

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 REPRODUÇÃO**



# **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](http://www.metrologia2025.org.br)



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

**Ramon Valls Martin**

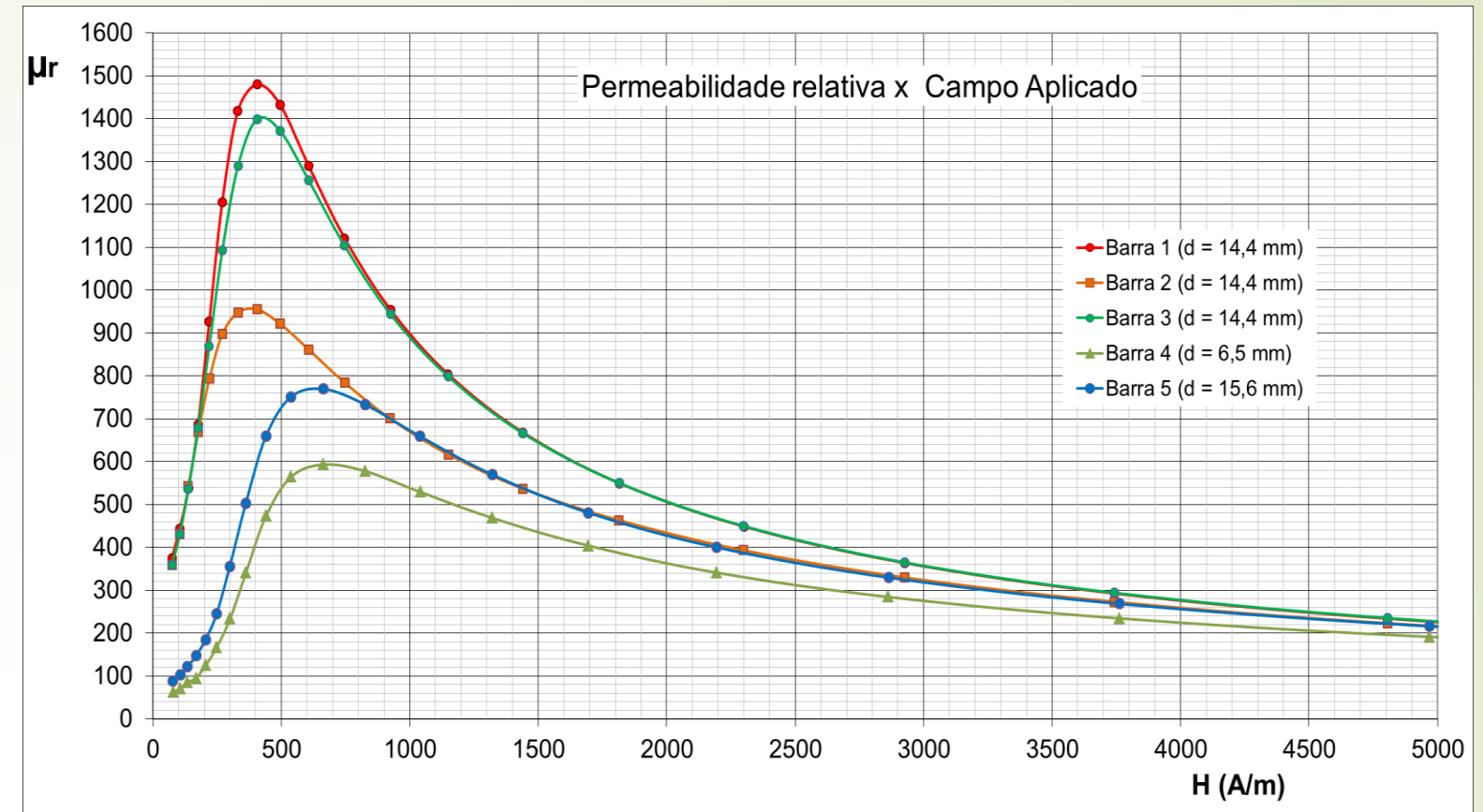
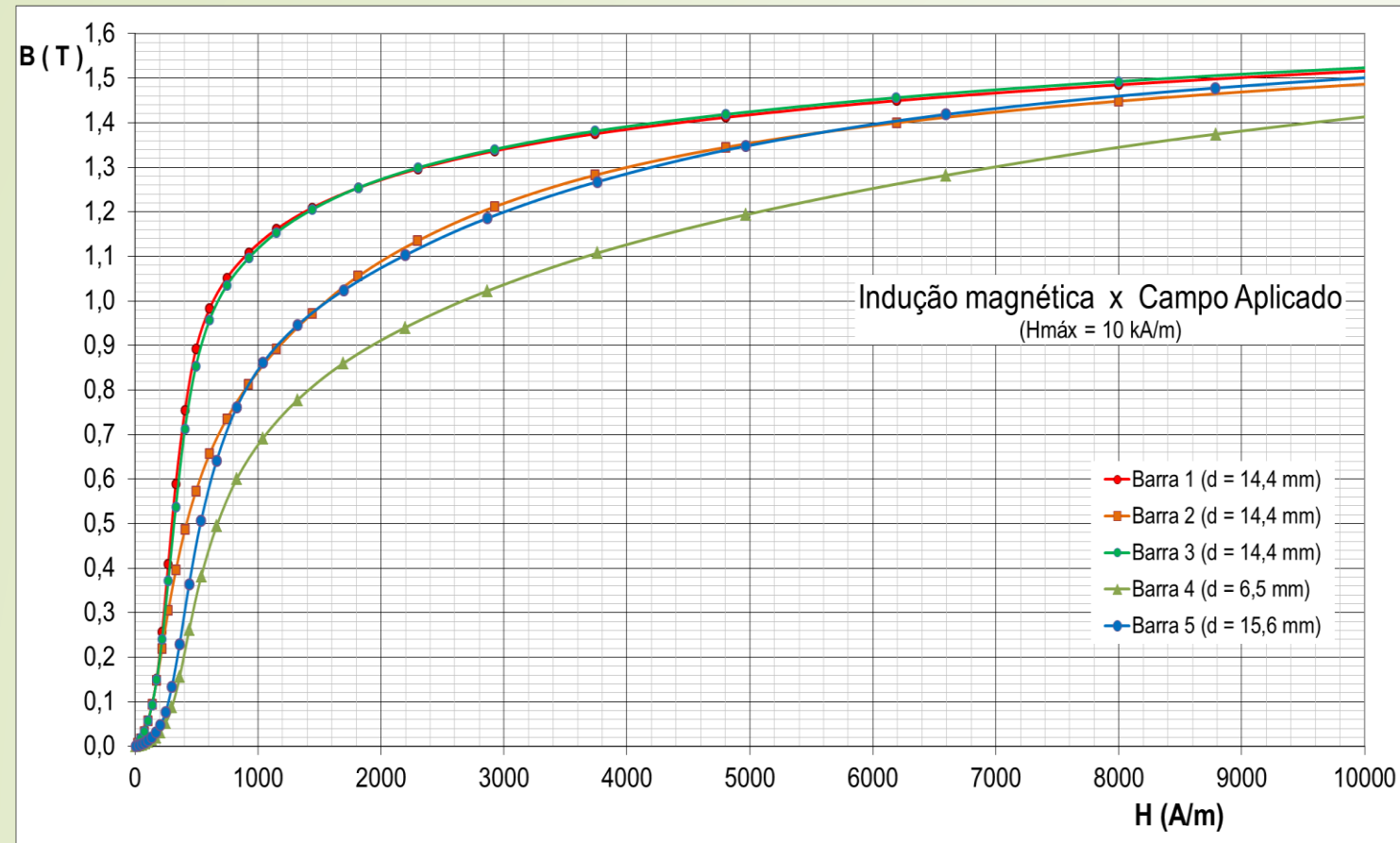
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo -IPT

# MATERIAIS MAGNÉTICOS IMPACTAM DIRETAMENTE A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE GRANDES MÁQUINAS ELÉTRICAS

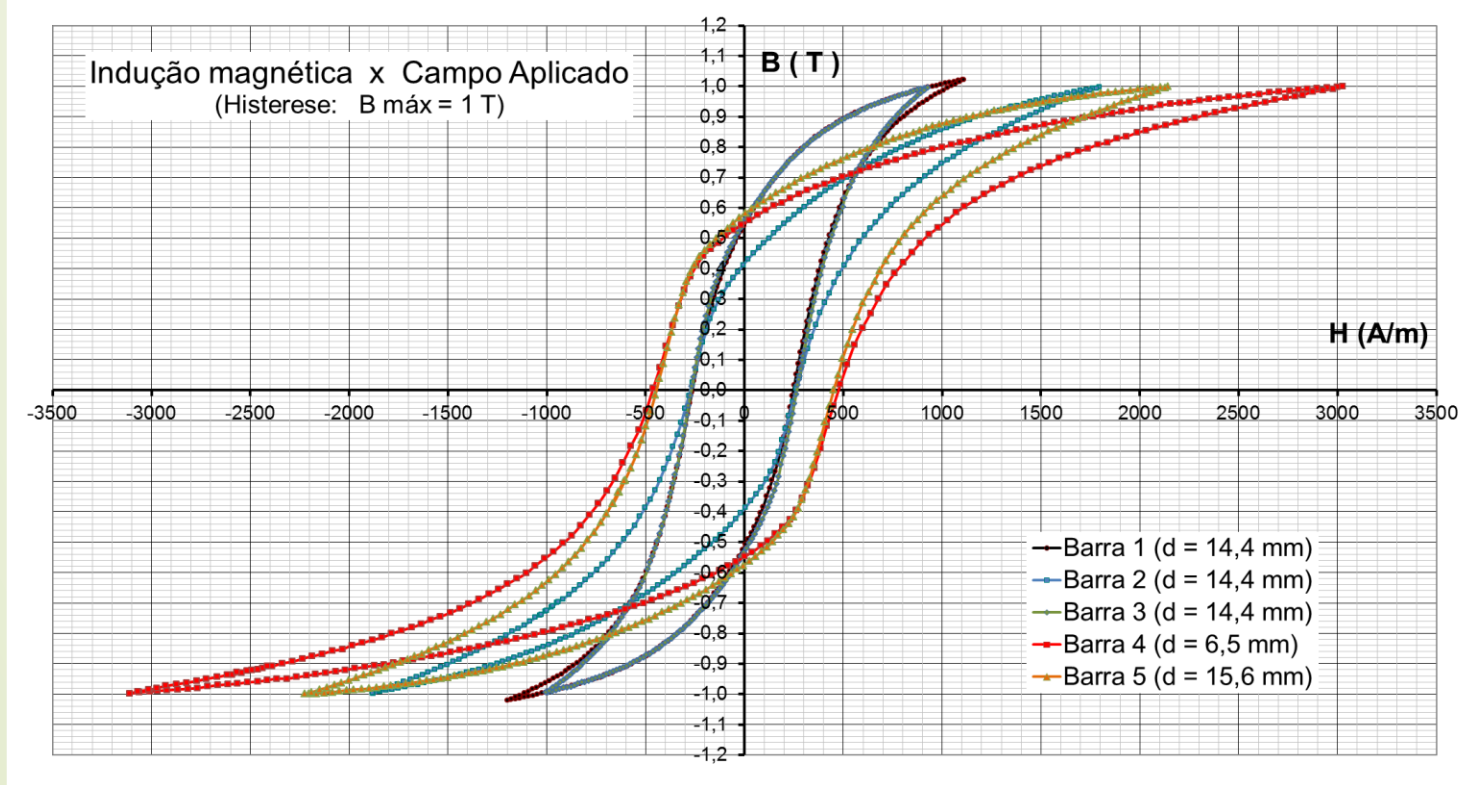


Rotor de hidrogerador da Usina Hidrelétrica Teles Pires, localizada entre os estados de Mato Grosso e Pará.

