

Nº 180054

Compatibilização de ensaios de caracterização magnética estática de materiais ferromagnéticos através de correções pelo fator desmagnetizante

Ramon Valls Martins

*Palestra apresentada no
CONGRESSO INTERNACIONAL
DE METROLOGIA ELÉTRICA,
16., 2025, Maceió. 23 slides*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.
PROIBIDO REPROUÇÃO

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
S/A - IPT
Av. Prof. Almeida Prado, 532 | Cidade Universitária ou
Caixa Postal 01411 | CEP 01064-970
São Paulo | SP | Brasil | CEP 05508-901
Tel 11 3767 4374/4000 | Fax 11 3767-4099

www.ipt.br



METROLOGIA

*150 anos de confiabilidade
para um futuro sustentável*

2025

Data: 1 a 4 de dezembro de 2025

Local: Centro Cultural e de Exposições
Ruth Cardoso
Maceió - AL



www.metrologia2025.org.br



Compatibilização de ensaios de caracterização magnética estática de materiais ferromagnéticos através de correções pelo fator desmagnetizante

Ramon Valls Martin

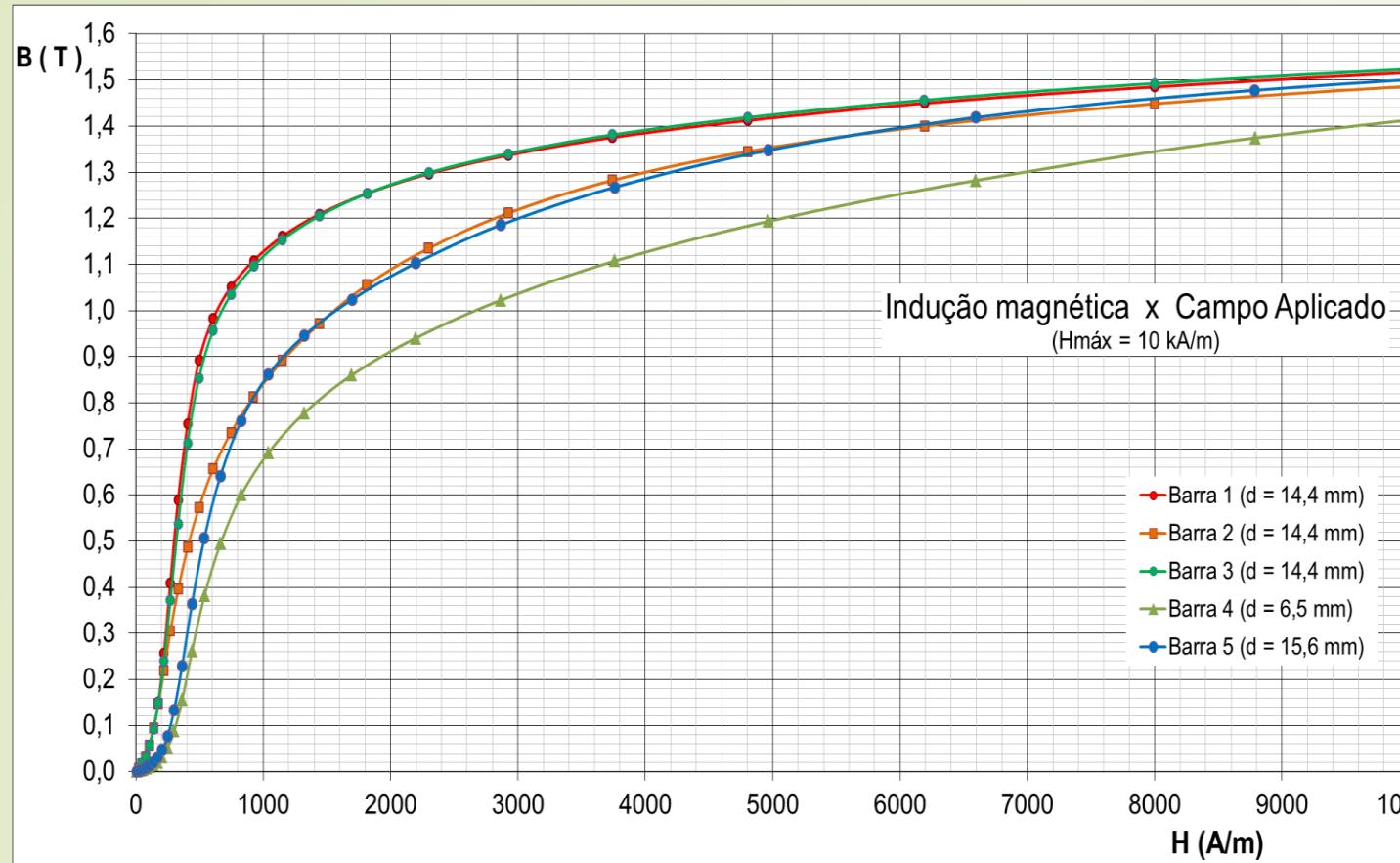
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo -IPT

MATERIAIS MAGNÉTICOS IMPACTAM DIRETAMENTE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE GRANDES MÁQUINAS ELÉTRICAS

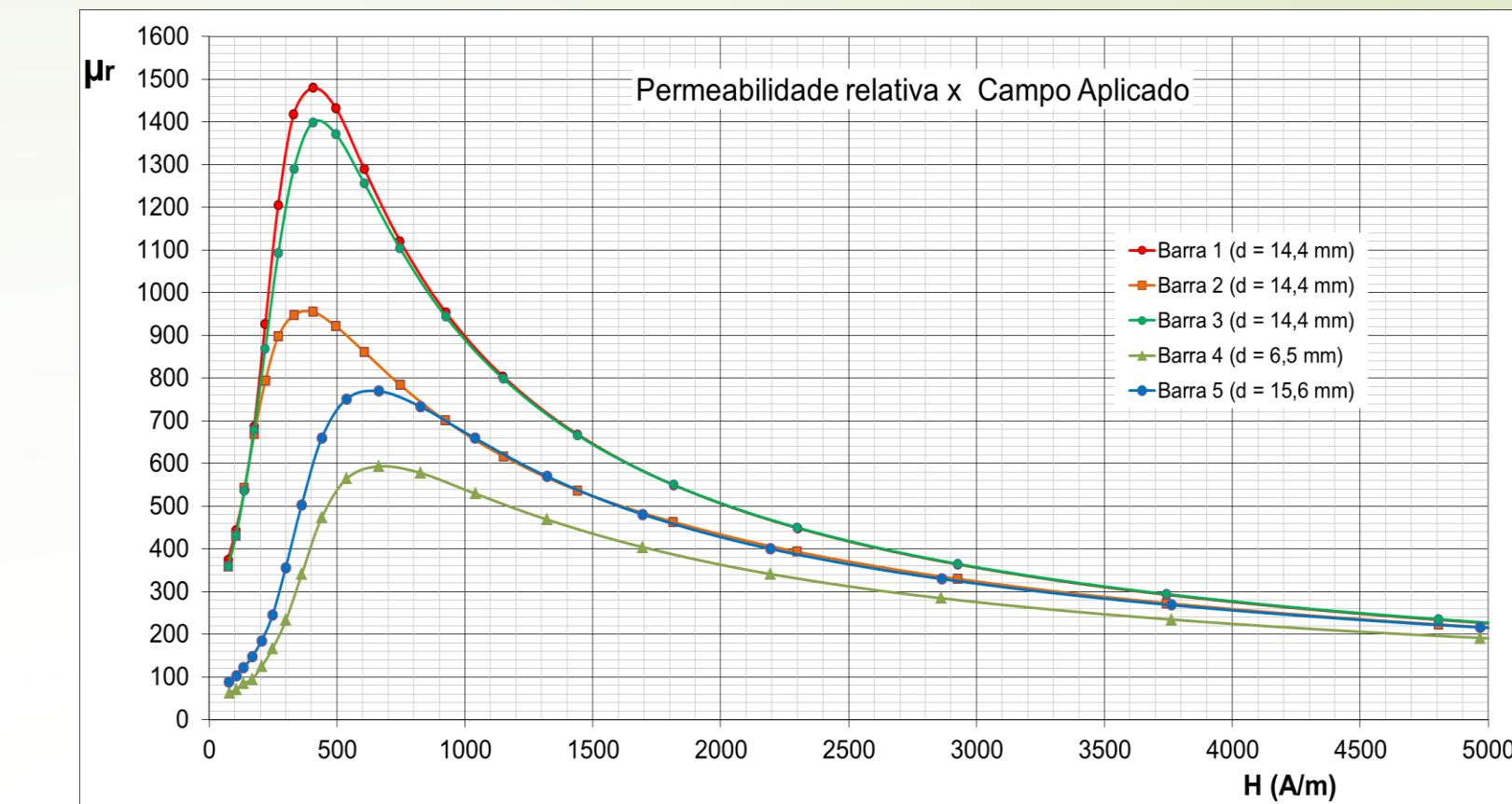


Rotor de hidrogerador da Usina Hidrelétrica Teles Pires, localizada entre os estados de Mato Grosso e Pará.

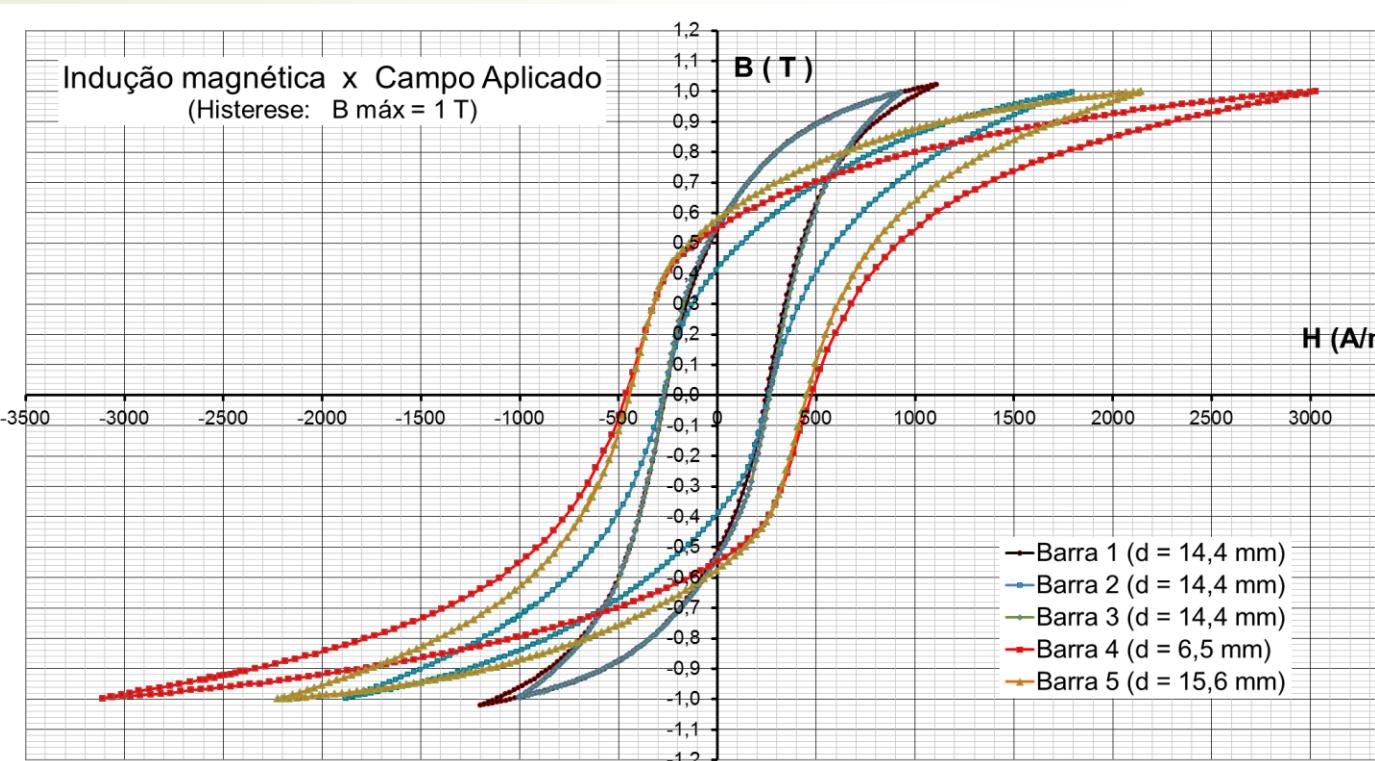
CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA ESTÁTICA DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS (AÇO)



