

**Nº 179359**

**Caracterização magnética de escórias de aciaria para otimização de seu reaproveitamento**

**Martin, Ramon Valls**  
**Chotoli Fabiano Ferreira**  
**Lima, Sergio Soares**  
**Augustin, Eric**  
**Pedrosa, Francisco Junior Batista**

*Palestra apresenta no CONGRESSO  
BRASILEIRO DE ENGENHARIA E  
CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 25.,  
2024, Fortaleza. 33 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**





# Caracterização magnética de escórias de aciaria para otimização de seu reaproveitamento

Martin, R. V.; Chotoli F. F.; Lima, S.S.; Augustin, E.; Pedrosa, F.J.  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo



**FERRO GUSA  
SUCATAS**

**CaO**

**O<sub>2</sub>**

**ELEMENTOS DE LIGA**



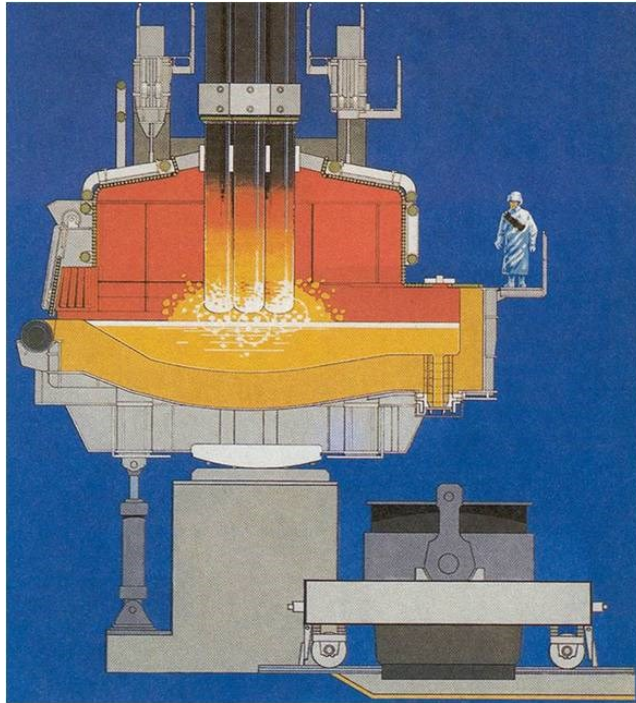
**FORNOS CONVERSORES – FORNOS PANELA**

**REFINO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO**

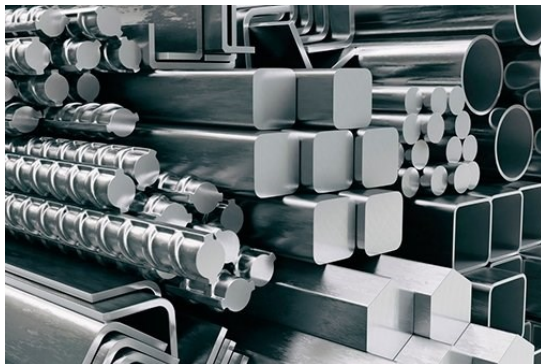
**Retirada de C, S, P, ...  
Ajuste de composição**



# ACIARIA – PRODUÇÃO DO AÇO



**PRODUTOS: AÇOS**



**RESÍDUOS:  
AGREGADOS SIDERÚRGICOS  
ESCÓRIAS**





# ESCÓRIAS DE ACIARIA



**COMPOSIÇÃO QUÍMICA COMPLEXA**  
**DEZENAS DE MILHÕES DE TONELADAS PRODUZIDAS ANUALMENTE**  
**1 tonelada de aço ↔ 0,5 tonelada de resíduos**

## EXEMPLOS DE REAPROVEITAMENTO:

- PAVIMENTAÇÃO
- INSUMO NA PRODUÇÃO DO CIMENTO
- REUTILIZAÇÃO NA ACIARIA
- CONSTRUÇÃO CIVIL
- CORRETIVO DE SOLO E FERTILIZANTE
- PREPARAÇÃO DE SUBSTRATOS FERROVIÁRIOS

**PILHAS (MONTANHAS DE ESCÓRIAS) SE ACUMULAM EM PÁTIOS DAS EMPRESAS SIDERÚRGICAS POR FALTA DE DESTINAÇÃO ECONOMICAMENTE VIÁVEL (DEMANDA INSUFICIENTE)**

**ENORME PASSIVO AMBIENTAL!**

# TESTE EM PLANTA PILOTO DE PROCESSAMENTO DE ESCÓRIAS A SECO



**QUANTIDADE: Batch único de 60 toneladas**

## EQUIPAMENTOS :

- SECADORES
- ESTEIRAS DE TRANSPORTE
- SEPARADORES MAGNÉTICOS
- PENEIRAS
- TRITURADORES / MOINHOS
- FILTROS

Material de entrada	Fluxos
Escórias 1 e 2	Alimentação
	Fração grossa
	Fração média
	Fração fina
	Pó metálico
	Pó não metálico
	Pó coletado no despoeiramento



FLUXOS DE  
SAÍDA

# TESTE EM PLANTA PILOTO DE PROCESSAMENTO DE ESCÓRIAS



**SECADOR**



**PENEIRAS**



**SEPARADORES MAGNÉTICOS**



**BAIAS COM OS PRODUTOS DO  
PROCESSAMENTO**



## EXEMPLO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA APÓS PROCESSAMENTO DAS ESCÓRIAS



Fluxos	Composição química (%)										
	Fe total	Fe met	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Fração grossa	<b>65,0</b>	<b>29,1</b>	<b>44,3</b>	<b>1,8</b>	<b>12,4</b>	<b>0,3</b>	<b>4,4</b>	<b>3,2</b>	<b>2,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
Fração média	<b>57,7</b>	<b>28,6</b>	<b>34,9</b>	<b>2,7</b>	<b>16,7</b>	<b>0,7</b>	<b>6,1</b>	<b>4,8</b>	<b>3,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,5</b>
Fração fina	<b>54,5</b>	<b>18,0</b>	<b>43,0</b>	<b>4,3</b>	<b>18,4</b>	<b>0,2</b>	<b>6,7</b>	<b>3,1</b>	<b>4,1</b>	<b>1,5</b>	<b>0,6</b>
Pó metálico	<b>66,7</b>	<b>47,0</b>	<b>25,4</b>	<b>0,0</b>	<b>11,6</b>	<b>0,5</b>	<b>4,5</b>	<b>5,3</b>	<b>3,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
Pó não metálico	<b>21,0</b>	<b>4,2</b>	<b>17,2</b>	<b>4,8</b>	<b>34,2</b>	<b>0,7</b>	<b>13,3</b>	<b>5,8</b>	<b>11,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>
Pó coletado no despoeiramento	<b>18,5</b>	<b>1,1</b>	<b>15,6</b>	<b>7,4</b>	<b>38,0</b>	<b>0,5</b>	<b>14,3</b>	<b>9,1</b>	<b>10,4</b>	<b>2,6</b>	<b>1,2</b>
Alimentação (retrocalculada)	<b>34,1</b>	<b>10,0</b>	<b>25,9</b>	<b>5,5</b>	<b>29,2</b>	<b>0,4</b>	<b>10,9</b>	<b>6,5</b>	<b>7,8</b>	<b>2,1</b>	<b>0,9</b>

## TIPOS DE SEPARADORES PARA OPERAÇÃO A SECO

-Tambor

-Suspenso com correias cruzadas

-Polias ou cilindros motores de correia

(Opção interessante pela flexibilidade de operação, custo e eficiência)

# MODELAGEM MATEMÁTICA DE SEPARADORES MAGNÉTICOS



Uso de modelos matemáticos simplificados dos fenômenos envolvidos

## Aspectos considerados:

**Parâmetros construtivos do separador** (dimensional, cinéticos)

**Forças atuantes** (magnéticas, inerciais, atrito, aerodinâmicas, gravitacionais)

**Características do material** (granulometria, densidade, propriedades magnéticas)

**Características do campo magnético do separador** (intensidade e distribuição espacial)

Solução analítica dos modelos e apresentação dos resultados em planilha interativa



## ENTRADAS:

AMOSTRA	
d (mm)=	10
Dens. (kg/m <sup>3</sup> )=	4000
Suscep. (adm) =	0.5
Forma (esf=1, cubo=2)	1
Fator empilhamento =	0.5
MECÂNICA	
Incl.(°) =	15
n (rpm)=	110
D polia (mm)=	600
h (mm) =	20
(esp. Correia)	
L (mm) =	400
(largura correia)	
Coef. Atrito (adm) =	0.5
(correia-carga)	
CLASSIFICADOR	
Muito magn. (m) =	0
Pouco magn. (m) =	1.25
Não magn. (m) =	2.5
H base (m) =	2.75
AERODINÂMICA	
C aero=	0.5
Dens. ar (Kg/m <sup>3</sup> )=	1
V vento (m/s) =	5
Âng. Vento (°)=	0
MAGNETISMO	
B (G) =	3000
expo decaim =	4
cte decaim =	10

## SAÍDAS:

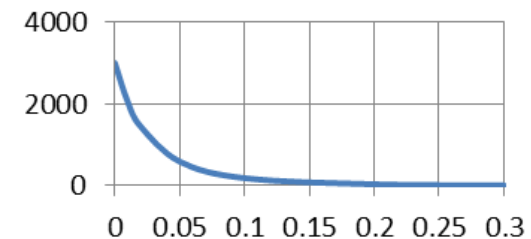
Ângulo decolagem=	120.0
Ângulo escorregamento =	

x base (m) =	-1.1
MAGNETISMO	
Intenso	X
Médio	
Fraco	
Nulo	

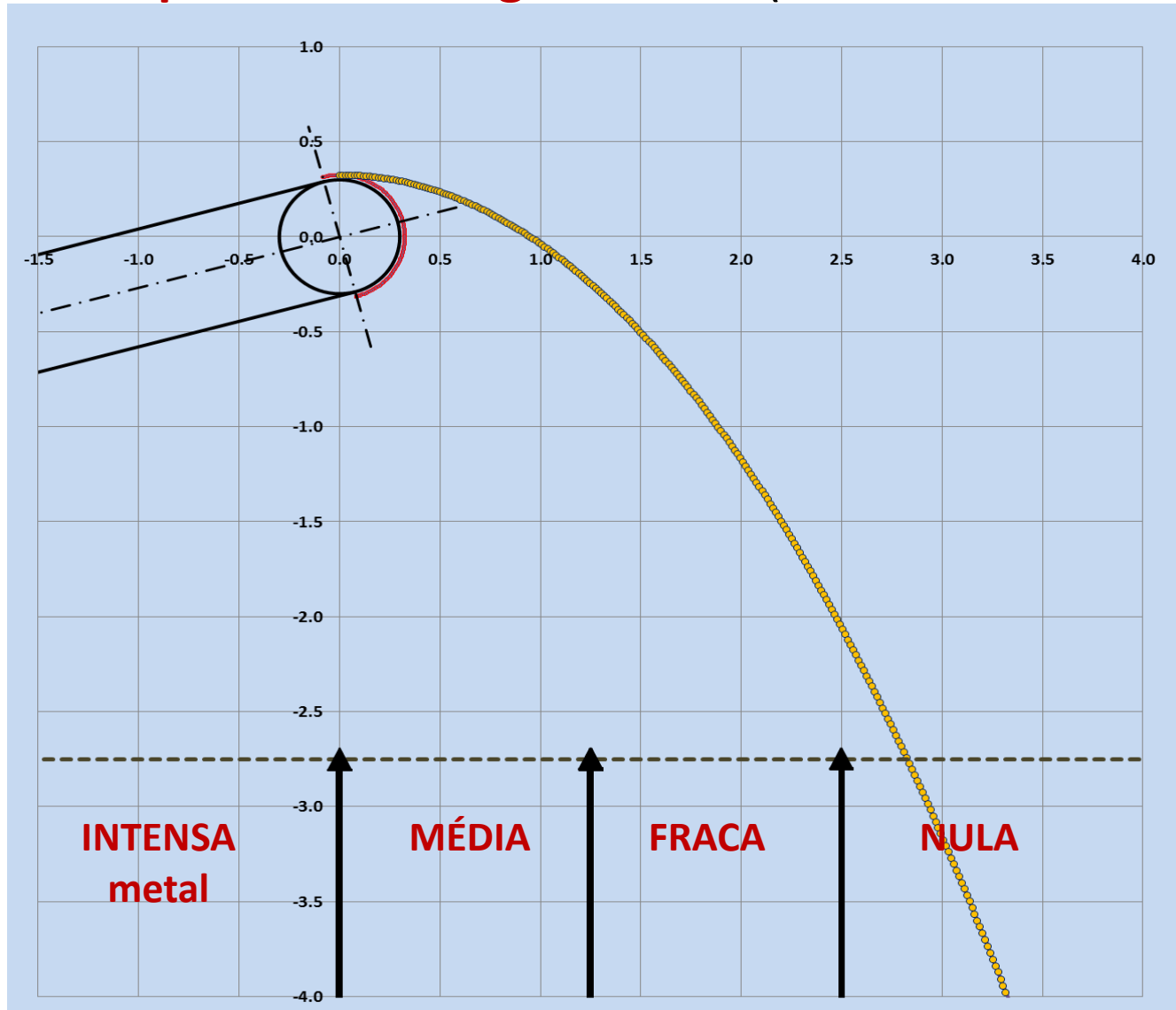
Vazão média (kg /s) =	29.9
Vazão média (ton /h) =	107.8
(monocamada)	



**Decaimento da intensidade do campo magnético a partir da superfície da polia do separador**

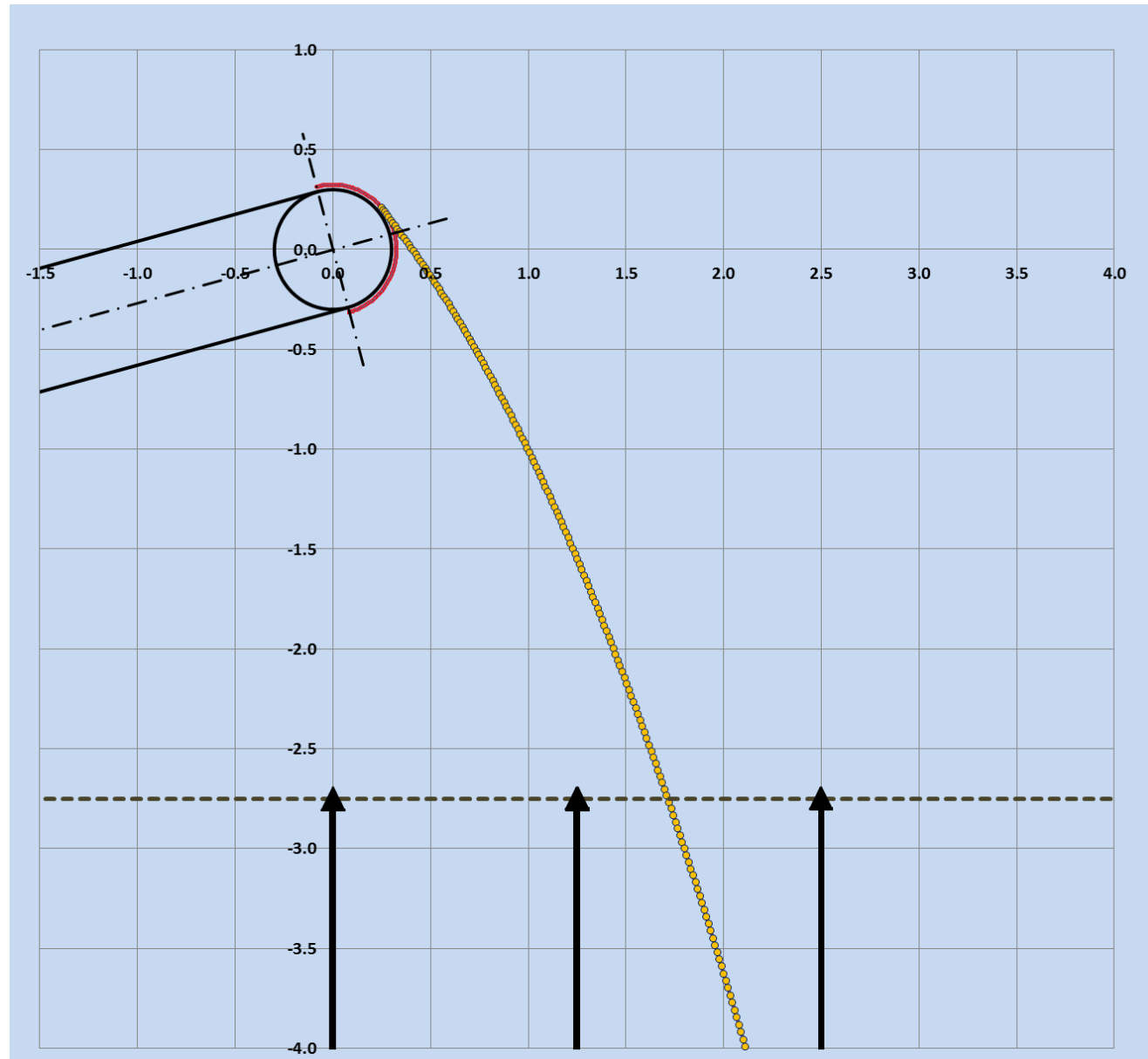


# SAÍDA GRÁFICA - Exemplo de variação de um único parâmetro: **Susceptibilidade magnética = 0** (material “não magnético”)



