos “macios” que gerem muito menos calor, sugerindo materiais que apresentem menores valores de campo coercivo H_c . Usando esses materiais, é possível construir motores que giram mais rápido, aumentando a produção de energia por um fator de três ou quatro em comparação com motores baseados em aços siliciosos tradicionais. Alternativamente, os tamanhos dos motores podem ser reduzidos pelo mesmo fator enquanto convertem a mesma quantidade de energia, o que seria um requisito atendido por ligas Fe-Co devido sua alta indução magnética de saturação (SOURMAIL, 2005) (SUNDAR; DEEVI, 2005) (WIESERMAN; SCHWARZE; NIEDRA, 1992) (GUTFLEISCH, 2011). Além disto, a questão da vibração dos motores originadas devido à alta magnetostricção do material magnético em campos alternados, também é um fator importante a se considerar na diminuição do aquecimento do motor (BELAHSEN, 2006) (ZHANG et al., 2017).

⁽¹⁾ Na verdade nas publicações em geral não é explicitado se as concentrações são em % atômica ou em % em massa. Mas a maioria das publicações leva a crer que é % em massa.

A resistividade de ligas magnéticas metálicas também é uma propriedade importante no desenvolvimento destes materiais metálicos, pois está relacionada às perdas magnéticas por correntes parasitas que são significativas em aplicações em corrente alternada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A liga com 35% (em massa) de Co possui maior valor de indução de saturação, levemente maior que a liga com 50% de Co, mas a última possui maior permeabilidade magnética relativa inicial, da ordem de 800, sendo apenas 300 para a liga com 35%. No que diz respeito à coercividade H_c , a liga com 35% de Co possui menor H_c (SUNDAR; DEEVI, 2005). A magnetostricção de saturação λ_s da liga com 35% de Co (%at.) é $3/2 \lambda_s \sim 60$ ppm e da liga com 50% de Co $3/2 \lambda_s \sim 90$ ppm (HAN, 2017).

Apesar das ótimas propriedades magnéticas das ligas binárias Fe-Co, elas não são usadas em larga escala, devido a sua extrema fragilidade e alto custo. Esta alta fragilidade das ligas binárias é devido a presença da fase CCC ordenada de estrutura B2 que torna os materiais muito resistentes à deformação, principalmente na liga de composição equiatômica. Uma forma de melhorar a trabalhabilidade das ligas binárias é pela adição de elementos estabilizadores da fase α de estrutura CCC desordenada, como C, V, Cr, Ni, Nb, Ta, B, dentre outros (KAWAHARA, 1983) (SUNDAR; DEEVI, 2004).

Em relação ao custo, o preço da tonelada de ferro é de 200 USD enquanto a tonelada de cobalto custa 43.800 USD (INFOMINE, 2021).

A liga equiatômica é denominada de Permendur, tendo sido patenteada pela empresa Bell Telephone Laboratories (ELMEN, 1929).

A adição de V à liga equiatômica resultou na liga denominada de Permendur 2V. O material Permendur 2V foi “inventado” por White e Wahl (1932) do Bell Telephone Laboratories, e tem aproximadamente 49% de cobalto, 49% de ferro e 2% de vanádio. O vanádio melhora a ductilidade e a trabalhabilidade da liga equiatômica, sendo possível até a

deformação a frio. A adição de 2% at. de V é capaz de permitir que o material seja deformado a frio até 90% de redução em área (GOULD; WENNY, 1956) (GEORGE, 2002).

A marca comercial HIPERCO foi adotada como o nome comercial da liga Fe-35% Co (% em massa) e foi registrada nos Estados Unidos (STANLEY, 1947) pela Westinghouse Electric Corporation. Esta liga, conforme mostrado por Stanley e Yensen (1947), possui adição de 0,5% de Cr e mostrou-se dúctil e capaz de ser laminada em chapas finas, sendo que após recozimento possui alta permeabilidade em altas induções, segundo os autores, mas não é tão simples assim, pois para esta composição já há aparece o ordenamento para a fase CCC com estrutura B2. Tratamentos térmicos seguidos de *quenching* em temperaturas adequadas são necessárias para que a liga esteja na fase desordenada. A liga foi preparada a partir de Fe e Co comercial de alta pureza, adicionando 0,1% de C para melhorar a forjabilidade, e então desoxidada com Si e Ti. O lingote foi reduzido por laminação a quente e a chapa resultante foi temperada a partir de 910° C. A chapa foi então subsequentemente laminada a frio em chapas finas e recozidas a 875-925 ° C, durante o qual o teor de carbono foi reduzido para menos de 0,005%. As propriedades desta chapa fina são: $B_s = 2,4 \text{ T}$, $H_c = 50 \text{ A/m}$, $B_r = 1,15 \text{ T}$, $\mu_{rel}^{in} = 650$ e $\mu_{rel}^{max} = 10.000$. As perdas para chapa de 0,43 mm de espessura são de 6,6 W/kg e 220 W/kg a 60 Hz e 600 Hz, respectivamente (STANLEY; YENSEN, 1947) (STANLEY, 1947).

