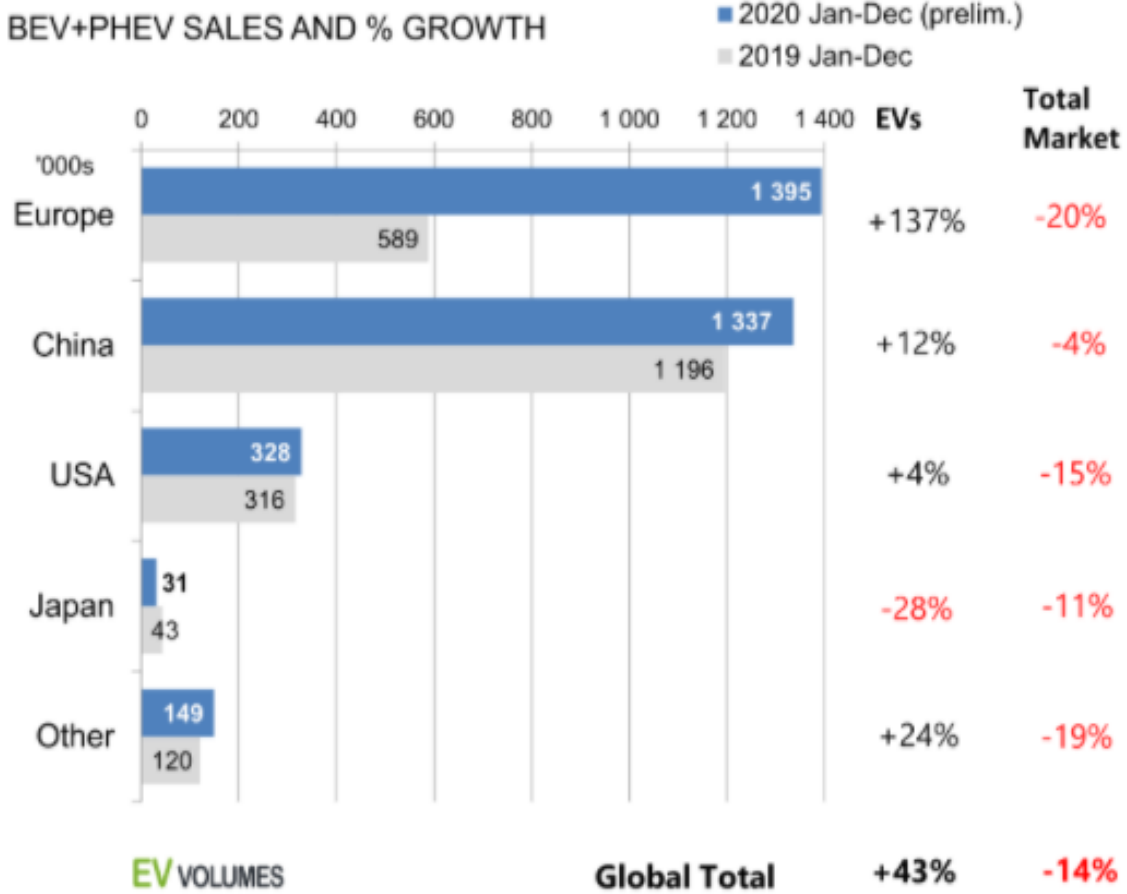
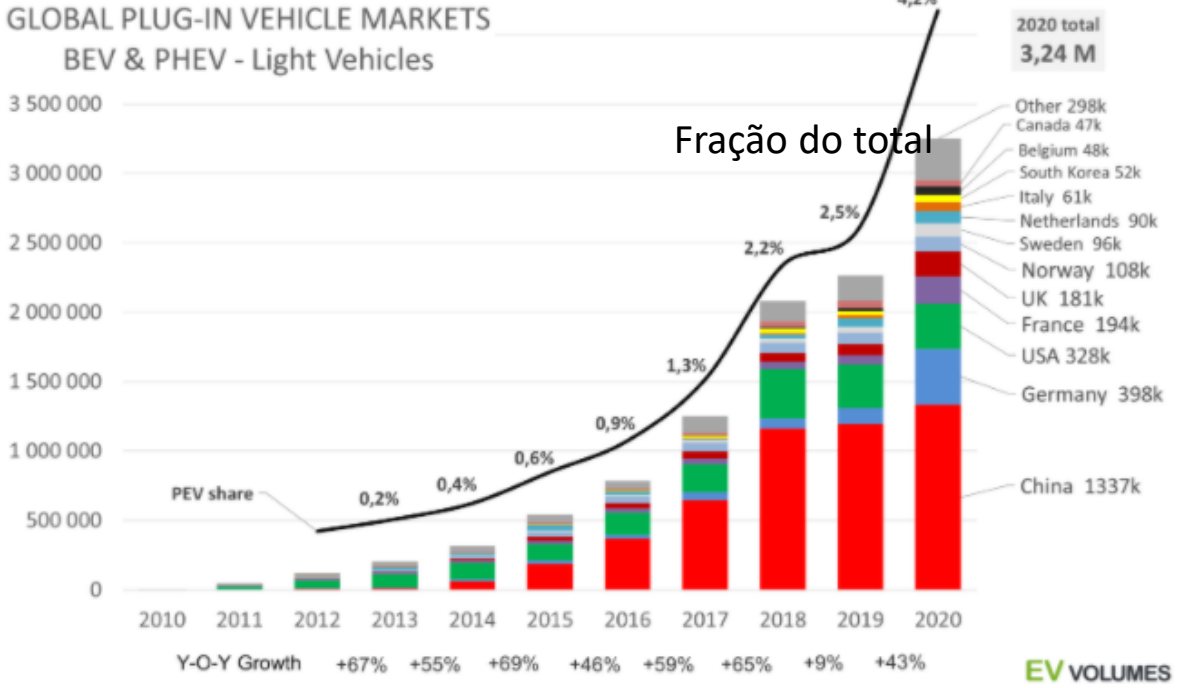


Desafios que a mobilidade elétrica
(e o motor síncrono à imã
enterrado)
colocam aos materiais magnéticos

PMT 5816

Landgraf 2021

Desnecessário enfatizar a importância da mobilidade elétrica



PHEV Plug in Hybrid EV
 BEV Battery EV
 Não inclui os HEV, Hybrid EV.

Crescimento da produção mundial de carros elétricos

Motores dos carros elétricos

Os três tipos de motores mais usados em EVs são:

Motores a indução sem escova: brushless asynchronous induction ([Tesla Model S](#)),

Motores síncronos com escova (brushed externally excited synchronous) ([Renault Zoe](#)) and,

E principalmente **Motores síncronos a ímã permanente** brushless permanent magnet synchronous ([Nissan Leaf](#), [Tesla Model 3](#)).

Opiniões numa revista para o público que gosta de carros:

Motores a indução são mais adequados a grande potência.

Daí Tesla usá-los no modelo S,

E usar MSIM no modelo 3.

MSIM são mais fáceis de controlar, são mais fáceis de resfriar (só tem enrolamentos do lado de fora) , são menores e mais leves, o que os faz mais adequados a carros menores.

Os três tipos básicos

Permanent Magnet Motor



Examples:
BMW i3
BYD e6
Chery eQ

Induction Motor



Examples:
Tesla Model S
Renault Twizy
BJEV EC180

Salient Pole Synchronous Reluctance Motor



Examples:
Renault Zoe
Renault Fluence
Smart Fortwo

Ai

**93% of All Passenger EVs Sold in 2018
Used Permanent Magnet Traction Motors**

Mar. 7, 2019  

Permanent magnet traction motors are up to 15% more efficient than induction motors and are the most power-dense type of traction motor available (in terms of kW/kg and kW/cm³).

Alguns modelos têm motores diferentes na traseira e na dianteira



Quem quiser ver o conjunto todo...

- Um vídeo de uma hora desmonta todo o conjunto motor-transmissão de um Chevrolet Bolt EV
- <https://www.youtube.com/watch?v=APhRPSdmdmk>
- é muito bom,
- Apresenta todos os detalhes
- a hora passa rapidinho...
- Ah, gear ratio = 7.058



Características desejáveis de um motor de VE

- (a) High torque density and power density; (peso e volume reduzido)
- (b) High torque for starting, at low speeds and hill climbing, and high power for high-speed cruising;
- (c) Wide speed range, with a constant power operating range of around 3–4 times the base speed;
- (d) High efficiency over wide speed and torque ranges, particularly at low torque operation;
- (e) Intermittent overload capability for short durations;
- (f) High reliability and robustness appropriate to the vehicle environment;
- (g) Acceptable cost;
- (h) Low acoustic noise and low torque ripple are important design considerations.

Potência, torque e velocidade angular

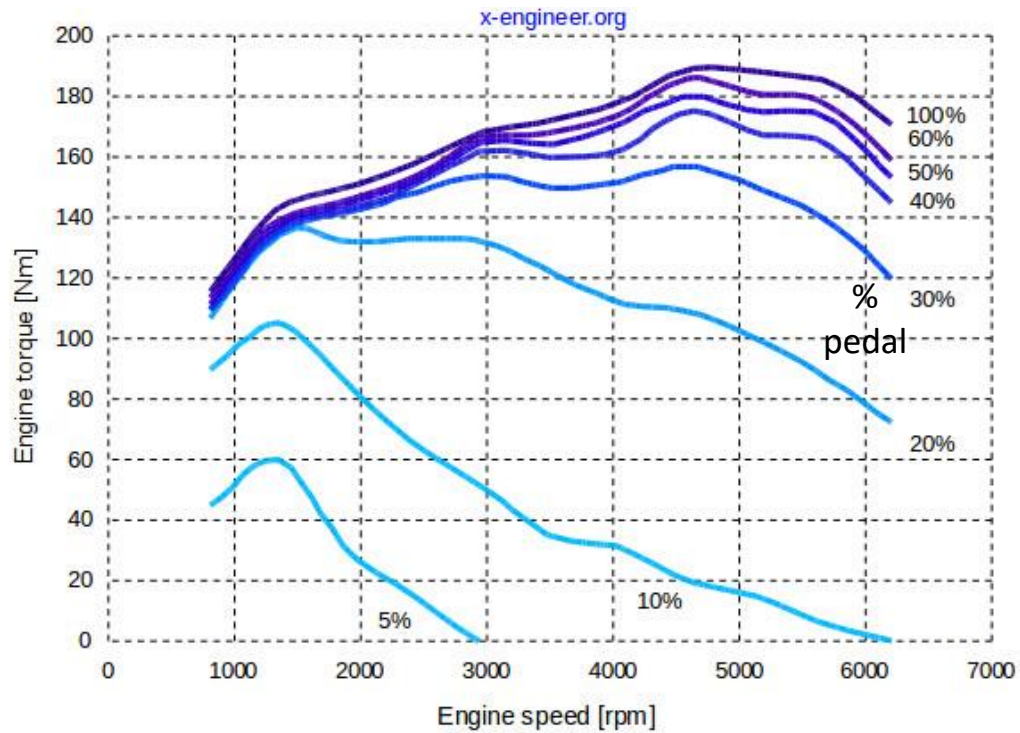
- Em sistemas rotativos, existe uma relação entre essas 3 características

$$P \text{ (W)} = T \text{ (Nm)} \cdot \omega \text{ (rad/s)} \quad \text{onde } \omega \text{ [rad/s]} = N \text{ [rpm]} \cdot \pi/30$$