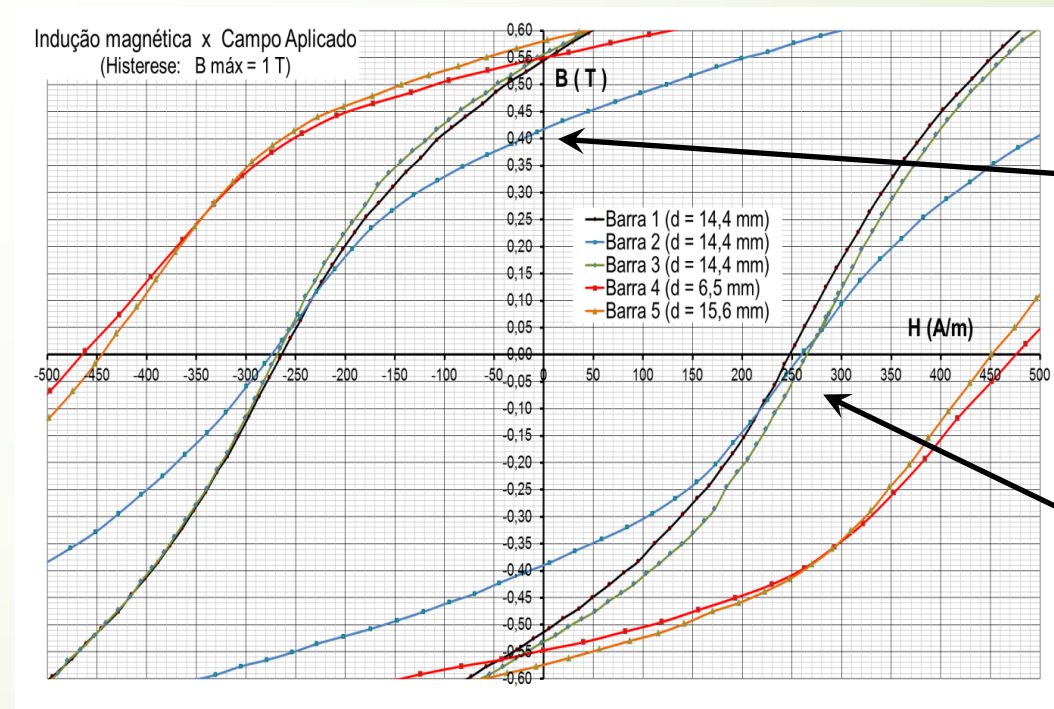
# CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA ESTÁTICA DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS (AÇO)



## MAGNETIZAÇÃO INICIAL ( $B \times H$ )



## PERMEABILIDADE RELATIVA ( $\mu_r \times H$ )



## HISTERESE QUASE-ESTÁTICA ( $B \times H$ )

# FORMATO DOS CORPOS DE PROVA



HASTES  
AGULHAS  
TARUGOS  
CHAPAS  
FIOS  
PÓS

.  
. .  
. .

# ANEL DE ROWLAND COMO PADRÃO DE REFERÊNCIA

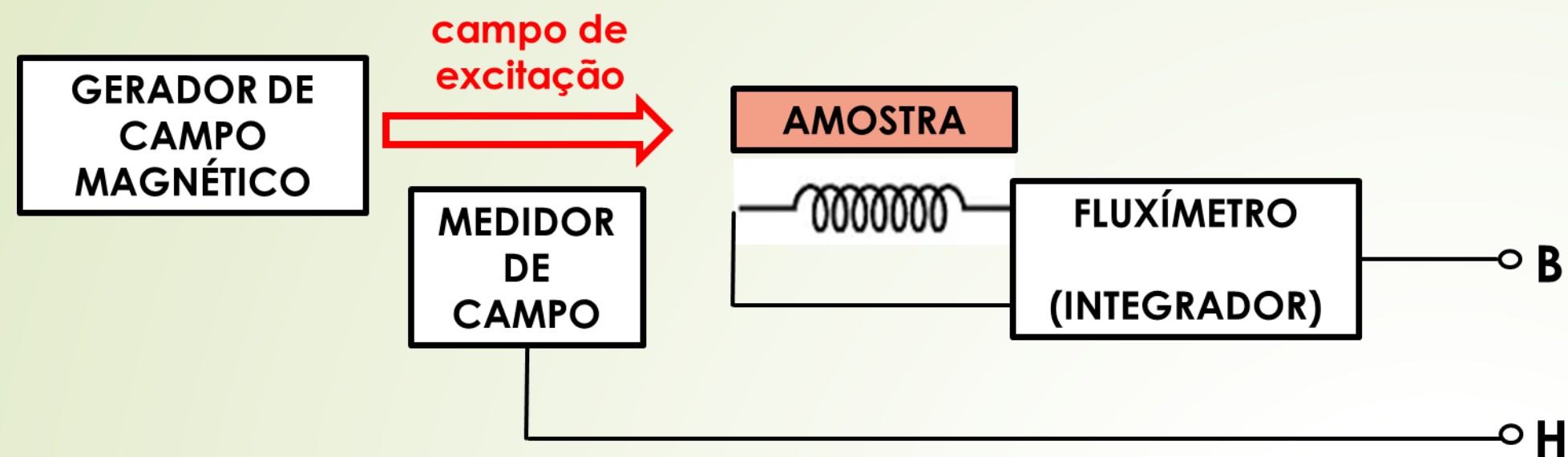
## PRÓS

- 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

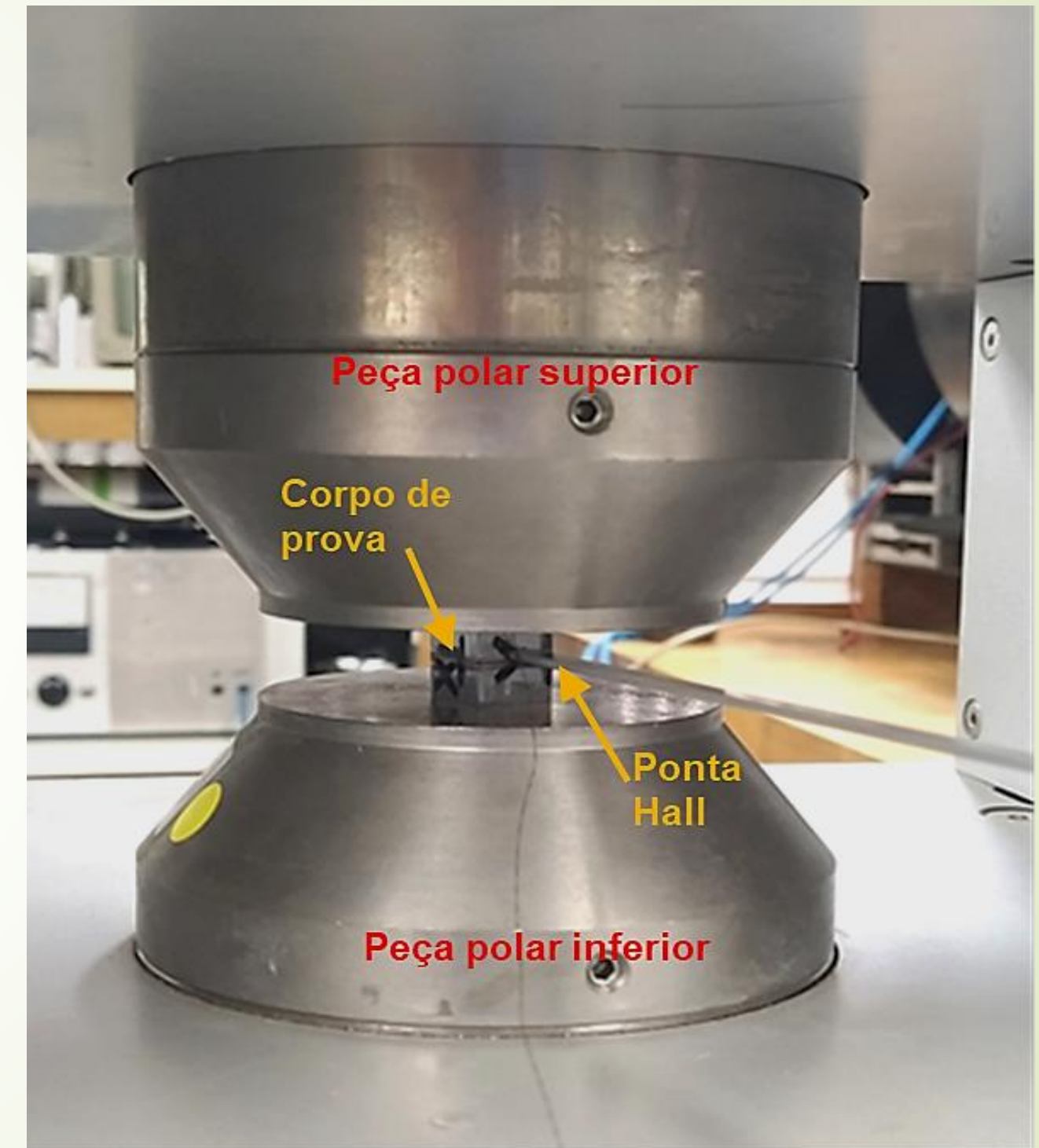
- Campo máximo de excitação bem limitado ( $H < 10 \text{ kA/m}$ )
- Perda da informação da anisotropia
- Corpo de prova de difícil extração das peças (eixos, peças polares,...)
- Ensaio muito demorado e custoso, pois exige a bobinagem dos enrolamentos primário e secundário diretamente sobre a amostra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