O material Supermendur foi desenvolvido por Gould e Wenny (1957) e denominado de HIPERCO 50, a marca comercial citada anteriormente. Esta liga tem composição semelhante a Permendur 2V, mas é um material de grão orientado (GO), por isso tem um laço de histerese quadrado e perdas de núcleo muito menores, para melhor desempenho em transformadores. As formulações atuais incluem traços de nióbio, silício e manganês para melhorar as propriedades de deformação a frio (HITACHI-METALS, 2021).

A empresa Carpenter Electrification desenvolveu a liga de grau comercial HIPERCO 27, certamente baseando-se nos resultados de Stanley e Yensen (1947) e Stanley (1947). Esta liga HIPERCO 27 contém 27% de Co e 0,6% de Cr e o restante de Fe. Sua alta densidade de fluxo e campo coercivo razoavelmente baixo tornam esta liga adequada para aplicações de temperatura elevada e para núcleos de chapas laminadas de motores, geradores (CARPENTER ELECTRIFICATION COMPANY, 2021).

Entretanto, praticamente não há estudos científicos publicados sobre estas ligas com menores quantidades de Co que a liga equiatômica, a não ser os dois trabalhos aqui já apresentados (STANLEY; YENSEN, 1947) (STANLEY, 1947). Praticamente tudo o que foi desenvolvido em relação a estas ligas foi feito pela indústria, que não disponibiliza dados da pesquisa realizada.

Estas ligas de Fe-Co com menores quantidades de Co ($27 < \%Co < 35$) são relevantes de serem estudadas, pois também possuem altas magnetizações de saturação e são mais baratas, pois possuem menos cobalto. Considerando-se apenas os preços das matérias primas, uma tonelada da liga equiatômica Fe-Co custa cerca de 30% e 40 % a mais que as ligas com 35% e 30% de Co, respectivamente.

O interesse nestes materiais é evidente, tanto que atualmente há várias empresas que oferecem estes materiais, tais como S.J.M Alloys & Metals Limited, Interleg Nedona, Arnold Magnetics, Hitachi Metals Ltd, Carpenter Electrification (S.J.M ALLOYS & METALS; INTERLEG NEDONA; ARNOLD MAGNETICS; HITACHI-METALS; CARPENTER ELECTRIFICATION, 2021)

A Tabela 1 lista as propriedades magnéticas e a resistividade dos materiais comerciais de ligas Fe-Co magneticamente macias, onde foi adicionado os dados da liga FeCo-Ti (FROES, 2021).

Tabela 1 - Propriedades magnéticas e a resistividade de ligas macias comerciais de Fe-Co.

MATERIAL	COMPOSIÇÃO (BALANÇO – Fe)						B_s (T)	H_c (A/m)	$\mu_{INICIAL}$	μ_{MAX}	ρ ($\mu\Omega.cm$)
	Co	Cr	Ni	V	Ti	Outros					
Hiperco 27	27	0,6	0,6			Mn	2,42	795	650	10.000	
Hiperco 35	35	0,5					2,42	795	650	10.000	20
2V-Permendur	49			2			2,40	1590	800	4.900	26
Supermendur	49			2			2,40	159		92.500	
Permendur	50						2,45	1590	800	5.000	7
(Fe_{0,70}C_{0,30})₉₇Ti₃ *	29				3		> 2,33*	420*	300*	800*	30*
Fe_{0,70}C_{0,30} **	30						~ 2,4_		210**	1750**	

Adaptado de Arnold Magnetics -2 (2021), *Froes (2021); ** Sundar e Deevi (2005).

Os dados fornecidos na Tabela 1 para a liga $(\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30})_{97}\text{Ti}_3$ foram obtidos no trabalho de mestrado de Fernando Froes, aluno do nosso grupo, trabalho este intitulado *“Obtenção de ligas magnéticas de $\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30}$, com adição de Nb e Ti: Estudo de propriedades físicas”*, cuja defesa está agendada para ocorrer no dia 30/07/2021 no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais Escola de Engenharia de Lorena da USP. Neste trabalho foi determinado que a adição de 3% at. de Ti aumentou o parâmetro de rede e aumentou também a permeabilidade relativa inicial da liga $\text{Fe}_{0,70}\text{Co}_{0,30}$ em 50%, de 200 para 300 (SUNDAR; DEEVI, 2005; BOZORTH, 1951). Porém as temperaturas de tratamento térmico usadas nos trabalhos de Froes (2021) e Bozorth (1951) são diferentes. Houve também a redução da magnetostricção em 50%. Já a adição de 1% de Nb piorou as propriedades magnéticas macias da liga Fe-Co com Ti, aumentando o campo anisotrópico, consequentemente reduzindo a permeabilidade do material.