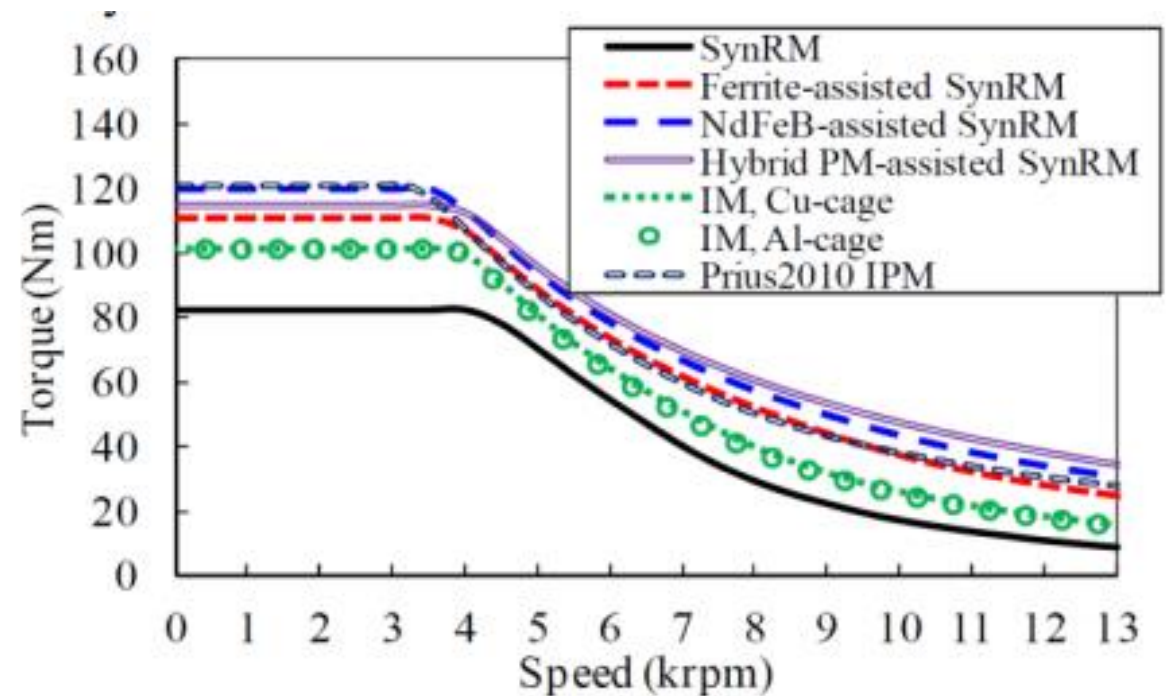
- Excluídas as perdas, a potência do motor é transferida para a roda
- Portanto, quanto maior a relação $\omega_{\text{motor}} / \omega_{\text{roda}}$, (que é a relação de transmissão) menos torque é necessário no motor.

A relação torque - velocidade é muito diferente entre motor a combustão e motor elétrico

motor de combustão interna



Motor de EV



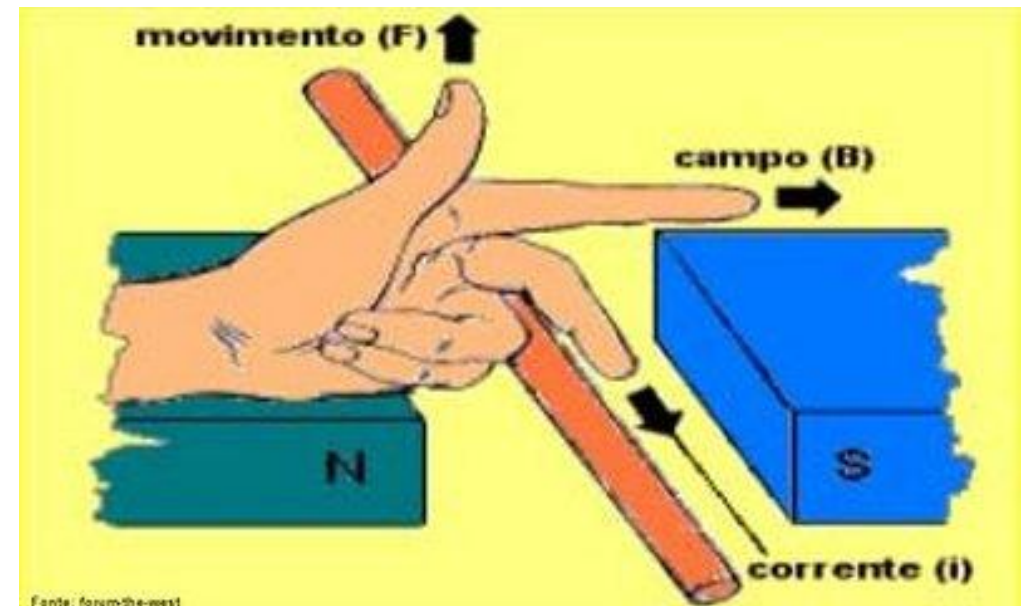
(a) Torque-speed characteristics at rated current

<https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/power-vs-torque/>

Relembrando o torque

- Lembrando que torque é uma grandeza vetorial associada às forças que produzam rotação em um corpo,
- O torque do motor elétrico está ligado àquela “força magnética” que um dia aprendemos: $F=BI\ell$
- B é o campo magnético
- I é a corrente no condutor
- ℓ é o comprimento do fio
- (exposto ao campo)
- Num motor à indução o torque depende
- Do fluxo magnético $\phi=B \cdot A$ e da corrente I

$$T = K_e \Phi I_a$$



Torque no motor síncrono a ímã

For the PM Syn machine that operates with sinusoidal current and sinusoidal air-gap flux, the corresponding control operation is similar to that of the induction machine. So, based on the FOC, the torque T can be expressed as:

$$T = \frac{3}{2} p [\psi_m i_q - (L_q - L_d) i_d i_q] \quad (4)$$

where p is the number of pole-pairs, ψ_m is the stator winding flux linkage due to the PMs, L_d , L_q are respectively the d -axis and q -axis stator winding inductances, and i_d , i_q are respectively the d -axis and q -axis currents. Moreover, the well-developed flux-weakening control technique

- Ops, complicou!
- Φ_m é o fluxo magnético do acoplamento ímã- estator

O que fazer para aumentar a densidade de torque (NM/m^3) e a densidade de potência (W/m^3)?

- O volume do motor depende do diâmetro e da altura do pacote de lâminas.
- O torque depende da força magnética e do raio do entreferro.
- A força magnética depende da indução no entreferro, do produto (numero de espiras x corrente elétrica) e do comprimento do fio

Uma das diferenças entre os motores é a densidade de torque

TABLE I: TORQUE DENSITY COMPARISON IN POWER TRACTION MOTORS FOR HYBRID/ELECTRIC VEHICLES

Motor brand	Motor Type	Peak torque (Nm)	Total weight (kg)	TRW (Nm/kg)
YASA 400	Axial PM	360	24	15
Tesla S	Induction	430	90	4.77
Nissan Leaf	Interior PM	300	46	6.52
Toyota Prius 2004	Interior PM	400	51	7.84

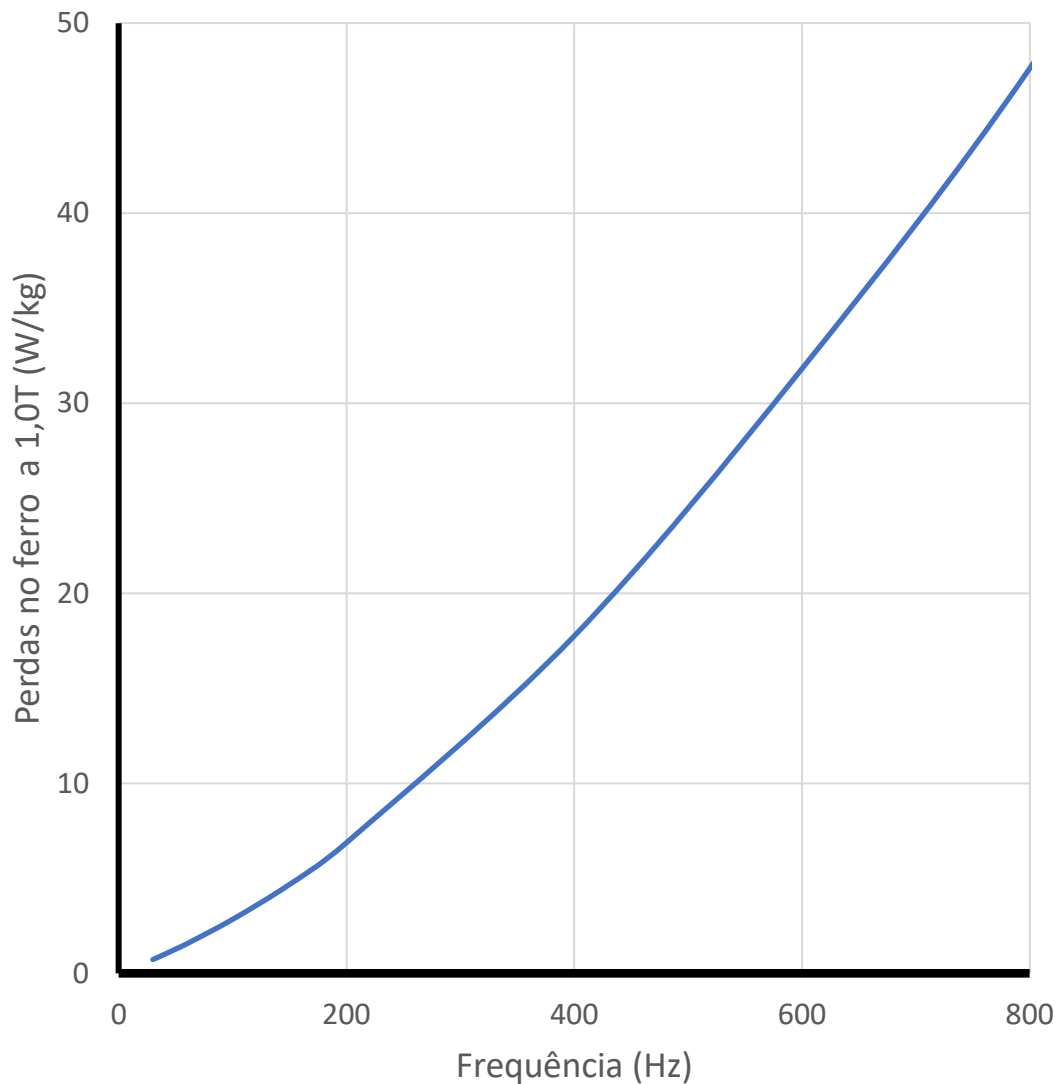
O motor a indução tem densidade de torque mais baixa.