# MÉTODOS DE ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA



## MÉTODO NÃO NORMALIZADO

### “PERMEÂMETRO” COM ELETROÍMÃ

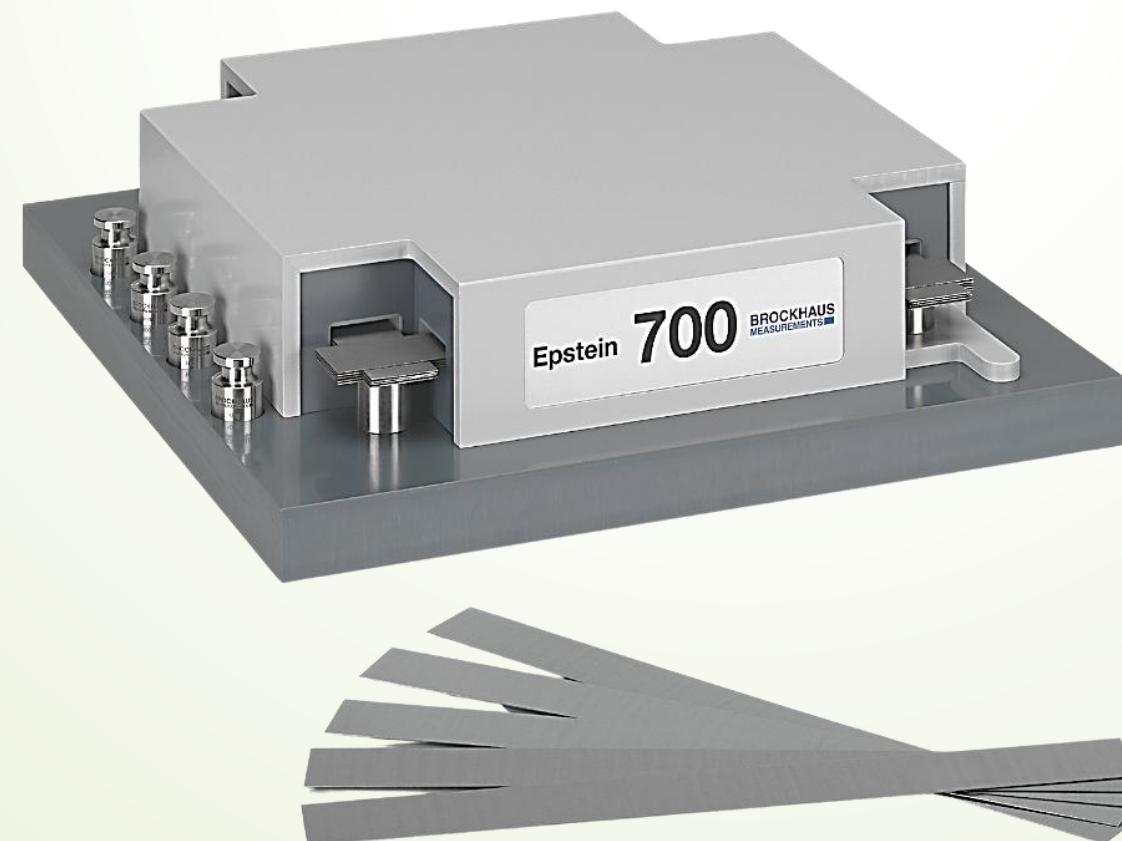


## MÉTODOS NORMALIZADOS (centenários!)

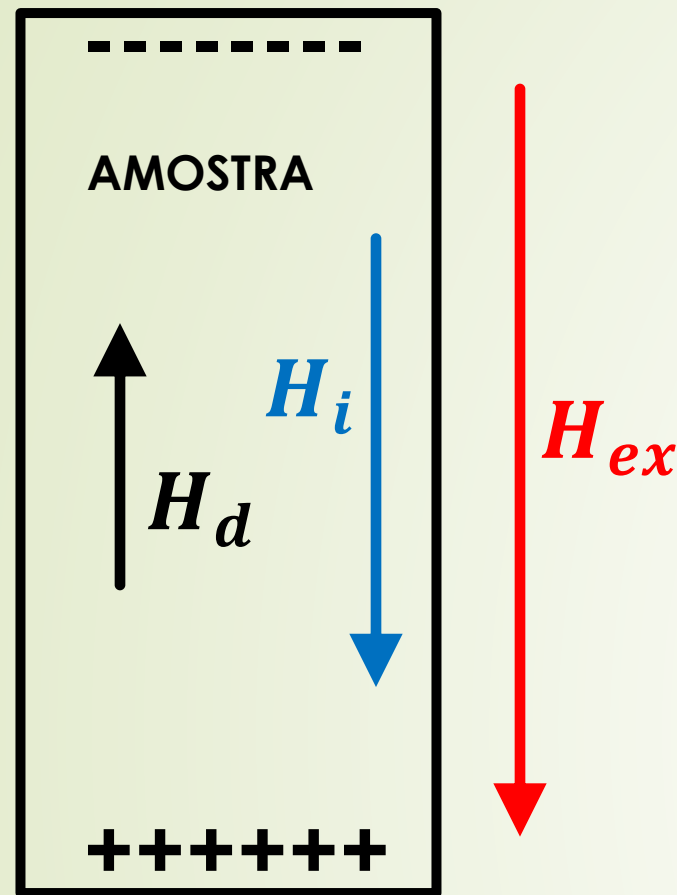
### ANEL DE ROWLAND



### QUADRO DE EPSTEIN



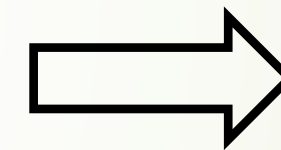
# CAMPO DESMAGNETIZANTE ( $H_d$ ) e FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO ( $N_d$ )



$H_d$  - campo de desmagnetização

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

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



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

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

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

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

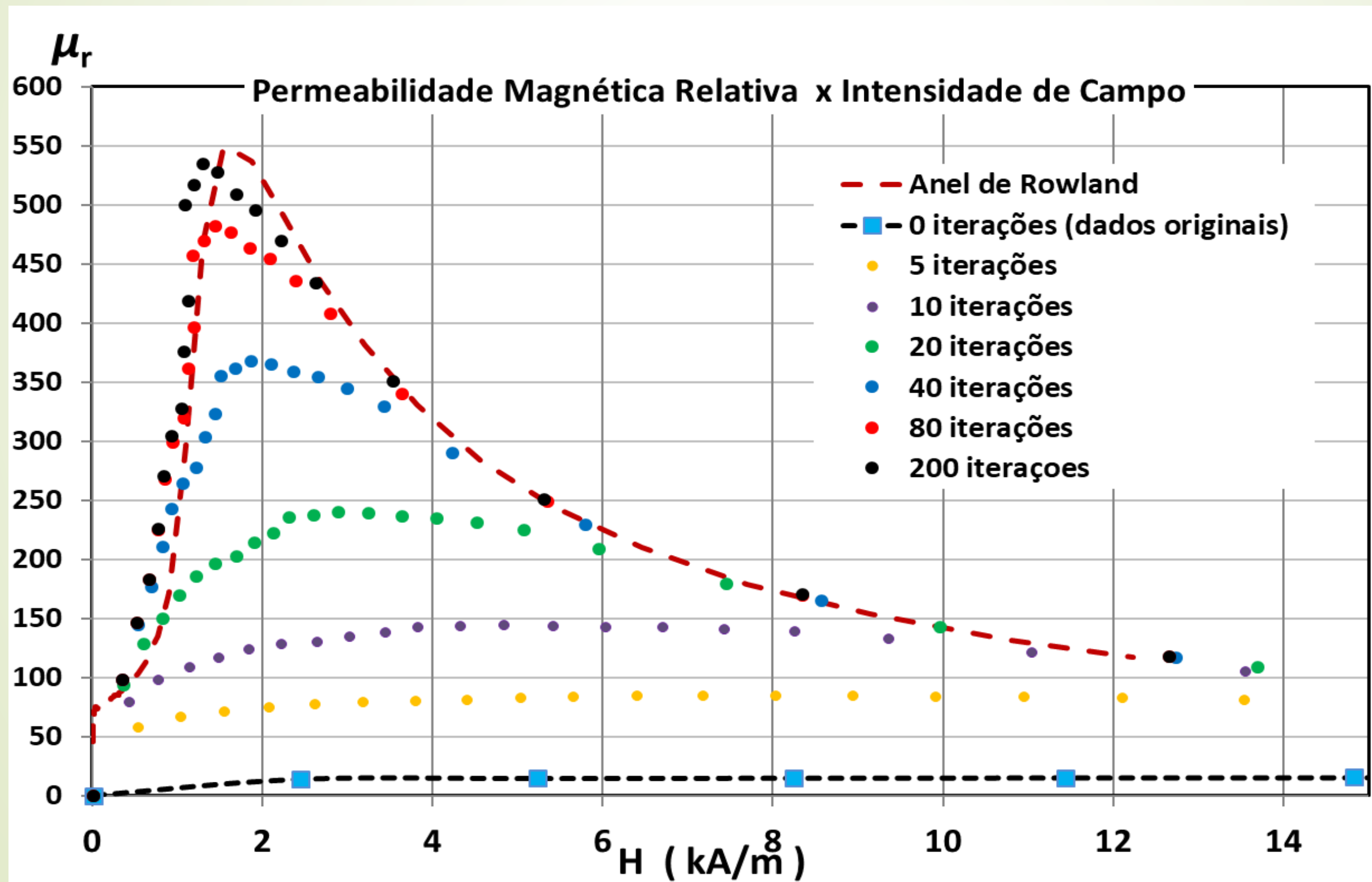
$$1 > N_d > 0$$

# SOLUÇÃO ITERATIVA

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

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

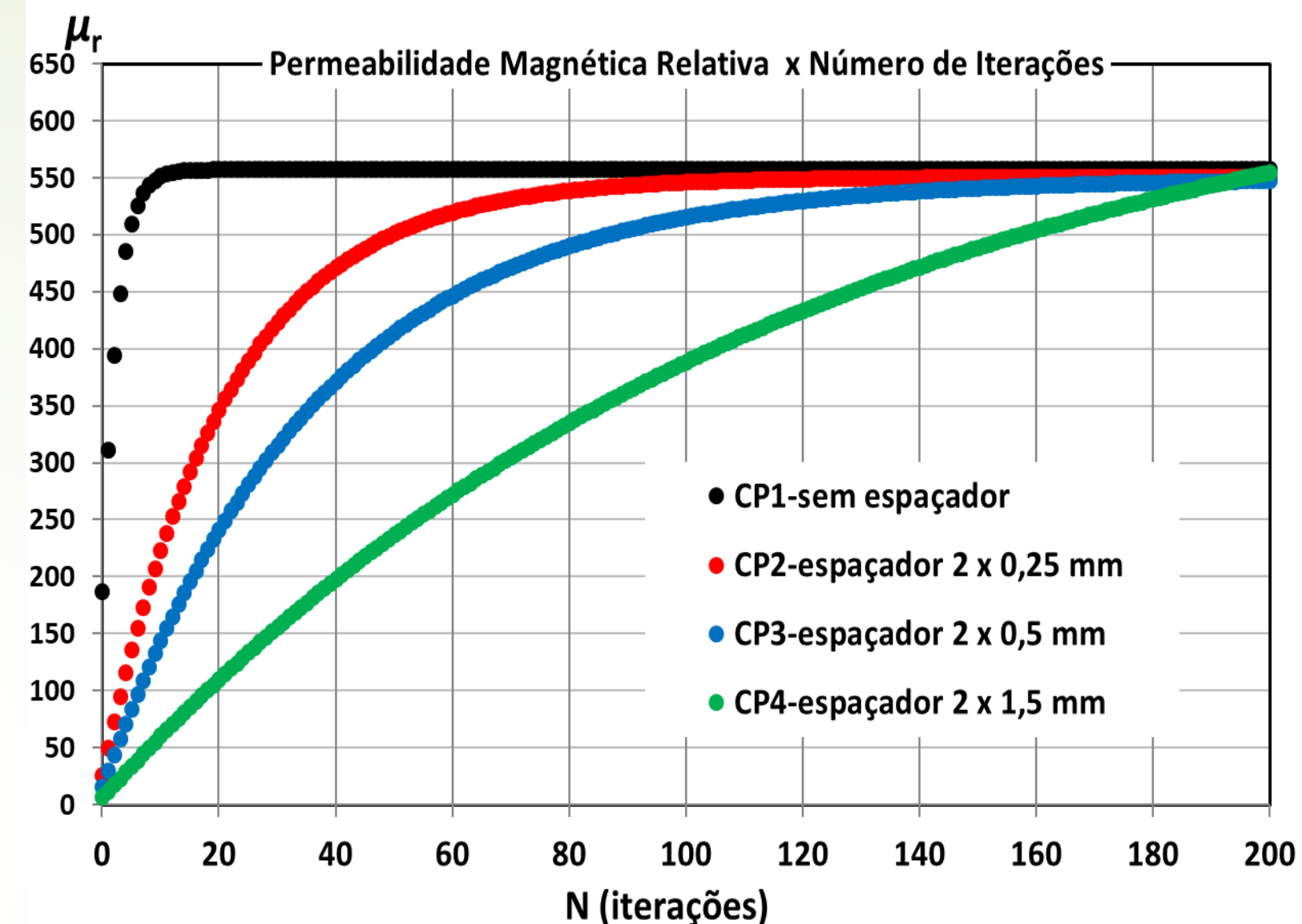
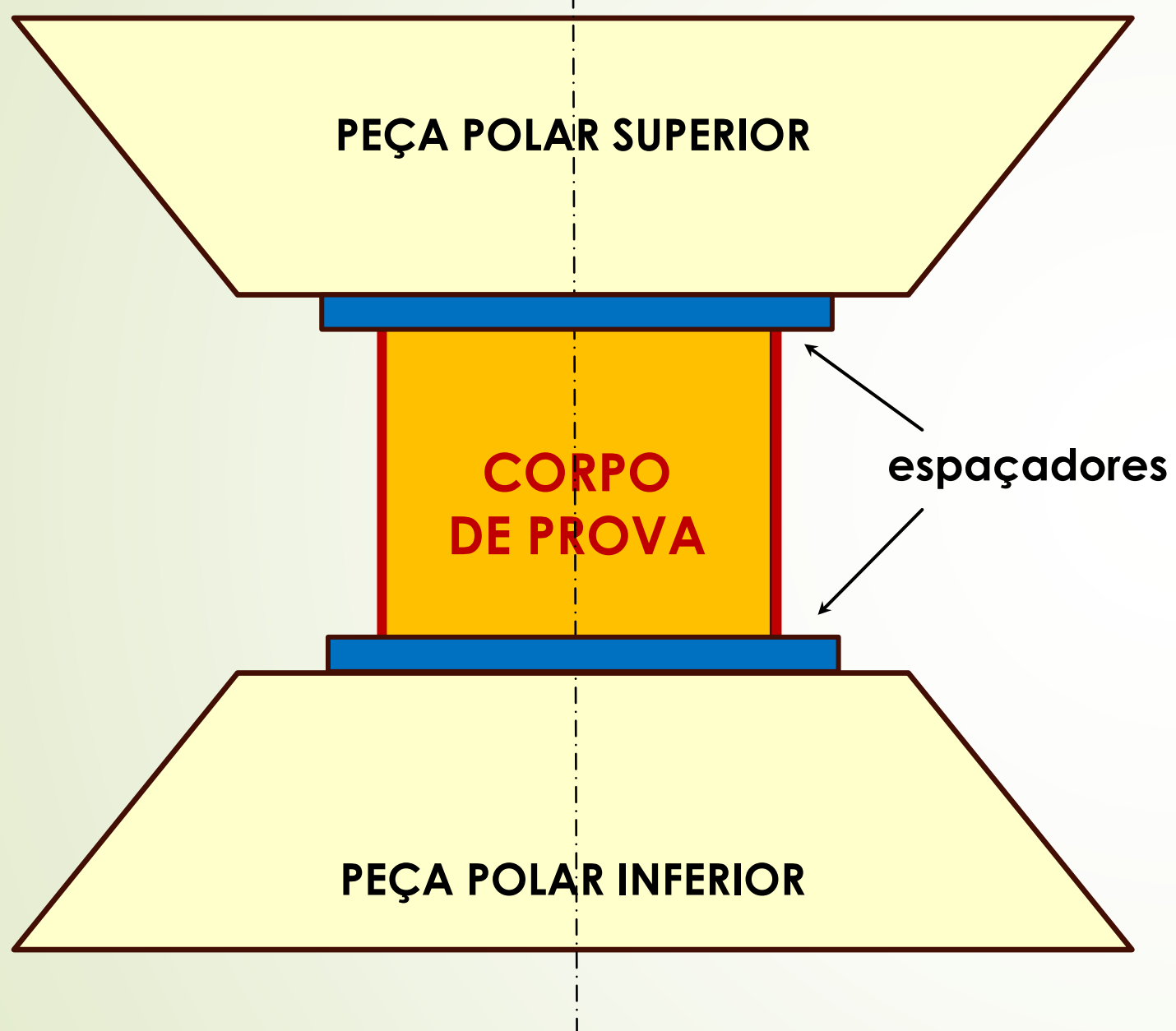
$$n\text{-ésima iteração: } \mu_{r\ n} = \mu_0 \frac{B}{H_{i\ n-1}}$$