Do ponto de vista de propriedades termomecânicas das ligas de (FROES, 2021), ambas foram laminadas a quente, sendo que a liga quaternária, com Nb atingiu maior grau de deformação (menor espessura) que a liga ternária, sem Nb. Este resultado atesta a capacidade do Nb de melhorar a deformabilidade da liga.

É interessante pontuar que esta adição de Ti à liga Fe-Co foi motivada por um outro trabalho de mestrado realizado pelo aluno Guilherme Origo Fulop, no qual adições de Ti ao Fe puro resultou em valores de permeabilidade máxima iguais a do aço elétrico de grão não orientado (FULOP, 2018) (FULOP et al., 2021), da ordem de 2700 em chapas desta liga laminadas a frio, mas com magnetostricções bem menores.

No entanto, apesar da adição de Ti ter aumentado a permeabilidade inicial da liga Fe-30Co e a resistividade, e diminuído a magnetostricção, as propriedades desta liga ainda precisam ser melhoradas. Mais que isto, é necessário a produção das ligas binárias e com as adições que se deseja, usando a mesma técnica de produção, mesmas matérias primas e mesmos tratamentos térmicos, para que possam ser comparadas às ligas com adições de outros elementos. Os dados que existem para as ligas binárias, data de no máximo 1960, já há 59 anos.

Como pode ser constatado no texto apresentado, os dados existentes das ligas Fe-Co com $27 < \% \text{Co} < 35$, são dados muito antigos e incompletos. O fato de serem dados antigos,

talvez até mesmo as purezas dos materiais utilizados fossem diferentes do que há disponível atualmente, o que também pode impactar nos resultados. Especificamente para a liga binária com 35% de Co, somente há os dados do trabalho de Stanley e Jensen (1947). Este trabalho foi citado apenas 2 vezes e visualizado 132 vezes, segundo o site da IEEEXplore.

Do ponto de vista fundamental, segundo a curva de Slater Pauling o momento magnético máximo da liga depende da razão elétron de valência/átomo (COEY, 2009), portanto, adições de outros elementos às ligas causam a mudança da razão elétron de valência/átomo da liga.

A posição na qual os átomos adicionados entram na rede da liga binária Fe-Co, também é importante de se determinar. Por exemplo, para a liga equiatômica com adição de V, foi determinado por difração de nêutrons que diferentemente do que se previa, os átomos de V substituem o Co e não o Fe e/ou Co aleatoriamente (WILLIAMS, 1990).

Além disto, a determinação da influência dos aditivos na ordem/desordem da estrutura CCC também é relevante para as propriedades magnéticas, além das propriedades mecânicas. A determinação do grau de ordem/ desordem de longo alcance pode ser obtida facilmente por difração de nêutrons, em contraste com os raios X, pois os fatores de espalhamento para Fe e Co são muito próximos para raios X, mas diferem consideravelmente para nêutrons.

Por último, a distância entre os átomos magnéticos também tem influência decisiva nas propriedades magnéticas como mostrado por Sundar e Deevi (2005). Na Figura 1 (a) e (b) são mostrados respectivamente resultados experimentais, coletados da literatura, do parâmetro de rede em função da quantidade de Co nas ligas Fe-Co e do momento magnético do Fe, em função do parâmetro de rede que é função da quantidade de Co nas ligas binárias.

A diminuição do parâmetro de rede com a adição de Co é evidente, assim como a variação do momento magnético do Fe em função da quantidade de Fe nas ligas, o que está relacionado à separação entre os átomos de Fe, além da razão elétrons/átomo. O momento magnético do Fe varia com o parâmetro de rede, tendo um valor máximo para um parâmetro de rede de $\sim 2,8600 \text{ \AA}$ para a estrutura desordenada (72% de Fe, 28% de Co) e $\sim 2,8565 \text{ \AA}$ (65% de Fe, 35% de Co) para a estrutura ordenada (SUNDAR; DEEVI, 2005) (DÍAZ-ORTIZ, 2006). Em experimentos de difração de nêutrons foi mostrado por Collins e Forsyth (1963) que o momento magnético no átomo de cobalto não é afetado nas ligas Fe-Co, permanecendo

aproximadamente constante para todas as concentrações de Co na liga, enquanto no átomo de Fe aumenta para um valor de até cerca de $3 \mu_B$.