Os motores a ímã (PM) tem densidade de torque maior

Um tipo especial, o motor axial, pode ter densidade de torque muito alta.

Surpresa: esses motores colocam novos desafios

- Por 135 anos os aços elétricos tem sido otimizados para uso em motores excitados com corrente elétrica alternada, operando na frequência das redes de distribuição, 50 ou 60Hz.
 - leiam sobre a disputa Tesla x Ferraris em https://en.wikipedia.org/wiki/Induction_motor
 - e Tesla x Edison no filme “ a guerra das correntes”)
- Os motores de indução fazem girar os eixos em velocidade de rotação que depende da frequência de excitação e do número de pares de polos criados pelo enrolamento dos fios.
- A eletrônica permitiu “criar” frequência variável, e portanto, velocidade de rotação variável.
- **A necessidade de chegar a frequências altas, da ordem de 400Hz, leva ao aquecimento do motor, que prejudica o rendimento energético e afeta o desempenho dos ímãs.**



O rendimento energético é afetado pelas “perdas de potência”, a dissipação de energia que ocorre nos mancais, nos condutores elétricos e na magnetização do ferro do estator e do rotor.

As “perdas no ferro” crescem muito com a frequência.

Iremos mostrar, em outras aulas, que características dos aços podem controlar essas perdas . Um aço que dissipa 1,6W/kg a 60Hz, dissipará 18W/kg a 400Hz.

NOVOS DESAFIOS PARA OS AÇOS PARA MOTORES ELÉTRICOS: as normas são outras

Catálogos agora mostram tabelas diferentes para **Aplicações normais** ou para **e-mobility**

Normais: limita Perdas máximas a 50 ou 60Hz e “permeabilidade)

E-mobility: perdas a 400Hz , permeabilidade e **limite de escoamento**

Electrical steel (NO) - Standard grades fully finished

Normal

Thickness [mm]	Density [kg/dm ³]	Max. Core loss		Min. Polarization		
		[W/kg] at 50 Hz 1.5 T	[W/kg] at 1.0 T	[W/lb] at 60 Hz 1.5 T	[W/lb] at 1.0 T	[T] at 2,500 5,000 10,000 [A/m] [A/m] [A/m]

DIN EN 10106

Steel grade designation	Standard designation	Thickness	Density	Max. Core loss	Min. Polarization	Min. yield strength
powercore® M350-50A	M350-50A	0.50	7.65	3.50 1.50	2.01 0.86	1.50 1.60 1.70
powercore® M400-50A	M400-50A	0.50	7.70	4.00 1.70	2.30 0.98	1.53 1.63 1.73
powercore® M470-50A	M470-50A	0.50	7.70	4.70 2.00	2.70 1.15	1.54 1.64 1.74

Electrical steel (NO) – For e-mobility and high frequencies

Para EVs

Thickness [mm]	Density [kg/dm ³]	Max. Core loss [W/kg] at 400 Hz 1.0 T	Min. Polarization [T] at 2,500 5,000 [A/m] [A/m]	Min. yield strength as per DIN EN ISO 6892-1 R _{p0.2} in the rolling direction at room temperature [A/m] [MPa]
-------------------	----------------------------------	--	--	---

According to EN 10303

Steel grade designation	Standard designation	Thickness	Density	Max. Core loss	Min. Polarization	Min. yield strength
powercore® 020-130Y320	NO20-13	0.20	7.60	13	1.48 1.59	1.69 320
powercore® 020-150Y320	NO20-15	0.20	7.60	15	1.48 1.59	1.69 320
powercore® 027-140Y420	NO27-15	0.27	7.60	14	1.51 1.61	1.73 420
powercore® 027-150Y370*	NO27-15	0.27	7.60	15	1.52 1.61	1.73 370



Por que a norma estabelece 400Hz?

Os carros elétricos usam motores de velocidade variável. Quem controla a velocidade do motor é a frequência de excitação da corrente elétrica do estator.

Para o carro chegar a 100km/h, com pneu de diâmetro 600mm, a roda tem que girar a 900 rpm, ou 15 rps
Mas os carros elétricos usam um redutor, normalmente de 9:1, ou seja, para roda girar a 15rps, o motor tem que girar a 135 rps.

A frequência de acionamento depende do número de pares de polos (n) do motor: $f = n * rps$

Para o motor de 4 pares de polos, a frequência de excitação será de 540Hz.

Portanto, a frequência de excitação do motor, quando o carro estiver a 100km/h, será de 540 Hz.

Curiosidade: muitos motores de EV tem apenas uma marcha

Video abaixo explica, em carros da formula E, motivos para usar uma ou mais marchas

https://www.youtube.com/watch?v=36H9BVeMYMI&ab_channel=EngineeringExplained



Small shifting unit: the 1-speed gearbox

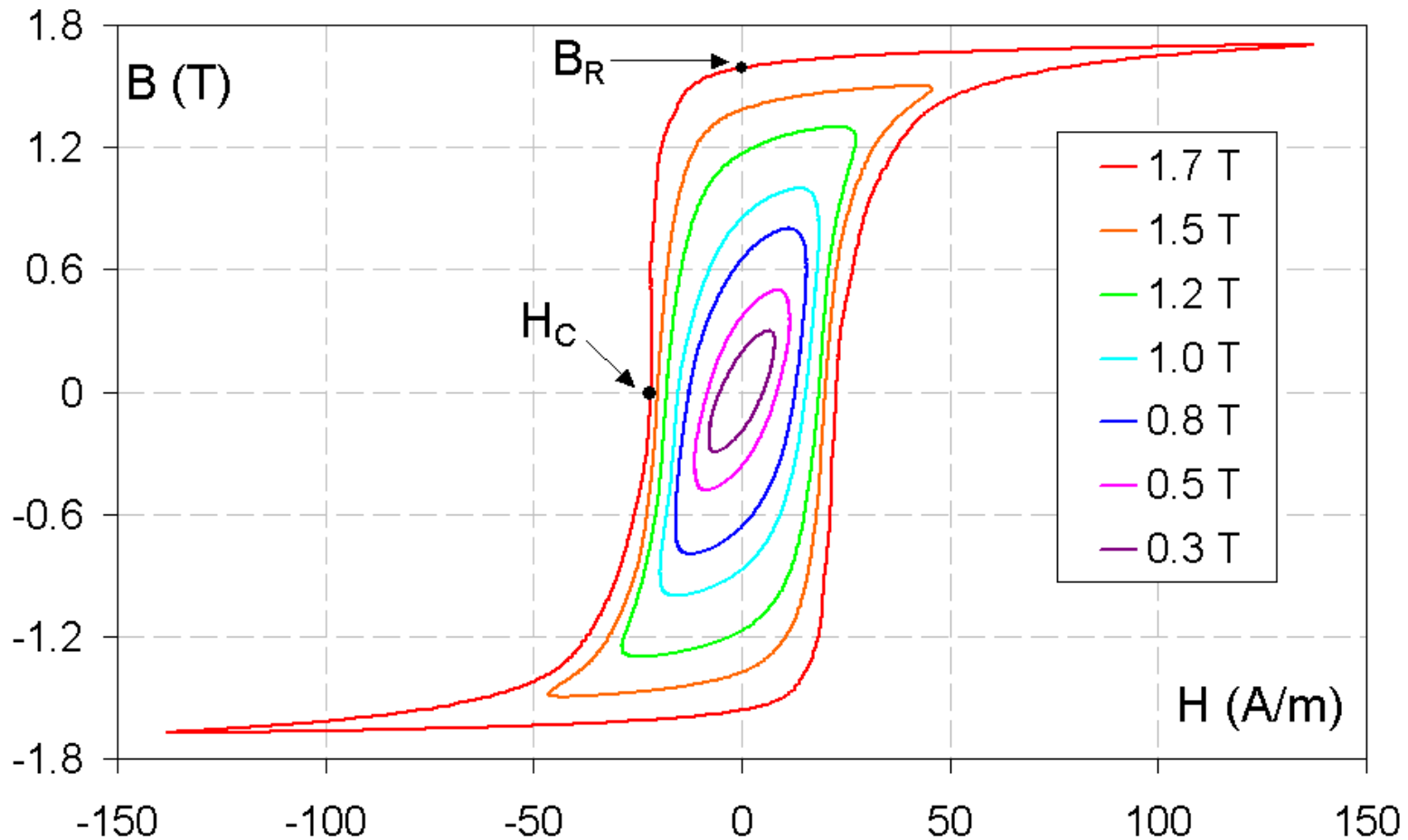
Imagem ao lado é de transmissão de Marcha única.

Mostra as engrenagens de dentes helicoidais

Motores de ônibus e caminhões têm mais de uma marcha

<https://www.volkswagenag.com/en/news/2020/02/in-brief-the-all-rounder-the-1-speed-gearbox.html>

Por que a norma estabelece 1,0 tesla?



- Quanto maior a indução máxima (B_{max}) na histerese, maior a área da histerese,
- Que significa que mais energia é dissipada,
- E, portanto, maior a “perda magnética de potência”
- Aproveitando, notar a remanência (B_r) e o campo coercitivo (H_c)

Por que a norma estabelece 1 tesla?

- O principal objetivo é permitir uma comparação fácil e reproduzível entre medidas feitas em diferentes locais. Medir a 400Hz é uma escolha dentro da faixa de frequências de uso corrente em motores de carros elétricos.
- A medida de perdas magnéticas de potência a 400Hz na polarização de 1 tesla pode não representar muito bem a faixa de induções da operação desses motores, já que a distribuição do fluxo entre os dentes não é homogênea, mas o uso de 1 tesla garante uma melhor qualidade de medida ao usar o mesmo instrumental (Quadro de Epstein) que vem sendo usado pra medir os aços a 1,5T e 60Hz. Por exemplo, a 1,5T seria mais difícil garantir senoidalidade da indução a 400Hz, que é uma condição imposta pelas normas para garantir reprodutibilidade.