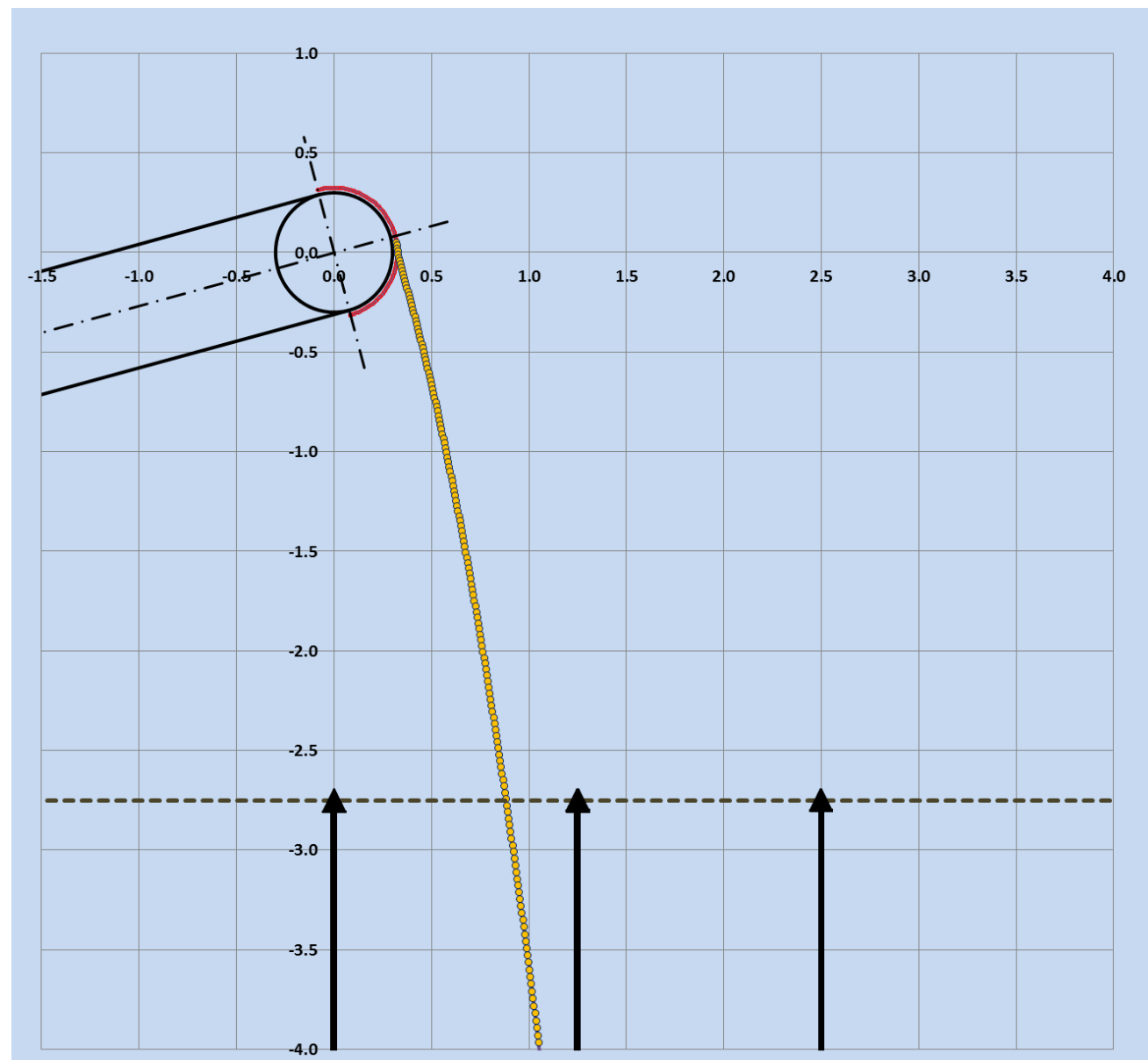
**CLASSIFICADORES POR MAGNETIZAÇÃO ( Teor de Fe)**

**susceptibilidade = 0,38**

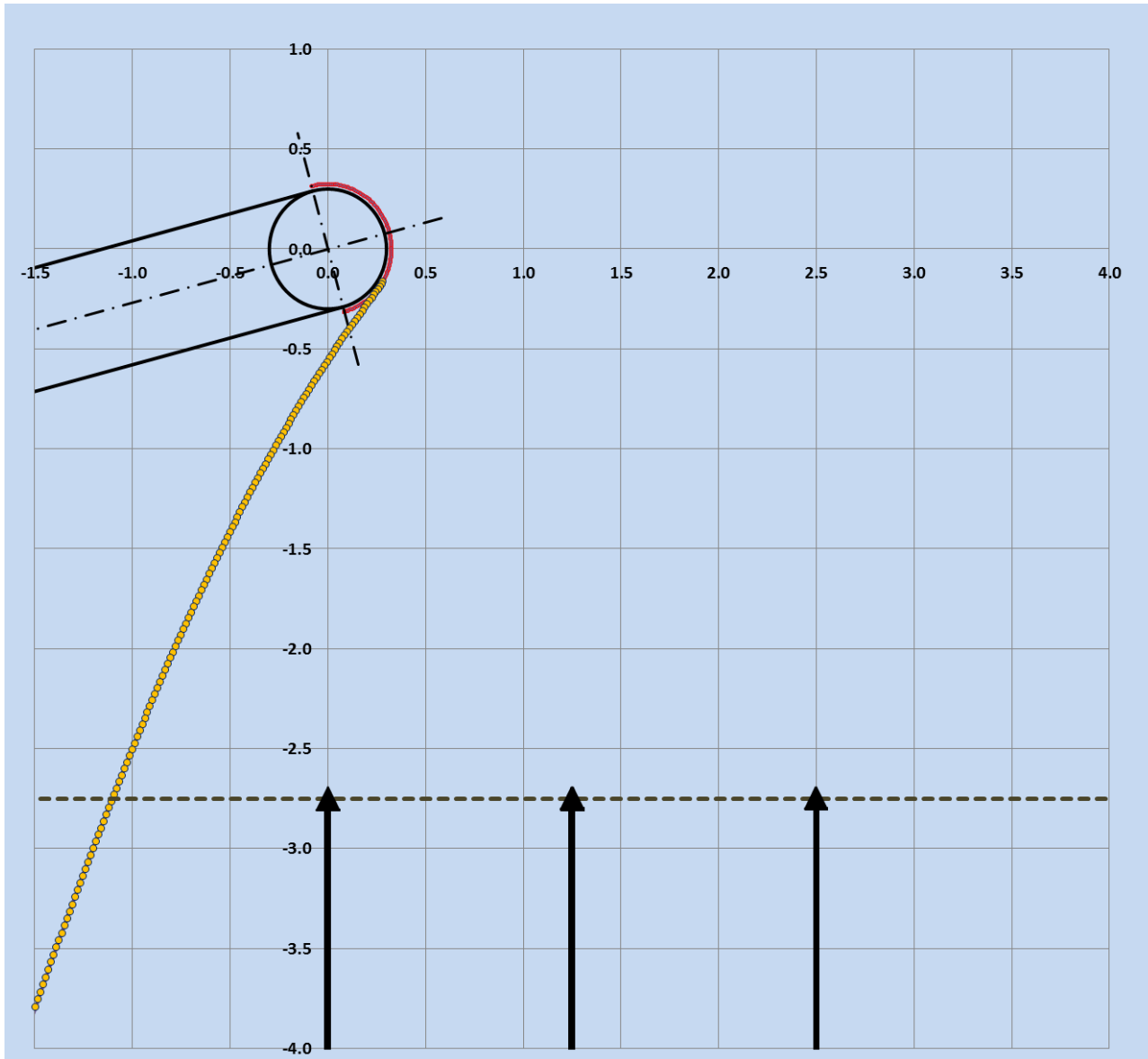




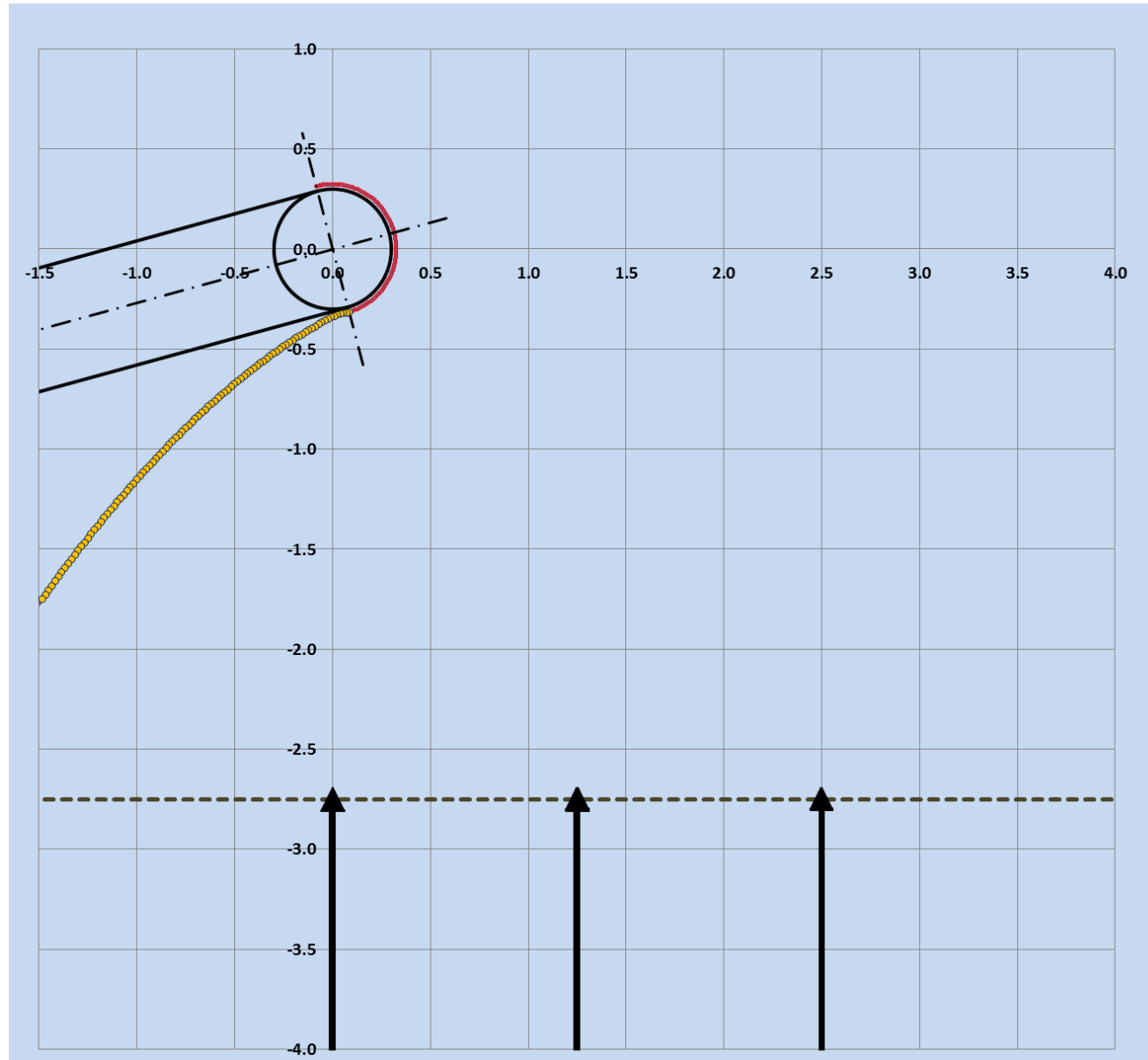
**susceptibilidade = 0,43**



**susceptibilidade = 0,5**



**susceptibilidade = 0,7**





# MISTURA DE MATERIAIS

AMOSTRA 1 (amarela)		AMOSTRA 2 (azul)	
d (mm)=	20	d (mm)=	10
Dens. (kg/m3)=	2500	Dens. (kg/m3)=	2500
Suscep. (adm) =	0	Suscep. (adm) =	0,5
Forma (esf=1, cubo=2)	1	Forma (esf=1, cubo=2)	1
Fator empilhamento =	0,3	Fator empilhamento =	0,3

## MECÂNICA

Incl.(°) =	15
n (rpm)=	90
D polia (mm)=	500
h (mm) =	10
(esp. Correia)	
L (mm) =	200
(largura correia)	
Coef. Atrito (adm) =	0,5
(correia-carga)	

## CLASSIFICADOR

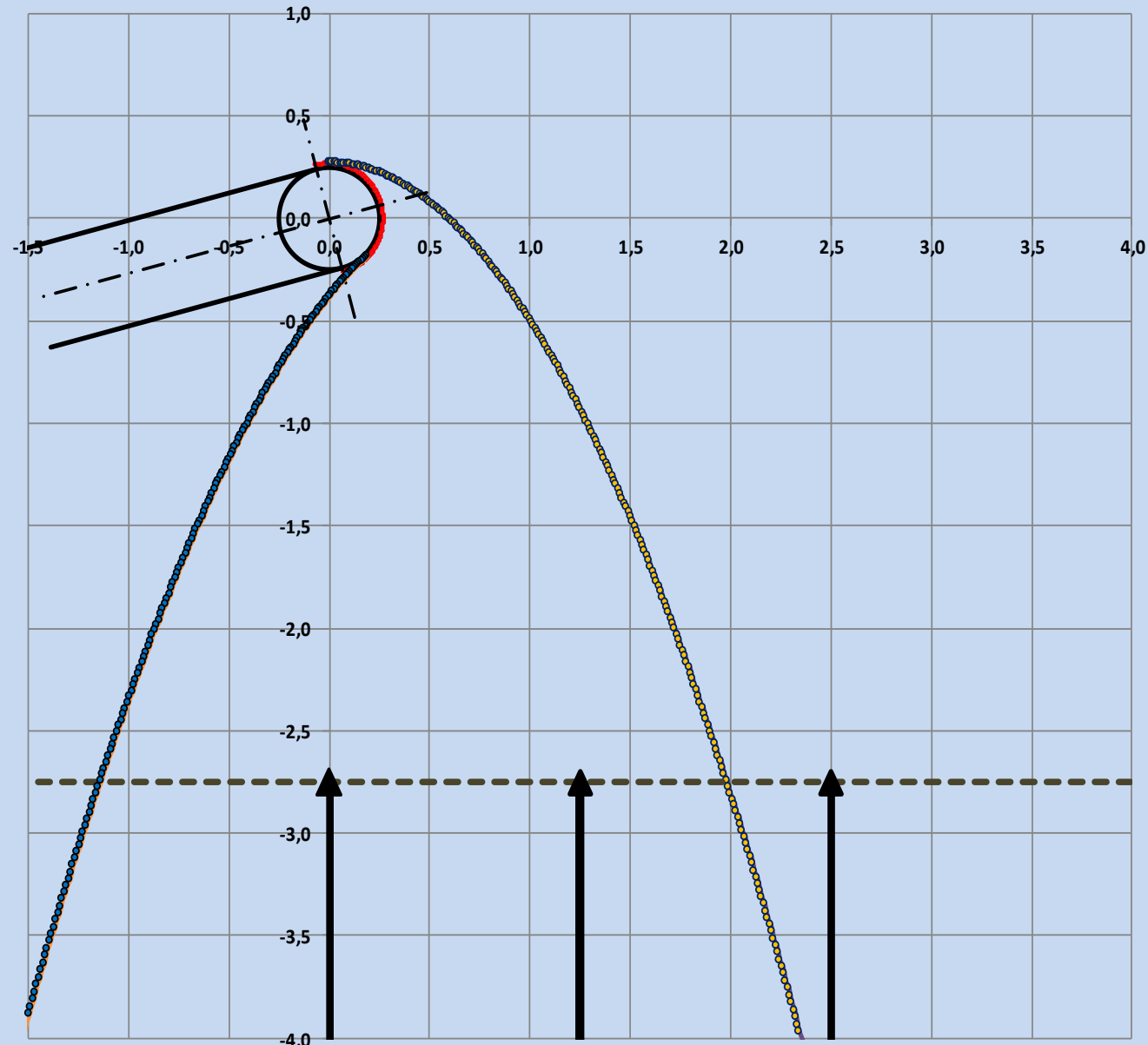
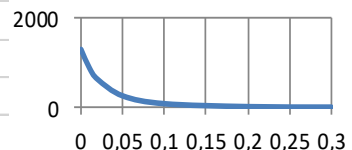
Muito magn. (m) =	0
Pouco magn. (m) =	1,25
Não magn. (m) =	2,5
H base (m) =	2,75

## AERODINÂMICA

C aero=	0,5
Dens. ar (Kg/m3)=	1
V vento (m/s) =	0
Âng. Vento (°)=	0

## MAGNETISMO

B (G) =	1300
expo decaim =	4
cte decaim =	10



Ângulo decolagem= 0,0

Ângulo escorregamento =

x base (m) = 2,0

## MAGNETISMO

Intenso

Médio

Fraco X

Nulo

Vazão média (kg /s) = 7,6

Vazão média (ton /h) = 27,5  
(monocamada)