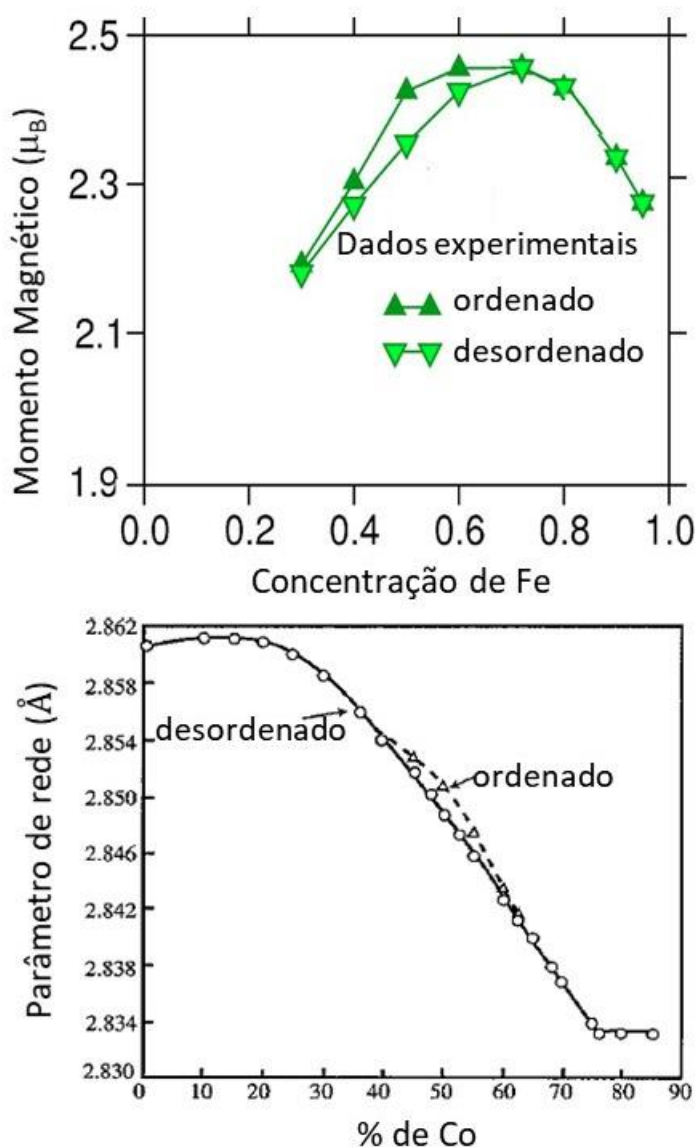


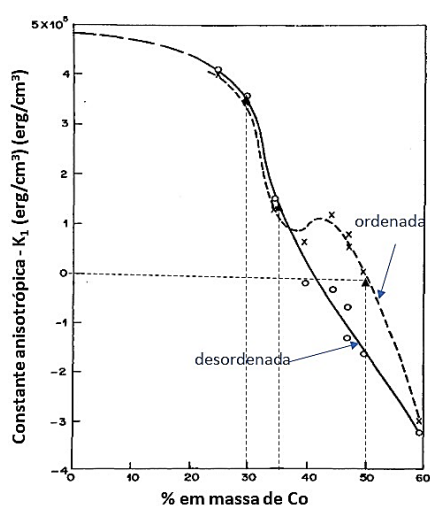
Figura 1 - Parâmetro de rede em função da quantidade de Co nas ligas Fe-Co, adaptado de Sundar, Deevi (2005) (a); (b) Momento magnético do Fe, da quantidade de Fe nas ligas FeCo, Adaptado de Díaz-Ortiz (2006).

A adição de outros elementos às ligas Fe-Co pode alterar significativamente a distância entre os átomos de Fe e Co e conseqüentemente podem alterar ou não o momento magnético do Fe na rede. Por exemplo, foi determinado que os momentos magnéticos são pouco afetados pela presença de vanádio a 1,8% na liga equiatômica (SMITH; RAWLINGS, 1976).

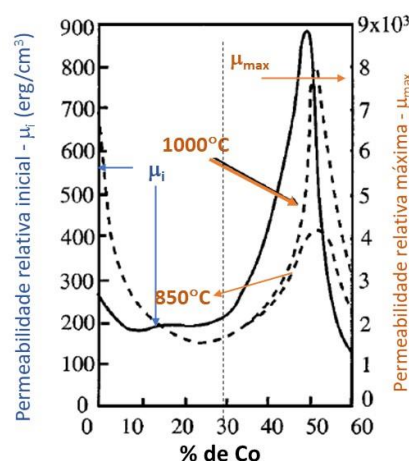
3. JUSTIFICATIVA

Entendemos que é importante que as ligas com valor mais baixo de Co que a liga equiatômica sejam revisitados e estudados mais a fundo e de maneira sistemática, fazendo a correlação da ciência/engenharia de materiais com as propriedades físicas do material. Esse entendimento pode vir a ajudar futuramente em alguma formulação de liga que permita melhorar o desempenho magnético e mecânico destes materiais. Consequentemente, a utilização destes materiais em máquinas elétricas acarretará maior eficiência energética, demanda urgente em um mundo carente de energia.