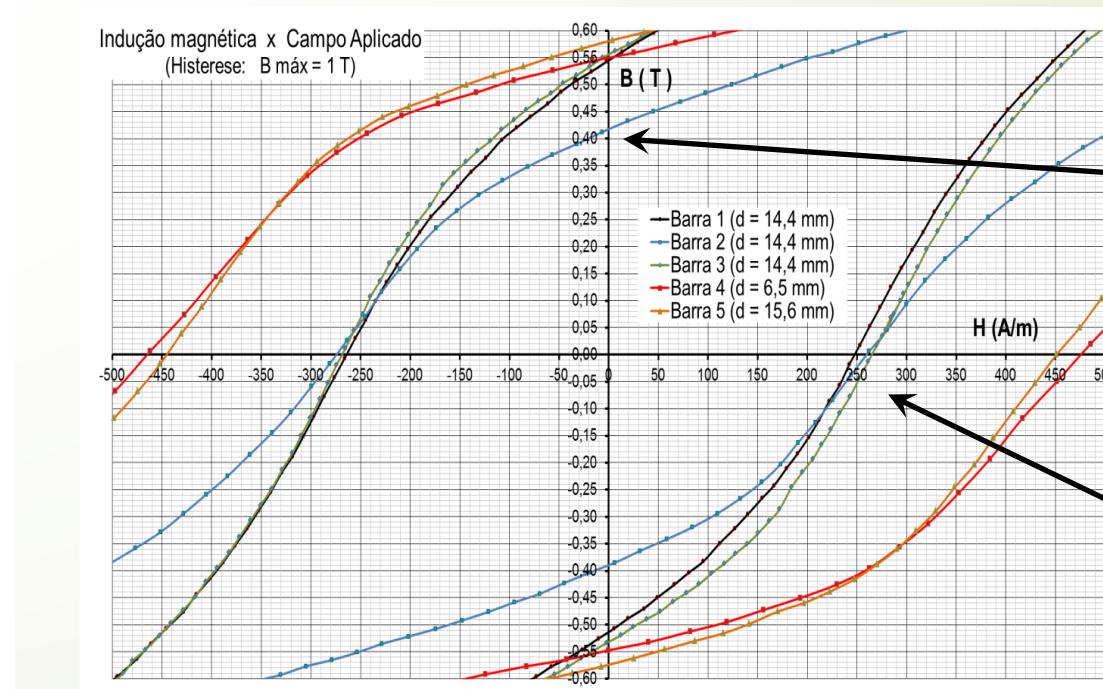
MAGNETIZAÇÃO INICIAL (B X H)



PERMEABILIDADE RELATIVA ($\mu_r \times H$)



HISTERESE QUASE-ESTÁTICA (B x H)



REMANÊNCIA

COERCIVIDADE

FORMATO DOS CORPOS DE PROVA



HASTES
AGULHAS
TARUGOS
CHAPAS
FIOS
PÓS

•
•
•

ANEL DE ROWLAND COMO PADRÃO DE REFERÊNCIA

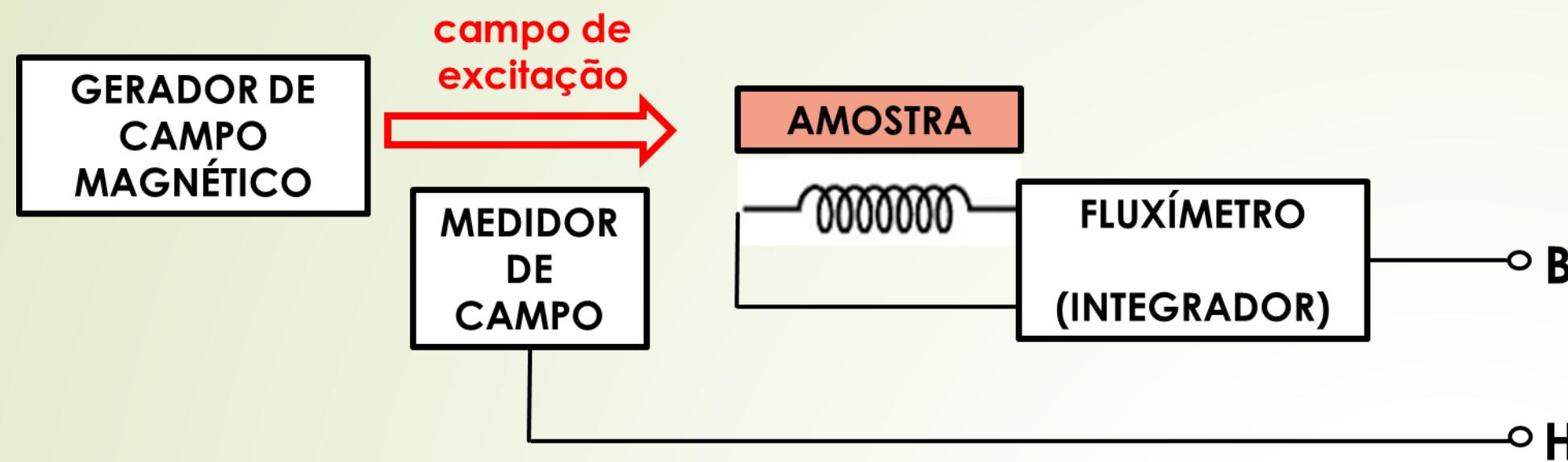
PRÓS

- Ensaio com os resultados mais confiáveis
- Apenas o material sob teste forma parte do circuito magnético de medição (núcleo toroidal)
- Campo aplicado bem determinado pela medição da corrente aplicada ao primário
- Indução bem determinada pela medição e integração da tensão induzida no secundário.
- Não há descontinuidades e nem campos desmagnetizantes

CONTRAS

- Campo máximo de excitação bem limitado ($H < 10 \text{ kA/m}$)
- Perda da informação da anisotropia
- Corpo de prova de difícil extração das peças (eixos, peças polares,...)
- Ensaio muito demorado e custoso, pois exige a bobinagem dos enrolamentos primário e secundário diretamente sobre a amostra
- Não chega à saturação magnética da amostra

MÉTODOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

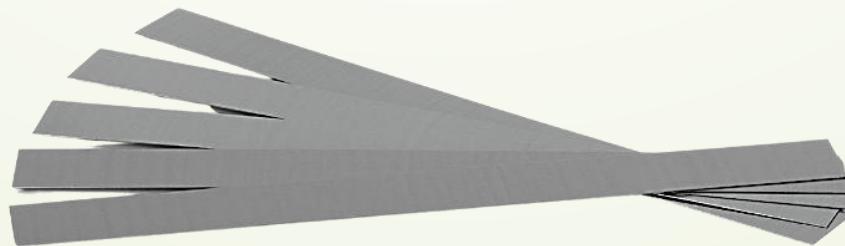


MÉTODOS NORMALIZADOS (centenários!)