## **MOTIVAÇÃO:**

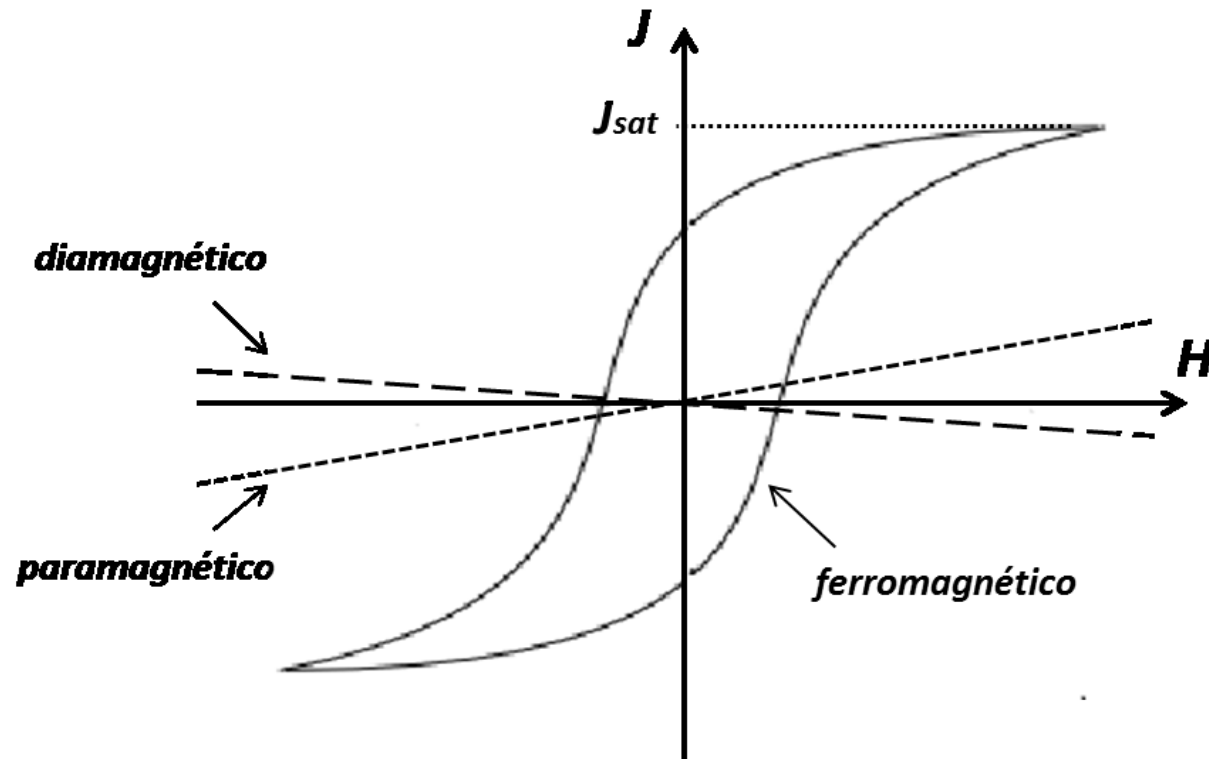
Otimizar parâmetros de operação de separadores magnéticos para obtenção da máxima eficiência

**Parâmetros:** Intensidade de campo (ajuste de corrente), velocidade de rotação de tambores, taxa de alimentação de material

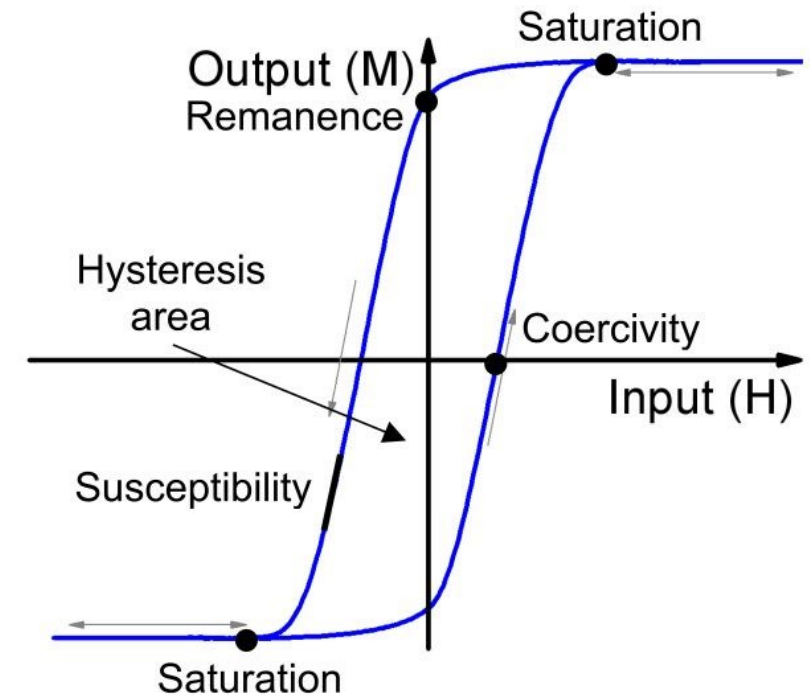
## **Exemplo de efeitos de ajustes inadequados:**

- Corrente excessiva no magnetizador => entupimento de grelhas
- Corrente insuficiente no magnetizador => descarte de material ainda rico em Fe

## CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS

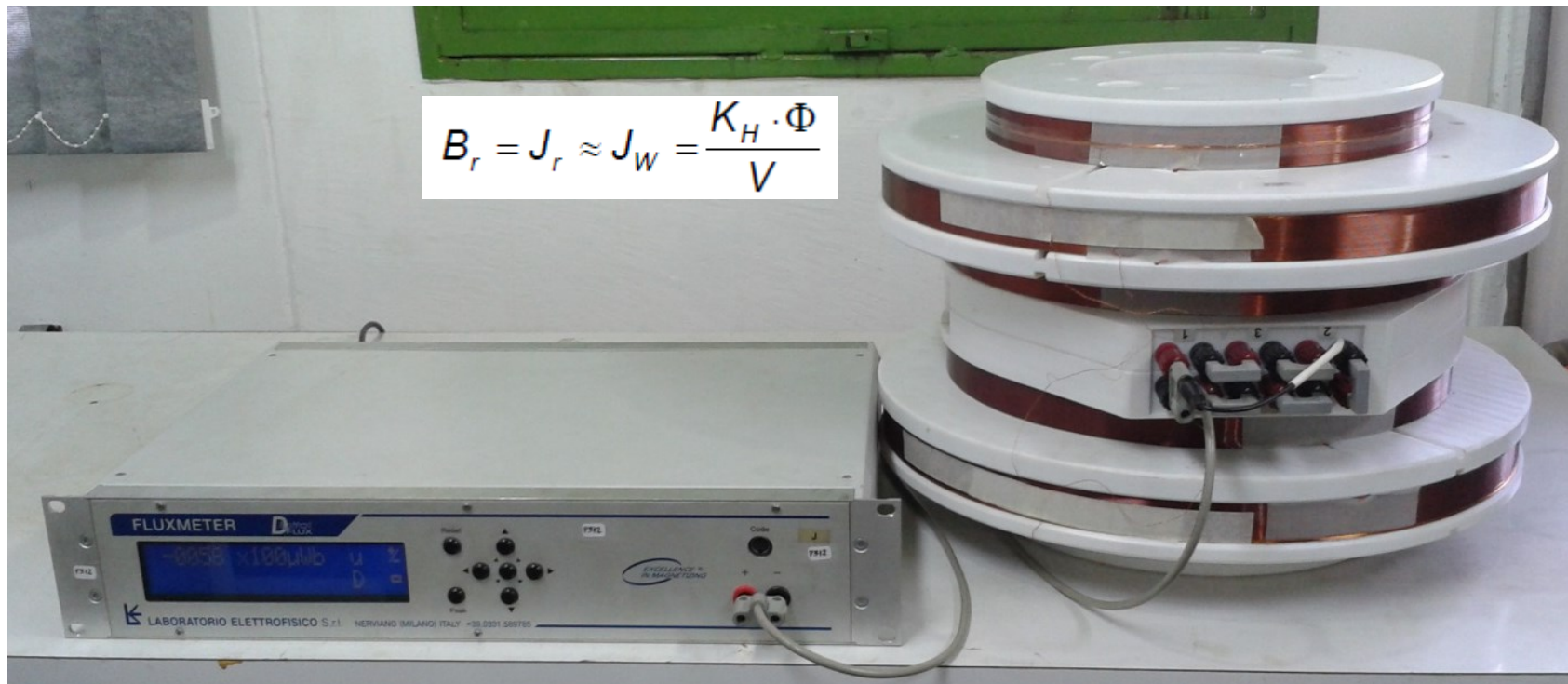


## PROPRIEDADES

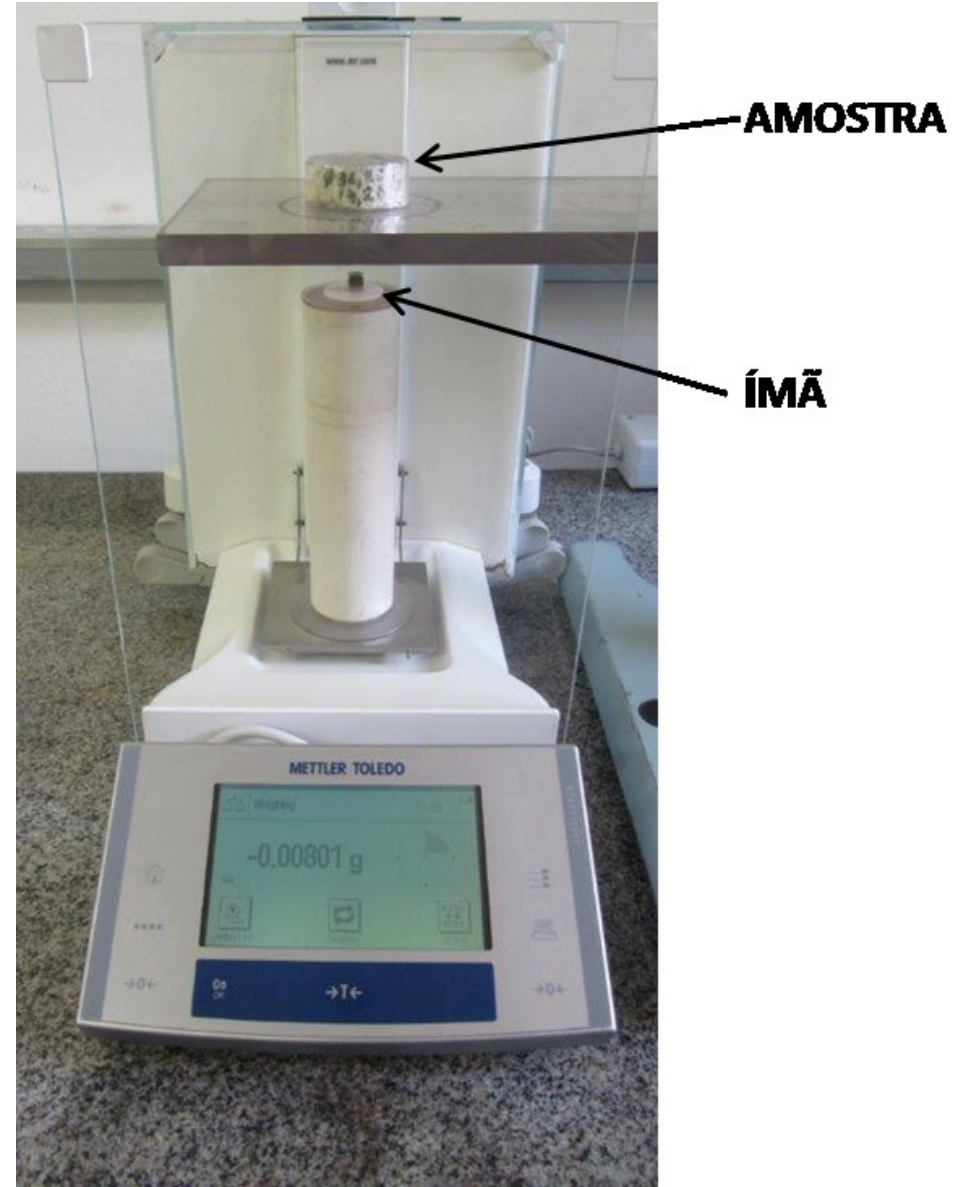
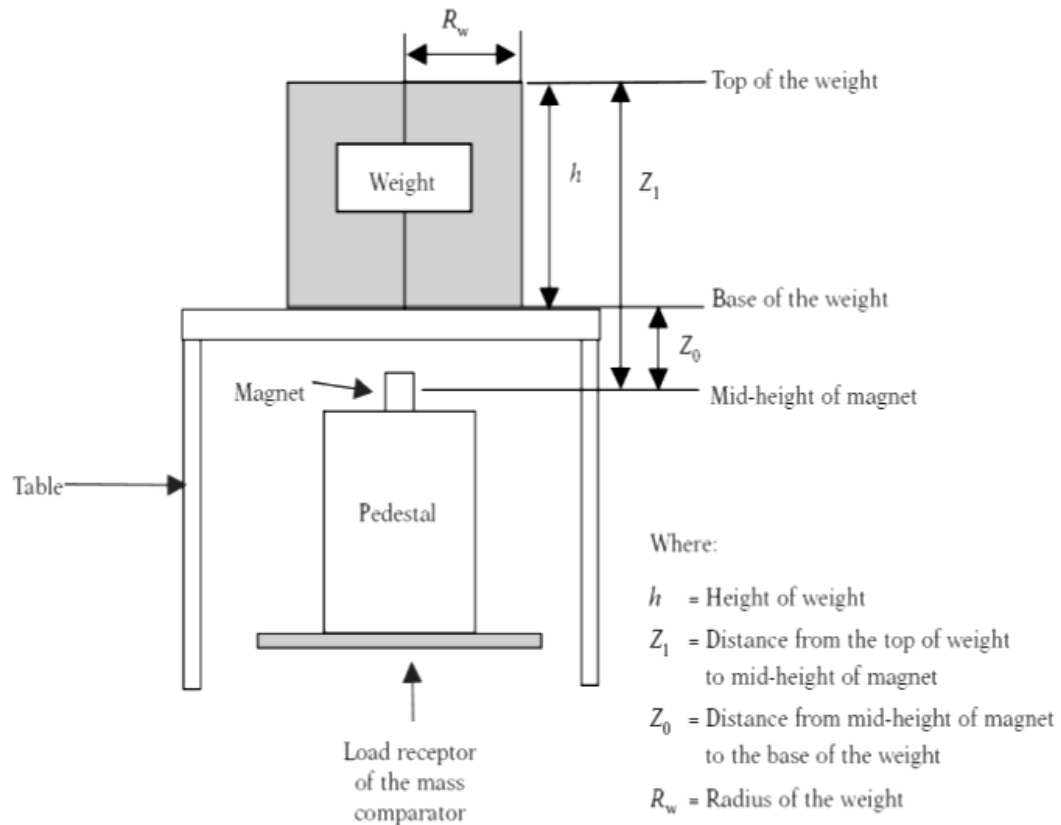




## MÉTODO DE EXTRAÇÃO (Medição da saturação magnética e remanência)



## MÉTODO DE FORÇA: BALANÇA DE PERMEABILIDADE

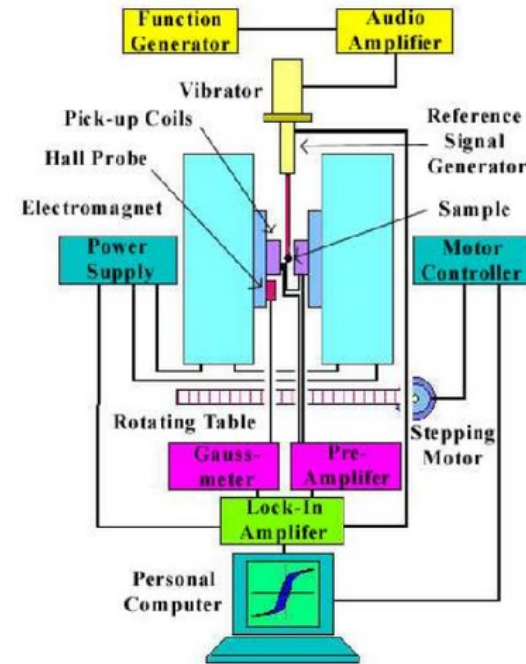
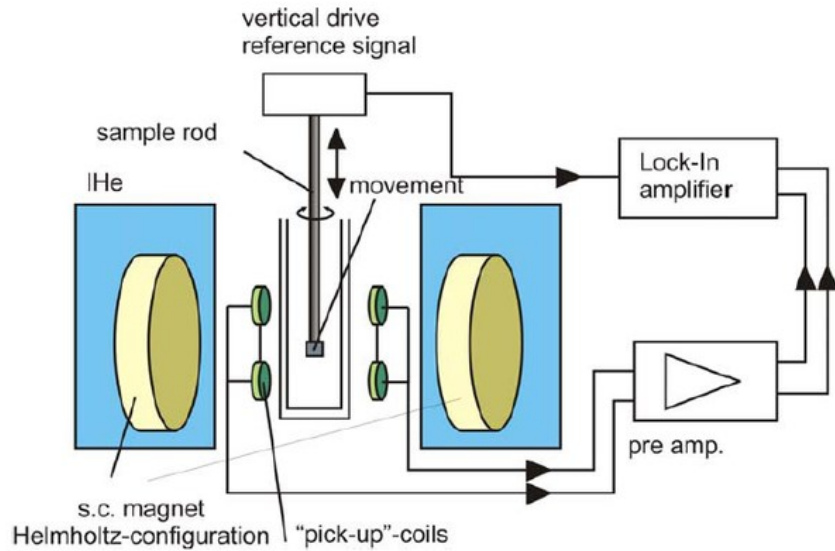