Uma das razões desta escolha é que a liga com 35% de Co comparada com a liga com 30% Co, ou seja, com apenas o incremento de 5% de Co, causa uma queda acentuada em K_1 , a primeira constante anisotrópica, o que irá causar a diminuição do campo anisotrópico e acarretará o aumento da permeabilidade, pois este é um ponto fraco desta liga. Isto pode ser constatado na Figura 2 (a), que mostra o gráfico da primeira constante anisotrópica K_1 em função da quantidade de Co nas ligas binárias Fe-Co e a Figura 2(b) o gráfico das permeabilidades relativas inicial e máxima em função da % de Co (SUNDAR; DEEVI, 2005) (BOZORTH, 1951). Devido aos resultados obtidos com a adição de Ti à liga $Fe_{0,70}Co_{0,30}$, supomos que esta adição de Ti também colabore por diminuir a anisotropia magnética da liga (FROES, 2021).



(a) Adaptado de Hall (1960).



(b) Adaptado de Sundar e Deevi (2005) que adaptou de Bozorth (1951).

Figura 2 – Primeira constante de anisotropia magnética K_1 (a); (b) permeabilidades inicial e máxima em função da quantidade de Co de ligas binárias de Fe-Co no intervalo de composição de $0 \leq \% Co \leq 60$.

No caso específico de motores para carros elétricos, o efeito da temperatura sobre o material do núcleo do eletroímã tem grande influência sobre a magnetização de saturação, assim como no campo coercivo e resistividade deste. O estudo destas propriedades em temperatura de trabalho destas máquinas elétricas, podem trazer dados importantes para os projetos de tais máquinas. As temperaturas de trabalho do motor não devem ultrapassar 80°C, sendo geradas principalmente pela rotação do motor etc., mas podem chegar a até 160°C (IORA; TRIBIOLI, 2019) (KIM, 2013).

4. OBJETIVOS

Escolhemos como objeto do estudo a liga Fe-Co com 35% em massa de Co, onde serão estudadas adições de Cr e Ti.

No trabalho que estamos propondo objetivamos responder as seguintes perguntas:

- 3.1) Quais são as propriedades magnéticas e mecânicas da liga binária de Fe-Co com 35% em massa de Co?
- 3.2) A adição de Cr à liga Fe-Co com 35% afeta somente a ductilidade e a trabalhabilidade da liga, ou tem efeito também sobre as propriedades magnéticas? A adição de Cr aumenta a permeabilidade magnética, já que esta é baixa para esta liga? Qual o efeito sobre o campo coercivo e magnetização de saturação? Com varia o parâmetro de rede?
- 3.3) Qual o efeito da adição de Ti à liga Fe-Co com 35% de Co e Cr (item 2)?
- 3.4) Como se comporta o ordenamento das ligas nas condições 3.1, 3.2 e 3.3?
- 3.5) Qual átomo, de Fe e/ou Co, os elementos Cr e Ti substituem na rede?
- 3.6) Como variam as propriedades elétricas e magnéticas com a temperatura?

5. ESTRATÉGIAS A SEREM ADOTADAS PARA RESPONDER QUESTÕES FORMULADAS

Tendo em vista os argumentos apresentados e o know-how obtido no trabalho de Froes (2021), no que diz respeito a obtenção do material por laminação a quente, usando as facilidades do Departamento de Engenharia de Materiais, produziremos as ligas Fe-35%Co (% em massa) com adições de Cr e Ti, usando os mesmos procedimentos usados por Froes (2021).

No item 3.2 será utilizada somente a adição de 0,5 % em massa de Cr, assim como foi na liga HYPERCO 35 (STANLEY; YENSEN, 1947).

Além disto, estudaremos a adição de $Ti < 2 \%$ com o intuito de melhorar as permeabilidades magnéticas destas ligas e reduzir as magnetostricções destas. Cuidados devem ser tomados para se tentar evitar o aparecimento da fase ordenada B2, que pode prejudicar a ductilidade, trabalhabilidade e usinabilidade. Para isto tratamentos térmicos em temperaturas acima da temperatura de ordenamento, da ordem de 850°C seguida de resfriamento rápido podem garantir que a liga seja congelada no estado desordenado.

No nosso caso serão utilizados materiais de alta pureza, sem adição de C.

Atenção será dada à obtenção de materiais com grãos grandes, com o intuito de obter um valor baixo de campo coercivo. A obtenção de grãos grandes também favorece deformações menores sob carga (creep) em ligas Fe-Co com grãos maiores (LIU, 2004).

Espera-se que a adição de Ti diminua a magnetostricção da liga.

A caracterização da microestrutura será realizada por difração de raios X, EBSD e EDS, sendo os dois últimos em microscópio eletrônico de alta resolução (FEG).

Usaremos difratometria de nêutrons para a determinar a variação do parâmetro de rede das ligas devido à adição de Cr e Ti, assim como a existência de ordenamento de estrutura CCC para B2 e a posição em que os átomos de Ti e Cr entram na rede.

No caso de ligas, as binárias sempre apresentam resistividade menor que as mesmas com adições de outros elementos. Assim sendo a adição de Cr e Ti também aumentarão a resistividade.