ANEL DE ROWLAND

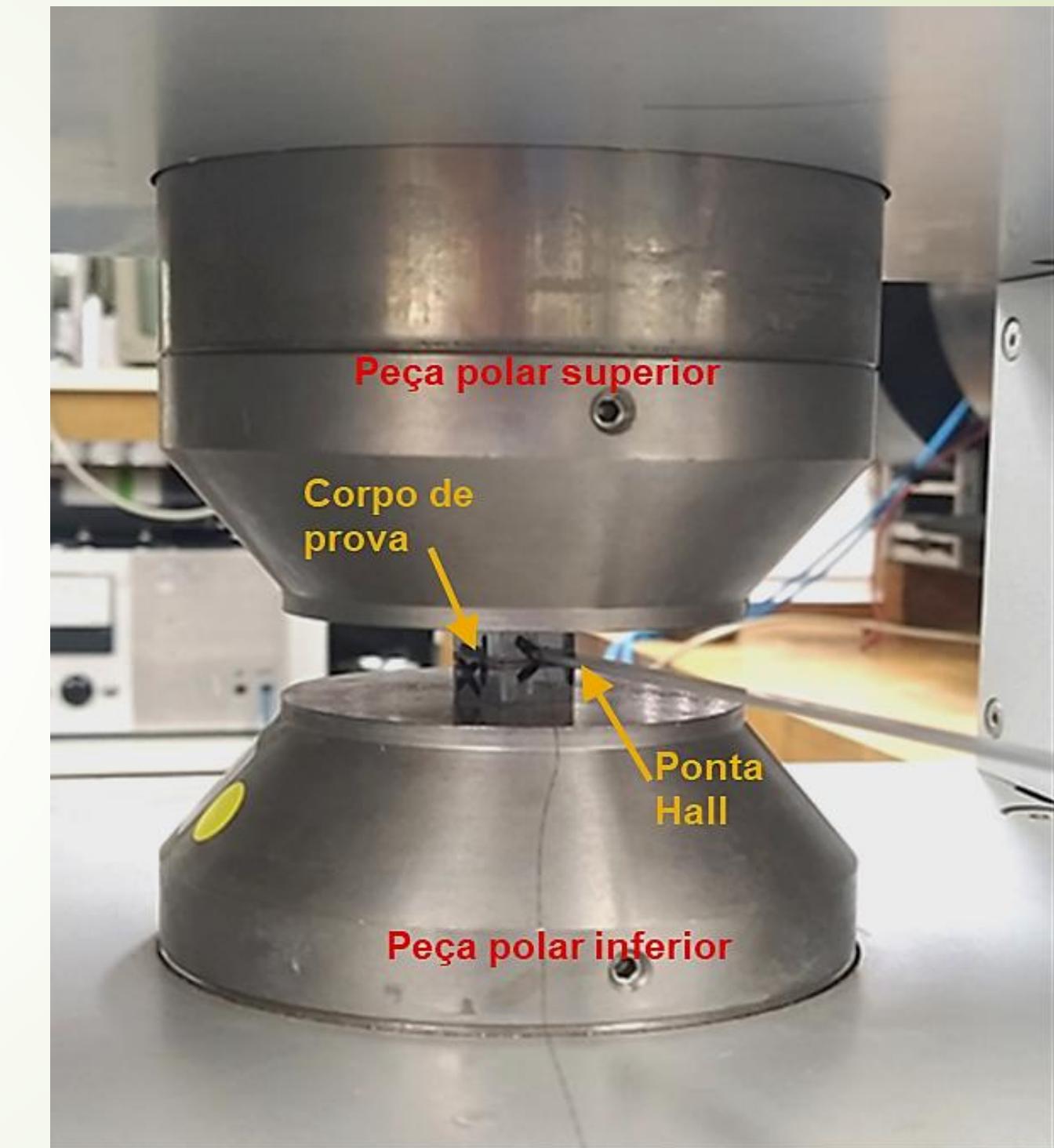


QUADRO DE EPSTEIN

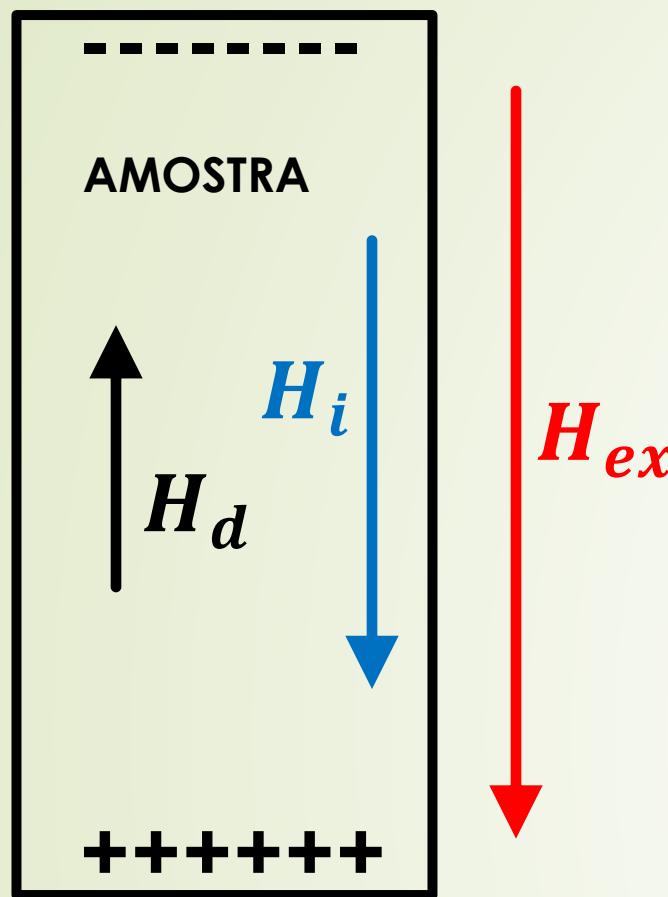


MÉTODO NÃO NORMALIZADO

"PERMEÂMETRO" COM ELETROÍMÃ



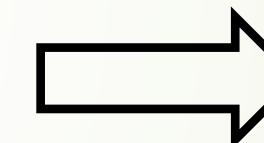
CAMPO DESMAGNETIZANTE (H_d) e FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO (N_d)



H_d - campo de desmagnetização

N_d - fator de desmagnetização proporcional à magnetização M
ou à polarização magnética J

$$H_d = N_d M = N_d \frac{J}{\mu_0}$$



$$H_i = H_{ex} \frac{1 + N_d}{1 + N_d \mu_r}$$

$$H_i = H_{ex} - H_d$$

$$B = \mu H_i = \frac{\mu_r}{\mu_0} H_i$$

$$1 > N_d > 0$$

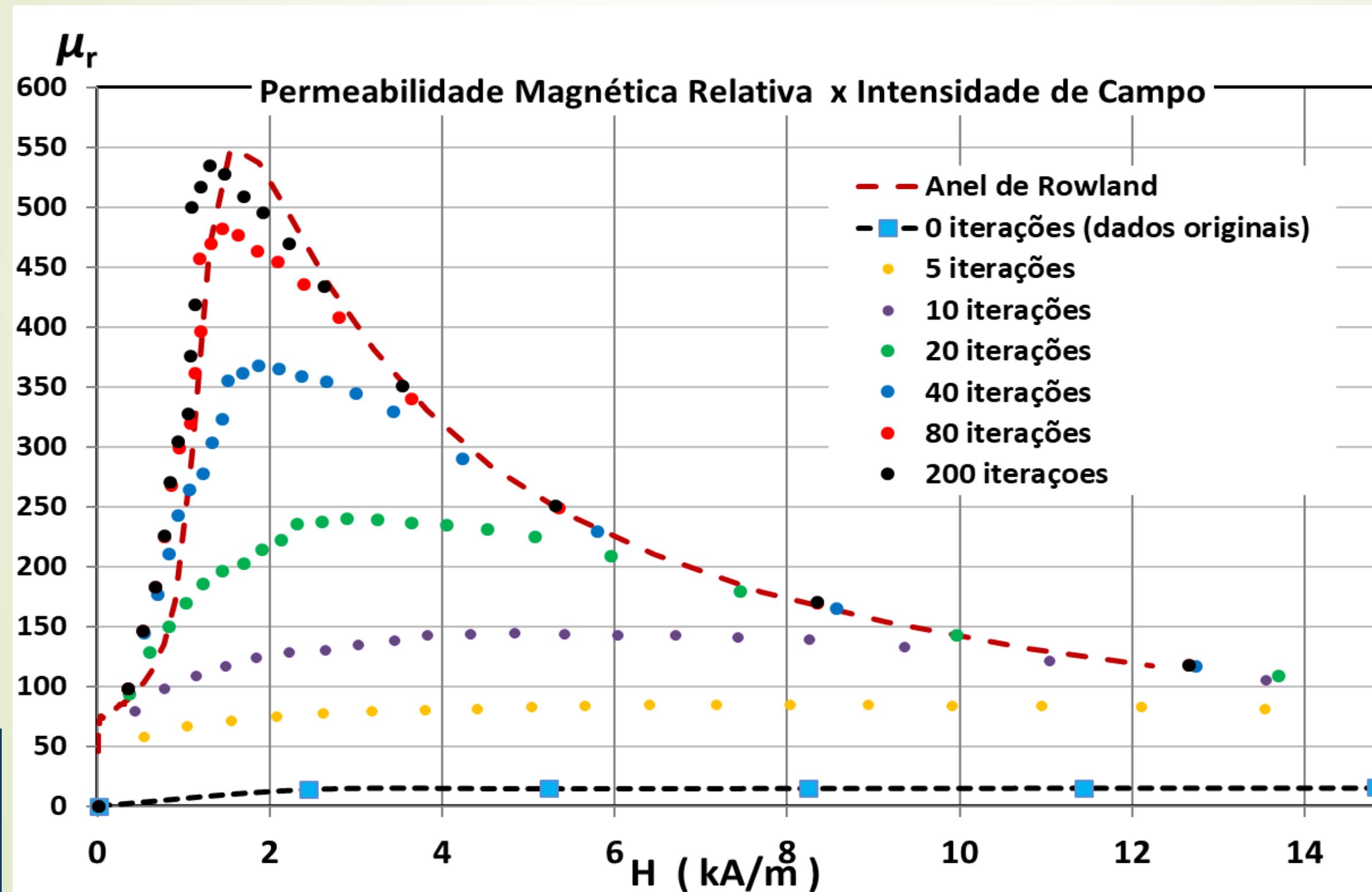
$$B = J + \mu_0 H_{ex}$$

SOLUÇÃO ITERATIVA

$$H_i = H_{ex} \frac{1 + N_d}{1 + N_d \mu_r}$$

1ª iteração: $\mu_r \sim \mu_0 \frac{B}{H_{ex}}$

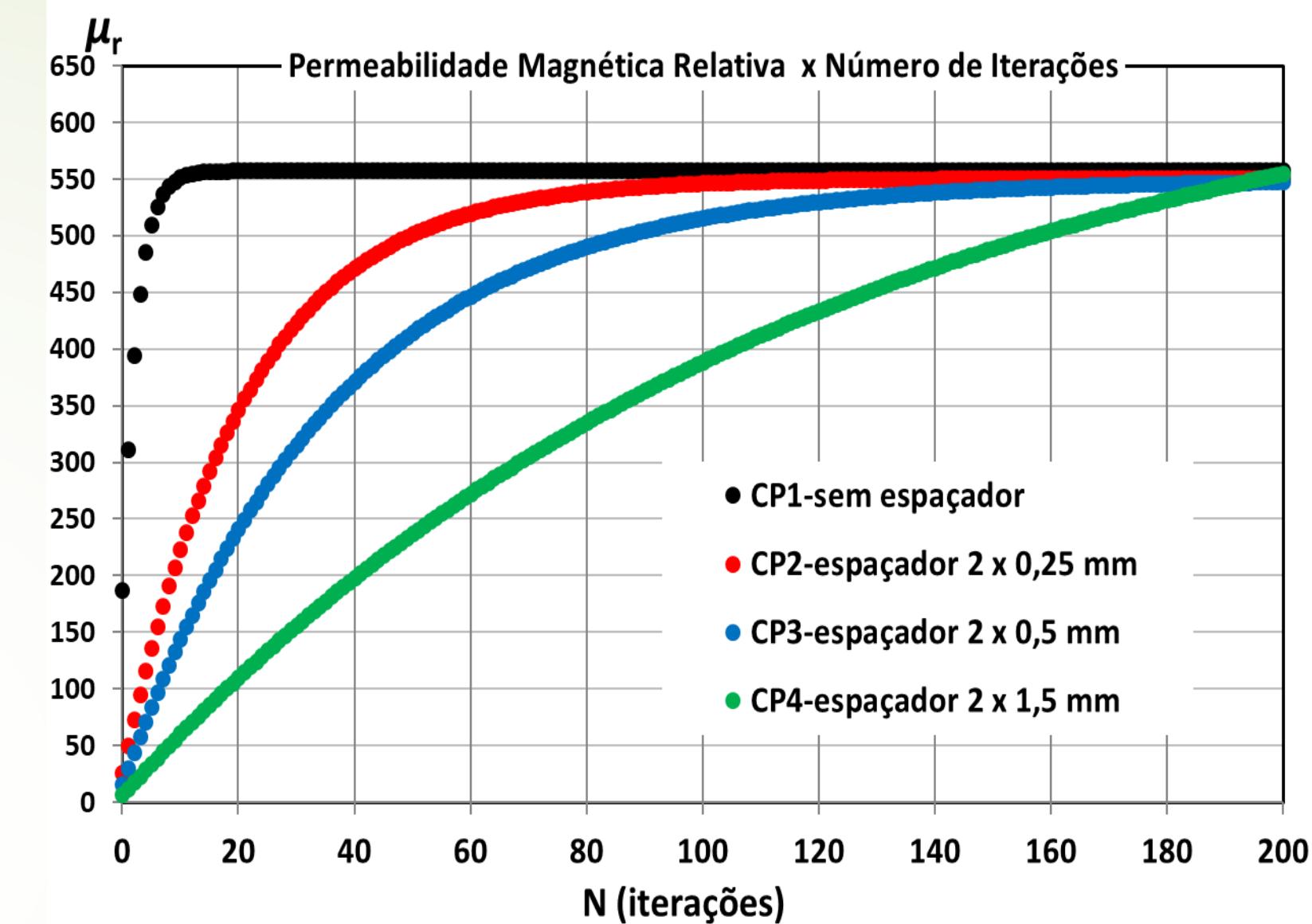
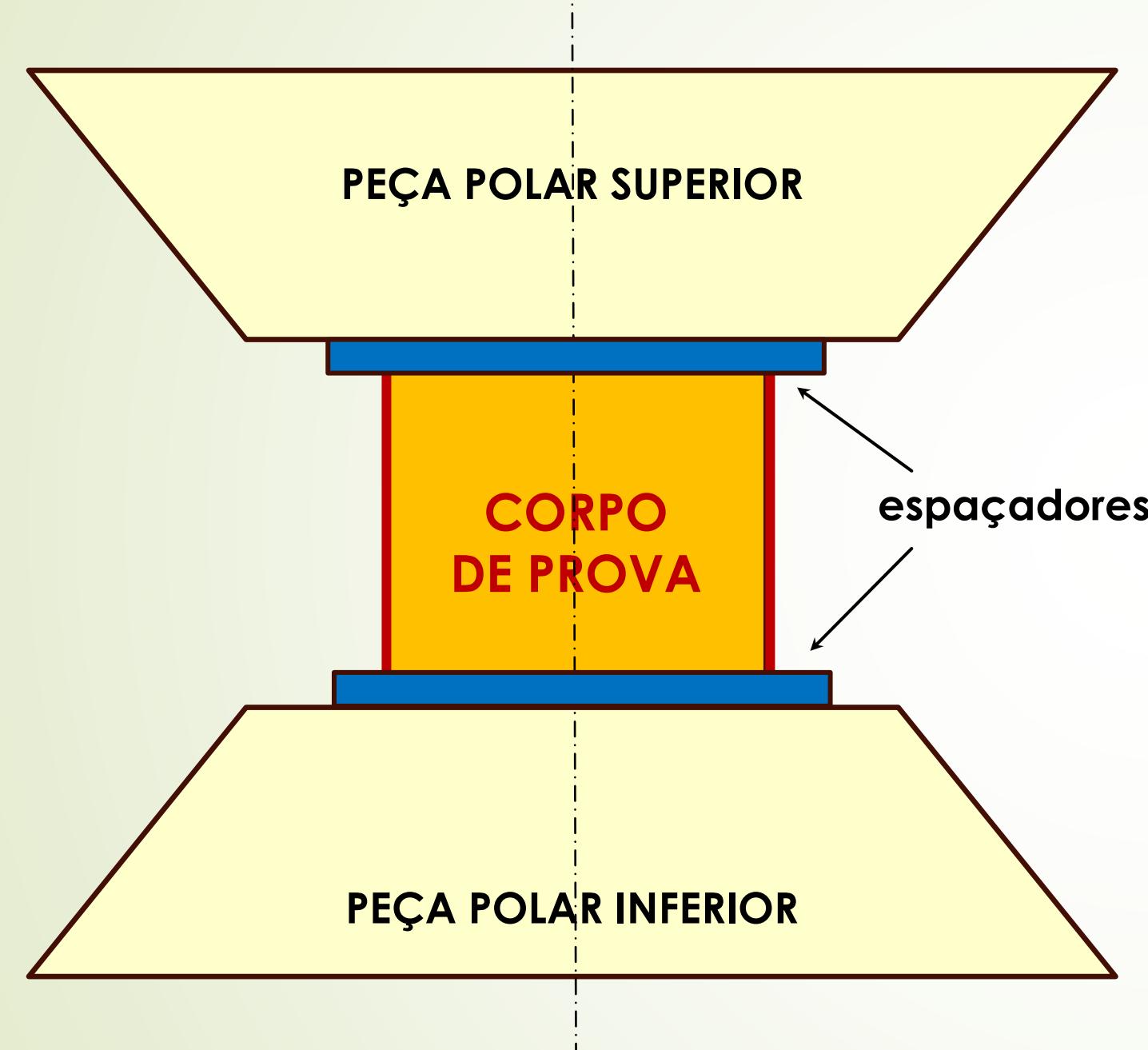
n-ésima iteração: $\mu_{r,n} = \mu_0 \frac{B}{H_{i,n-1}}$