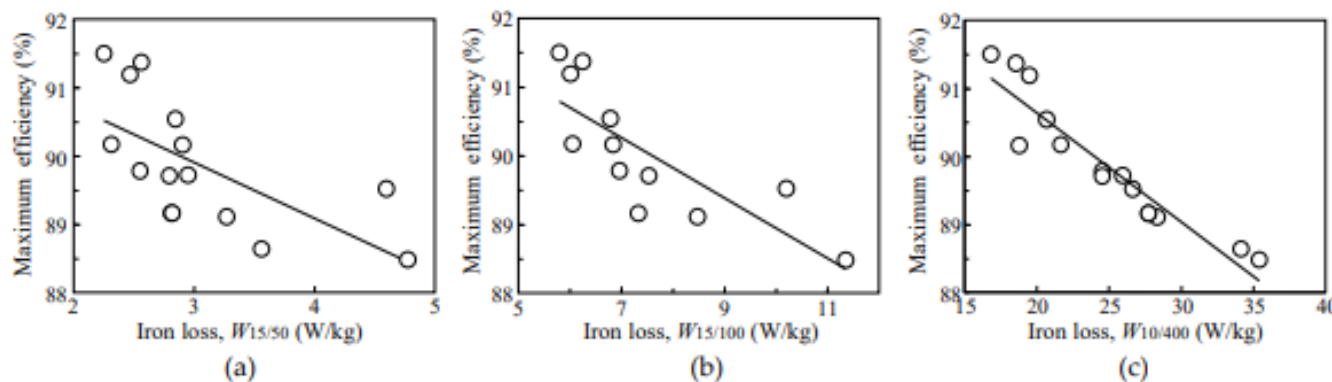


Figure 2. Relationship between maximum motor efficiency and iron loss $W_{15/50}$, $W_{15/100}$, $W_{10/400}$.
(a) Relationship between maximum motor efficiency and material iron loss at $B = 1.5$ T, 50 Hz;
(b) relationship between maximum motor efficiency and material iron loss at $B = 1.5$ T, 100 Hz;
(c) relationship between maximum motor efficiency and material iron loss at $B = 1.0$ T, 400 Hz.



Article

Electrical Steels and Their Evaluation for Automobile Motors

Kunihiko Senda *, Masanori Uesaka, Soichiro Yoshizaki and Yoshihiko Oda

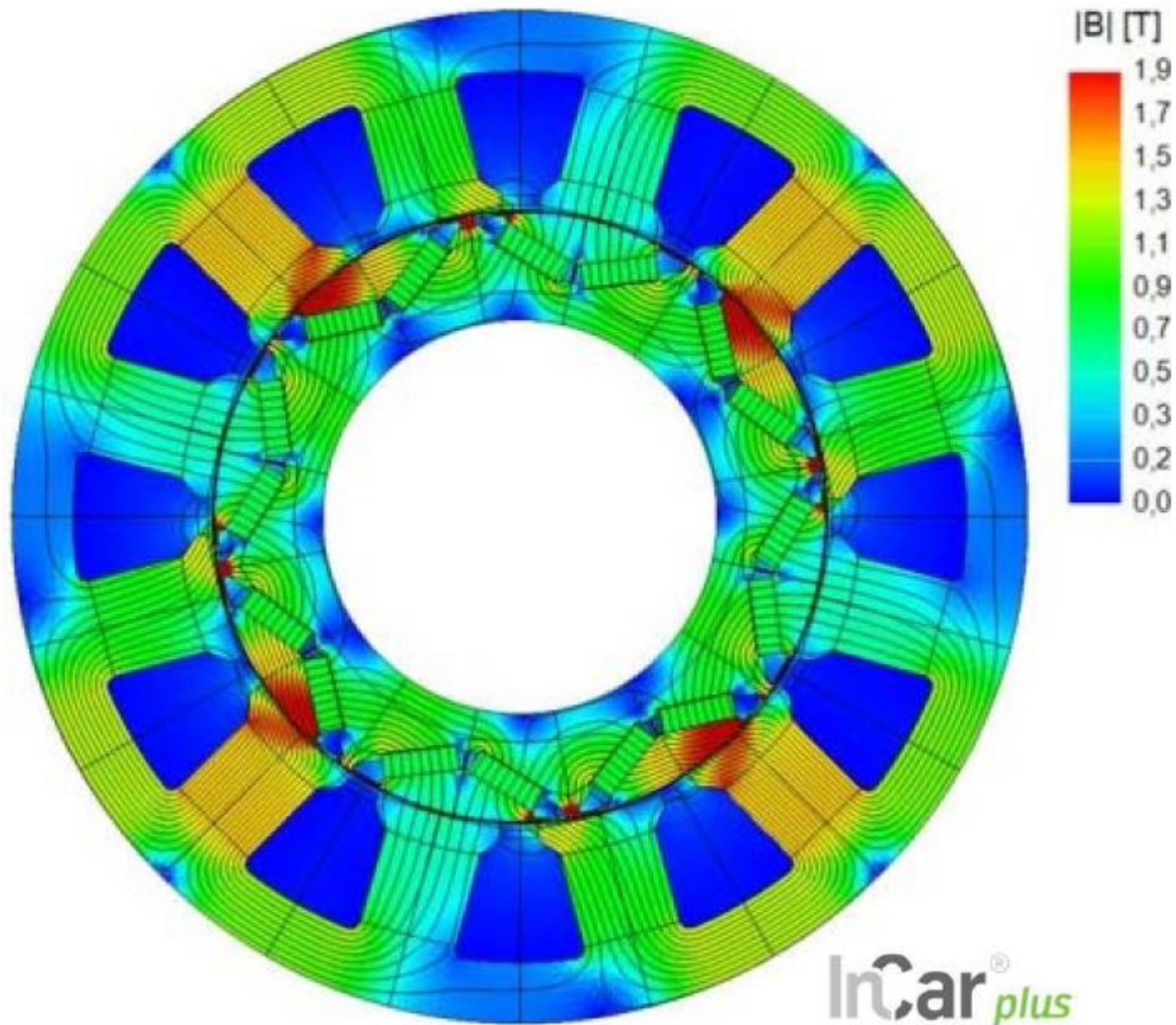
Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, Kawasaki-dori 1-chome, Mizushima, Kurashiki, Okayama 712-8511, Japan; m-uesaka@jfe-steel.co.jp (M.U.); s-yoshizaki@jfe-steel.co.jp (S.Y.); yos-oda@jfe-steel.co.jp (Y.O.)

* Correspondence: k-senda@jfe-steel.co.jp

Received: 17 April 2019; Accepted: 20 May 2019; Published: 27 May 2019



densities such as 1.6 T. Moreover, measurement of material iron loss at high flux density such as 1.6 T and a frequency of 400 Hz is sometimes difficult because of the performance limitations of measuring apparatuses. Therefore, $W_{10/400}$ is a useful indicator for the evaluation of materials used in BLDC motor cores.



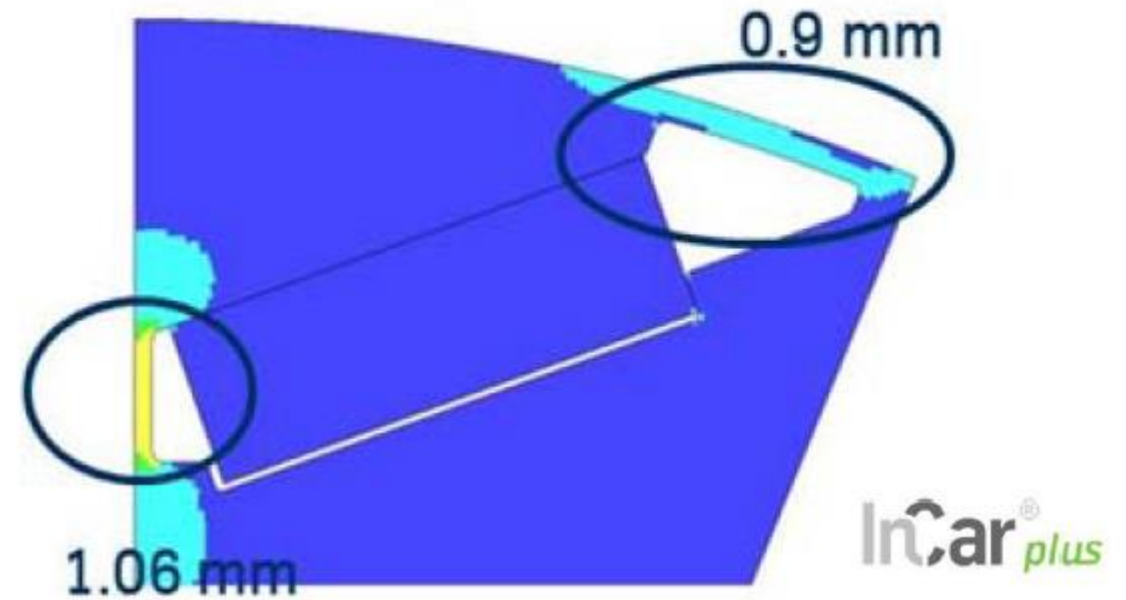
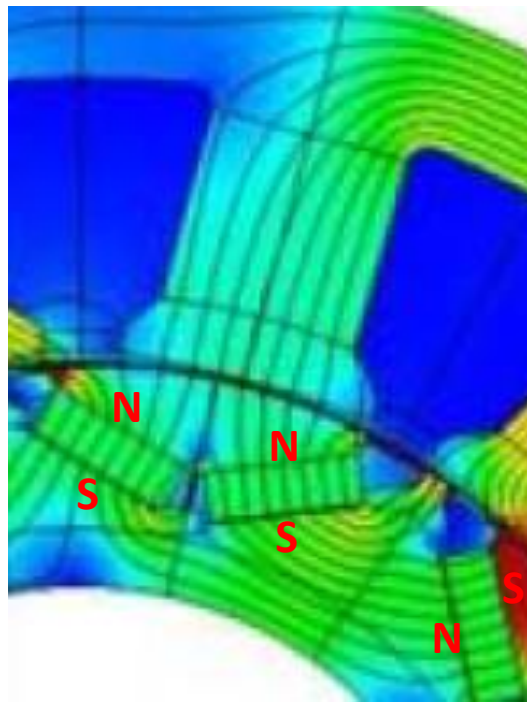
Mapa de induções atingidas em diferentes pontos de um motor síncrono com ímã permanente enterrado.

É possível ver os 16 ímãs que, dois a dois, forma os quatro polos sul e quatro polos norte do rotor.

As correntes elétricas que percorrem os enrolamentos de fios de cobre no estator criam campos magnéticos. É possível ver dentes com indução magnética da ordem de 1,5T (amarelos), verde escuro (1,0T) e verde claro (0,5T).