As medidas de propriedades magnéticas são facilmente obtidas em nossos laboratórios, conforme descrito a seguir.

Foi submetido à FAPESP no dia 26/06/2021 um projeto para dar suporte ao presente trabalho. No entanto, vale ressaltar que já temos disponíveis o Fe e o Cr para a produção das ligas. Caso o projeto não seja aprovado, será viabilizada a compra de Co por recursos próprios do orientador. Se o projeto não for aprovado, as medidas de propriedades magnéticas em função da temperatura também serão prejudicadas, porém não constituem o núcleo principal do trabalho. Além disto, a realização destas medidas poderá ser tentada em outros laboratórios nacionais e no exterior.

Alunos de Iniciação Científica trabalharão juntamente com o candidato para auxiliá-lo nos trabalhos experimentais. Foram pedidas 3 bolsas PUB para dar apoio a este projeto.

5. TÉCNICAS EXPERIMENTAIS A SEREM USADAS

As ligas serão produzidas por fusão em forno a arco em atmosfera inerte de argônio.

Tratamentos térmicos de homogeneização recristalização e envelhecimento das amostras serão realizados por encapsulamento destas em tubo de quartzo, em atmosfera inerte de argônio.

Os lingotes obtidos por fusão a arco serão laminados em laminador da marca FENN, sendo estes previamente aquecidos em forno do tipo mufla até a temperatura de 1200 °C.

Das chapas laminadas e recozidas serão cortadas lâminas de dimensões de espessura (a determinar) \times 40 (largura) \times 700 (comprimento) mm, onde a espessura dependerá do comportamento do material. Nestas lâminas serão realizadas as medidas magnéticas e elétricas. Após a realização destas medidas, serão cortadas amostras destas lâminas para preparação metalográfica e posterior observação por microscopia eletrônica de varredura (EDS e EBSD) e difração de raios X, para identificar as fases presentes e a textura das ligas.

Lingotes das amostras que apresentarem os resultados mais interessantes também serão produzidos para realização de difração de nêutrons, dentro da colaboração existente com o Prof. Dr. Igor Golovin da National University of Science and Technology MISIS, em

Moscou na Rússia. Os padrões de difração de nêutrons (ND) serão medidos por um difratômetro de Fourier de alta resolução (HRFD) no reator pulsado IBR-2 no Joint Institute for Nuclear Research localizado em Dubna na Rússia.

Por microscopia eletrônica de varredura será utilizado um microscópio FEG, com facilidades de medidas de obtenção de imagem para observação das fases presentes, EBSD para análise de textura e fases e análise química (EDS). Este microscópio está sendo adquirido em um projeto FINEP aprovado pelo docente do nosso departamento, o Prof. Dr. Carlos Angelo Nunes, em 2018 e espera-se que esteja instalado até o final de 2021.

Parte das medidas de propriedades magnéticas serão obtidas em um dispositivo mostrado na Figura 3 construído em nosso laboratório, conforme descrito a seguir.

Os núcleos magnéticos em formato de U são de ferrita e servem para fechar o circuito magnético com a amostra, não sendo necessário assim considerar efeitos de desmagnetização do material, o que é essencial para a medida de permeabilidade magnética. A bobina primária gera o campo magnético ao ser alimentada por uma corrente elétrica produzida por uma fonte de corrente da TEKTRONIX, modelo PWS4602, com uma corrente variável no tempo. Ao redor do material (chapa) é enrolada a bobina secundária com 100 espiras e este conjunto foi colocado dentro da bobina primária. A medida de indução magnética inicial B_i em função do campo magnético aplicado é realizado por um fluxímetro da marca LAKESHORE modelo 480 (LAKE SHORE CRYOTRONICS, 2019) conectado à bobina secundária. A bobina secundária é o sensor que capta a variação do fluxo magnético no material devido a variação temporal do campo magnético H , fornecendo a curva B_i versus H . A permeabilidade magnética é calculada a partir da curva B_i vs H , calculando-se a derivada desta, pois é conhecido que $B = \mu H$, sendo μ a permeabilidade magnética do material. Também é possível medir o laço de histerese do qual é possível extrair os valores da indução remanescente, do campo coercivo e da indução magnética máxima do material, que é limitada pelo campo magnético máximo do dispositivo.

As medidas de magnetização de saturação serão realizadas em magnetômetro de amostra vibrante em um PPMS da Quantum Design, também disponível em nosso departamento. Este equipamento também permite fazer medidas de resistividade e magnetização em função da temperatura, para o intervalo de temperatura entre 2 e 300 K.