disco de aço:
 $(\varnothing 24 \text{ mm} \times 10 \text{ mm})$
acomodado entre as peças polares do eletroímã com entreferros de 0,5 mm.
Fator de desmagnetização:
 $N_d = 0,0653$

EFEITO DE Nd NA ESTABILIZAÇÃO DAS MEDIDAS

(Entreferros ou gaps criados pelo uso de espaçadores de material não magnético)



sem entreferro: $N_d 1 = 0,00355$

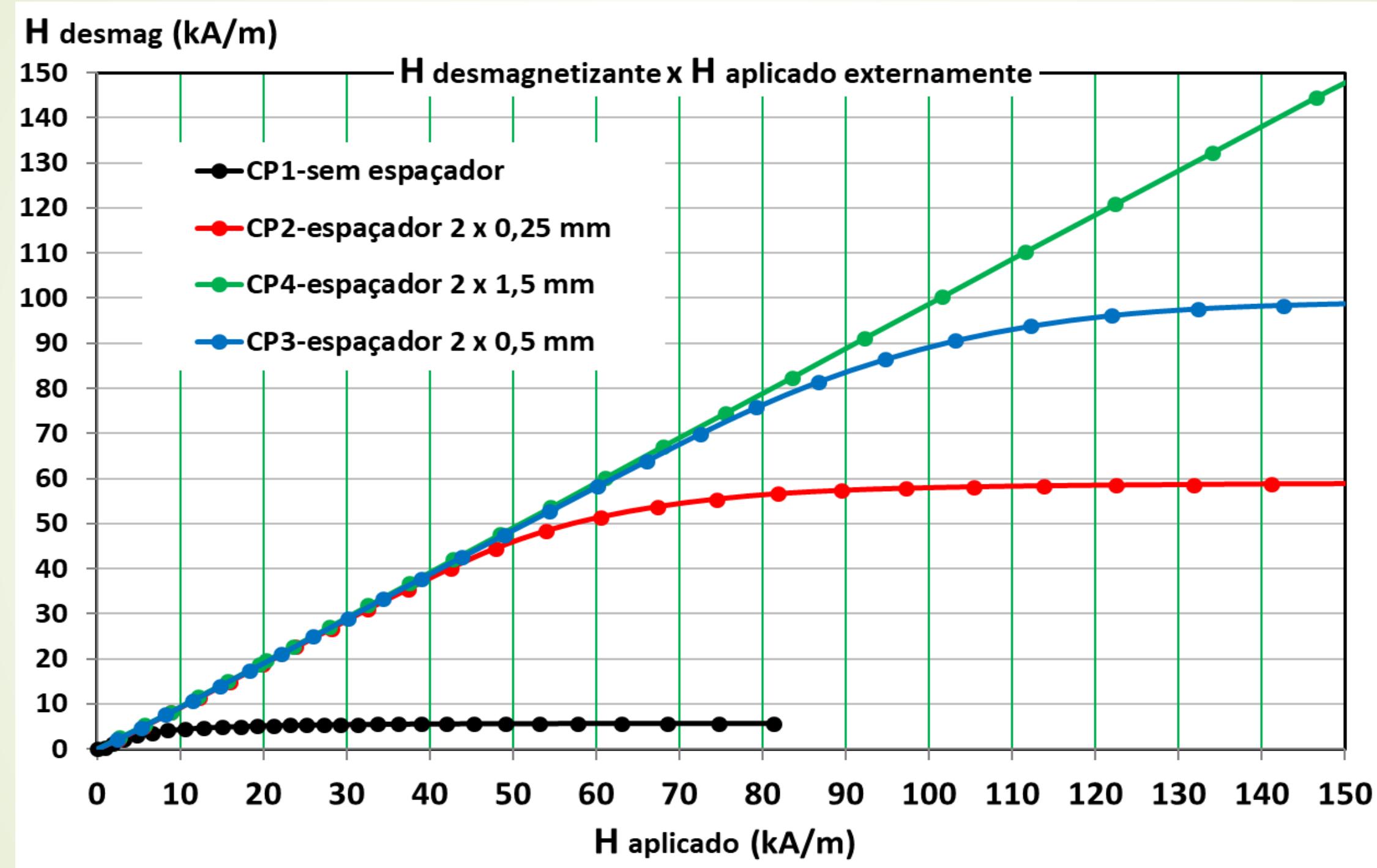
2 x 0,25 mm: $N_d 2 = 0,0376$

2 x 0,5 mm: $N_d 3 = 0,0653$

2 x 1,5 mm: $N_d 4 = 0,175$

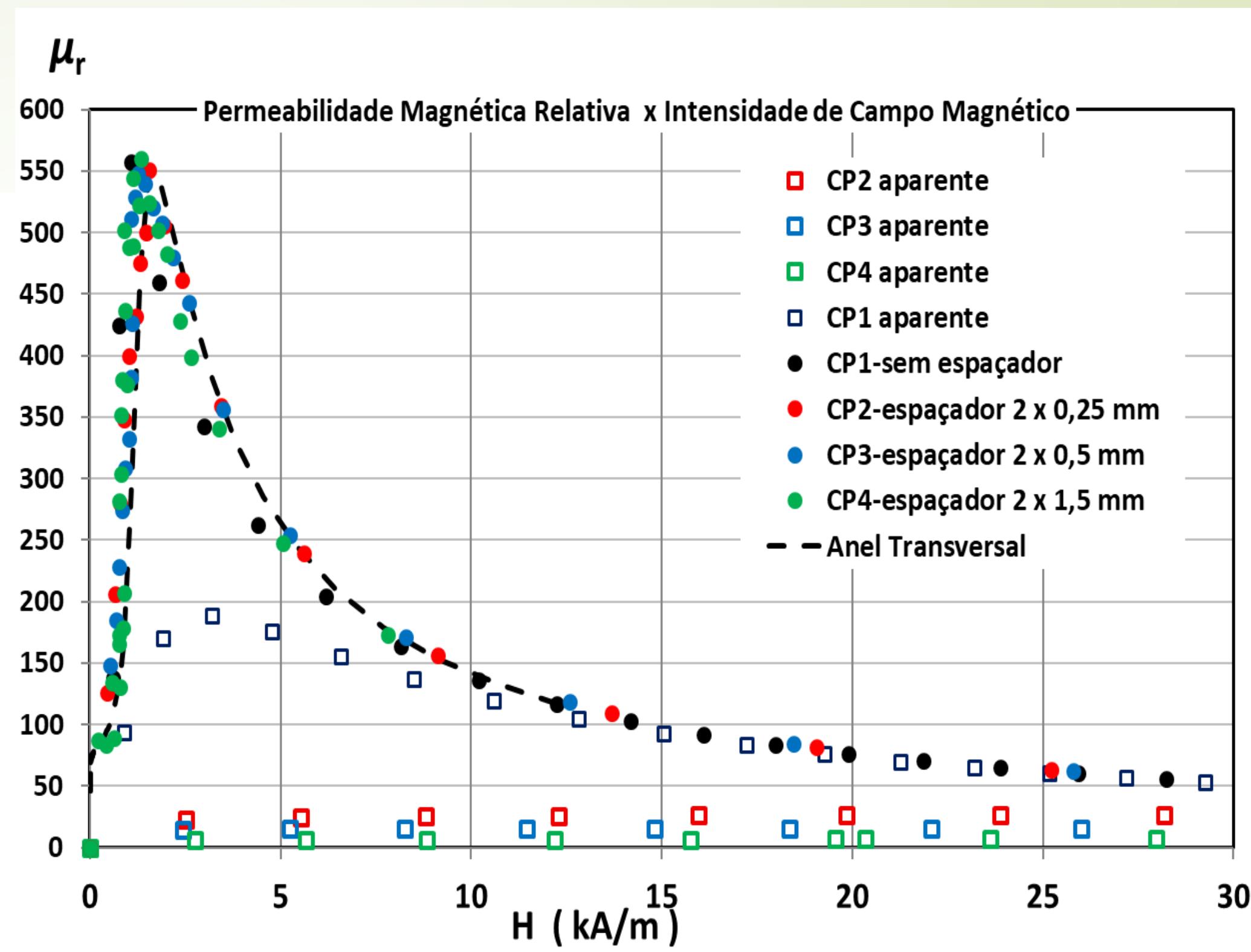
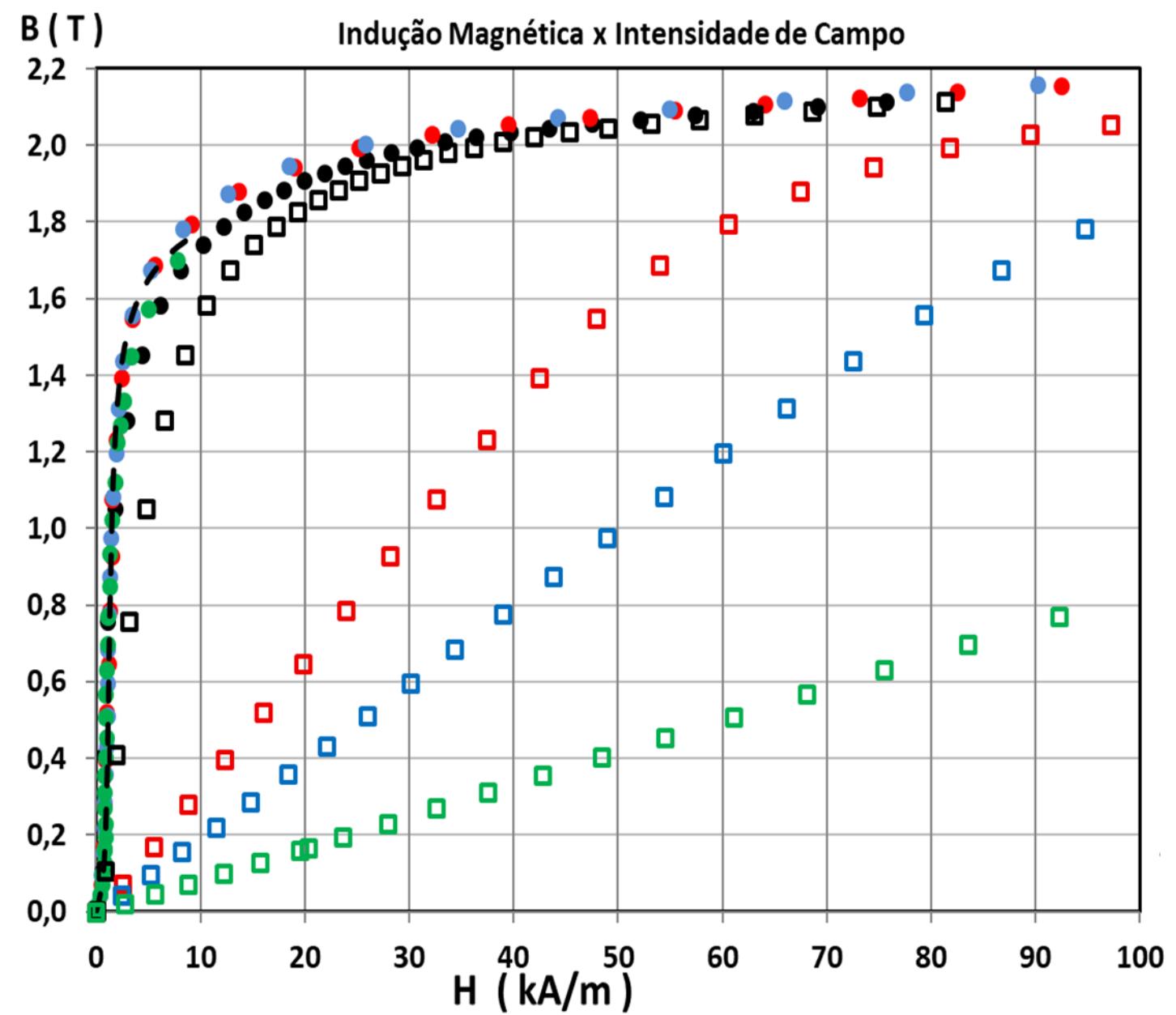
Evolução da permeabilidade relativa máxima:
Tempo de estabilização do sistema é proporcional à N_d