## MÉTODO INDUTIVO: HISTERESÍGRAFO

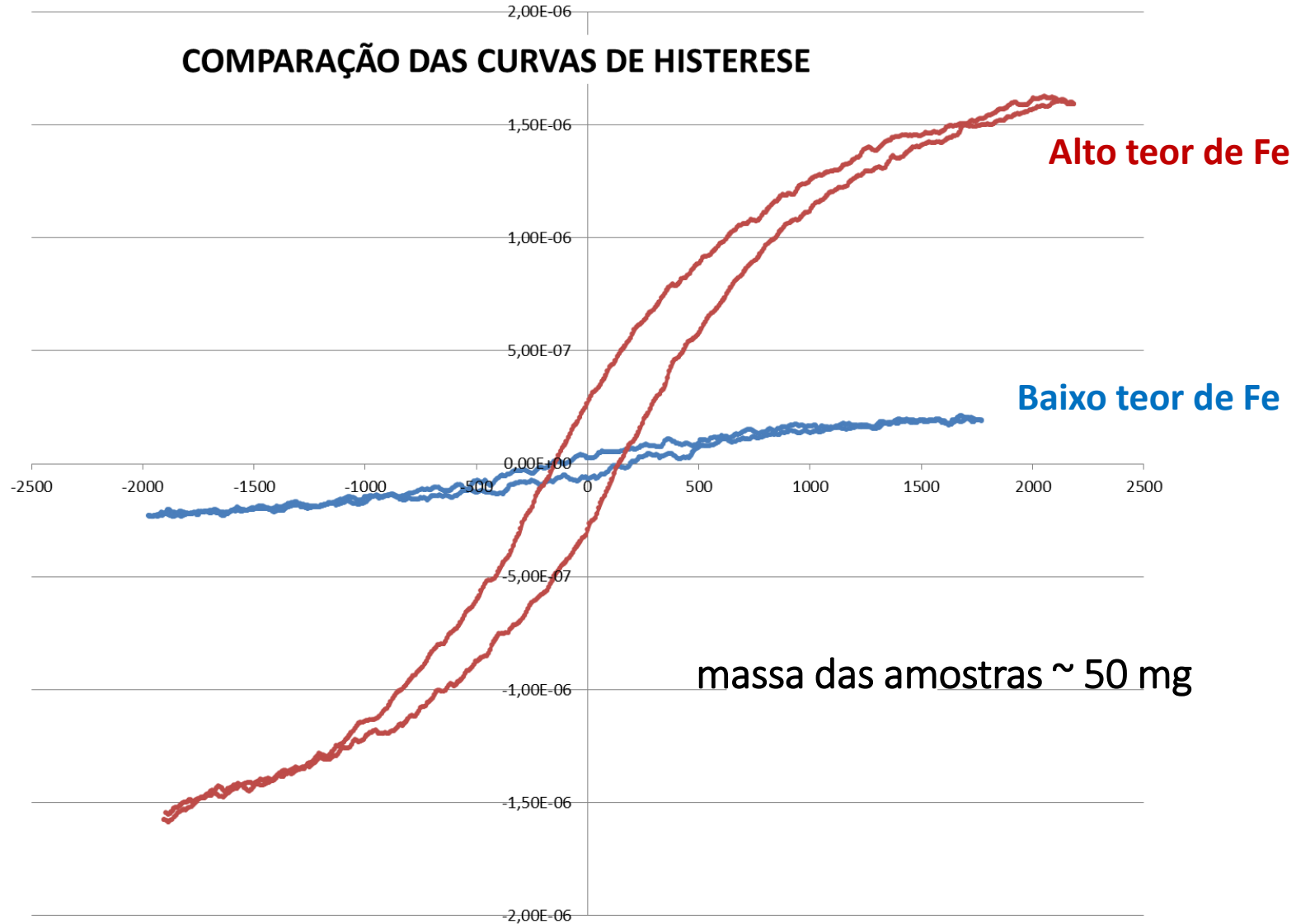




## MÉTODO VSM (Magnetômetro de amostra vibrante)



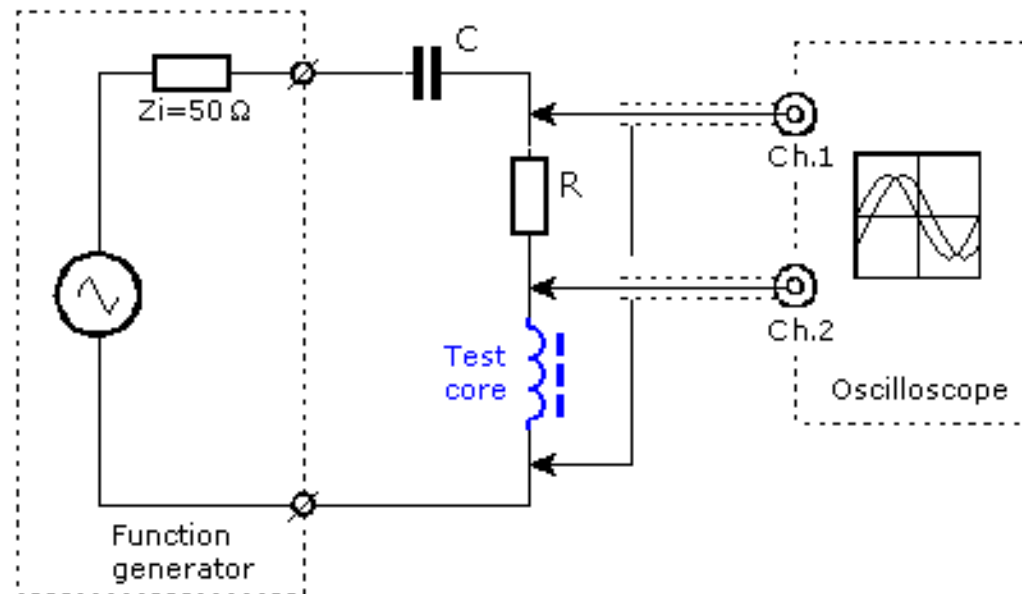
## EXEMPLO DE MEDIDAS OBTIDAS EM VSM





## MÉTODO DA PERMEABILIDADE AC

- A amostra é colocada como núcleo no centro de uma bobina, provocando alterações na sua impedância (indutância e resistência)

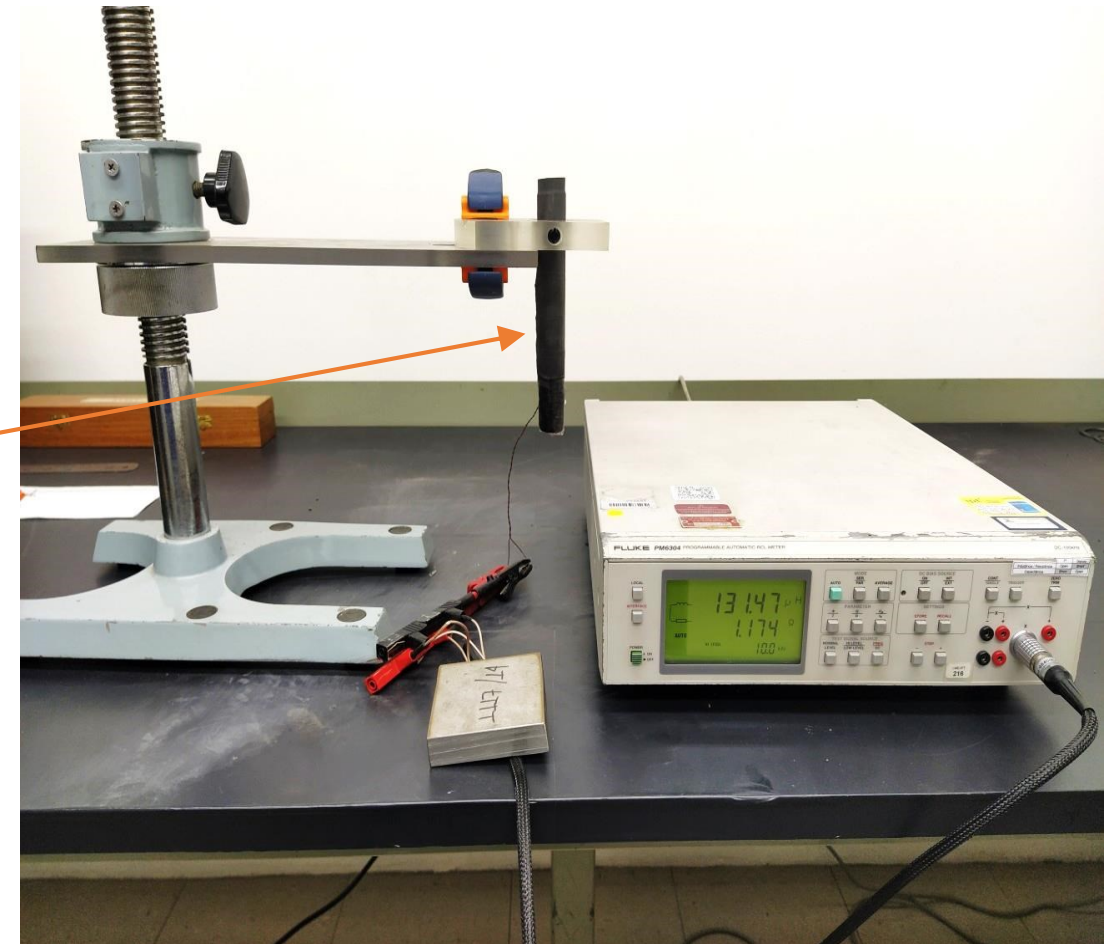


# MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

## MEDIDA DA SUSCEPTIBILIDADE ATRAVÉS DA INDUTÂNCIA

**PORTA AMOSTRAS**

**SOLENOIDE ENROLADO  
SOBRE TUBO DE ENSAIO**



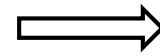
**ARRANJO EXPERIMENTAL COM MEDIDOR DE  
IMPEDÂNCIAS ( L, R )**

## RELAÇÃO ENTRE INDUTÂNCIA E SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA



Susceptibilidade magnética:

$$\chi = \frac{M}{H}$$

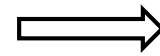


$$\chi = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\mu_r = 1 + \chi$$

Permeabilidade magnética relativa:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$



$$\mu_r = \frac{L}{L_0}$$

Susceptibilidade magnética específica:

$$\chi_e = \frac{\chi}{d}$$

$M$  – magnetização [A/m]

$H$  - campo aplicado [A/m]

$B$  - indução magnética [ T ]

$d$  - densidade [kg/m<sup>3</sup>]

$L_0$ - indutância em vazio [Henry]

$L$  - indutância com amostra [Henry]

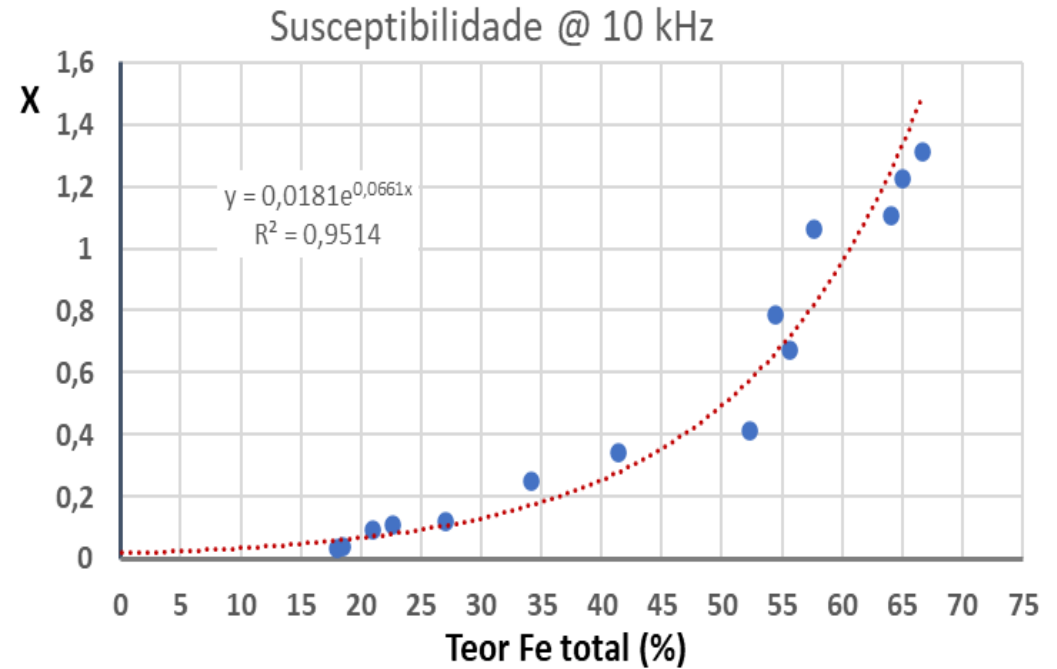
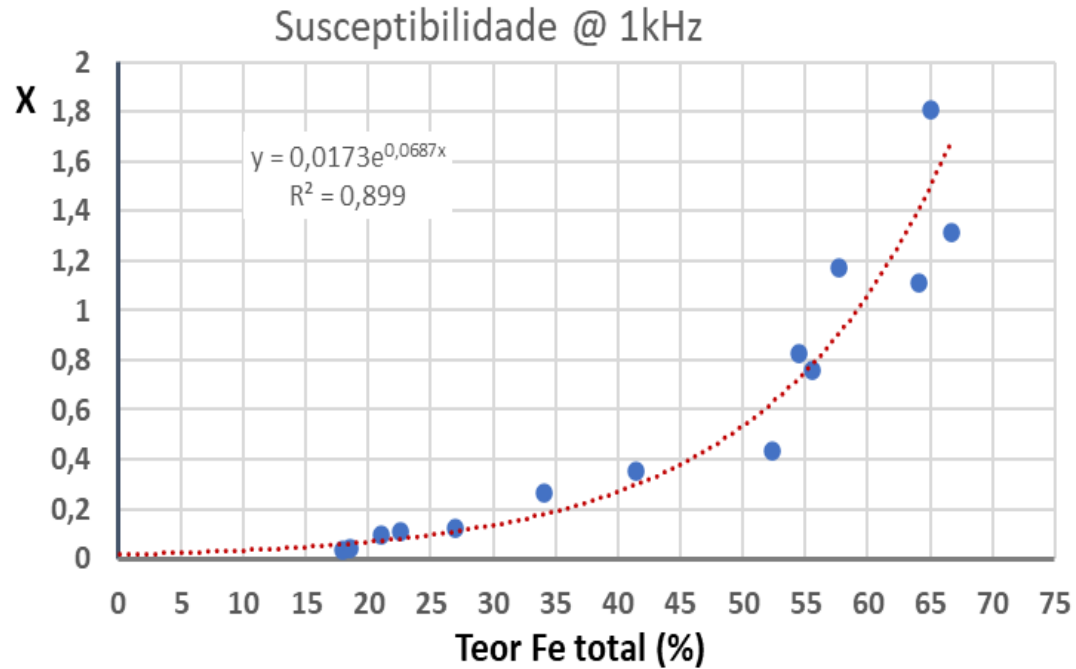
$R_0$ - resistência em vazio [ $\Omega$ ]

$R$  - resistência com amostra [ $\Omega$ ]

A susceptibilidade magnética está relacionada com a concentração e a forma de Fe presente na amostra, enquanto a perda resistiva ( $R - R_0$ ) /  $R_0$  é proporcional à sua condutividade e granulação.