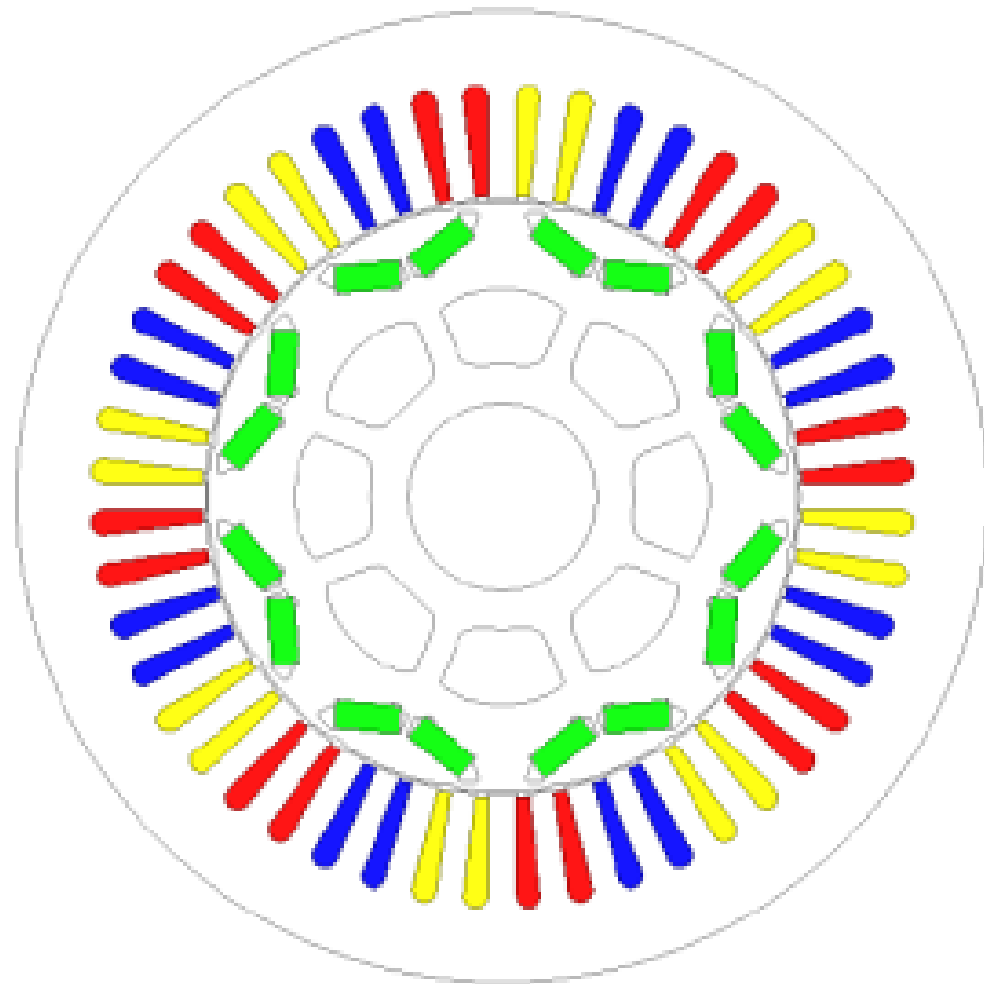
A corrente alternada faz com que esses campos girem, levando o rotor a girar.

Fig. 1. Field plot of a PMSM simulation.



1. Os ímãs ficam acondicionados em cavidades estampadas nas lâminas de aço.
2. Para garantir que o campo magnético do polo norte de um ímã busque passar pelo dente do estator, é preciso evitar que ele encontre um “curto circuito” dentro do rotor para chegar no polo sul vizinho.

3. Para isso, busca-se deixar espaços vazios que aumentem a relutância magnética do caminho dentro do rotor.
4. entretanto, algumas “pontes metálicas” são necessárias para sustentar a parte externa do rotor que conduz o campo até o dente.
5. A força centrífuga que atua sobre a parte externa do rotor exige resistência ao escoamento das pontes metálicas. Para minimizar a largura das pontes, é necessário aumentar o limite de escoamento do aço.



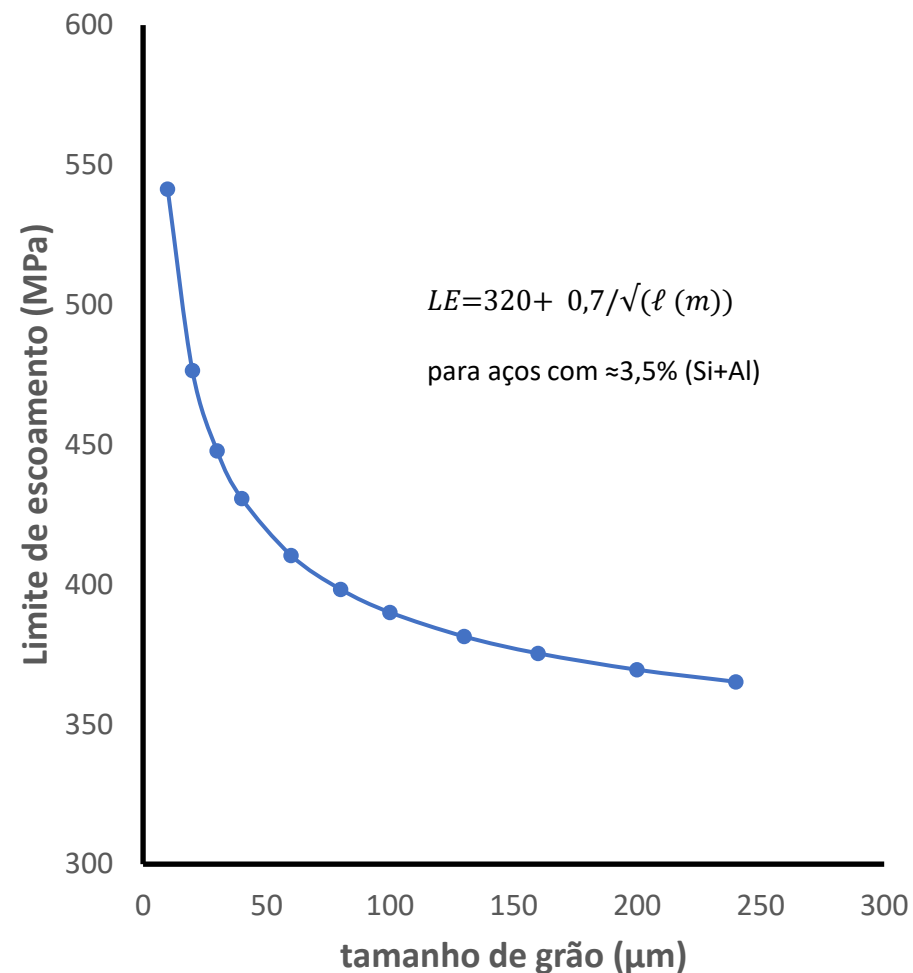
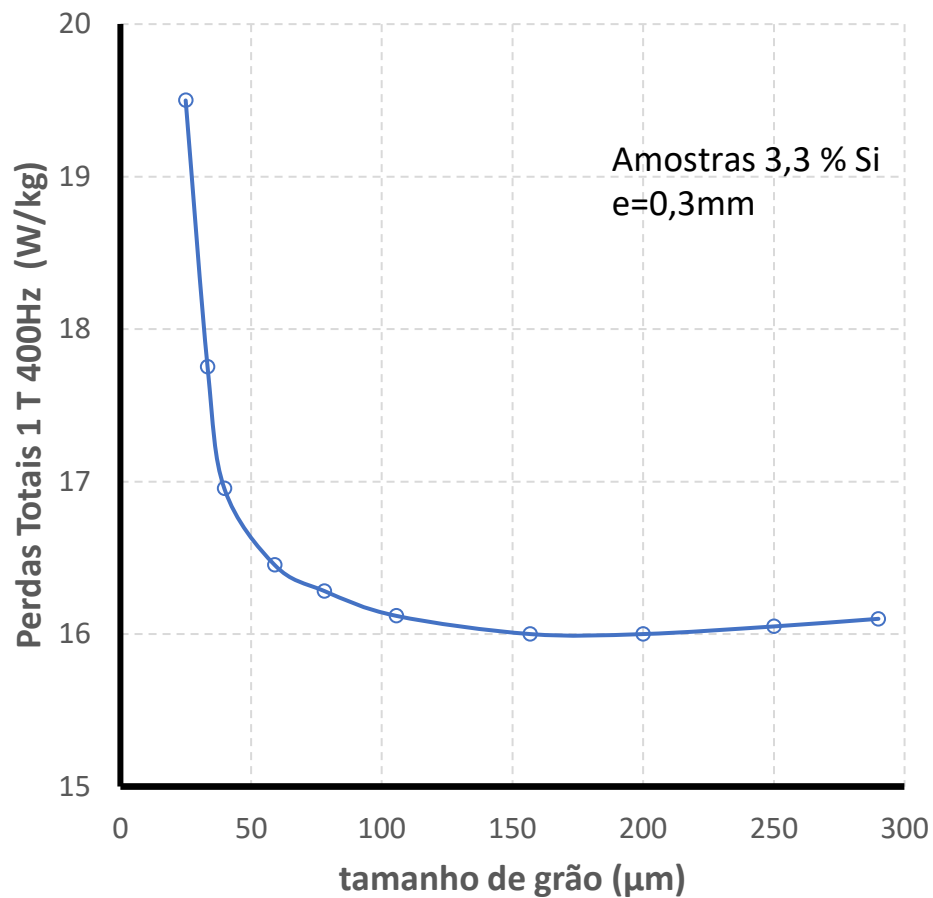
Prius 2010 IPM machine

Estator, com 3 enrolamentos de fios (amarelo, azul e vermelho) envolvendo os dentes do estator. É nessa região que a frequência de excitação é alta, gerando alta dissipação de calor. Essa região exige baixa perda magnética de potência .

O rotor é a região central, móvel, que inclui os ímãs (de cor verde) Como o rotor gira acompanhando o campo magnético, a frequência de excitação é baixa, as perdas magnéticas são bem mais baixas. O rotor esquenta pela transmissão de calor do estator. Mas é ali, nas chamadas “pontes” que se exige alta resistência mecânica do aço.

Estator e rotor poderiam ser feitos de aços diferentes, mas como o estator é estampado de uma chapa, haveria o desperdício de todo o interior.

Entretanto, as características microestruturais que favorecem a redução das perdas Prejudicam o limite de escoamento. Por exemplo, o tamanho de grão.



Typical Electrical and Magnetic Properties

Grade	Resistivity, $\Omega \cdot m \times 10^{-8}$	Core Loss, W/kg (W/lb)					Magnetic Flux Density, T	
		1.0T/50Hz	1.5T/50Hz	1.0T/60Hz	1.5T/60Hz	1.0T/400Hz	B25	B50
20PNX1200F	59	0.81(0.37)	1.95 (0.88)	1.00 (0.45)	2.40 (1.09)	10.8 (4.90)	1.54	1.63
25PNX1250F	59	0.83(0.38)	1.97 (0.89)	1.03 (0.47)	2.43 (1.10)	12.1 (5.49)	1.56	1.65
27PNX1350F	59	0.84(0.38)	1.98 (0.90)	1.04 (0.47)	2.44 (1.11)	12.7 (5.76)	1.57	1.66
30PNX1450F	59	0.85(0.39)	2.00 (0.91)	1.04 (0.47)	2.46 (1.12)	13.7 (6.21)	1.57	1.66

Note) Above values are not guaranteed. Tests are conducted in accordance with IEC 60404-2 (or JIS C 2550-1) method, using as-sheared specimens taken one half parallel and one half transverse to the rolling direction.