RELAÇÃO ENTRE O CAMPO APLICADO (MEDIDO) E O CAMPO DESMAGNETIZANTE



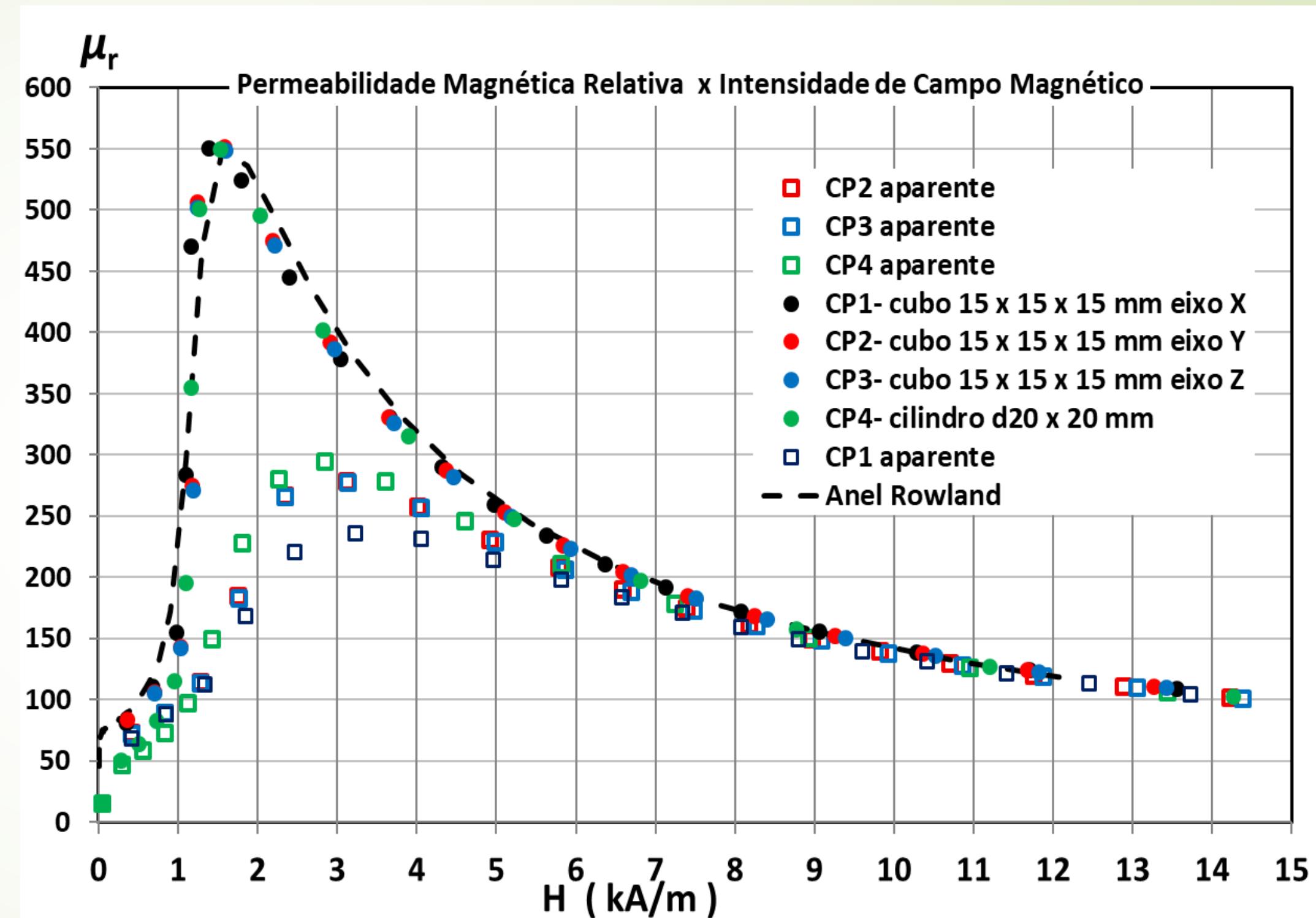
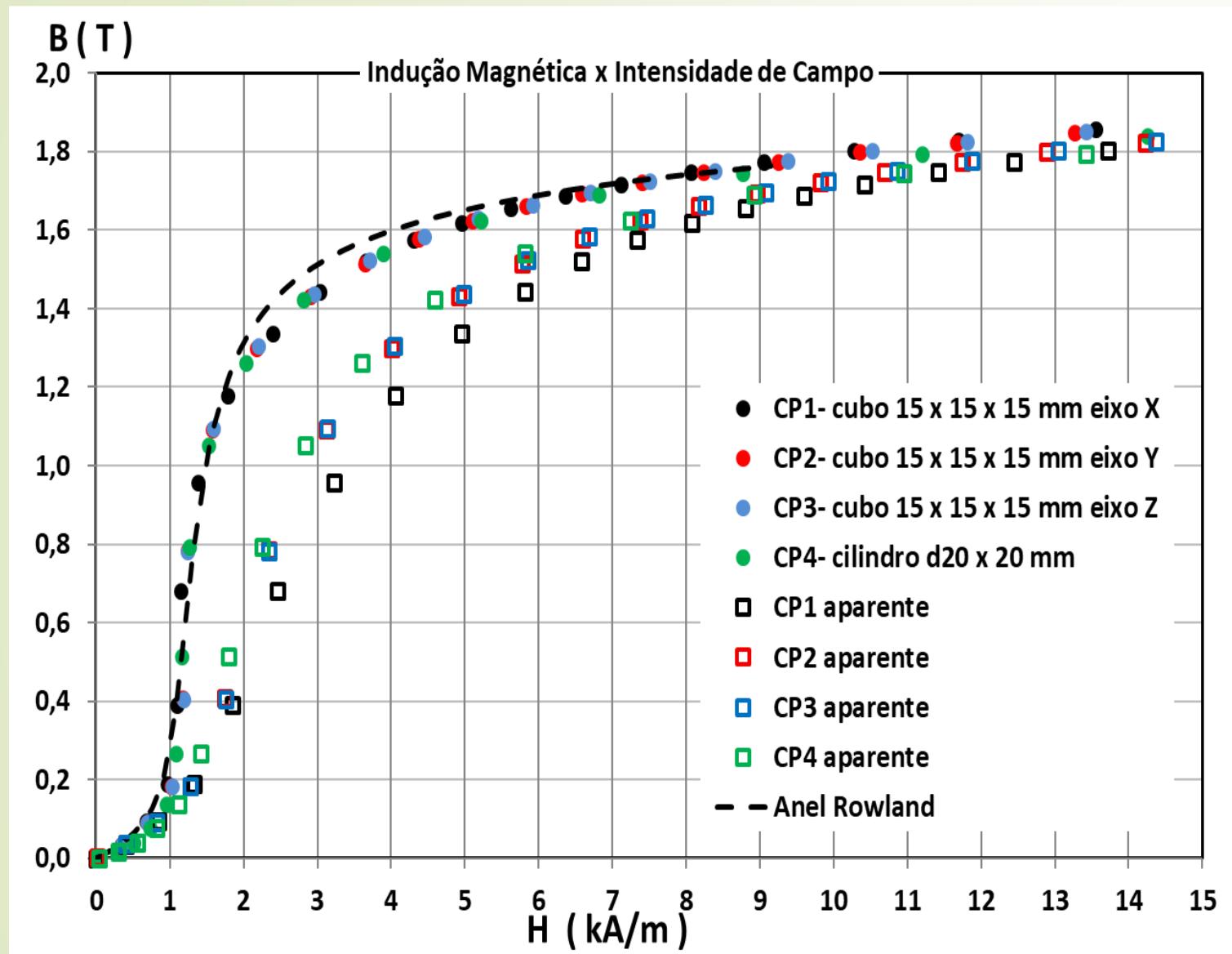
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Efeito de espaçadores