**disco de aço:**  
( Ø 24 mm x 10 mm)  
acomodado entre as peças  
polares do eletroímã com  
entreferos de 0,5 mm.  
Fator de desmagnetização:  
 $N_d = 0,0653$

# EFEITO DE $N_d$ 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:*  $N_d 2 = 0,0376$

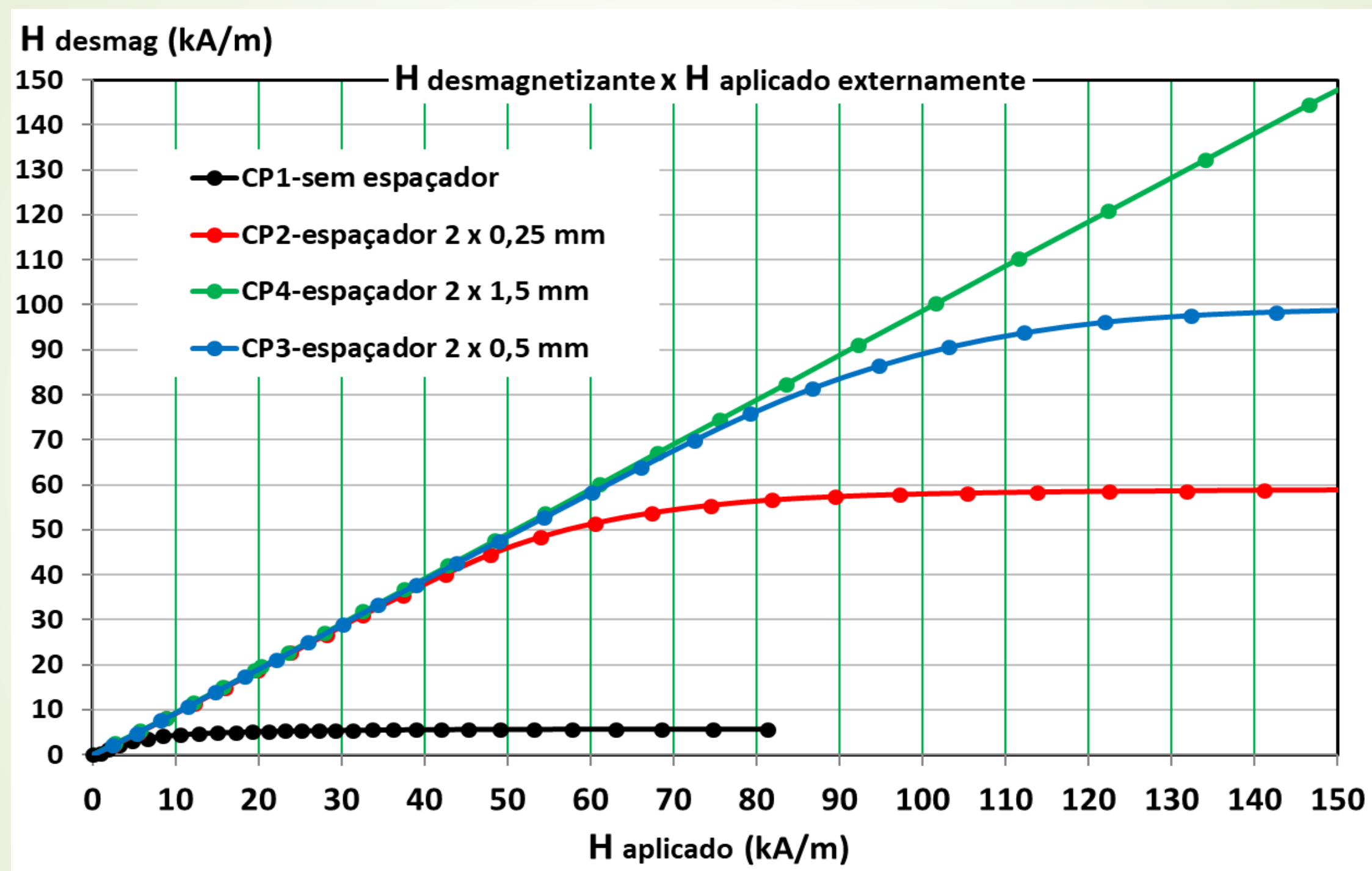
*2 x 0,5 mm:*  $N_d 3 = 0,0653$

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