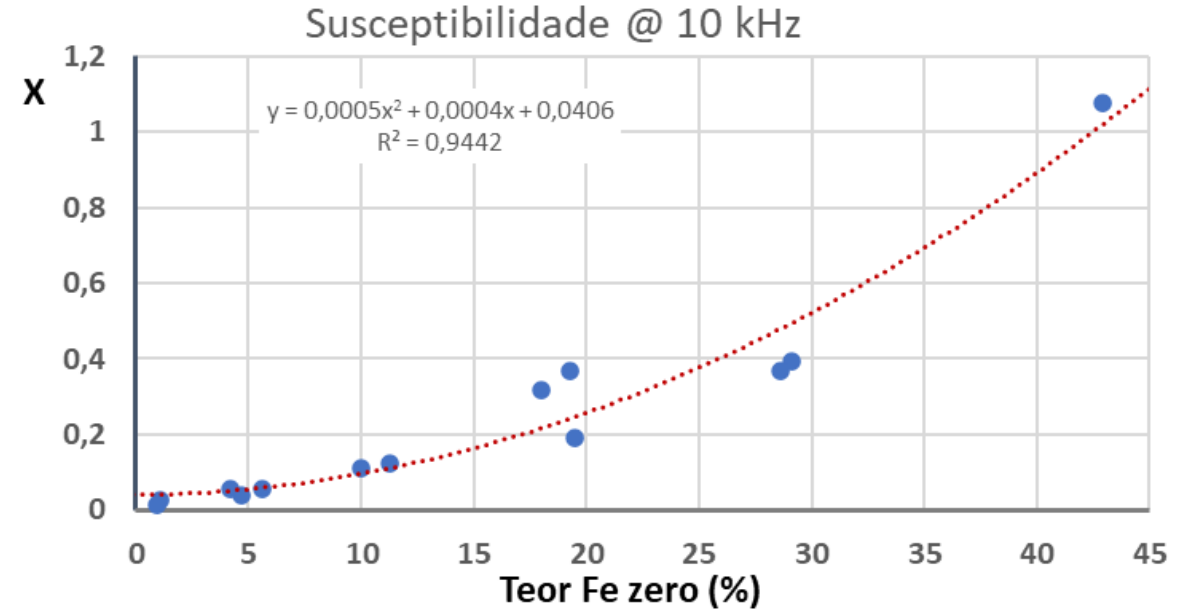
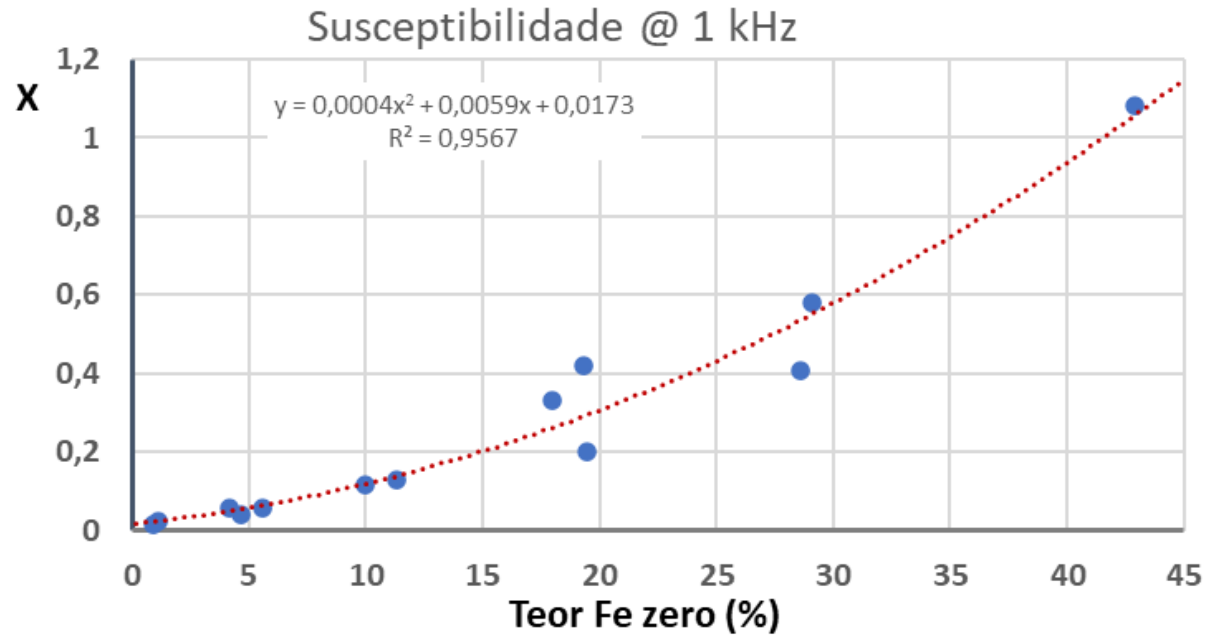
# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

## TEOR DE FERRO TOTAL



# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

## TEOR DE FERRO METÁLICO



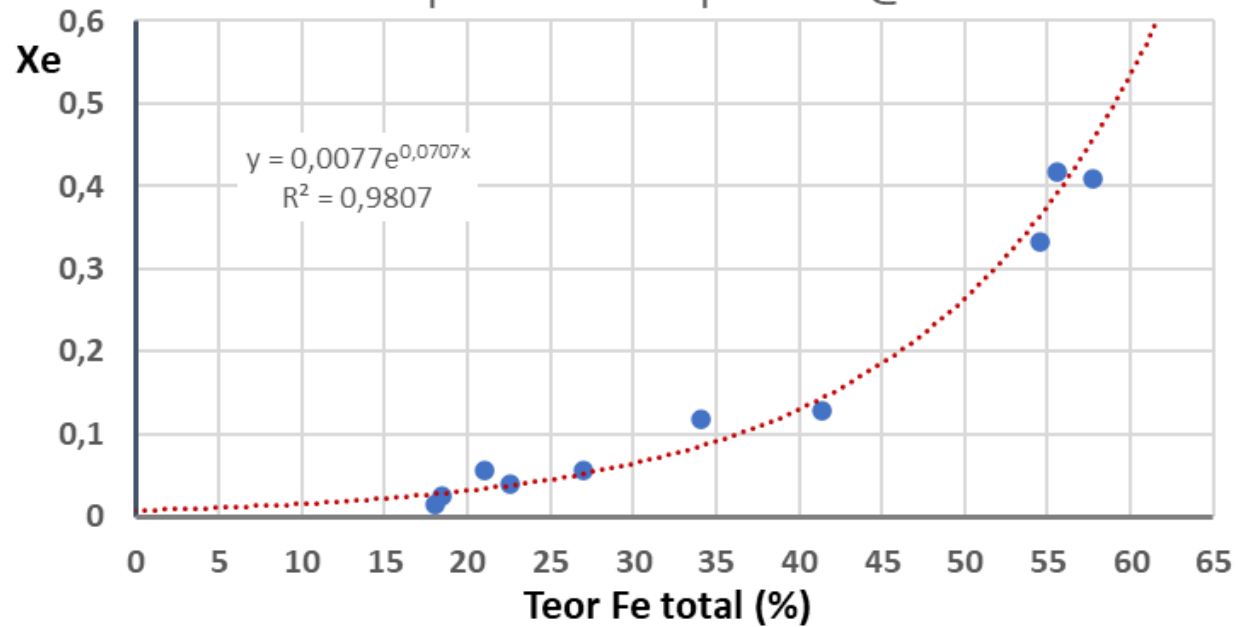
# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE ESPECÍFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA



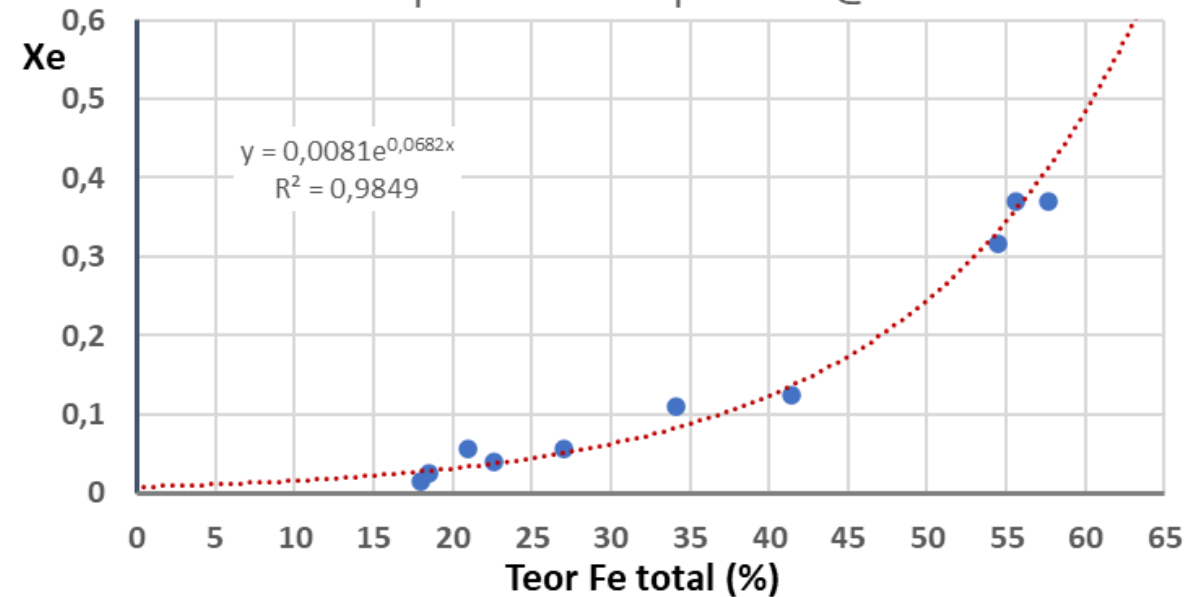
$$\chi_e = \frac{\chi}{d}$$

**TEOR DE FERRO TOTAL**

Susceptibilidade específica @ 1kHz



Susceptibilidade específica @ 10 kHz



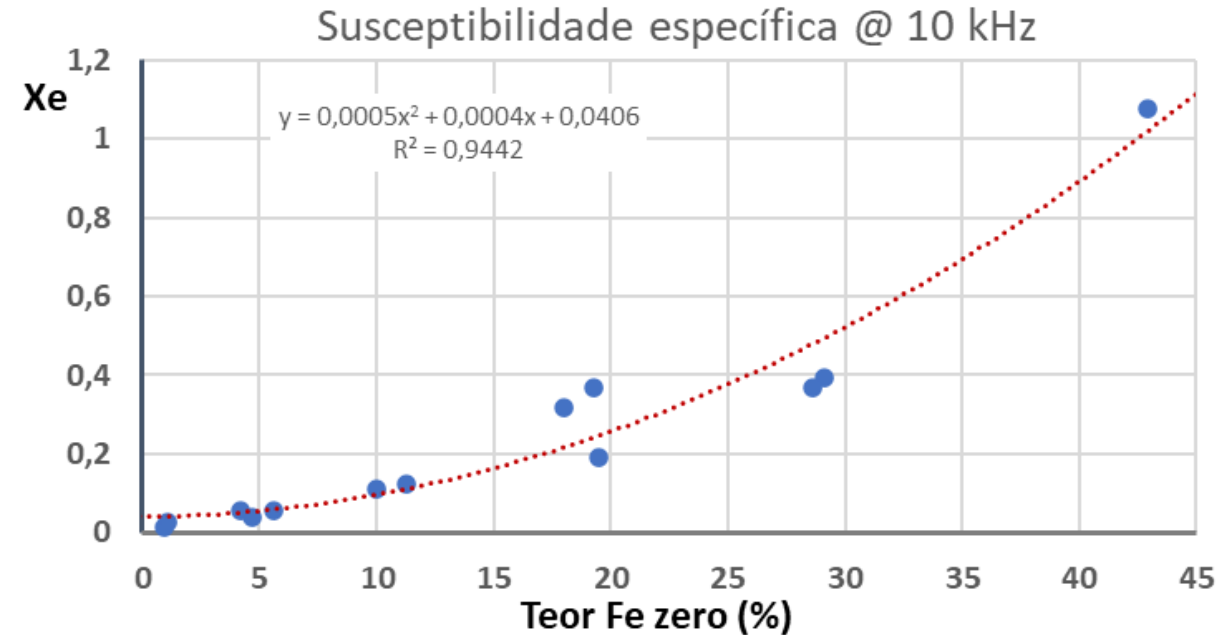
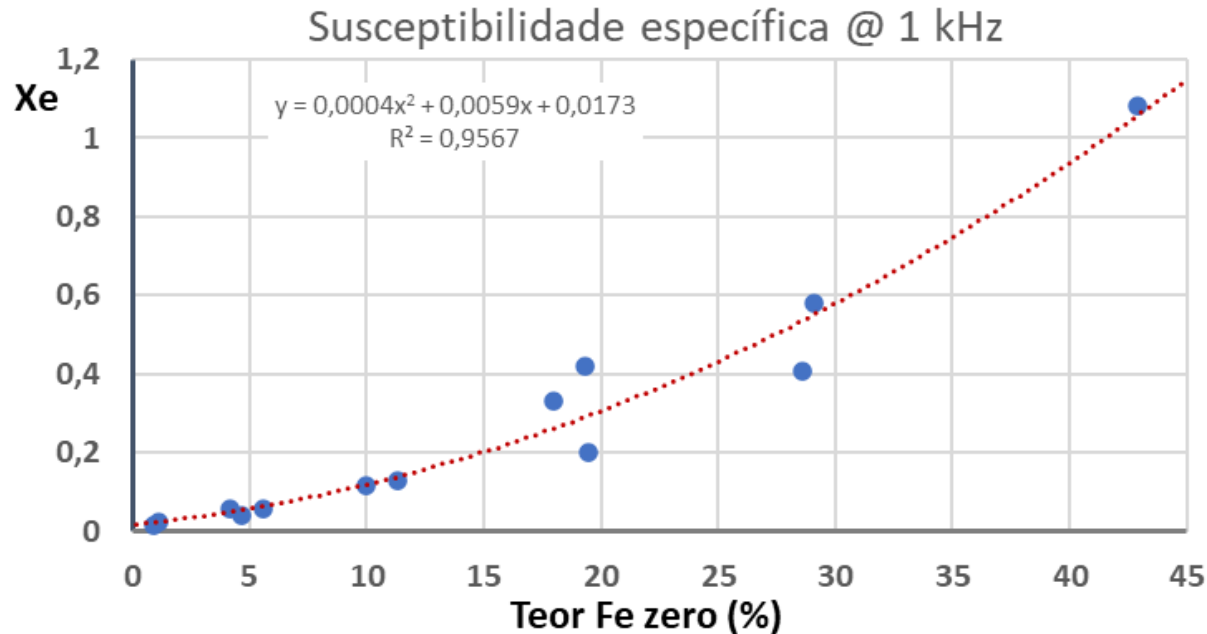


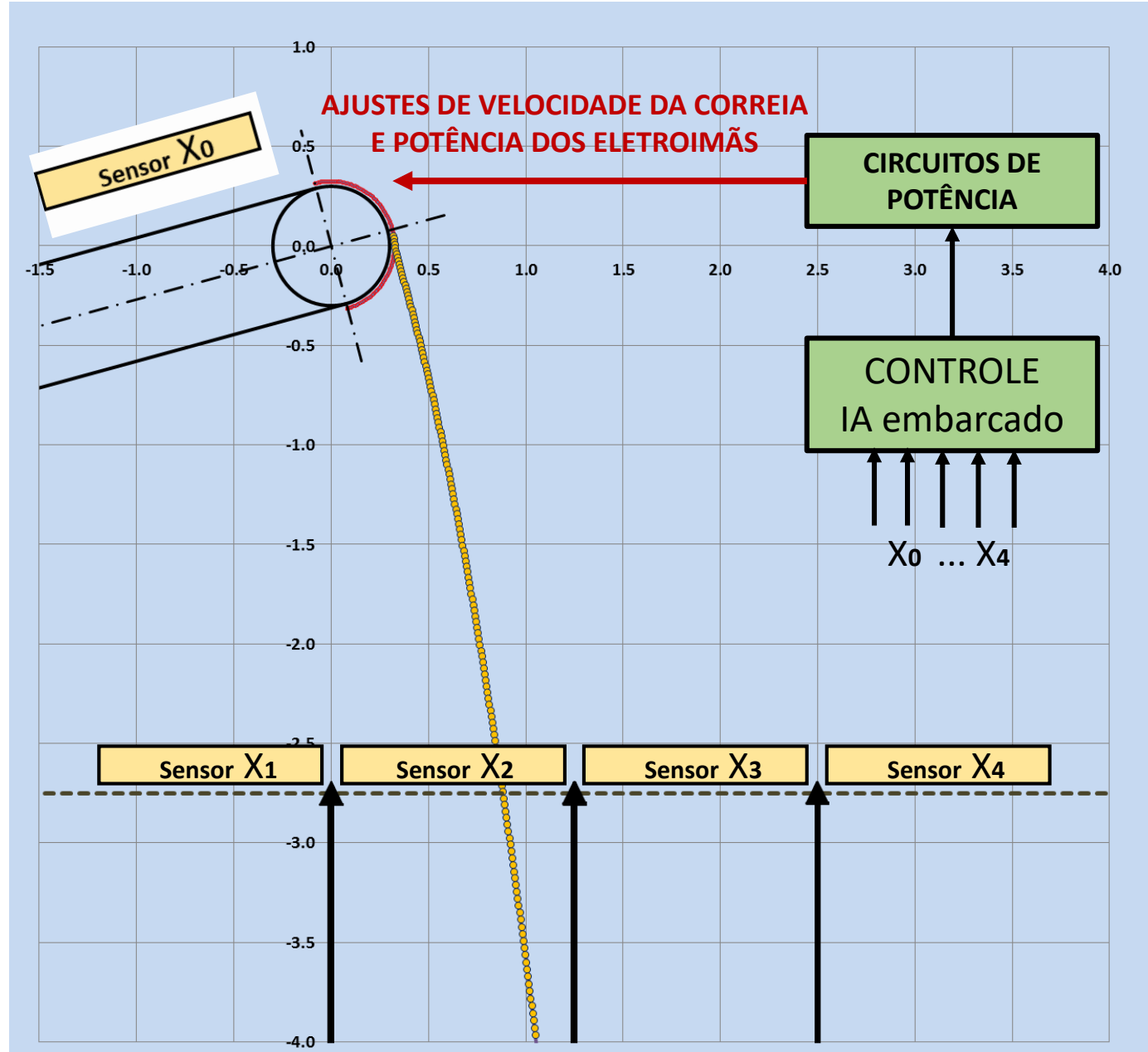
# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE ESPECÍFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA



$$\chi_e = \frac{\chi}{d}$$

## TEOR DE FERRO METÁLICO







- 1-** O controle da quantidade de Fe nos produtos de reprocessamento de escórias de aciaria permite a obtenção de melhores propriedades para aplicações específicas, permitindo um maior reaproveitamento e redução do passivo ambiental representado por estes resíduos industriais.
- 2-** A medição automatizada por meios eletrônicos é uma forma rápida e robusta de verificação dos teores de Fe.
- 3-** A susceptibilidade magnética é uma propriedade representativa da quantidade de Fe.
- 4-** Dentre as várias formas para medir as propriedades magnéticas, o método das indutâncias permite medir de forma simples e rápida a susceptibilidade magnética e pode ser implementado em campo.
- 5-** A medição em tempo real das propriedades dos fluxos presentes em plantas de reprocessamento de escórias permitirá a otimização dos parâmetros de processos com a maximização da produção e a redução de custos.



Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais

24 a 28 de Novembro de 2024 | Fortaleza – CE - Brasil



**OBRIGADO!**

Contato: **Ramon Valls Martin**

[ramon@ipt.br](mailto:ramon@ipt.br)

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)



# Caracterização magnética de escórias de aciaria para otimização de seu reaproveitamento

Martin, R. V.; Chotoli F. F.; Lima, S.S.; Augustin, E.; Pedrosa, F.J.  
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo



## ACIARIA – PRODUÇÃO DO AÇO



**FERRO GUSA  
SUCATAS**

**CaO**

**O<sub>2</sub>**

**ELEMENTOS DE LIGA**



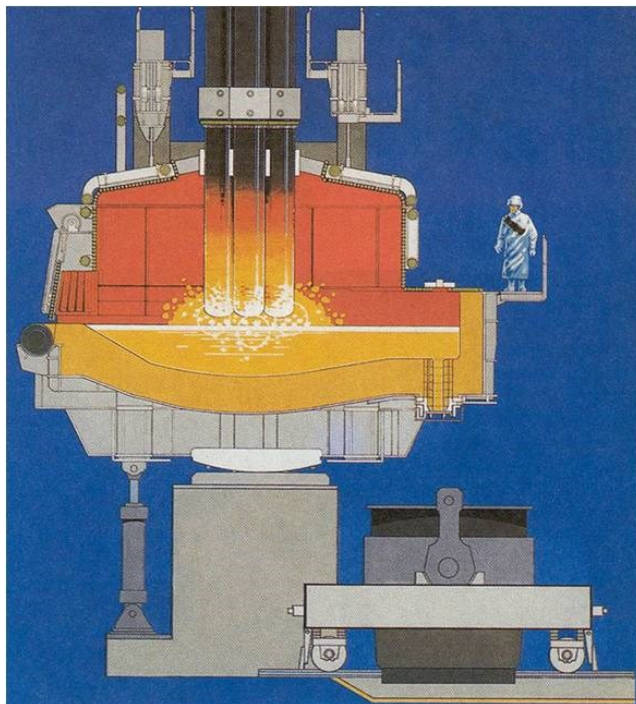
**FORNOS CONVERSORES – FORNOS PANELA**

**REFINO PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO**

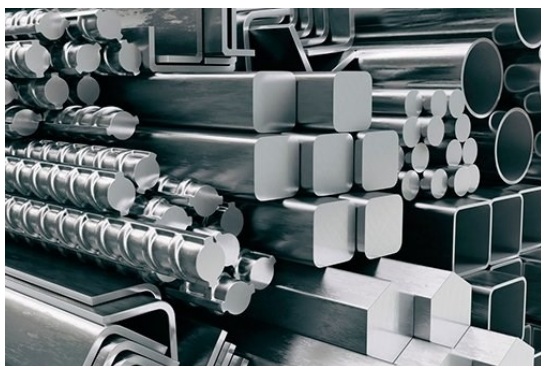
**Retirada de C, S, P, ...  
Ajuste de composição**



# ACIARIA – PRODUÇÃO DO AÇO



**PRODUTOS: AÇOS**



**RESÍDUOS:  
AGREGADOS SIDERÚRGICOS  
ESCÓRIAS**





# ESCÓRIAS DE ACIARIA



**COMPOSIÇÃO QUÍMICA COMPLEXA**  
**DEZENAS DE MILHÕES DE TONELADAS PRODUZIDAS ANUALMENTE**  
**1 tonelada de aço ↔ 0,5 tonelada de resíduos**

## EXEMPLOS DE REAPROVEITAMENTO:

- PAVIMENTAÇÃO
- INSUMO NA PRODUÇÃO DO CIMENTO
- REUTILIZAÇÃO NA ACIARIA
- CONSTRUÇÃO CIVIL
- CORRETIVO DE SOLO E FERTILIZANTE
- PREPARAÇÃO DE SUBSTRATOS FERROVIÁRIOS

**PILHAS (MONTANHAS DE ESCÓRIAS) SE ACUMULAM EM PÁTIOS DAS EMPRESAS SIDERÚRGICAS POR FALTA DE DESTINAÇÃO ECONOMICAMENTE VIÁVEL (DEMANDA INSUFICIENTE)**

**ENORME PASSIVO AMBIENTAL!**

# TESTE EM PLANTA PILOTO DE PROCESSAMENTO DE ESCÓRIAS A SECO



**QUANTIDADE: Batch único de 60 toneladas**

## EQUIPAMENTOS :

- SECADORES
- ESTEIRAS DE TRANSPORTE
- SEPARADORES MAGNÉTICOS
- PENEIRAS
- TRITURADORES / MOINHOS
- FILTROS

Material de entrada	Fluxos
Escórias 1 e 2	Alimentação
	Fração grossa
	Fração média
	Fração fina
	Pó metálico
	Pó não metálico
	Pó coletado no despoeiramento



FLUXOS DE  
SAÍDA

# TESTE EM PLANTA PILOTO DE PROCESSAMENTO DE ESCÓRIAS



**SECADOR**



**PENEIRAS**



**SEPARADORES MAGNÉTICOS**



**BAIAS COM OS PRODUTOS DO  
PROCESSAMENTO**

## EXEMPLO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA APÓS PROCESSAMENTO DAS ESCÓRIAS

Fluxos	Composição química (%)										
	Fe total	Fe met	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Fração grossa	<b>65,0</b>	<b>29,1</b>	<b>44,3</b>	<b>1,8</b>	<b>12,4</b>	<b>0,3</b>	<b>4,4</b>	<b>3,2</b>	<b>2,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
Fração média	<b>57,7</b>	<b>28,6</b>	<b>34,9</b>	<b>2,7</b>	<b>16,7</b>	<b>0,7</b>	<b>6,1</b>	<b>4,8</b>	<b>3,3</b>	<b>1,4</b>	<b>0,5</b>
Fração fina	<b>54,5</b>	<b>18,0</b>	<b>43,0</b>	<b>4,3</b>	<b>18,4</b>	<b>0,2</b>	<b>6,7</b>	<b>3,1</b>	<b>4,1</b>	<b>1,5</b>	<b>0,6</b>
Pó metálico	<b>66,7</b>	<b>47,0</b>	<b>25,4</b>	<b>0,0</b>	<b>11,6</b>	<b>0,5</b>	<b>4,5</b>	<b>5,3</b>	<b>3,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,4</b>
Pó não metálico	<b>21,0</b>	<b>4,2</b>	<b>17,2</b>	<b>4,8</b>	<b>34,2</b>	<b>0,7</b>	<b>13,3</b>	<b>5,8</b>	<b>11,0</b>	<b>2,0</b>	<b>1,0</b>
Pó coletado no despoeiramento	<b>18,5</b>	<b>1,1</b>	<b>15,6</b>	<b>7,4</b>	<b>38,0</b>	<b>0,5</b>	<b>14,3</b>	<b>9,1</b>	<b>10,4</b>	<b>2,6</b>	<b>1,2</b>
Alimentação (retrocalculada)	<b>34,1</b>	<b>10,0</b>	<b>25,9</b>	<b>5,5</b>	<b>29,2</b>	<b>0,4</b>	<b>10,9</b>	<b>6,5</b>	<b>7,8</b>	<b>2,1</b>	<b>0,9</b>

## TIPOS DE SEPARADORES PARA OPERAÇÃO A SECO

-Tambor

-Suspenso com correias cruzadas

-Polias ou cilindros motores de correia

(Opção interessante pela flexibilidade de operação, custo e eficiência)



# MODELAGEM MATEMÁTICA DE SEPARADORES MAGNÉTICOS



Uso de modelos matemáticos simplificados dos fenômenos envolvidos

## Aspectos considerados:

**Parâmetros construtivos do separador** (dimensional, cinéticos)

**Forças atuantes** (magnéticas, inerciais, atrito, aerodinâmicas, gravitacionais)

**Características do material** (granulometria, densidade, propriedades magnéticas)

**Características do campo magnético do separador** (intensidade e distribuição espacial)

Solução analítica dos modelos e apresentação dos resultados em planilha interativa

## ENTRADAS:

AMOSTRA	
d (mm)=	10
Dens. (kg/m <sup>3</sup> )=	4000
Suscep. (adm) =	0.5
Forma (esf=1, cubo=2)	1
Fator empilhamento =	0.5
MECÂNICA	
Incl.(°) =	15
n (rpm)=	110
D polia (mm)=	600
h (mm) =	20
(esp. Correia)	
L (mm) =	400
(largura correia)	
Coef. Atrito (adm) =	0.5
(correia-carga)	
CLASSIFICADOR	
Muito magn. (m) =	0
Pouco magn. (m) =	1.25
Não magn. (m) =	2.5
H base (m) =	2.75
AERODINÂMICA	
C aero=	0.5
Dens. ar (Kg/m <sup>3</sup> )=	1
V vento (m/s) =	5
Âng. Vento (°)=	0
MAGNETISMO	
B (G) =	3000
expo decaim =	4
cte decaim =	10

## SAÍDAS:

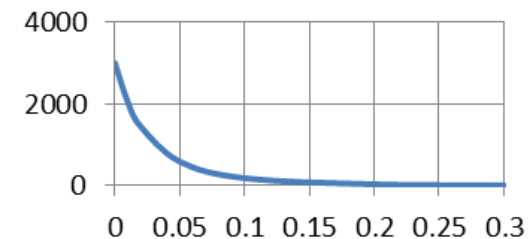
Ângulo decolagem=	120.0
Ângulo escorregamento =	

x base (m) =	-1.1
MAGNETISMO	
Intenso	X
Médio	
Fraco	
Nulo	

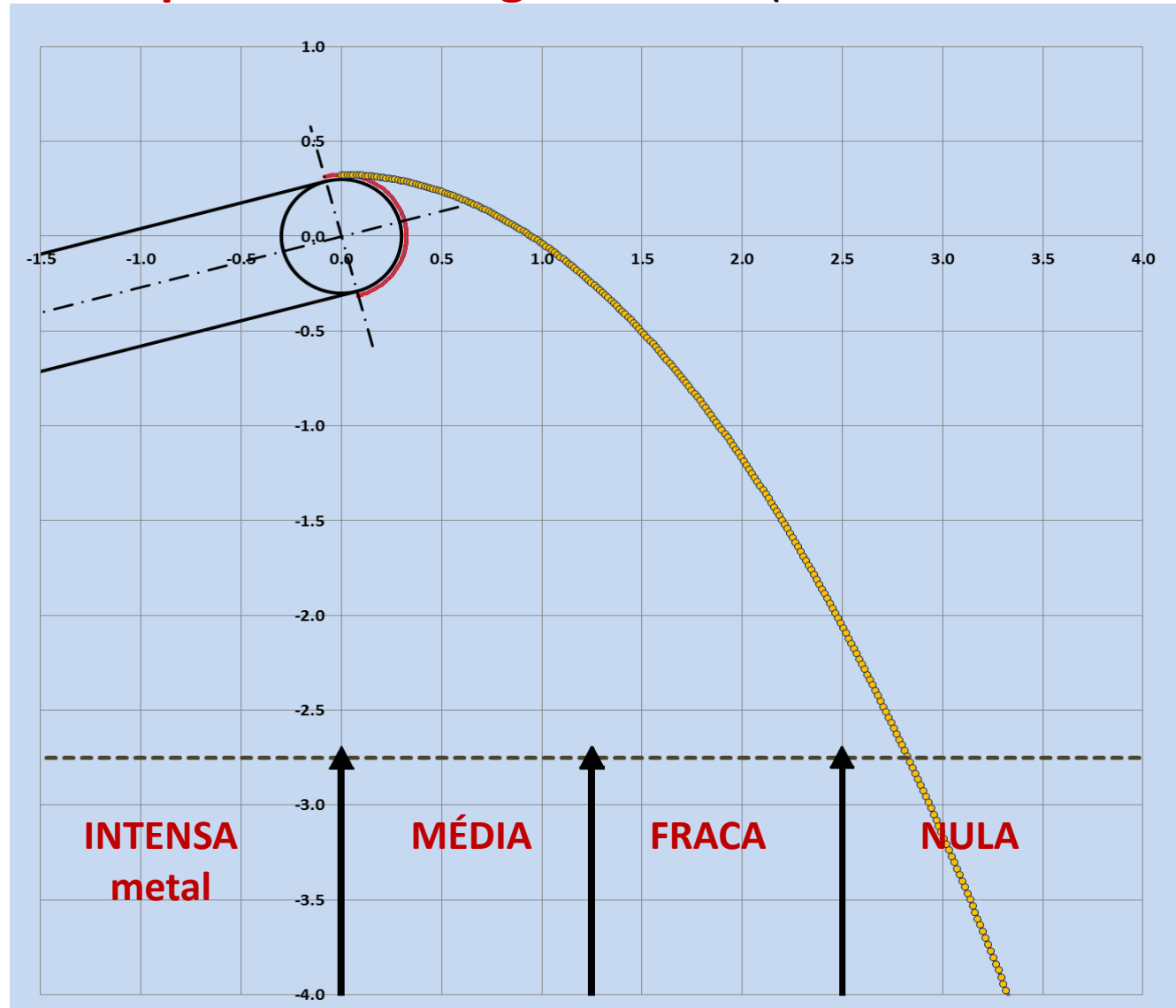
Vazão média (kg /s) =	29.9
Vazão média (ton /h) =	107.8
(monocamada)	



**Decaimento da intensidade do campo magnético a partir da superfície da polia do separador**

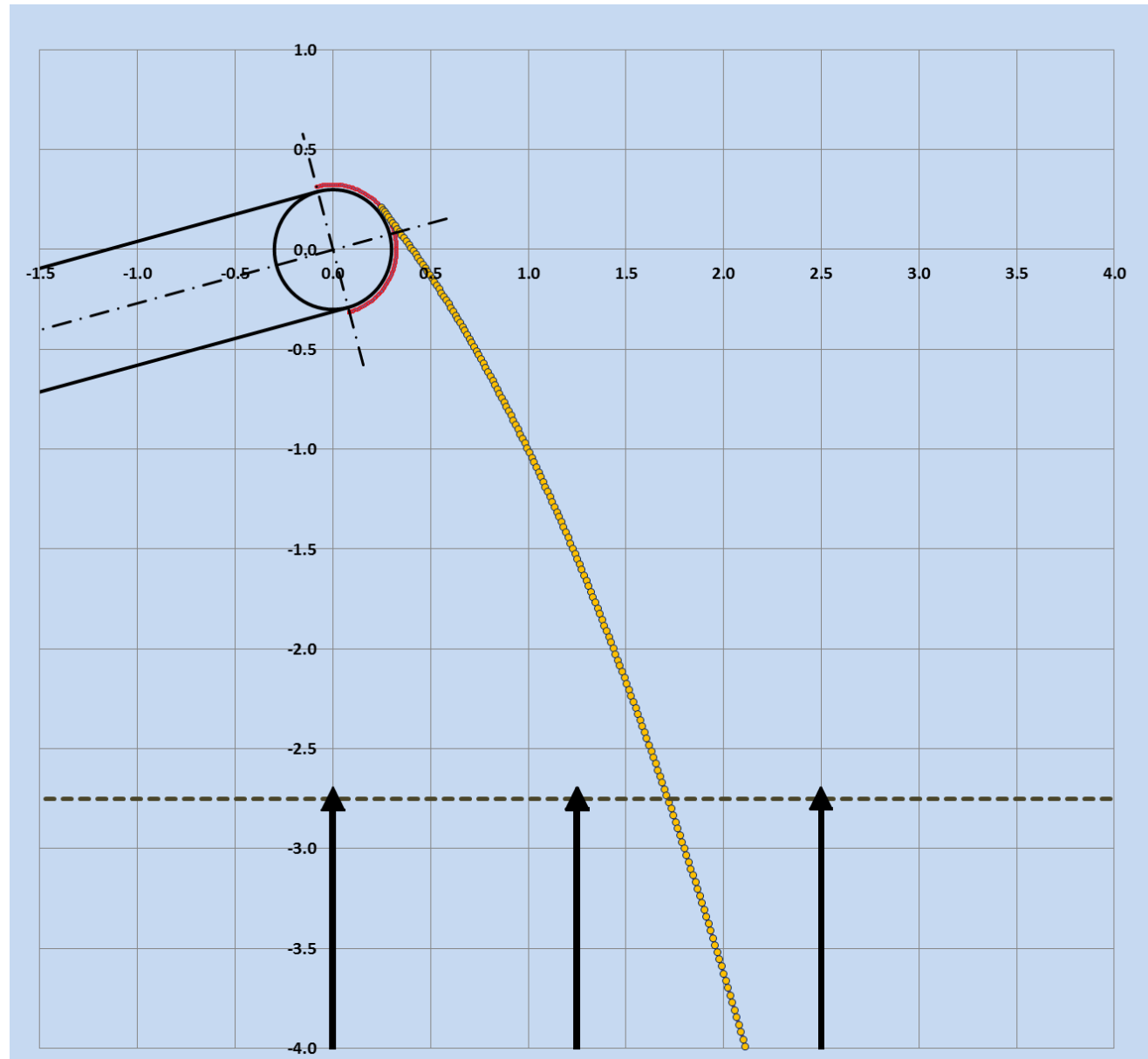


# SAÍDA GRÁFICA - Exemplo de variação de um único parâmetro: **Susceptibilidade magnética = 0** (material “não magnético”)