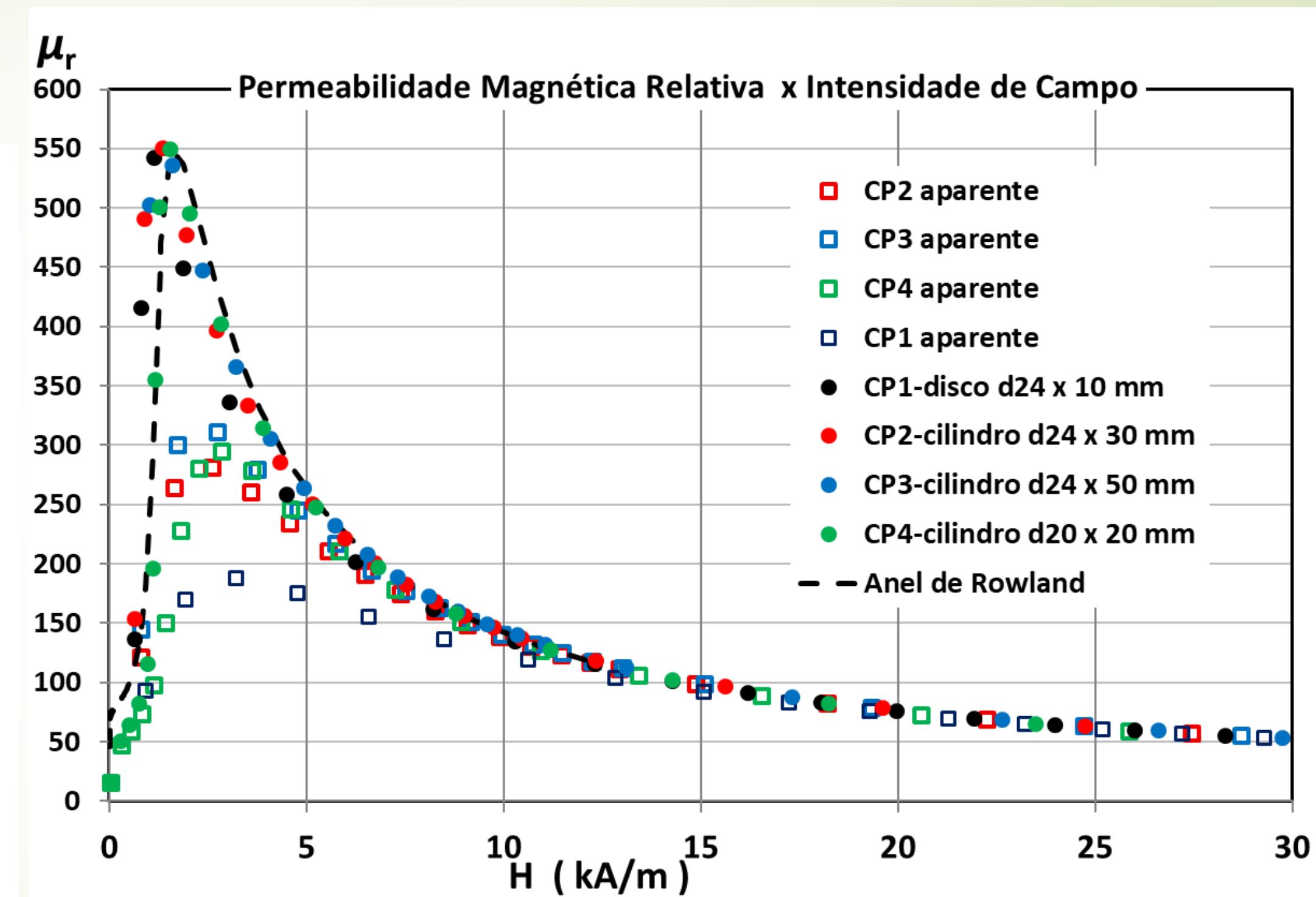
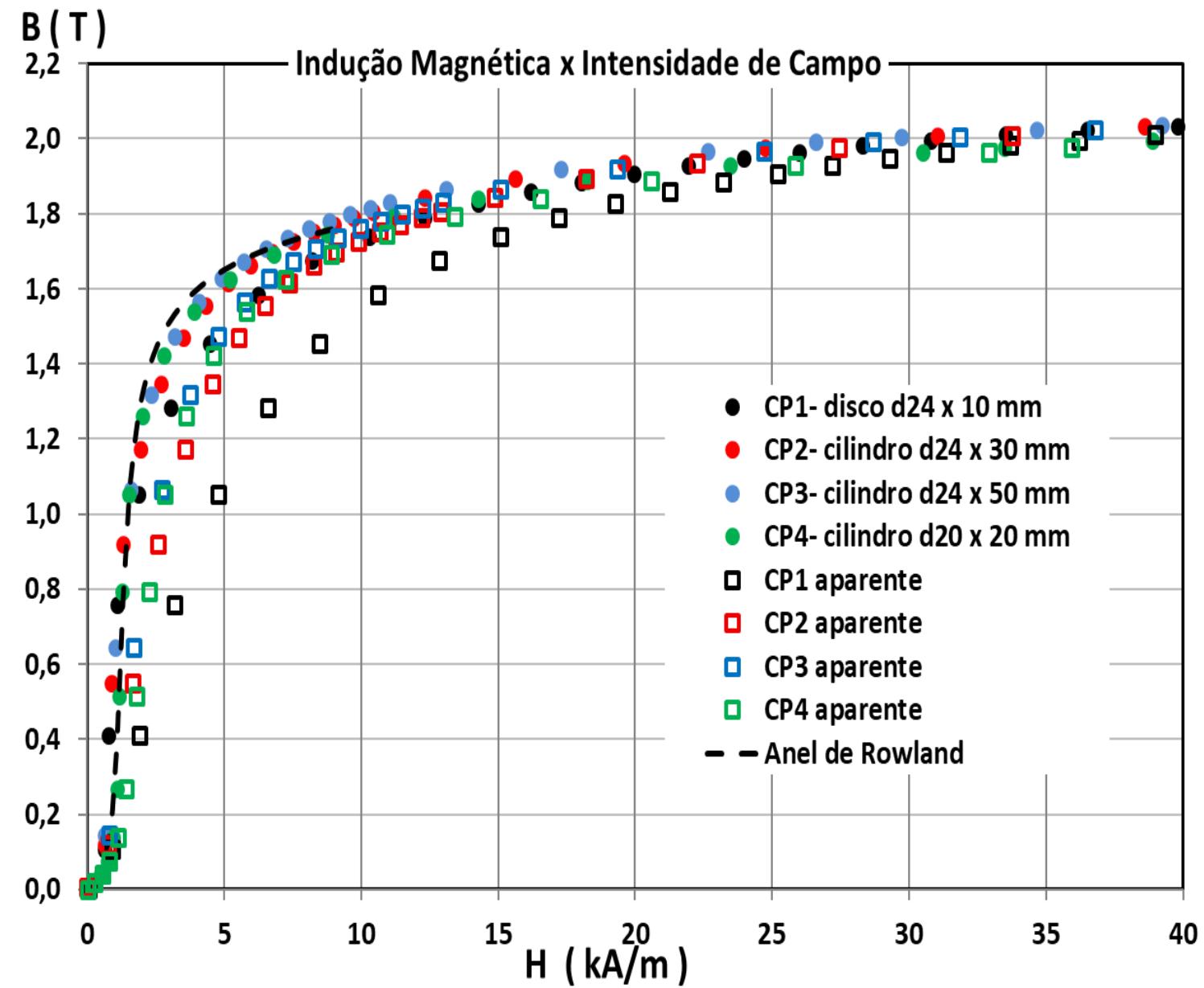
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Efeito de anisotropia



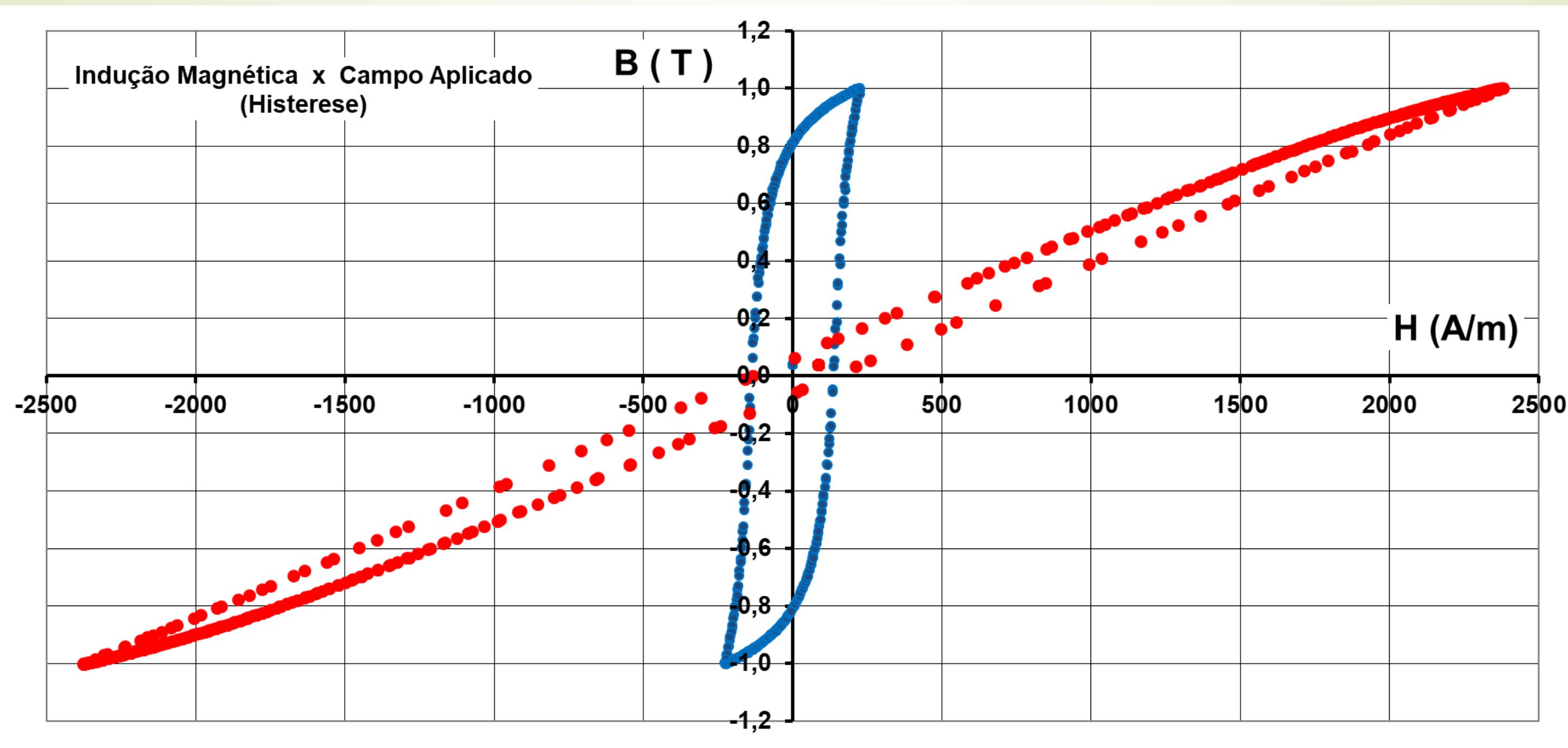
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Efeito da geometria da amostra