**Evolução da permeabilidade relativa máxima:**

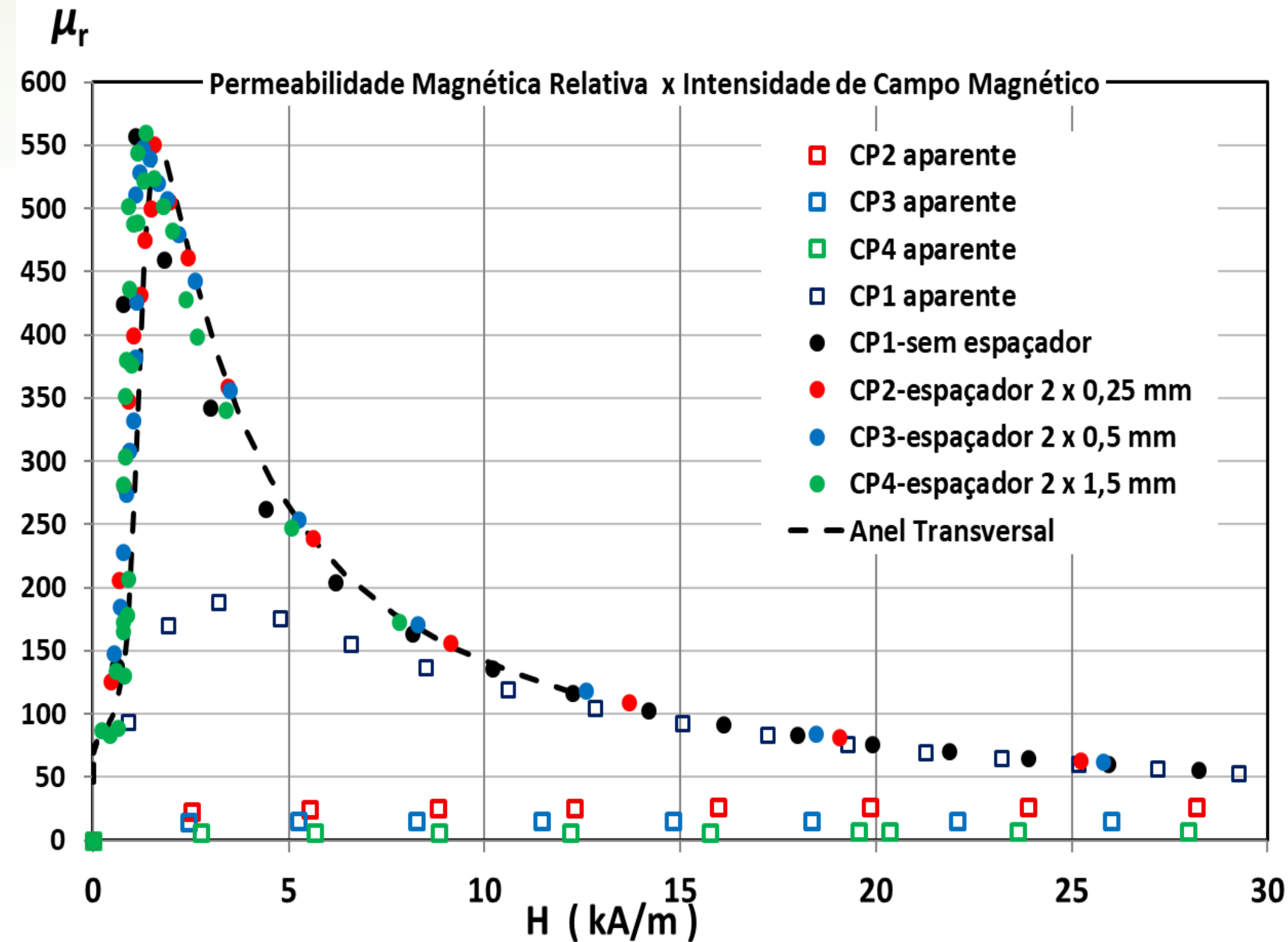
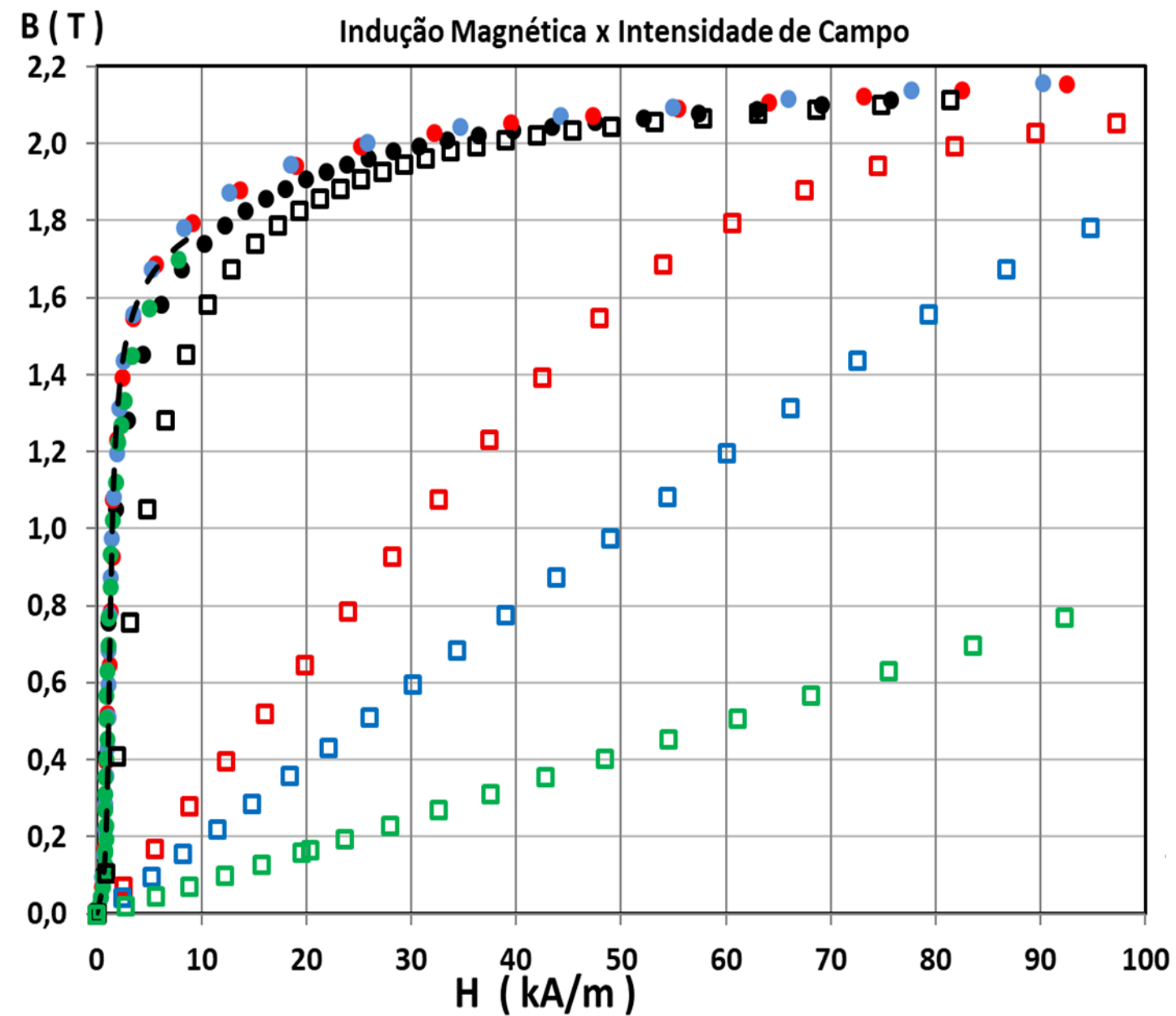
Tempo de estabilização do sistema é proporcional à  $N_d$

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



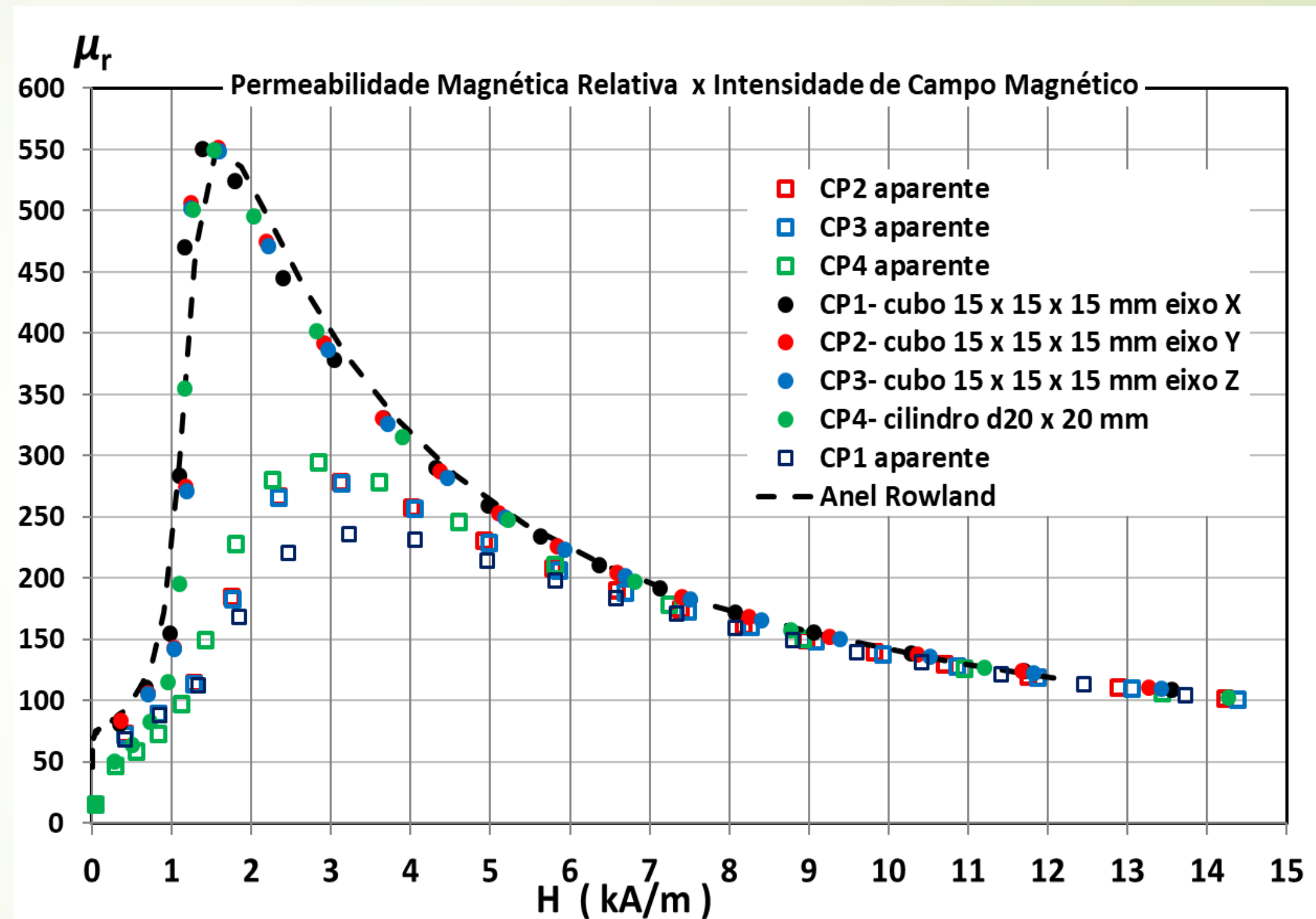
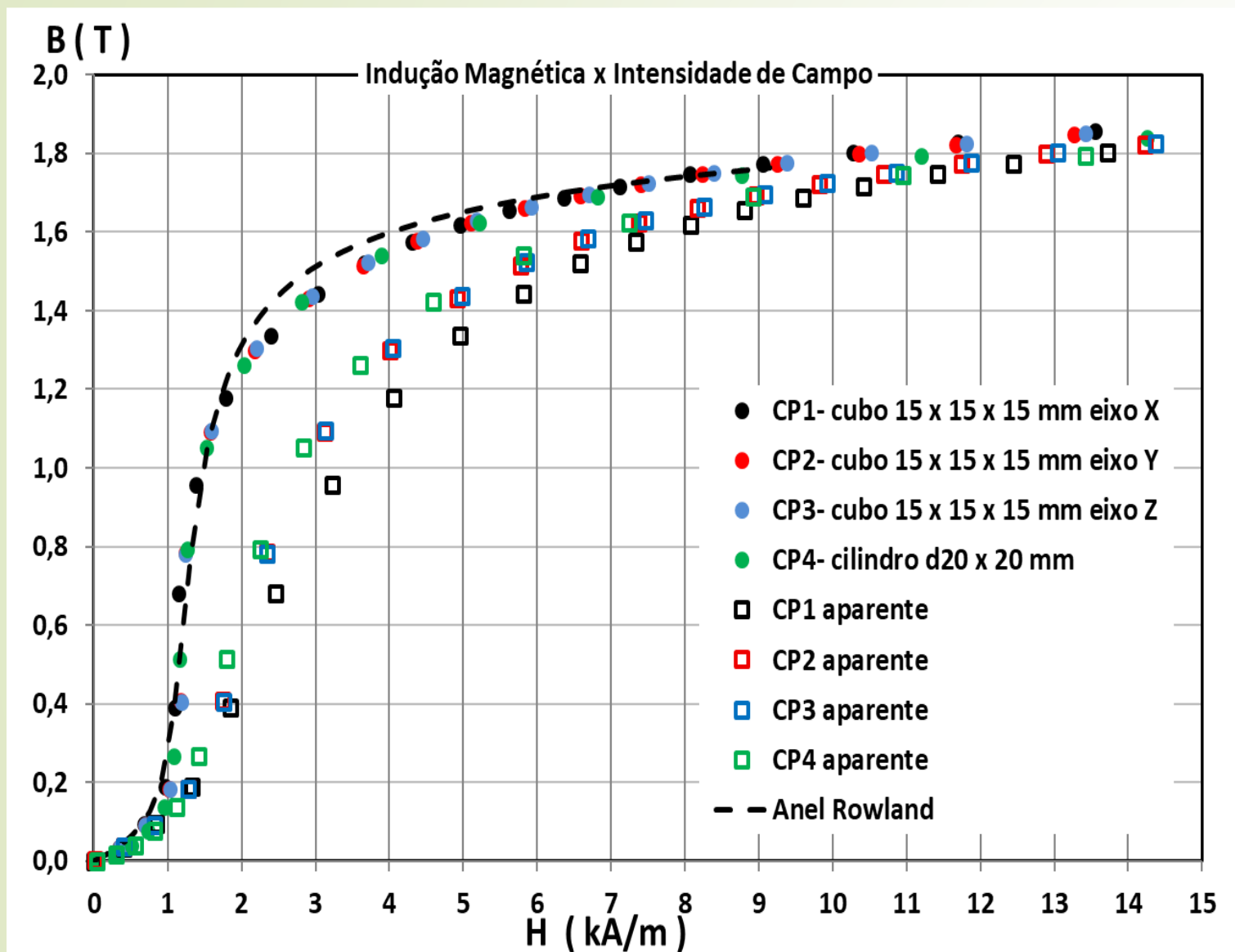
# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## Efeito de espaçadores