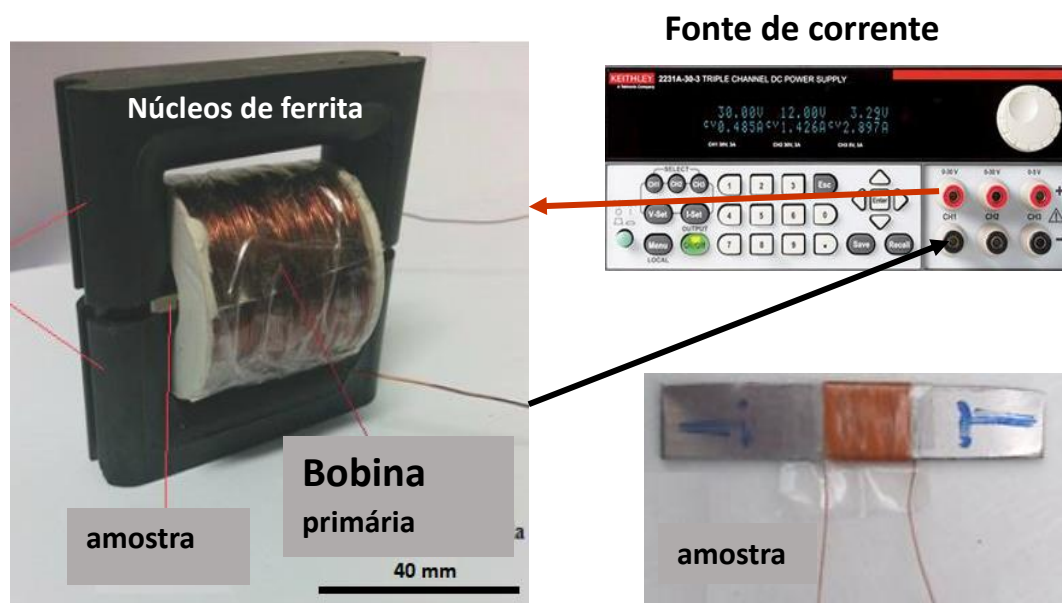


Figura 3 - Dispositivo para a medida de permeabilidade magnética relativa em ligas na forma de lâminas.

6. CRONOGRAMA

Divisão do cronograma em semestres

ATIVIDADES	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º
1) Revisão Bibliográfica								
2) Cursar disciplinas								
3) Produção das ligas								
4) Tratamentos térmicos e laminação								
5) Medida de permeabilidade, magnetostricção e resistividade								
6) Preparação metalográfica								
7) Exame de qualificação								
8) Análise por microscopia eletrônica de varredura: EBSD, EDS, Imagem								
9) Medida de difração de nêutrons								

10) Análise dos resultados								
11) Escrita de trabalhos para publicação em revistas científicas								
12) Defesa da tese								

8. REFERÊNCIAS

ARNOLD MAGNETICS disponível em <https://www.arnoldmagnetics.com/>, Acesso em 09/06/2021.

ARNOLD MAGNETICS -2: disponível em <https://www.arnoldmagnetics.com/Cobalt-Essential-to-High-Performance-Magnetics-Baylis-and-Constantinides-Cobalt-Conference-2012.-psn-hi-res;>

BELAHZEN A., Vibrations of rotating electrical machines due to magnetomechanical coupling and magnetostriction, IEEE Trans. Magn. **42** (4) 971–974, 2006.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.871469>.

BOZORTH R. M. 'Ferromagnetism'; 1951, D. Van Nostrand Co. Inc.

CARPENTER ELECTRIFICATION COMPANY: disponível em <https://www.carpenterelectrification.com/>, datasheet HYPERCO 27, Acesso em 09/06/2021.

CHIN G. Y. e WERNICK J. H., Soft Magnetic Metallic Materials, Cap. 2 em Ferromagnetic Materials, Vol. 2, Edited by E. P. Wohlfarth, © North-Holland Publishing Company, 1980.

COEY J. M. D., Magnetism and Magnetic Materials, Cap. 5, p. 151, Cambridge University Press, New York, 2009.

COLLINS M.F. AND FORSYTH J.B., The magnetic moment distribution in some transition metal alloys, Philosophical Magazine, **8** (87), 401 – 410, 1963. DOI: <https://doi.org/10.1080/14786436308211141>

DÍAZ-ORTIZ A. et al. Structure and magnetism in bcc-based iron-cobalt alloys, PHYSICAL REVIEW B **73**, 224208, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.224208>.

ELMEN G. W., Magnetic Material and Appliance, Patente US1739752A, 1929.

FROES, F. Obtenção de ligas magnéticas de Fe_{0,70}Co_{0,30}, com adição de Nb e Ti: Estudo de propriedades físicas. 2021. 91p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2021.

FULOP G. O. Estudos de ligas de Fe-Ti laminadas para utilização em máquinas elétricas, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de Lorena – USP, 2018; DOI: <https://doi.org/10.11606/D.97.2018.tde-07082018-163212>.

FULOP G.O. et al., High saturation magnetic induction and low magnetostriction of a novel ferritic Fe-Ti alloy compared to a non-oriented silicon steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials **527**, 167702, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.167702>.