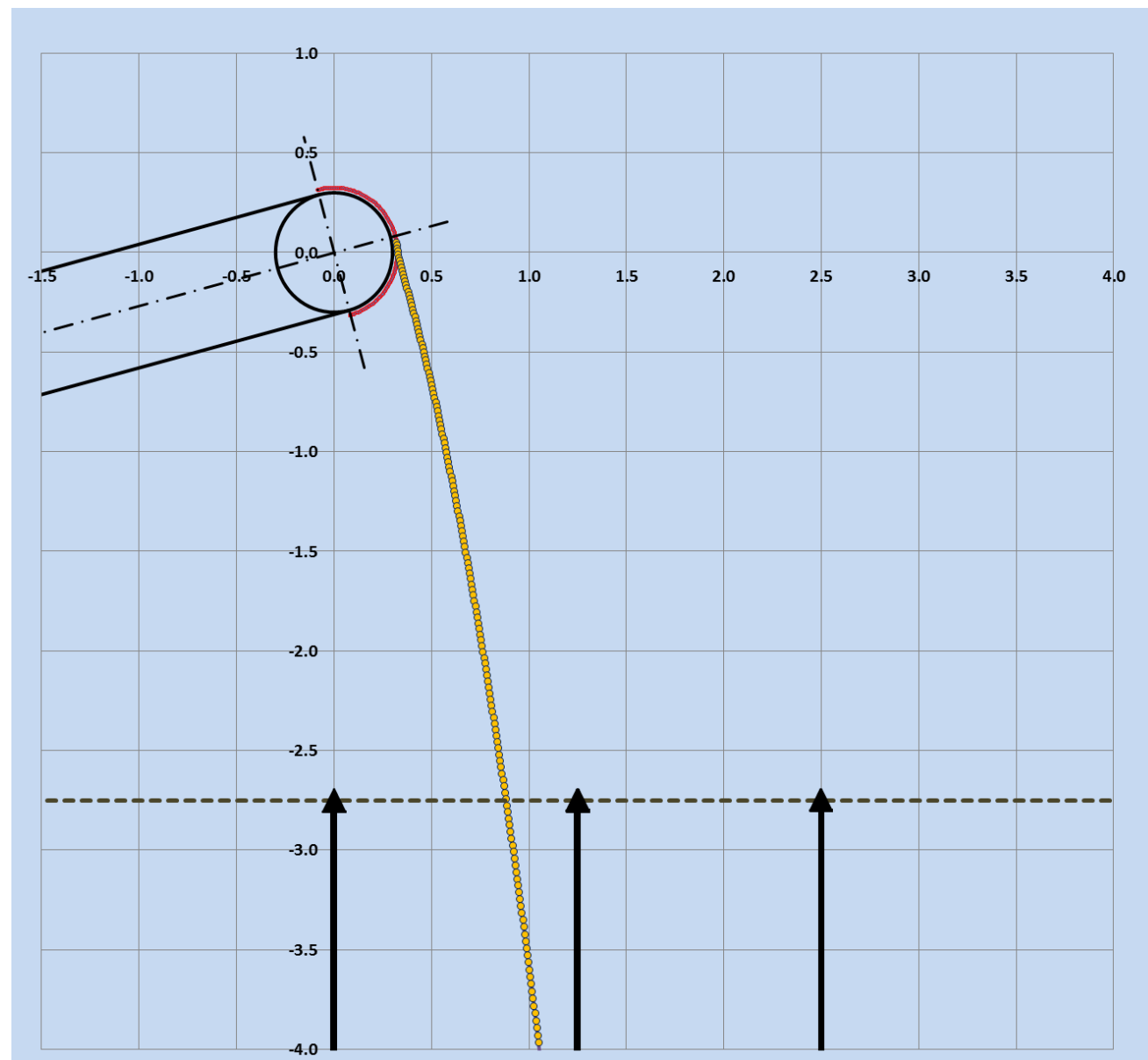


**CLASSIFICADORES POR MAGNETIZAÇÃO ( Teor de Fe)**

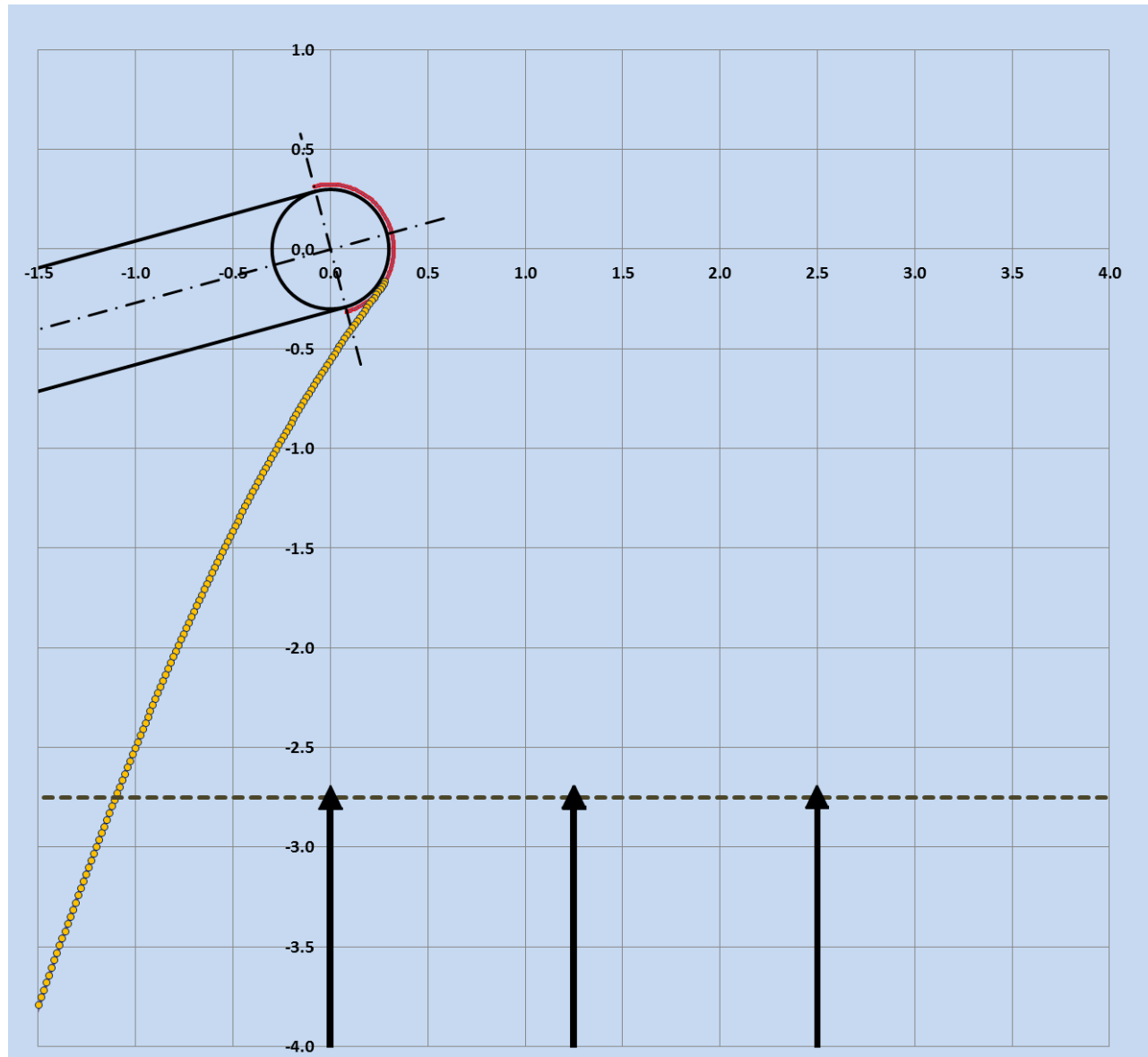
**susceptibilidade = 0,38**



**susceptibilidade = 0,43**

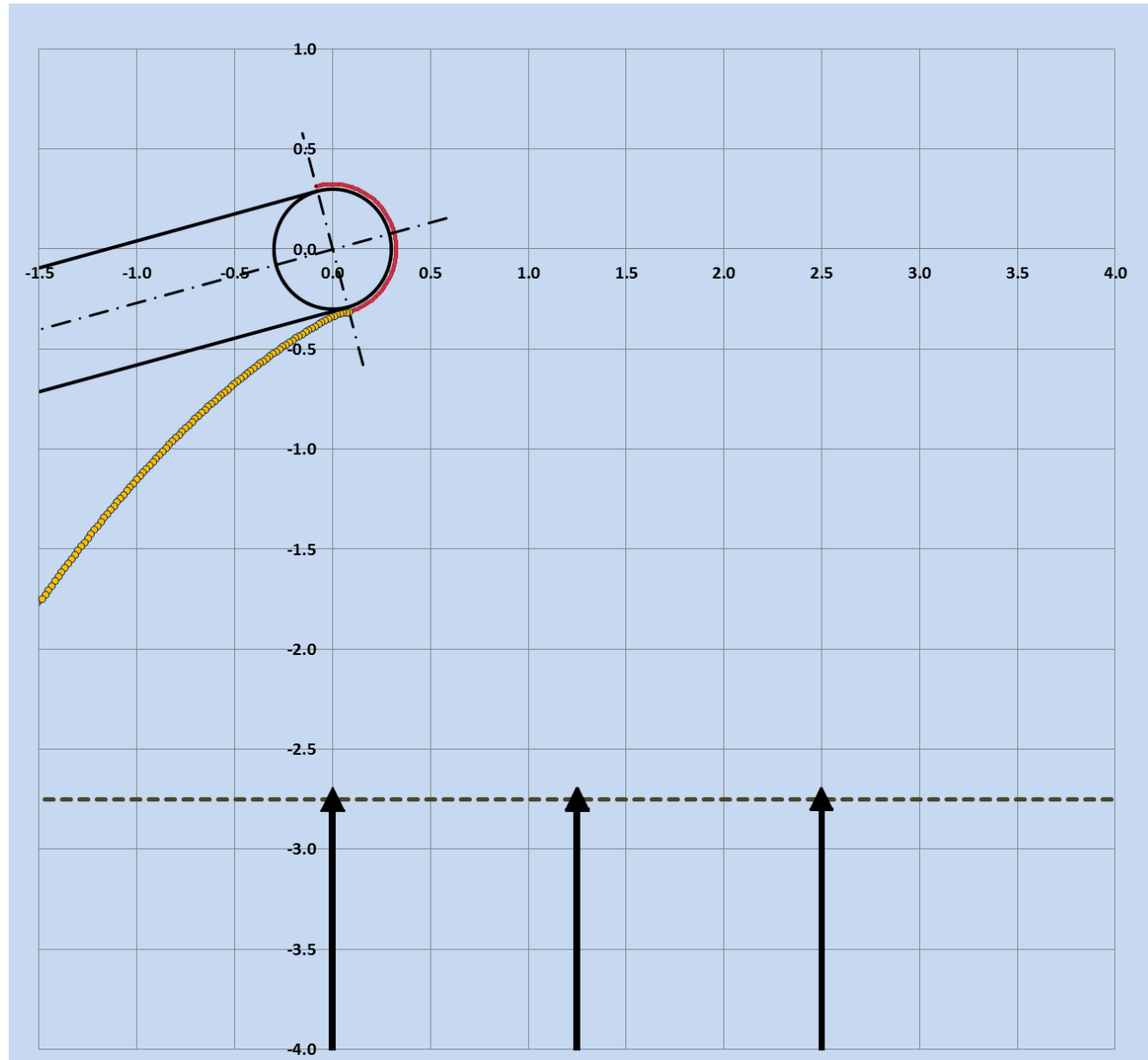


**susceptibilidade = 0,5**





**susceptibilidade = 0,7**



# MISTURA DE MATERIAIS

AMOSTRA 1 (amarela)		AMOSTRA 2 (azul)	
d (mm)=	20	d (mm)=	10
Dens. (kg/m3)=	2500	Dens. (kg/m3)=	2500
Suscep. (adm) =	0	Suscep. (adm) =	0,5
Forma (esf=1, cubo=2)	1	Forma (esf=1, cubo=2)	1
Fator empilhamento =	0,3	Fator empilhamento =	0,3

## MECÂNICA

Incl.(°) =	15
n (rpm)=	90
D polia (mm)=	500
h (mm) =	10
(esp. Correia)	
L (mm) =	200
(largura correia)	
Coef. Atrito (adm) =	0,5
(correia-carga)	

## CLASSIFICADOR

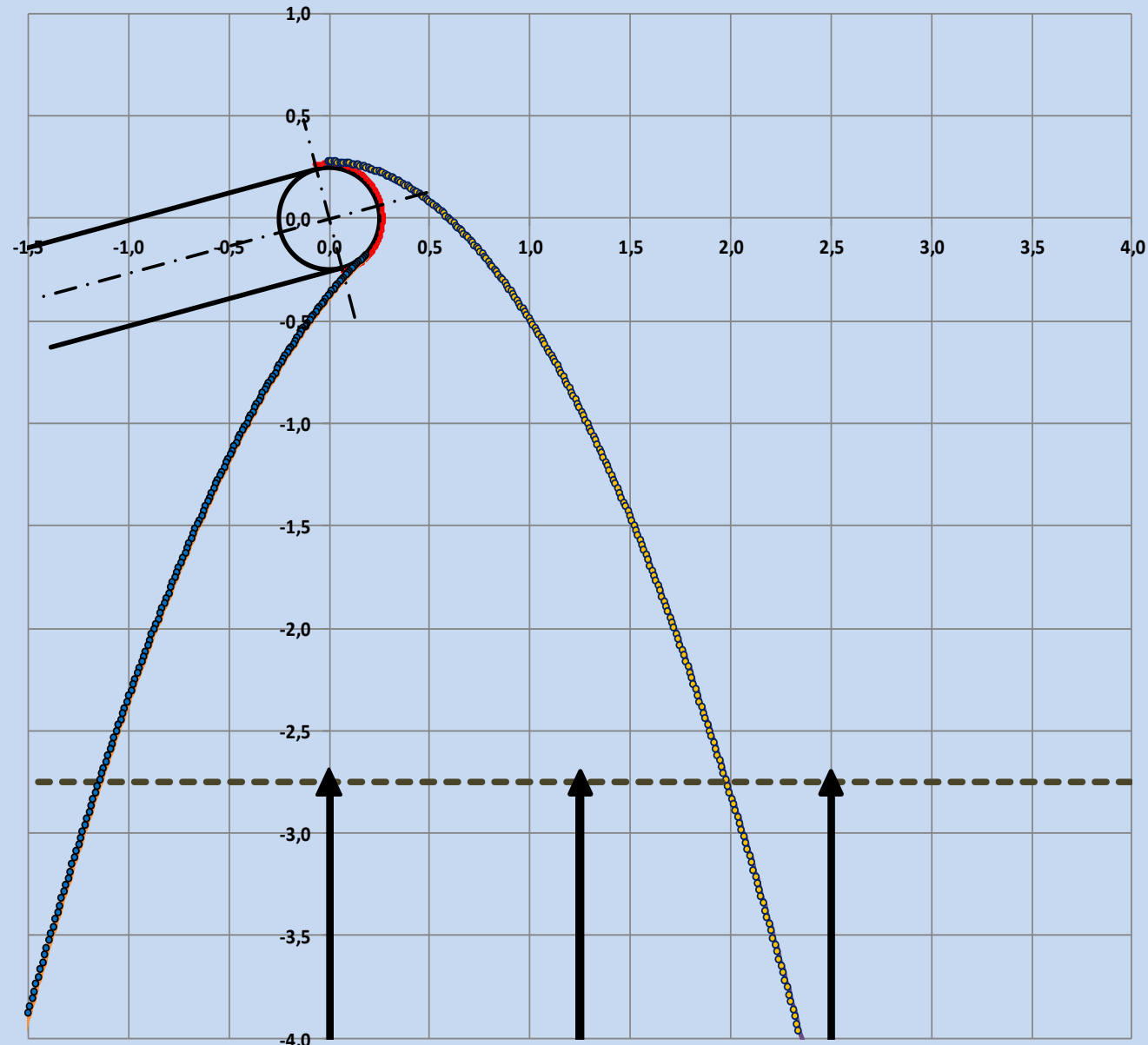
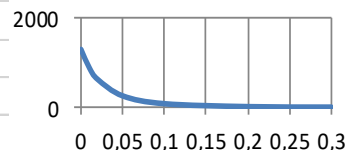
Muito magn. (m) =	0
Pouco magn. (m) =	1,25
Não magn. (m) =	2,5
H base (m) =	2,75