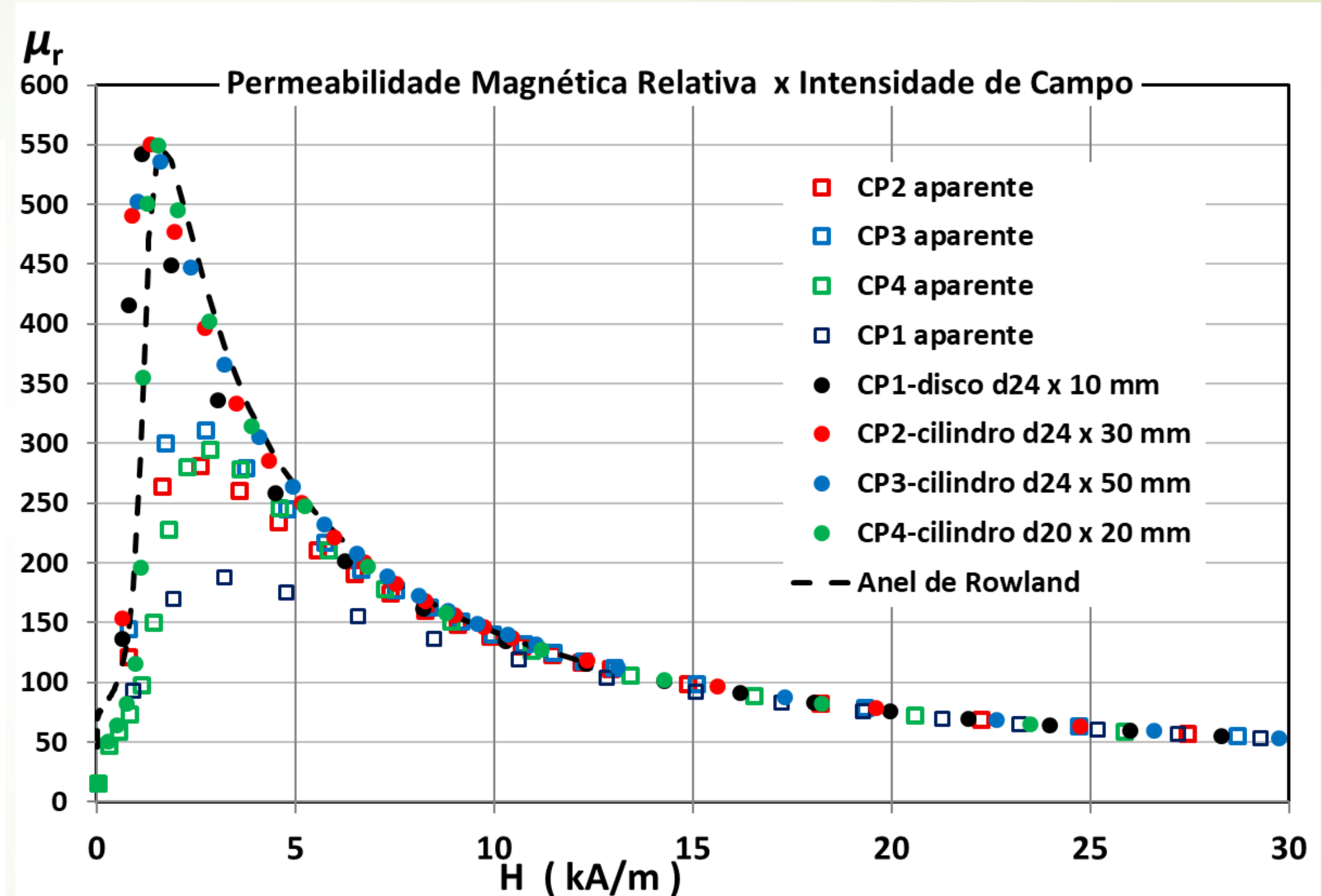
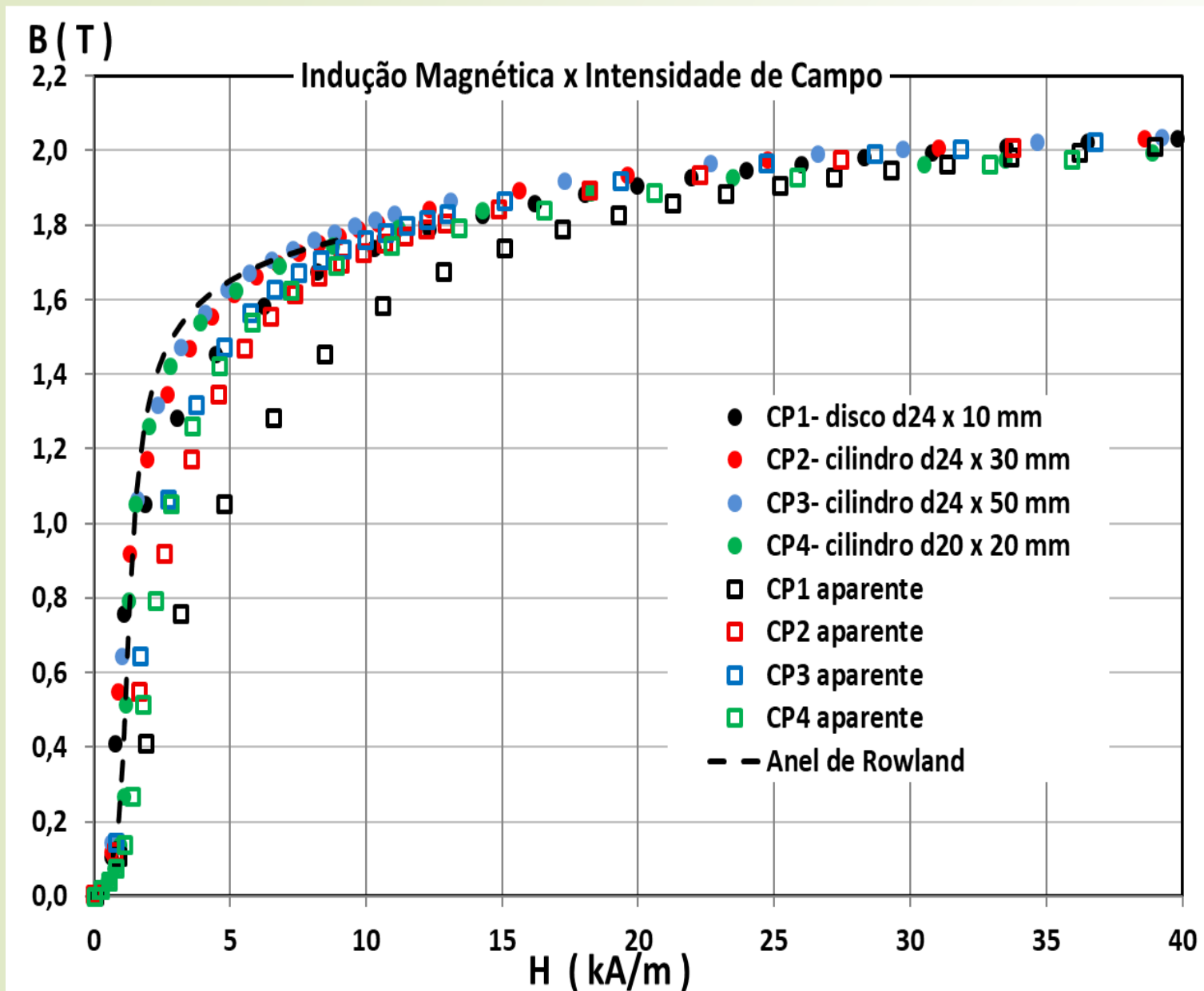
# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## Efeito de anisotropia



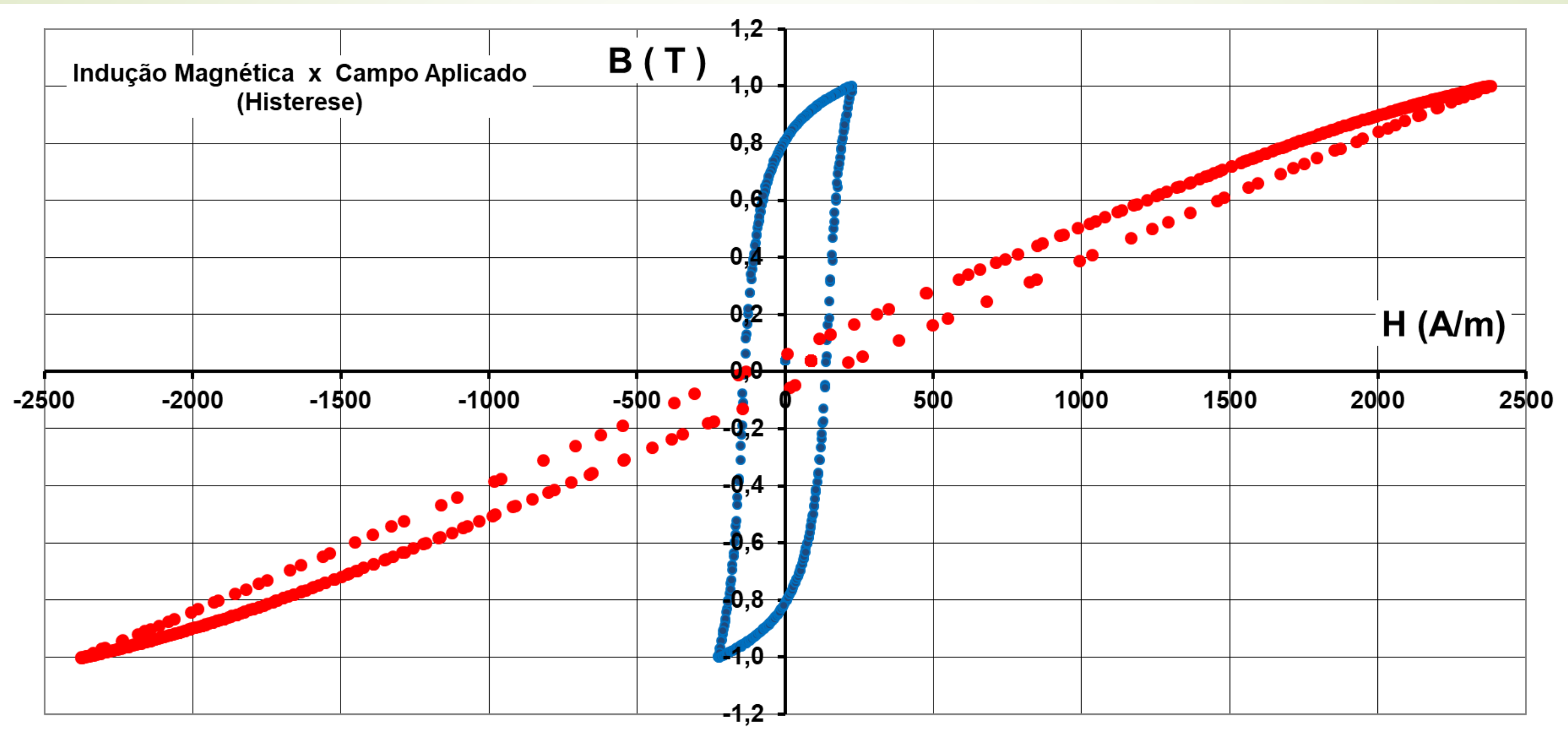
# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## Efeito da geometria da amostra