Typical Mechanical Properties and Lamination Factor

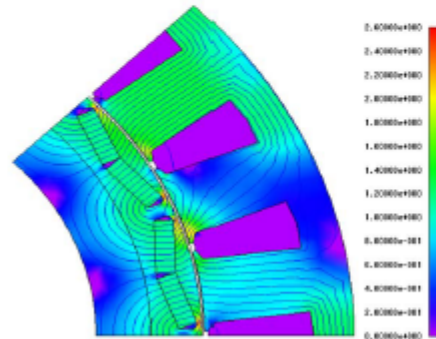
Grade	Tensile Strength, N/mm ²		Yield Point, N/mm ²		Elongation, %		Hardness HV1	Lamination Factor, %
	L	C	L	C	L	C		
20PNX1200F	513	535	409	431	15	15	218	96.0
25PNX1250F	538	545	415	424	15	16	224	97.0
27PNX1350F	547	556	421	432	17	16	22	
30PNX1450F	536	551	413	428	17	16	22	

Note) 1. Above values are not guaranteed. Tests are conducted in accordance with JIS Z 2241 and 2244.
 2. L : Specimen is parallel to the rolling direction. / C : Specimen is transverse to the rolling direction.
 3. Specimens with 6A coating are used for lamination factor test.

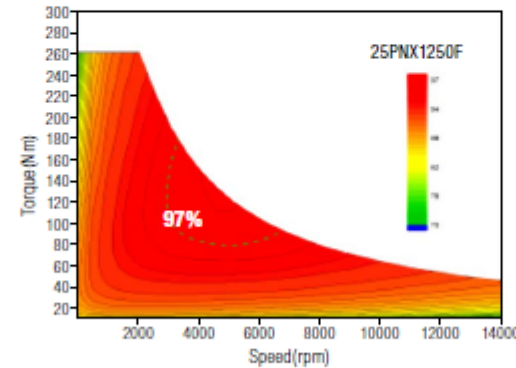
Motor design and vehicle performance analysis

Performance simulation

- Finite Element Analysis (FEA)
- Core loss evaluation



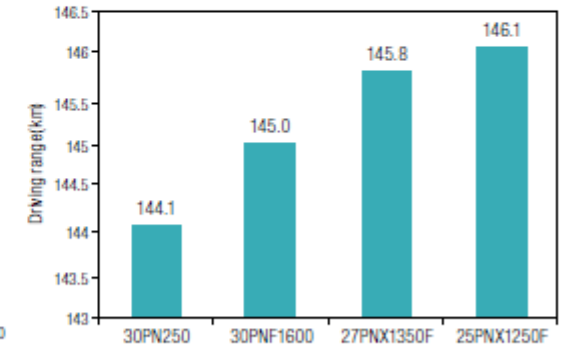
[Electromagnetic FEA]



[Motor efficiency map]

EV performance

- EV driving range analysis
- Driving performance calculation :
Lowest cost to performance



[EV driving range, City mode]

Catálogo da POSCO

PNX-Core Non-oriented electrical steel

PNX-Core

PNX-Core is optimized core for traction motor in electrical vehicle(EV). It has low core loss at high frequencies, and has high mechanical strength for excellent endurance.

Mostra curva de torque x velocidade, até 14.000 rpm

Mostra o efeito da escolha da espessura na eficiência energética

Mostra a topologia do motor

Electrical steel (NO) – For e-mobility and high frequencies

Thickness [mm]	Density [kg/dm ³]	Max. Core loss	Min. Polarization			Min. yield strength as per DIN EN ISO 6892-1
		[W/kg] at	[T] at	[A/m]	[A/m]	[A/m]
		400 Hz	2,500	5,000	10,000	
		1.0 T	[A/m]	[A/m]	[A/m]	[MPa]

According to EN 10303

Steel grade designation	Standard designation							
powercore® 020-130Y320	NO20-13	0.20	7.60	13	1.48	1.59	1.69	320
powercore® 020-150Y320	NO20-15	0.20	7.60	15	1.48	1.59	1.69	320
powercore® 027-140Y420	NO27-15	0.27	7.60	14	1.51	1.61	1.73	420
powercore® 027-150Y370*	NO27-15	0.27	7.60	15	1.52	1.61	1.73	370
powercore® 027-150Y420*	NO27-15	0.27	7.60	15	1.52	1.61	1.73	420
powercore® 027-180Y370*	NO27-18	0.27	7.60	18	1.52	1.61	1.73	370
powercore® 030-150Y420*	NO30-16	0.30	7.60	15	1.52	1.61	1.73	420
powercore® 030-160Y420*	NO30-16	0.30	7.60	16	1.52	1.61	1.73	420
powercore® 032-190Y330*	NO35-19	0.32	7.65	19	1.52	1.62	1.74	330
powercore® 035-170Y420*	NO35-19	0.35	7.60	17	1.52	1.61	1.73	420
powercore® 035-180Y400	NO35-19	0.35	7.60	18	1.52	1.61	1.73	400
powercore® 035-190Y390	NO35-22	0.35	7.60	19	1.52	1.61	1.73	390
powercore® 035-220Y330	NO35-22	0.35	7.65	22	1.52	1.62	1.74	330
powercore® 035-220Y300	NO35-22	0.35	7.65	22	1.55	1.64	1.76	300

Aços elétricos no Brasil

Três usinas produzem aços elétricos: CSN, Aperam e Usiminas.

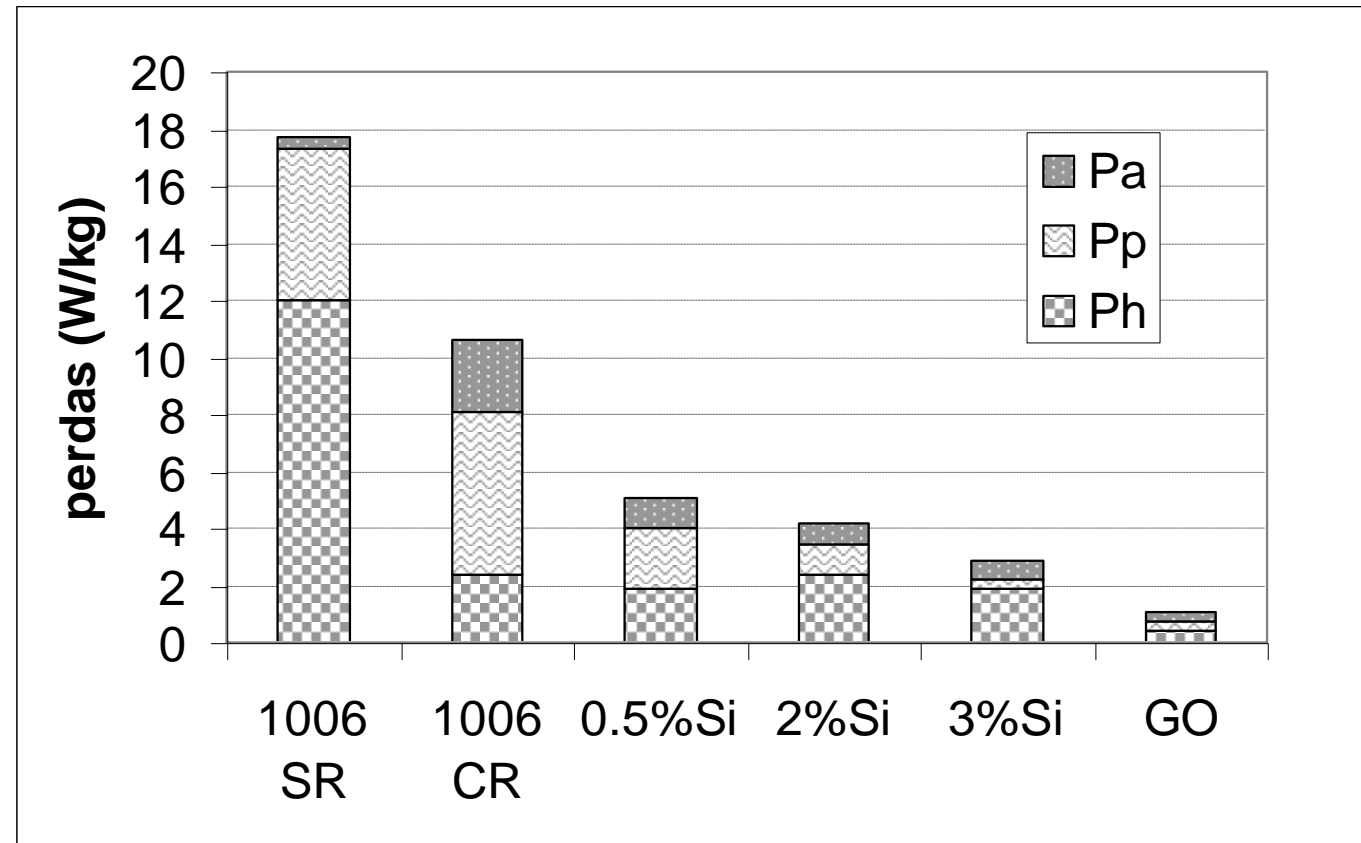
CSN e Usiminas produzem aços com teor de silício limitado a 2%.

Aperam pode produzir aços com teor até 3%.

Veremos a importância da composição mais a frente.