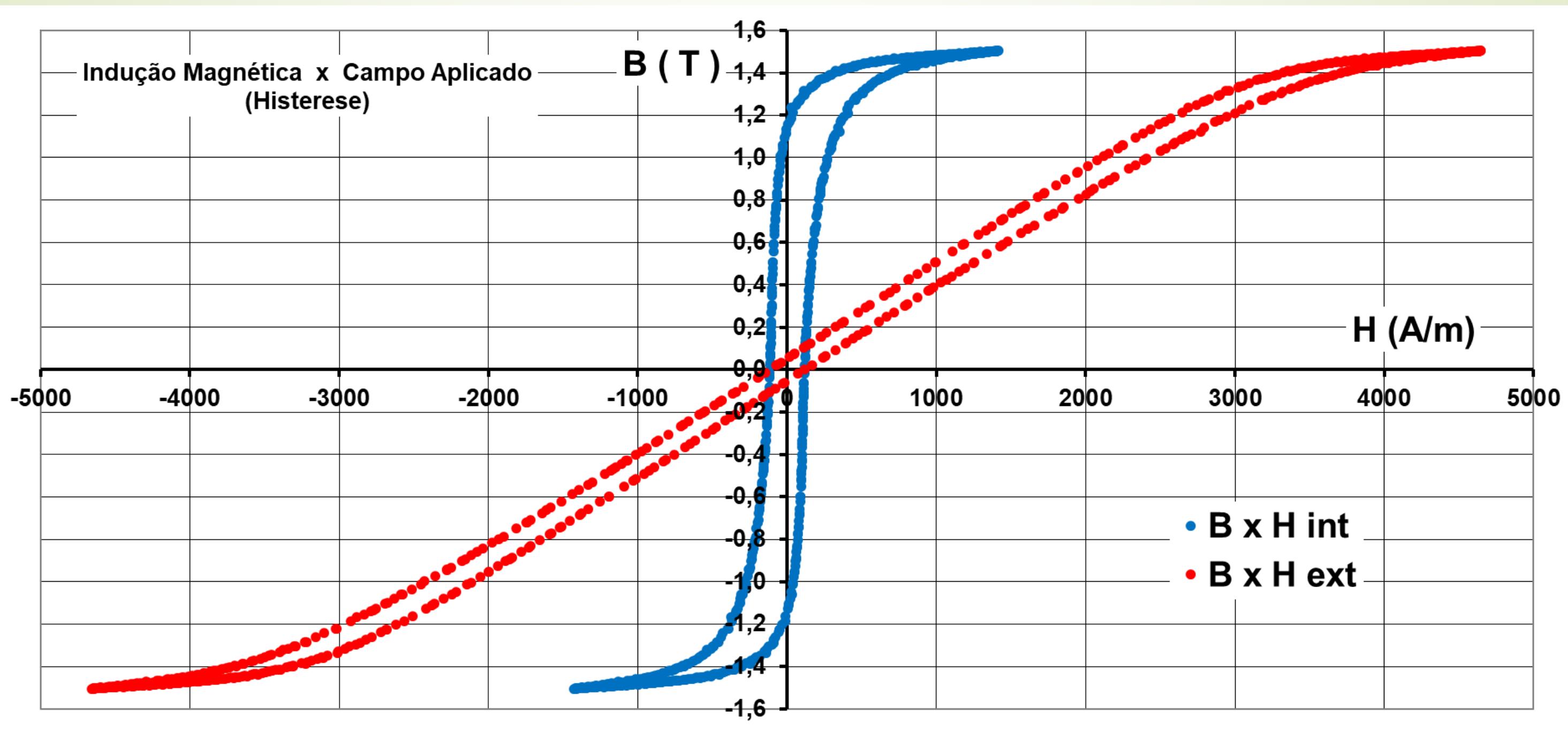
RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Efeito nas figuras de histerese (B máx = 1 T)



RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Efeito nas figuras de histerese (B máx = 1,5 T)



MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO

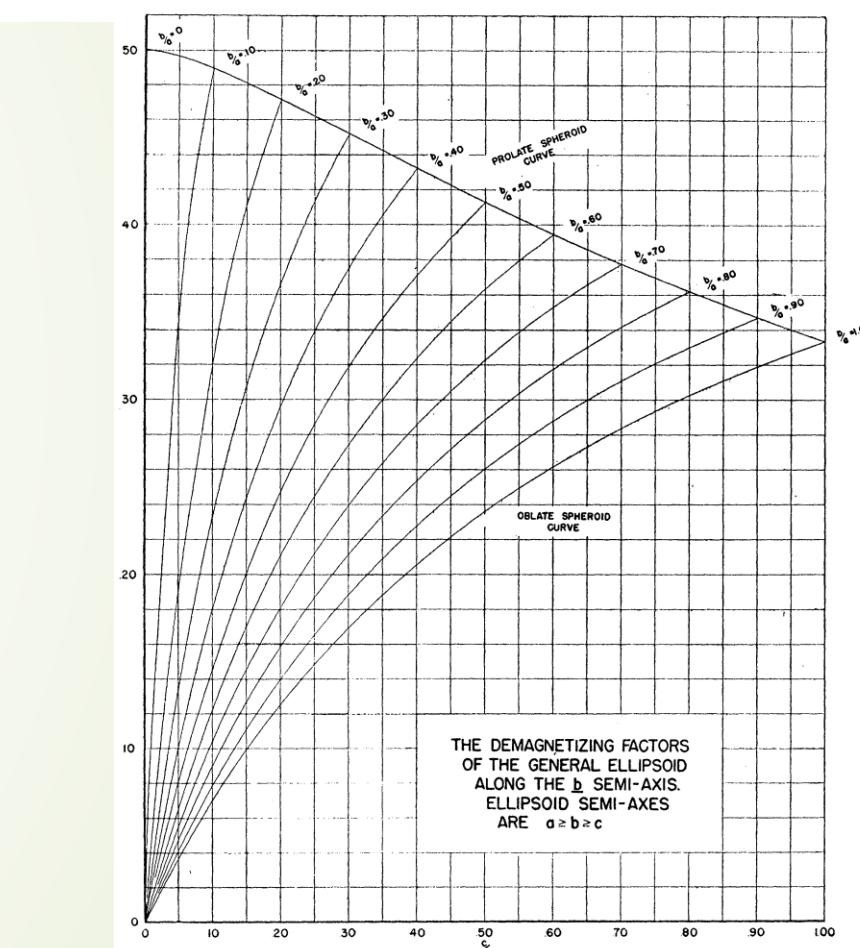
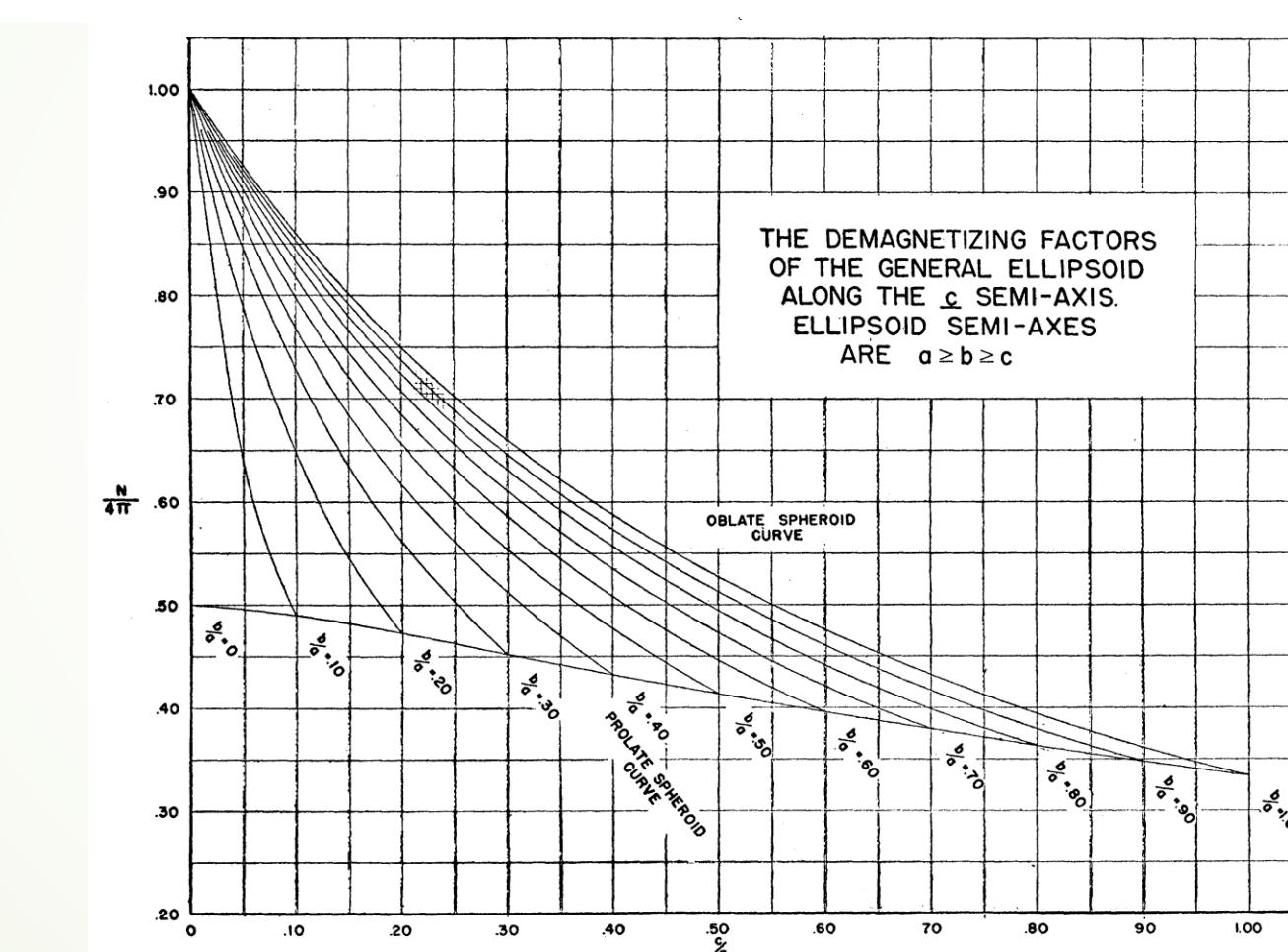
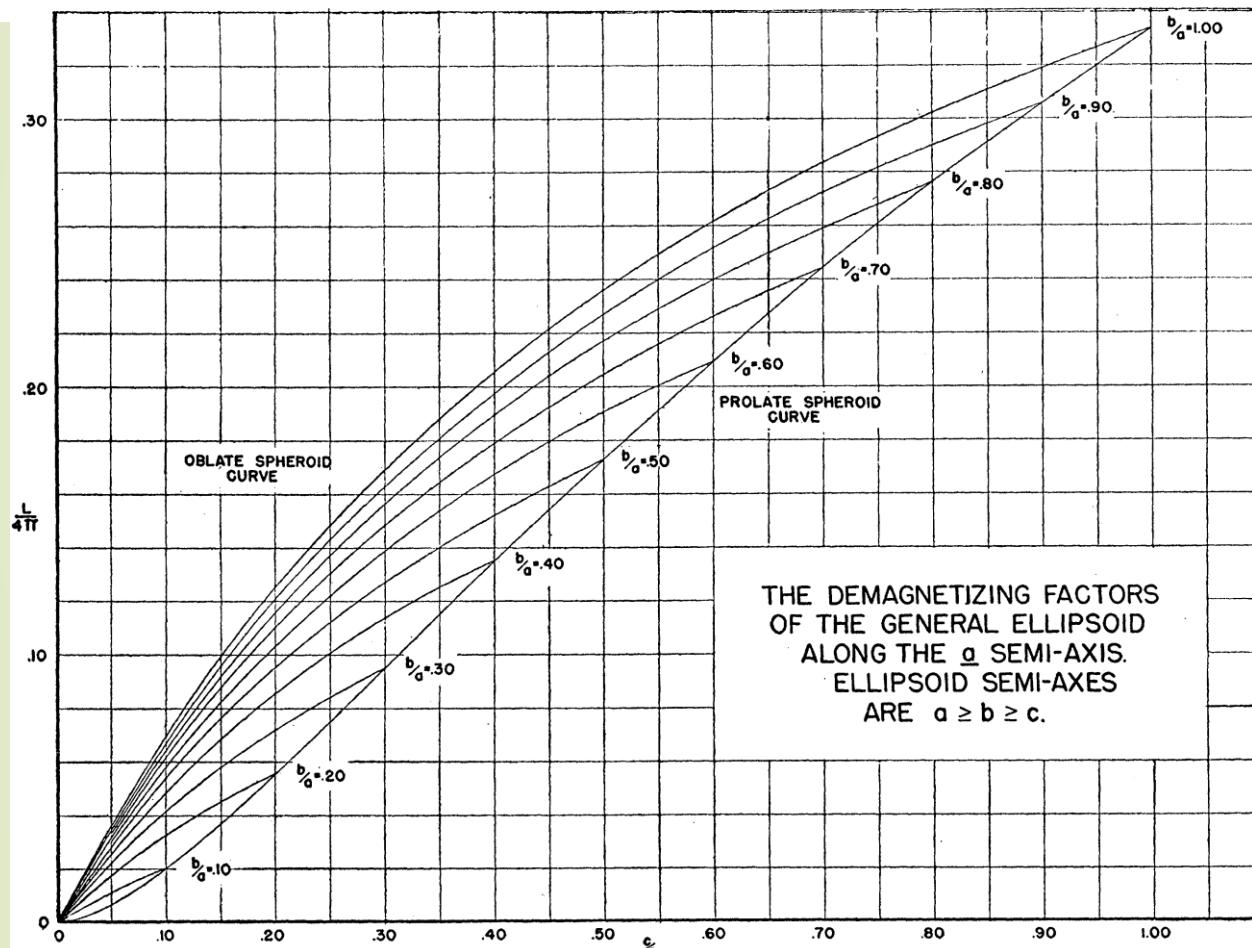
- Comparação direta com os resultados do método de referência (Anel de Rowland) para a mesma família de materiais, geometria dos CPs e equipamento de medição
- Estimativa pela permeabilidade máxima típica do material ou algum ponto notável da curva de magnetização (B_{10} , B_{25}, \dots)
- Simulações numéricas  input de curvas de magnetização
- Solução analítica ?

Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid

J. A. OSBORN

Naval Ordnance Laboratory, Washington, D. C.

(Received March 24, 1945)

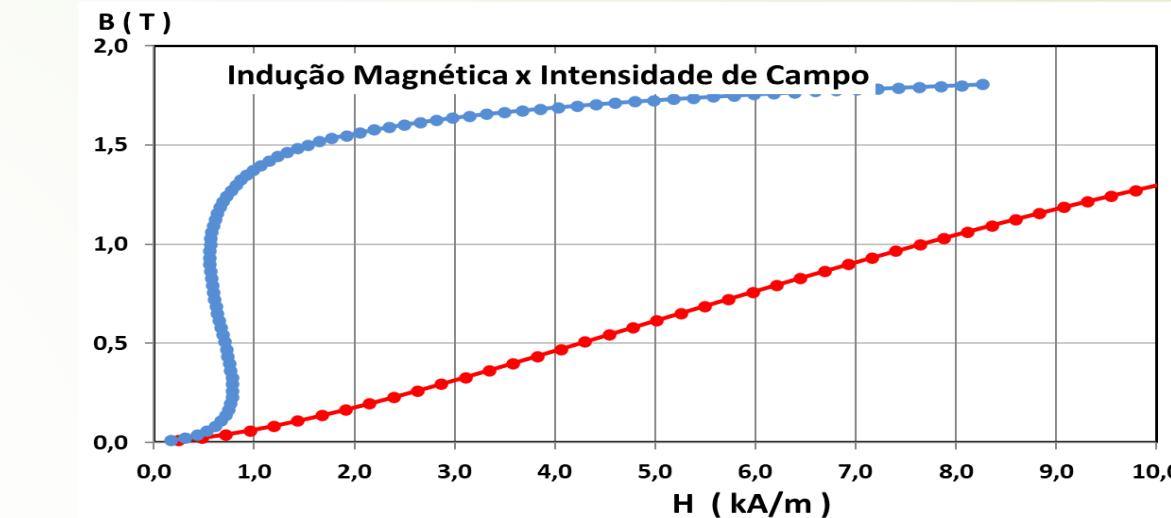
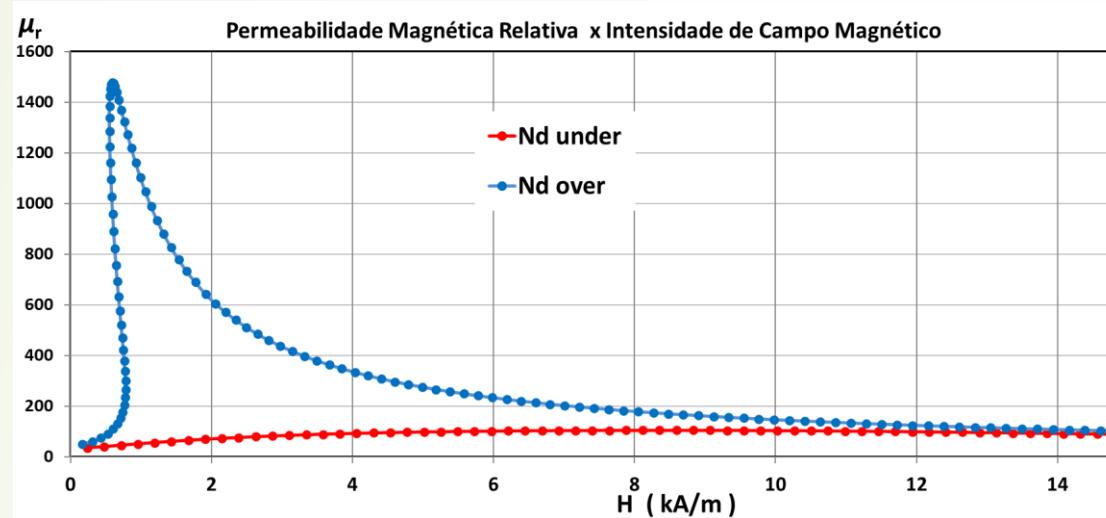


Solução analítica apenas corpos de prova com geometrias aproximadas por elipsoides e bobinas de excitação com núcleo de ar

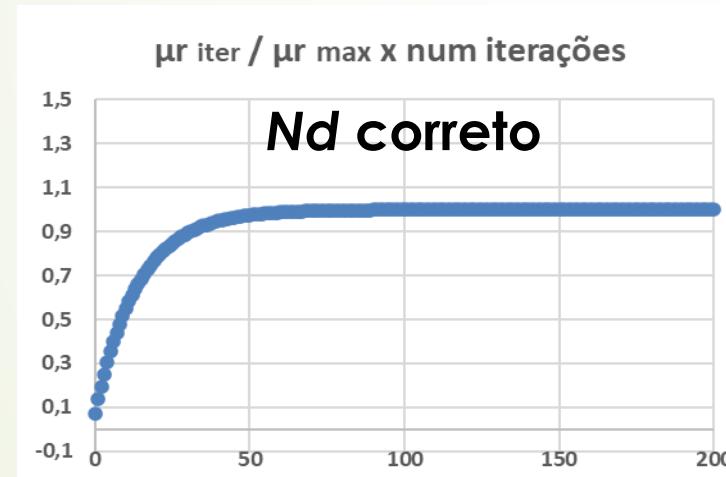
FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO EM “TESTE CEGO”

- Estimativa pela minimização do campo desmagnetizante (máximo Nd possível) e convergência do processo iterativo:

Nd superestimado →



Convergência →



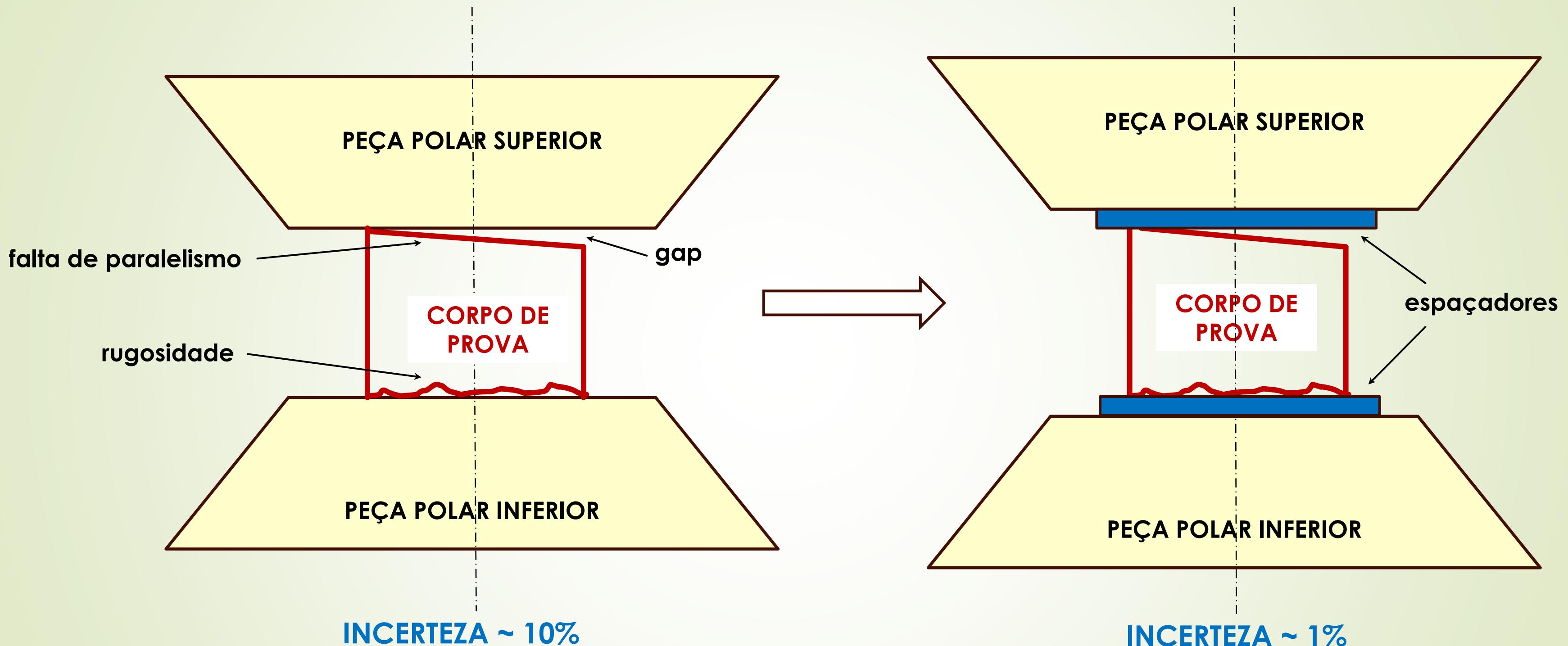
Refinamento →

Estimativa pela minimização da energia envolvida na magnetização
(em desenvolvimento...)

COMENTÁRIOS FINAIS

- **Necessidade de normalização de forma, dimensões e gaps no novo ensaio**
- **Definição de fatores de desmagnetização para corpos de prova padronizados**
- **Validação do método para ensaios e materiais ferromagnéticos diversos**
- **Estudo de possibilidade de procedimento para determinar Nd pela minimização de energia envolvida na magnetização**
- **Melhorias no arranjo experimental**

REDUÇÃO DA DISPERSÃO DOS RESULTADOS COM USO DE ESPAÇADORES



CONCLUSÕES

- Novo ensaio de caracterização magnética estática permite obter mais facilmente resultados similares àqueles obtidos com o método padrão (anel de Rowland)
- Possibilidade de utilização de corpos de prova em diversas geometrias
- Compatibilização dos resultados de ensaios diversos através de correções nas medidas do intensidade do campo magnético de excitação
- Fator de desmagnetização Nd como parâmetro único para a realização das correções
- Possibilidades diversas para estabelecer o valor de Nd



AGRADECEMOS SUA PRESENÇA !