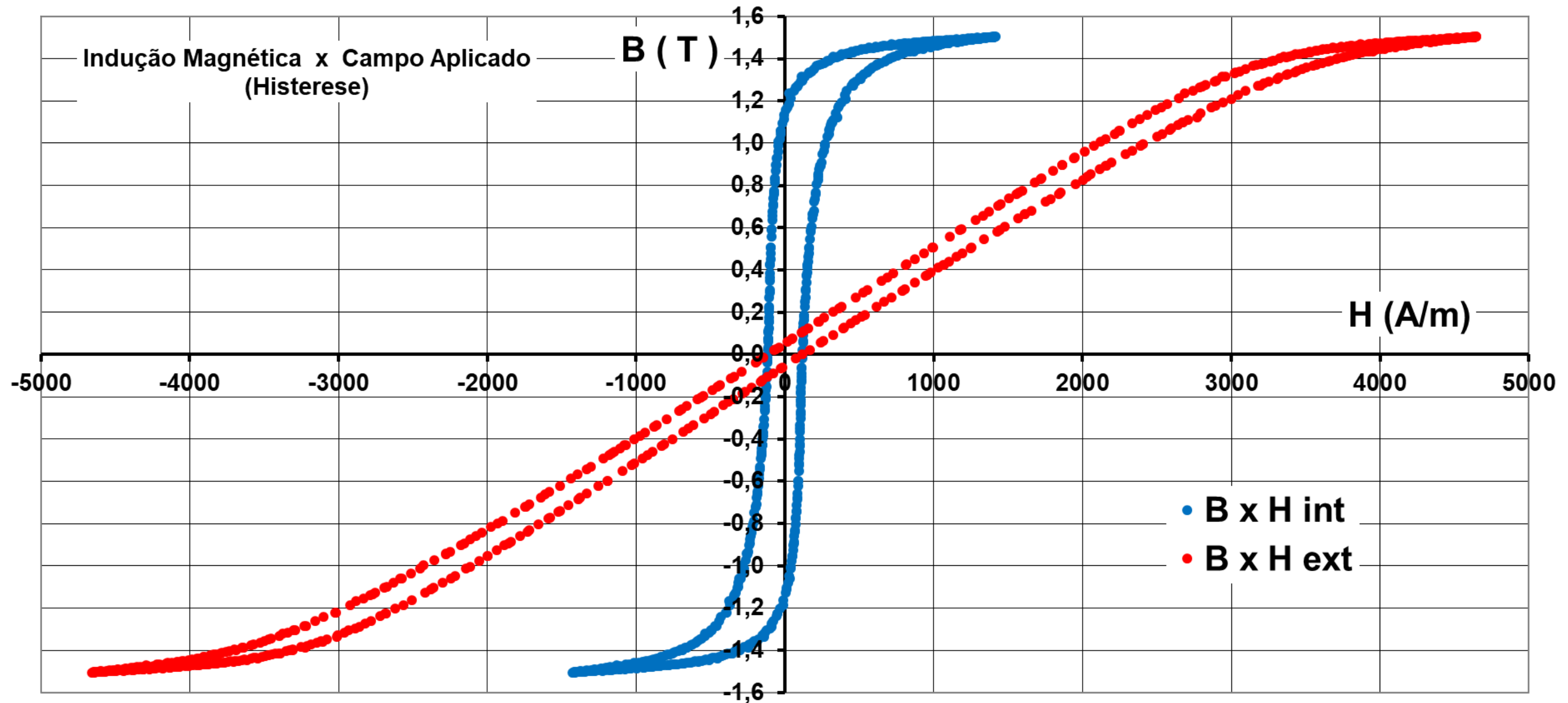
# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## Efeito nas figuras de histerese ( $B_{\text{máx}} = 1 \text{ T}$ )



# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

## Efeito nas figuras de histerese ( $B_{\text{máx}} = 1,5 \text{ T}$ )



# MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO

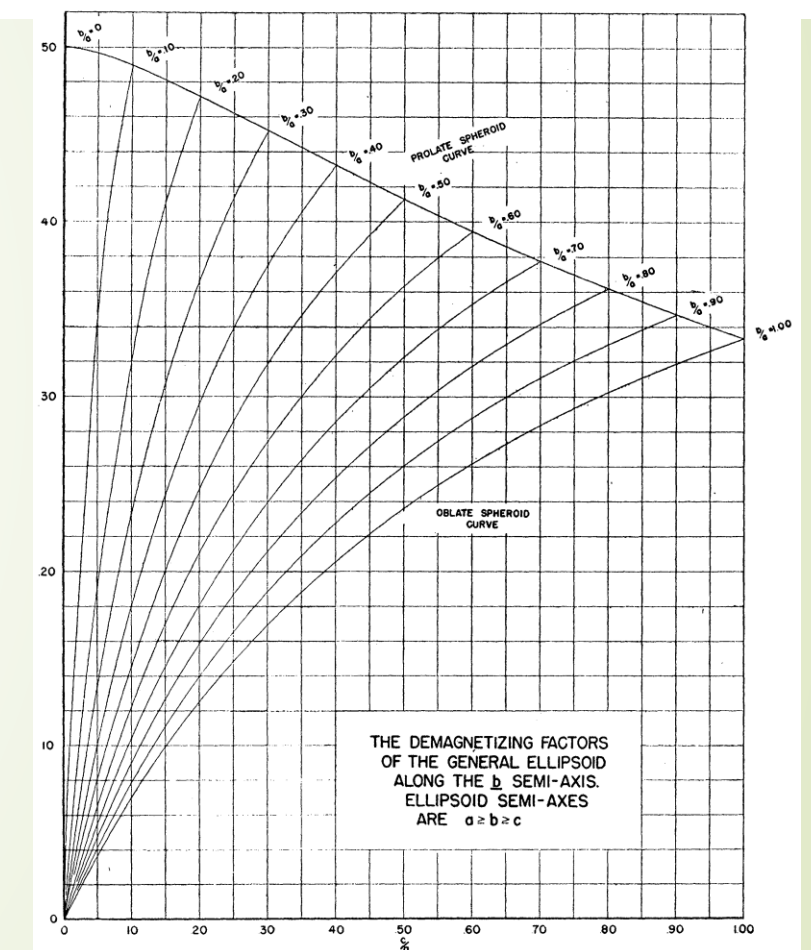
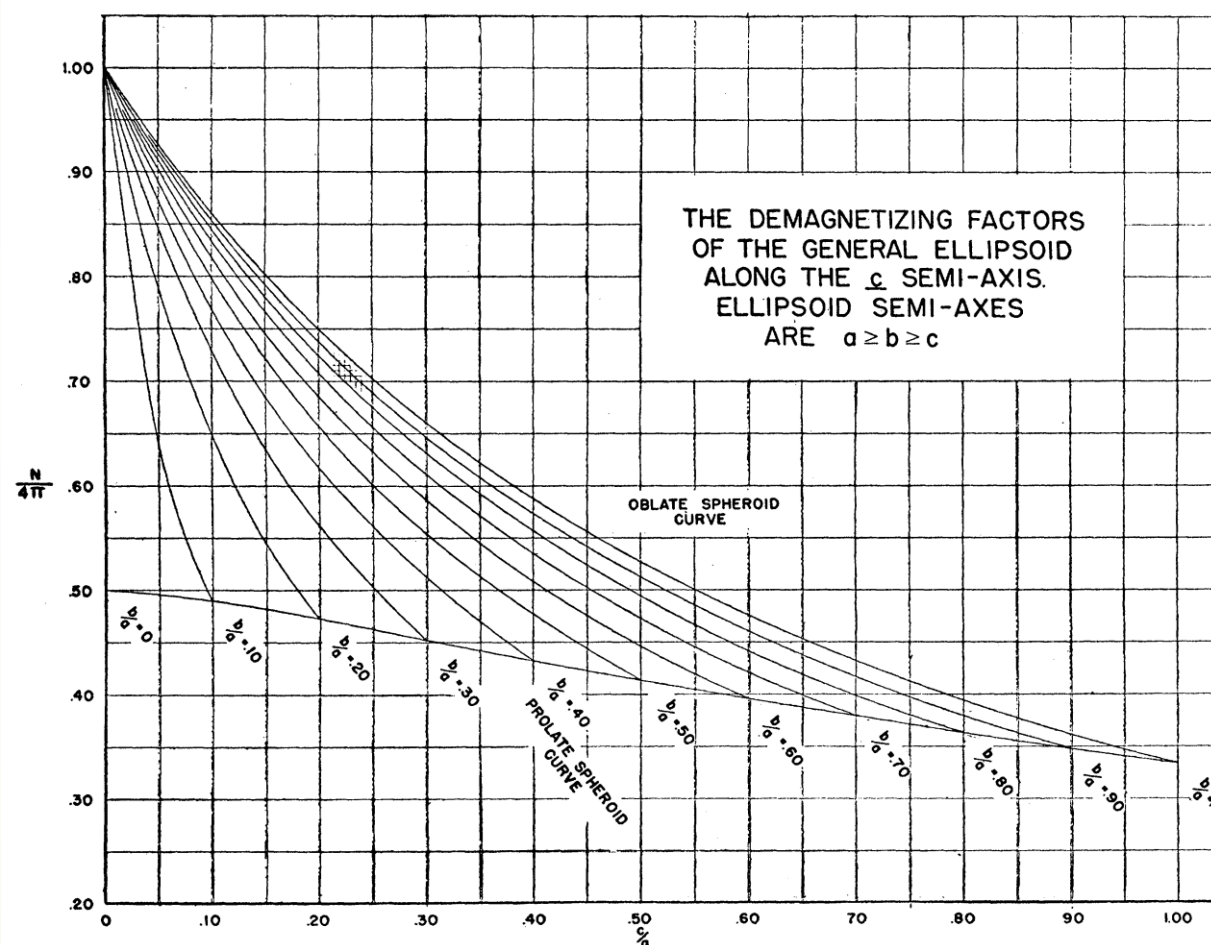
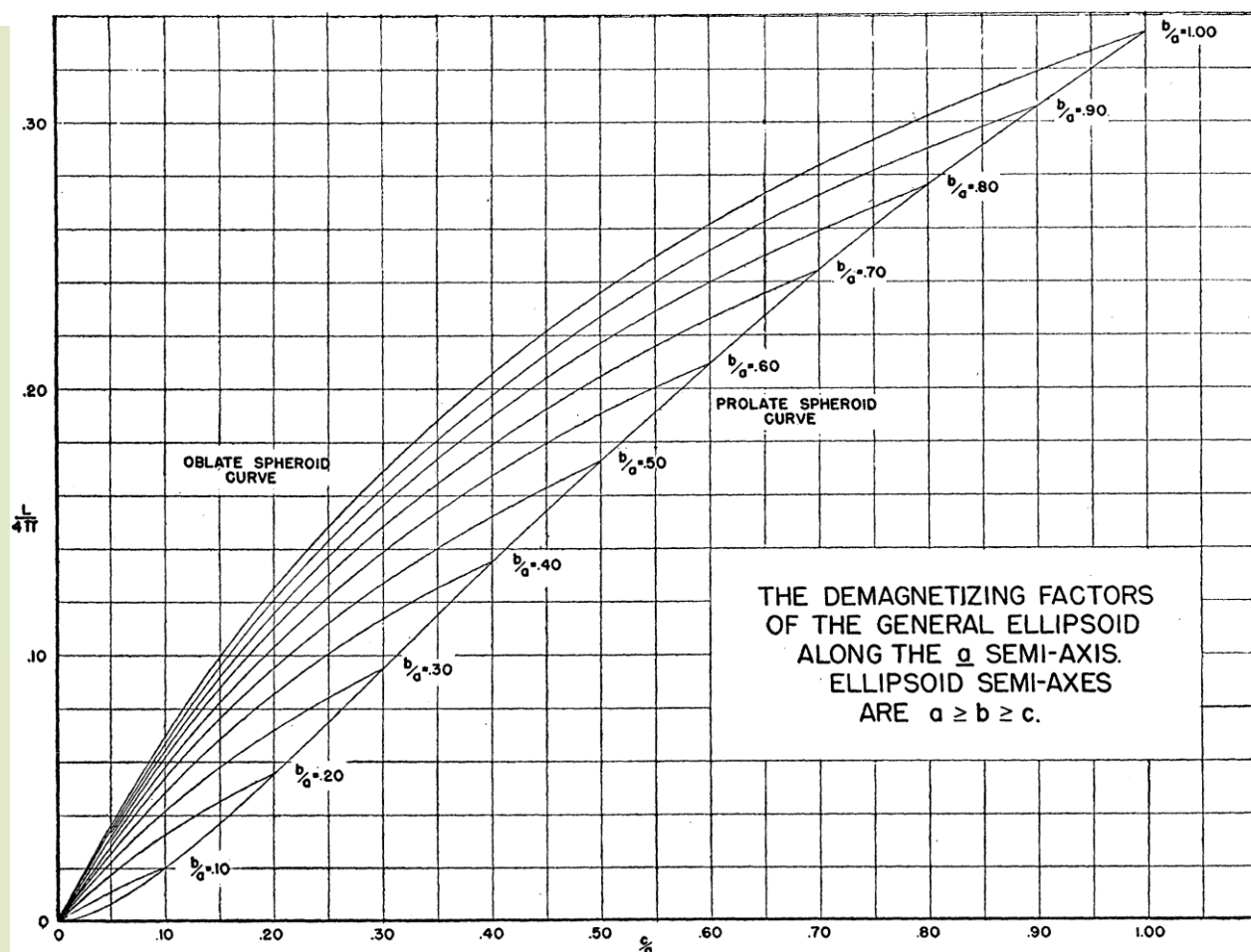
- Comparação direta com os resultados do método de referência (Anel de Rowland) para a mesma família de materiais, geometria dos CPs e equipamento de medição
- Estimativa pela permeabilidade máxima típica do material ou algum ponto notável da curva de magnetização ( $B_{10}$ ,  $B_{25}$ ,...)
- Simulações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