Perdas em diferentes aços

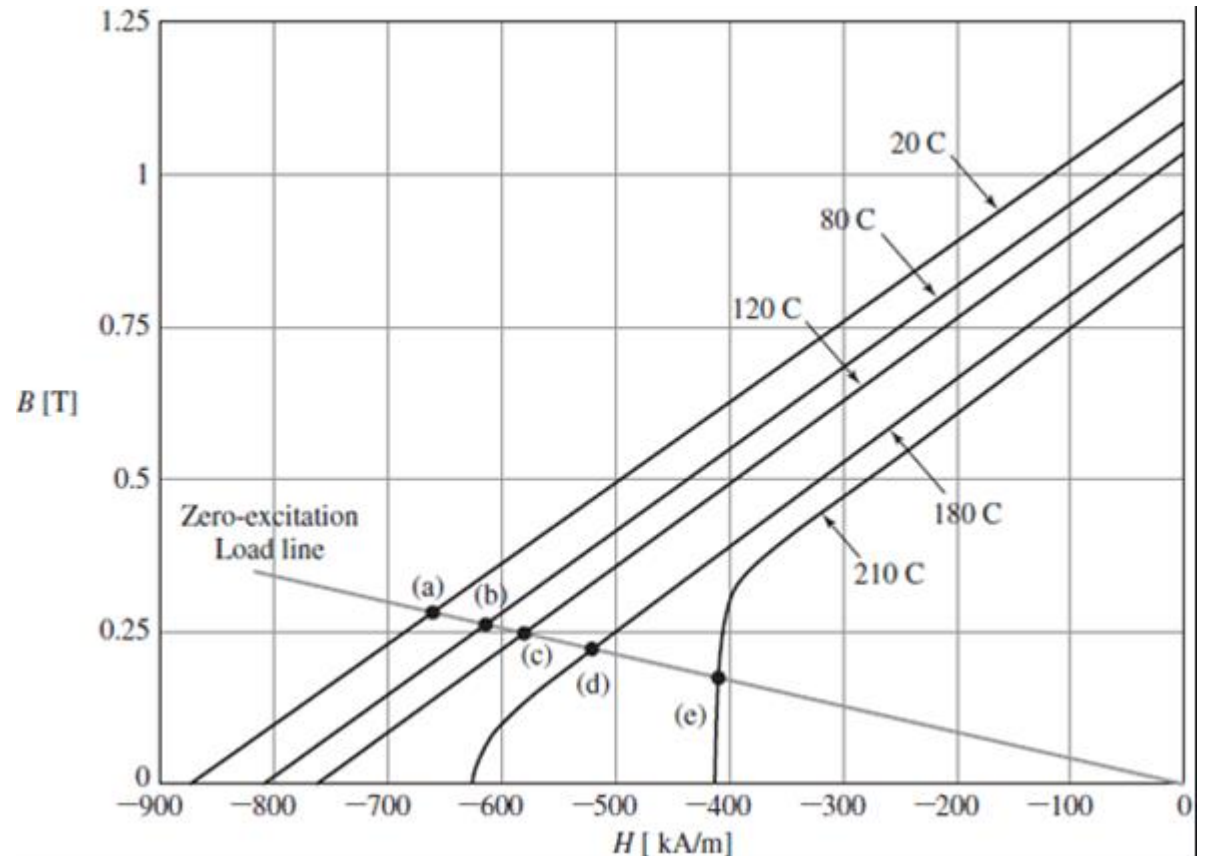
Perdas 1,5T, 60Hz



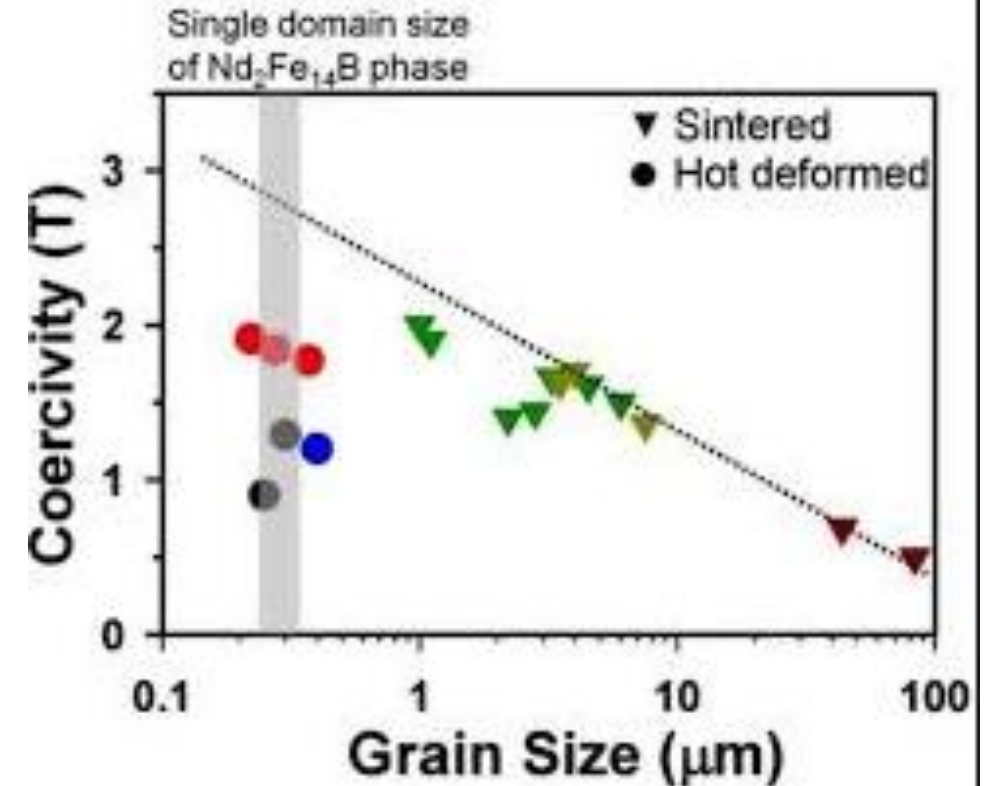
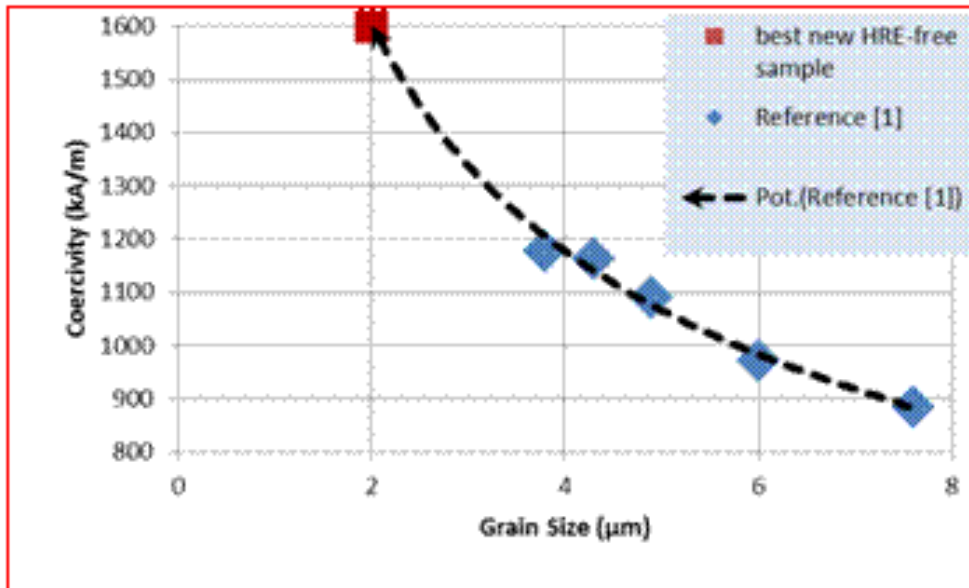
Discutiremos a separação das perdas em 3 parcelas, e como as características do aço controlam cada uma delas.

Desafio para os ímãs

- A função dos ímãs é disponibilizar um campo magnético, numa condição em que existe um campo desmagnetizante, ou seja, o ímã está no segundo quadrante da curva de histerese.
- O aumento da temperatura pode desmagnetizar o ímã.



O tal tamanho de grão é crítico para a coercividade dos ímãs



References [1] K. Uestuener, M. Katter, W. Rodewald, IEEE Trans. Magn. 42 (2006) 2897.

Ah, as unidades do magnetismo deixam a gente confuso!

Como $B = \mu_0 H$, e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ então coercividade de 2T = $B / \mu_0 \approx 1600$ kA/m

Características de um ímã de terras raras

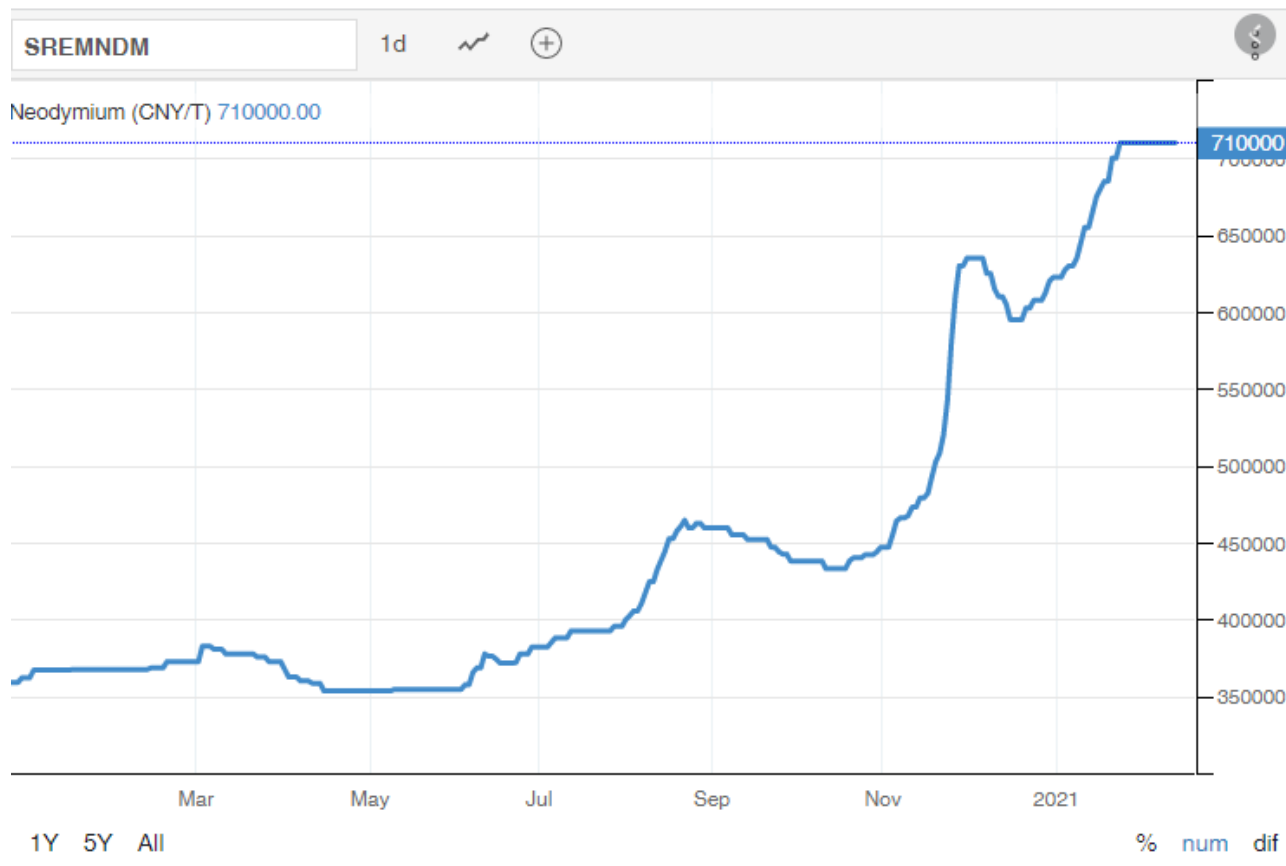
NdFeB Magnetic Values according to DIN 17410		Min.	Typ.	Max.	Units
Energy Product	(B x H) max.	205	295		kJ/ m ³
Remanence	B _r	1180	1240		mT
Reverse Temperature Coefficients of B _r			-0.1		%/K
Coercivity	H _{cB}	680	920		kA/m
Coercivity	H _{cJ}	1750	1900		kA/m
Reverse Temperature Coefficients of H _{cJ}			-0.6		%/K
Density			7.6		g/cm ³
Max. Operating Temperature				160	°C
All details correspond to manufacturers information					

o principal desafio colocado aos ímãs nos motores de EV é o aquecimento, que no limite pode causar desmagnetização, mas no mínimo altera a indução