GEORGE E.P. et al., Mechanical properties of soft magnetic FeCo alloys, Materials Science and Engineering A **329–331**, 325–333, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01594-5](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01594-5)

GOLDMAN, A., Handbook of modern ferromagnetic materials, Springer Science + Business Media New York, Capítulo 7, p. 137, 1999. (The Kluwer international series in engineering and computer science; SECS 505, 1999)

GOULD H. L. B., WENNY D. H., "Supermendur: A new rectangular-loop magnetic material," Electrical Engineering **76** (3), 208-211, 1957. DOI: <https://doi.org/10.1109/EE.1957.6443037>.

GUTFLEISCH O. et al., Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient, *Adv. Mater.* **23**, 821–842, 2011. DOI: [10.1002/adma.201002180](https://doi.org/10.1002/adma.201002180).

HALL, R.C. Magnetic Anisotropy and Magnetostriction of Ordered and Disordered Cobalt-Iron Alloys, *J. Appl. Phys.* **31** (6), 157S, 1960. <https://doi.org/10.1063/1.1984643>.

HAN, Y. et al. Tailoring the heterogeneous magnetostriction in Fe-Co alloys. *Journal of Alloys and Compounds* **699**, 200–209, 2017.

HITACHI-METALS: <https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/infr/ai/permendur.html>, Acesso em 09/06/2021.

IORA P.; TRIBIOLI L. Effect of Ambient Temperature on Electric Vehicles' Energy Consumption and Range: Model Definition and Sensitivity Analysis Based on Nissan Leaf Data, *World Electric Vehicle Journal* **10**, 2 (1-15), 2019; DOI: <https://doi.org/10.3390/wevj10010002>.

INFOMINE. *InvestmentMine*. www.infomine.com/investment/metal-prices, acessado em 21/07/2021.

INTERLEG NEDONA, disponível em <https://www.interlegnedona.nl/>, Acesso em 09/06/2021.

KAWAHARA K., Effect of additive elements on cold workability in FeCo alloys, *Journal of Materials Science* **18**, 1709–1718, 1983. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00542066>.

KIM, S. C. Thermal Performance of Motor and Inverter in an Integrated Starter Generator System for a Hybrid Electric Vehicle. *Energies* **6**, 6102-6119, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/en6116102>.

LIU, SHIQIANG, Final report on Project AFRL-PR-WP-TR-2005-2021_ Air Force: HIGH-PERFORMANCE, SOFT MAGNETIC LAMINATES FOR AEROSPACE POWER SYSTEMS, 2004. DOI: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA430916>.

S.J.M ALLOYS & METALS, disponível em <https://www.simalloysandmetals.com/> Acesso em: 09/06/2021.

SOURMAIL T., Near equiatomic FeCo alloys: Constitution, mechanical and magnetic properties, *Progress in Materials Science* **50**, 816–880, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.04.001>.

SMITH A. W., RAWLINGS R. D., A Neutron Diffraction Study of Ordering in an Iron-Cobalt-1.8% Vanadium Alloy, *Phys. Stat. Sol. (a)* **34**, 117, 1976. DOI: <https://doi.org/10.1002/pssa.2210340109>.

STANLEY J. K., YENSEN T. D., Hiperco---A Magnetic Alloy, *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers* **66** (1), 714-718, 1947. Publisher: IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1947.5059496>.

STANLEY, J.K., Magnetic Alloy, US Patent 2 442 219, 1947.

SUNDAR R. S., DEEVI S. C., Soft magnetic FeCo alloys: alloy development, processing, and properties, *International Materials Reviews* **50** (3), 157, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328005X14339>.

SUNDAR R. S., DEEVI S. C., Influence of alloying elements on the mechanical properties of FeCo–V alloys, *Intermetallics* **12**, 921–927, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2004.02.022>.

WHITE J.H., WAHL C.V., Workable magnetic compositions containing principally iron and cobalt, Patente US1862559, 1932.

WIESERMAN W.R., SCHWARZE, G.E., NIEDRA, J.M., "Comparison of High Temperature, High Frequency Core Loss and Dynamic B-H Loops of a 2V-49Fe-49Co and a Grain Oriented 3Si-Fe Alloy," SAE Technical Paper 929116, 1992. DOI: <https://doi.org/10.4271/929116>.

WILLIAMS, A., Kwei, G.H., Ortiz, A.T. et al. Combined neutron and x-ray powder diffraction study of Fe_{0.50}Co_{0.48}V_{0.02}. *Journal of Materials Research* **5**, 1197–1200, 1990. <https://doi.org/10.1557/JMR.1990.1197>.

ZHANG X., XIE C., ZHU L., L. LI, Numerical simulation and experimental research on stress of motor including magnetostriction effects, *Trans. China Electrotech. Soc.* **30**, 50–55, 2017. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L70534>.