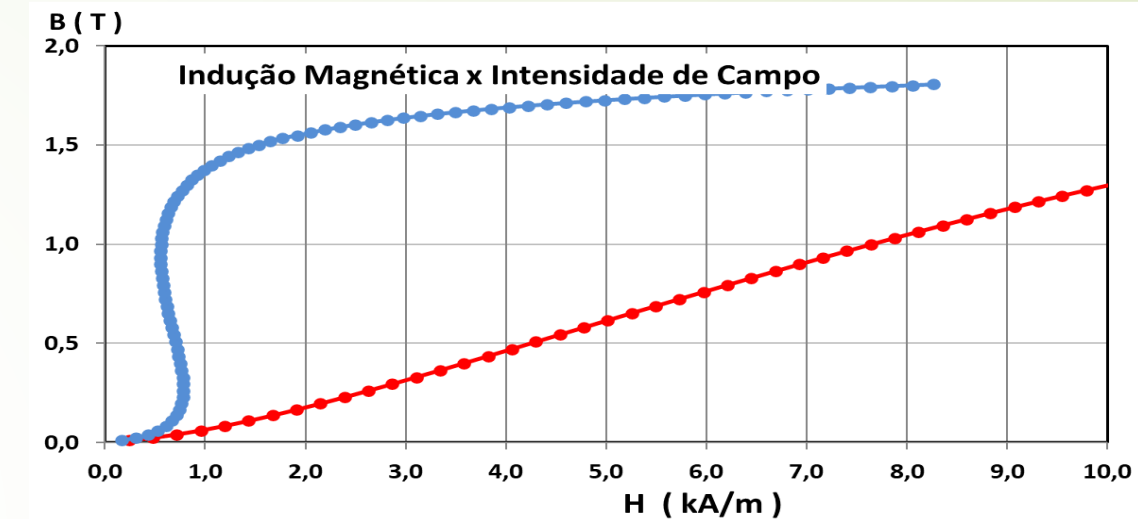
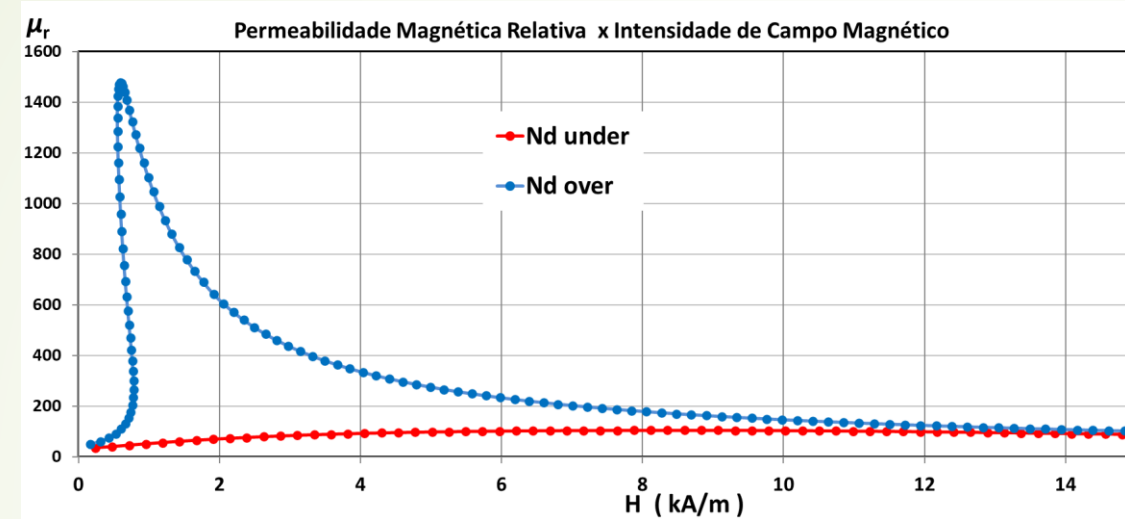


**Solução analítica apenas corpos de prova com geometrias aproximadas por elipsoides e bobinas de excitação com núcleo de ar**

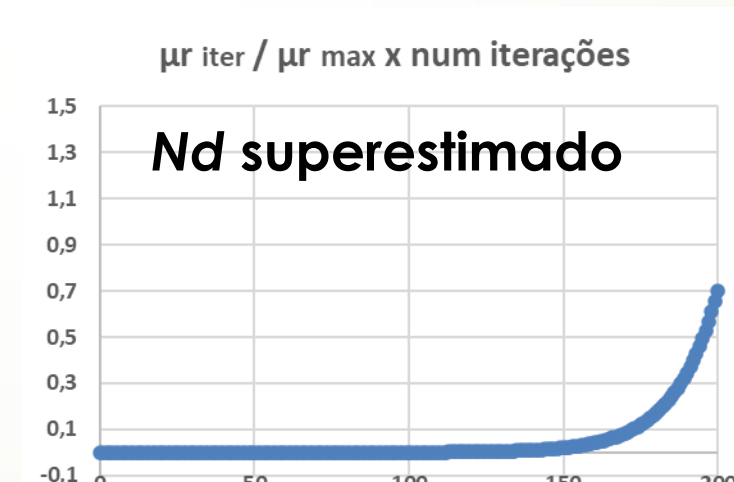
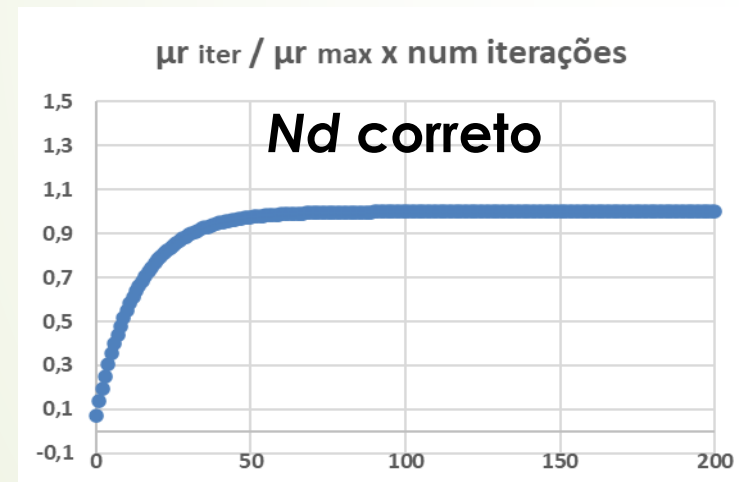
# FATOR DE DESMAGNETIZAÇÃO EM “TESTE CEGO”

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

$N_d$  superestimado →



Convergência →



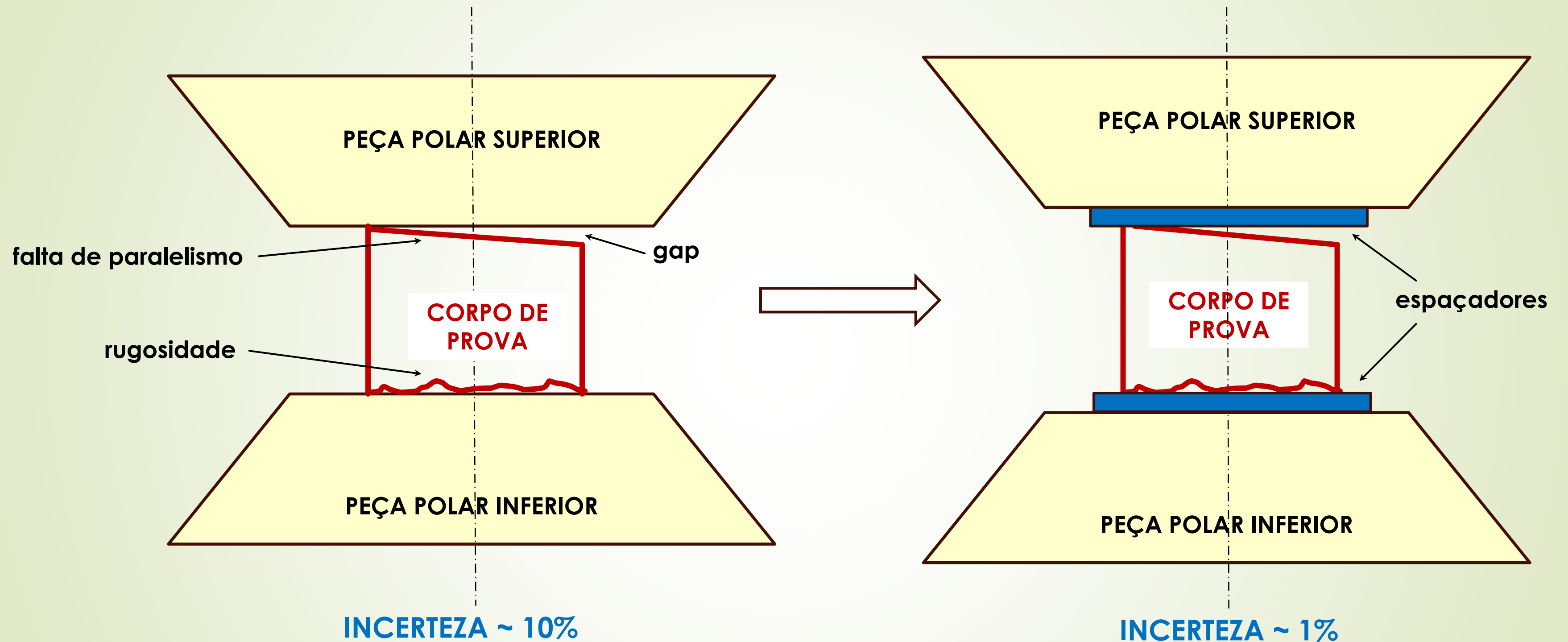
Refinamento →

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  $N_d$  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 da intensidade do campo magnético de excitação
- Fator de desmagnetização  $N_d$  como parâmetro único para a realização das correções
- Possibilidades diversas para estabelecer o valor de  $N_d$



**AGRADECEMOS SUA PRESENÇA !**