RARE EARTH MAGNETS FOUND IN HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES

Hybrid & EV part	Quantity	Type of RE Magnet
HVAC systems	45-50 gr	Mostly Nd & Dy
Steering, transmission, braking systems	160-200 gr	Mostly NdFeB
Hybrid engine or electric motor compartment	800-5,000 gr	Mostly Nd, Dy
Various other items (security, seats, cameras, etc.)	20-30 gr	Mostly Nd
Door & window systems	67-85 gr	Mostly NdFeB
Entertainment (speakers, radio, etc)	40-50 gr	Mostly NdFeB
EV Batteries	3,800-4,200 gr	Nd
Fuel and Exhaust system for Hybrids	70-80 gr	Mostly Ce

O preço das terras raras voltou a subir em 2020.
Deve ser resultado das disputas China x EUA,
causando corrida aos estoques.



Ímãs de terras raras e o Brasil

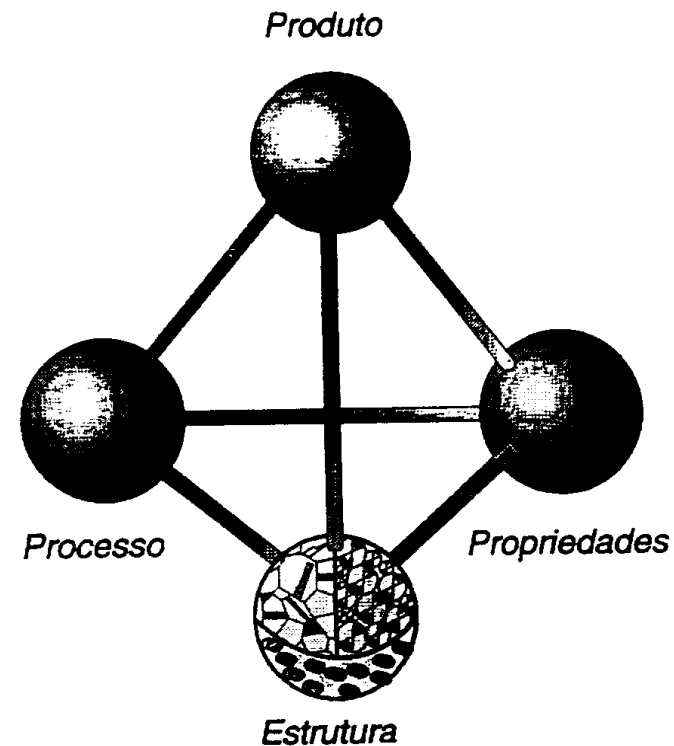
- Brasil tem grandes reservas minerais de terras raras, em Minas Gerais, em Goiás e no Amazonas.
- Governo de Minas Gerais está investindo em um Laboratório-Fábrica de ímãs com capacidade para produzir até 100 toneladas anuais, desde 2017.
- Governo Federal

resumindo

- O motor mais usado nos carros elétricos é o motor a ímã permanente enterrado, por ter a maior densidade de torque e de potência.
- Essa solução coloca desafios para os aços elétricos: como conseguir reduzir as perdas a 1T 400Hz e aumentar o limite de escoamento, usando o conhecimento sobre as relações processo- microestrutura- propriedade?
- Tb coloca desafios para os ímãs: como resistir aos efeitos do aquecimento do ímã durante a operação, usando as relações processo- microestrutura- propriedade?

Lógica do curso

- Base: relação desempenho do produto - propriedades
- ênfase: relação microestrutura - propriedade
- Complemento: relação processamento-propriedades.



Programa de curto prazo

- No capítulo 2 vamos rever os fundamentos do magnetismo:
 - Campo H, indução B,
 - ferromagnetismo,
 - domínios magnéticos,
 - Determinação de propriedades magnéticas, histerese.
- No capítulo 3 vamos rever os fundamentos da microestrutura:
 - Grãos
 - Orientação cristalina
 - Deformação plástica
 - precipitados

Para a segunda aula

- Ler os itens 20-1, 20-2 e 20-3 do capítulo “magnetic properties”, do livro “Ciência e engenharia dos Materiais: uma introdução”, de William Callister.
- É um livro escrito para o 1º ano de engenharia, mas esse capítulo não é tão simples.
- Teremos um teste no início da aula.
- A ideia é prepararmos-nos para um certo aprofundamento que virá na 3ª aula.



20.1 INTRODUCTION

Magnetism, the phenomenon by which materials assert an attractive or repulsive force or influence on other materials, has been known for thousands of years. However, the underlying principles and mechanisms that explain the magnetic phenomenon are complex and subtle, and their understanding has eluded scientists until relatively recent times. Many of our modern technological devices rely on magnetism and magnetic materials; these include electrical power generators and transformers, electric motors, radio, television, telephones, computers, and components of sound and video reproduction systems.

Iron, some steels, and the naturally occurring mineral lodestone are well-known examples of materials that exhibit magnetic properties. Not so familiar, however, is the fact that all substances are influenced to one degree or another by the presence of a magnetic field. This chapter provides a brief description of the origin of magnetic fields and discusses the various magnetic field vectors and magnetic parameters; the phenomena of diamagnetism, paramagnetism, ferromagnetism, and ferrimagnetism; some of the different magnetic materials; and the phenomenon of superconductivity.

20.2 BASIC CONCEPTS

Magnetic Dipoles

Magnetic forces are generated by moving electrically charged particles; these magnetic forces are in addition to any electrostatic forces that may prevail. Many times it is convenient to think of magnetic forces in terms of fields. Imaginary lines of force may be drawn to indicate the direction of the force at positions in the vicinity of the field source. The magnetic field distributions as indicated by lines of force are shown for a current loop and also a bar magnet in Figure 20.1.

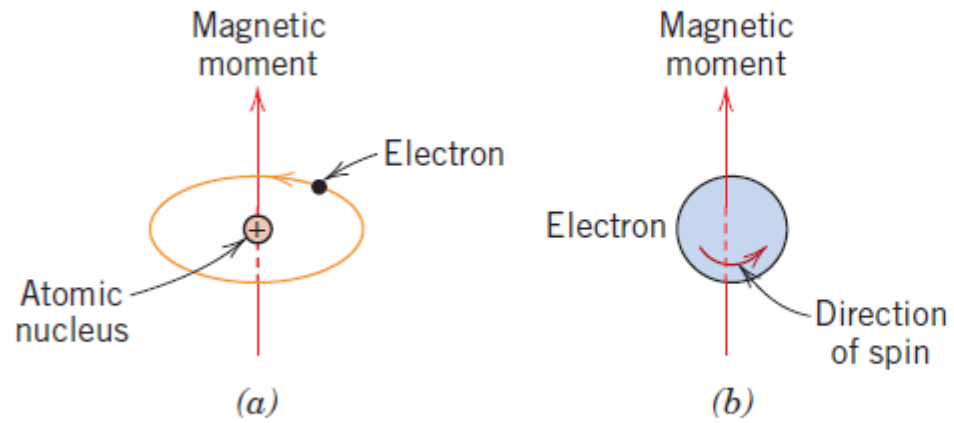


Figure 20.4 Demonstration of the magnetic moment associated with (a) an orbiting electron and (b) a spinning electron.

O conceito mais complexo será o magneton de Bohr.

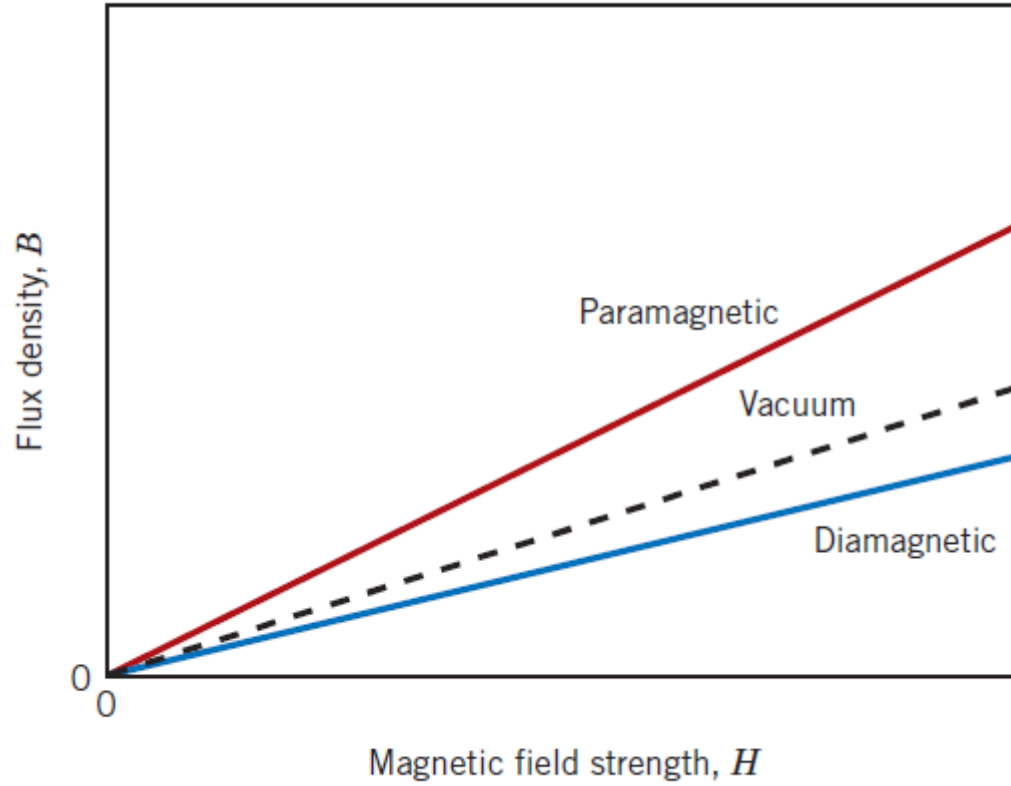


Figure 20.6 Schematic representation of the flux density B versus the magnetic field strength H for diamagnetic and paramagnetic materials.