## AERODINÂMICA

C aero=	0,5
Dens. ar (Kg/m3)=	1
V vento (m/s) =	0
Âng. Vento (°)=	0

## MAGNETISMO

B (G) =	1300
expo decaim =	4
cte decaim =	10



Ângulo decolagem= 0,0

Ângulo escorregamento =

x base (m) = 2,0

## MAGNETISMO

Intenso

Médio

Fraco X

Nulo

Vazão média (kg /s) = 7,6

Vazão média (ton /h) = 27,5  
(monocamada)



## **MOTIVAÇÃO:**

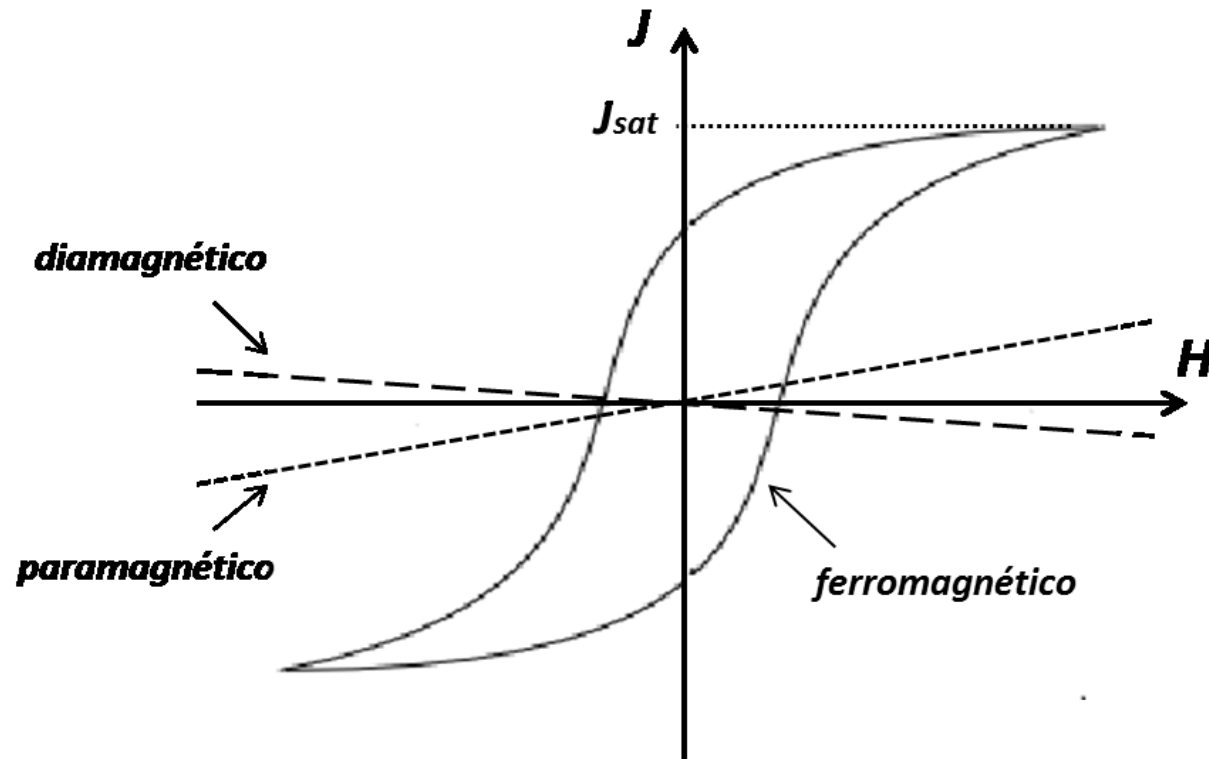
Otimizar parâmetros de operação de separadores magnéticos para obtenção da máxima eficiência

**Parâmetros:** Intensidade de campo (ajuste de corrente), velocidade de rotação de tambores, taxa de alimentação de material

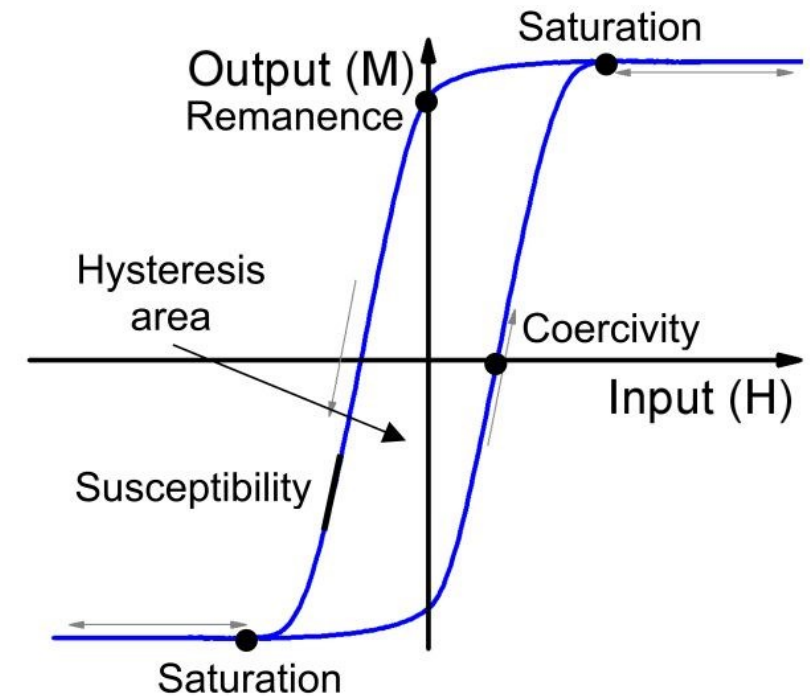
## **Exemplo de efeitos de ajustes inadequados:**

- Corrente excessiva no magnetizador => entupimento de grelhas
- Corrente insuficiente no magnetizador => descarte de material ainda rico em Fe

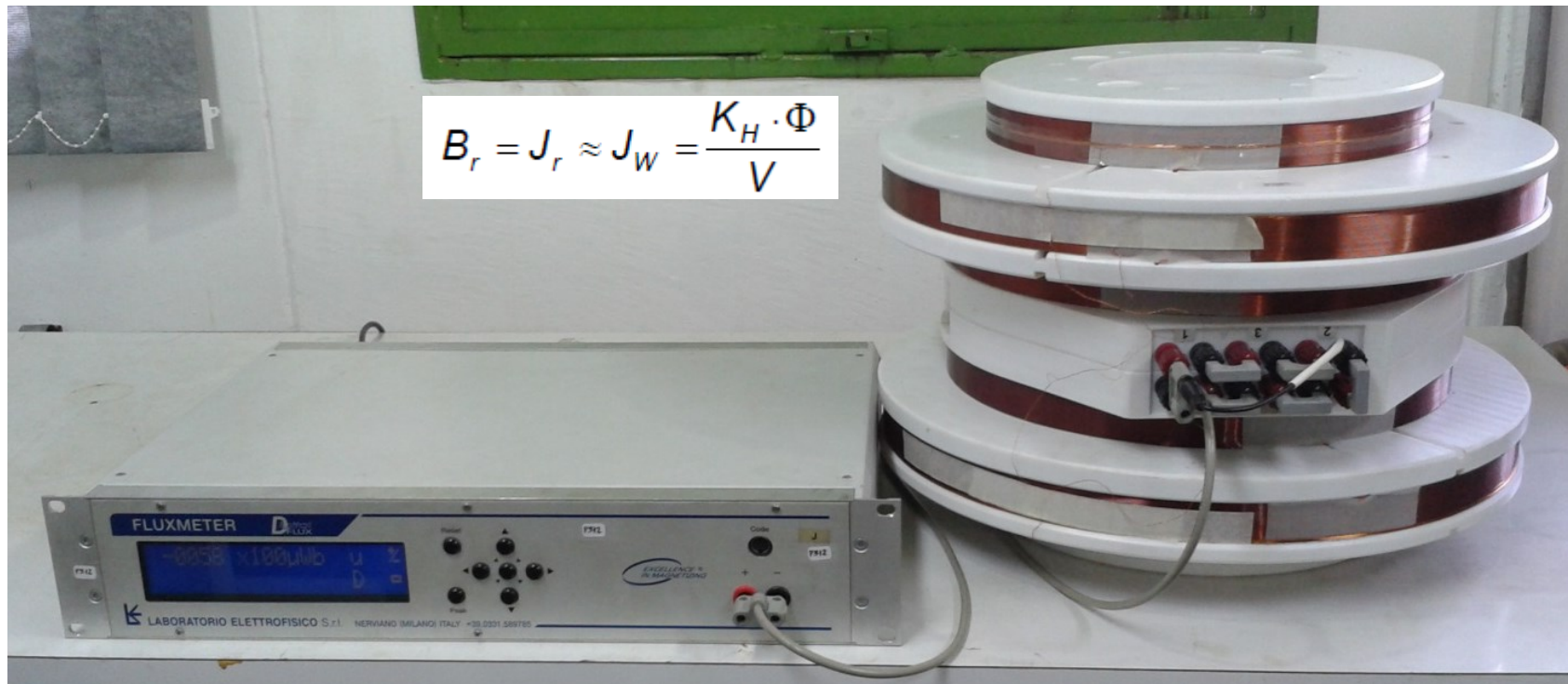
## CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS



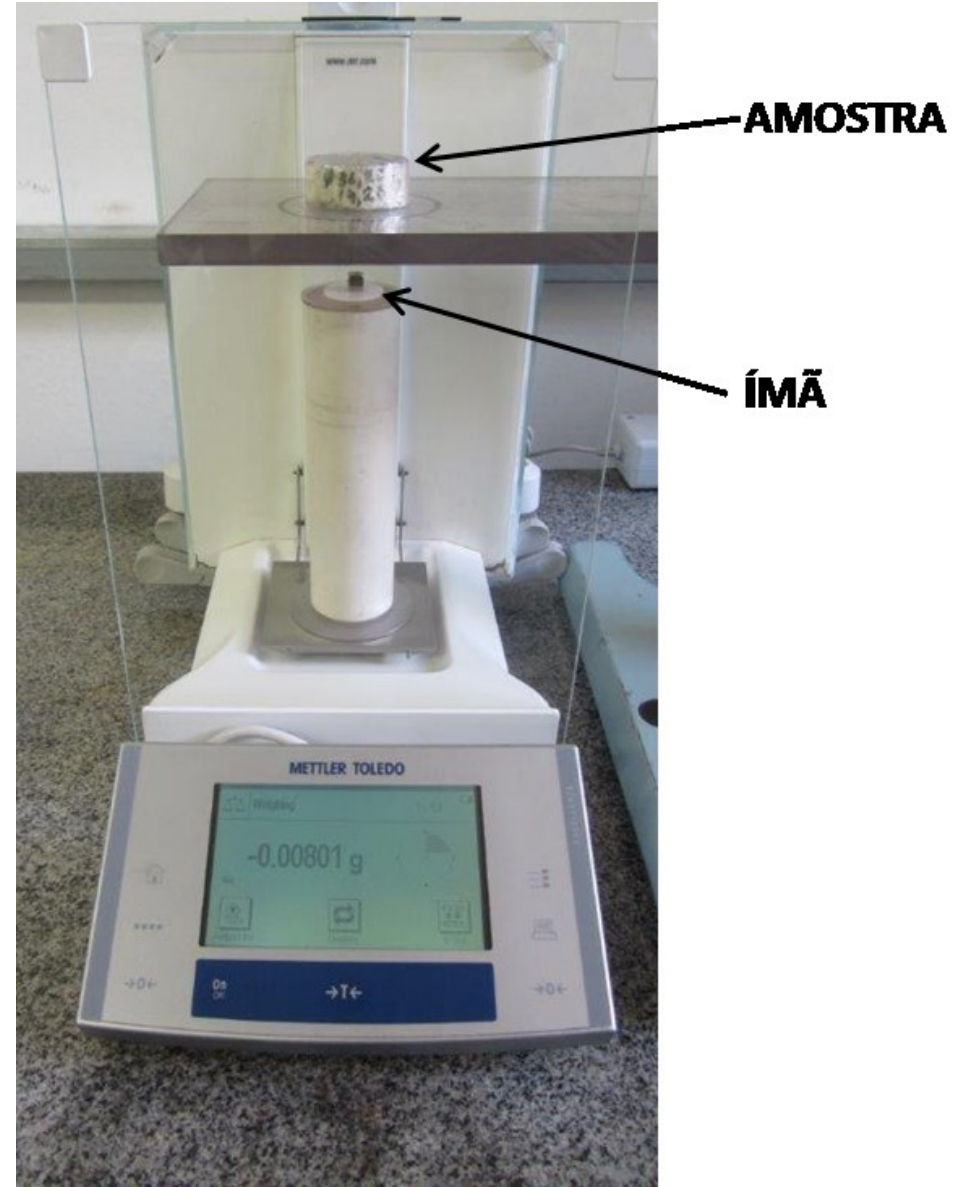
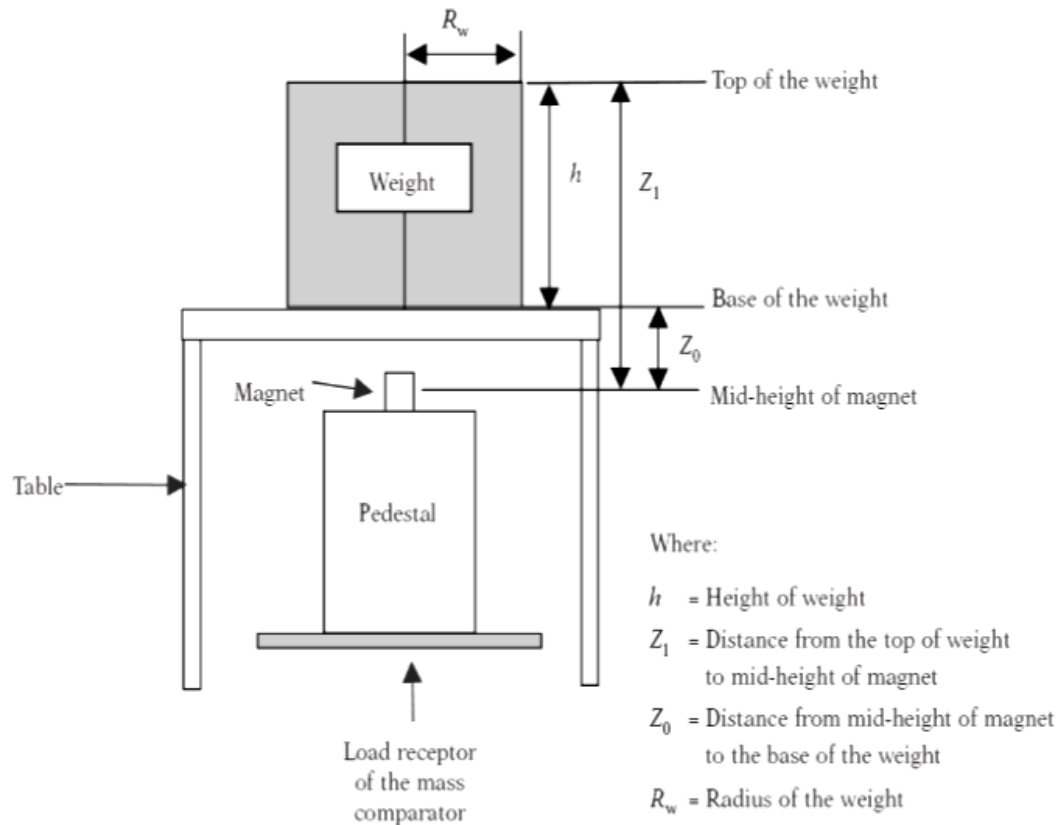
## PROPRIEDADES



## MÉTODO DE EXTRAÇÃO (Medição da saturação magnética e remanência)



## MÉTODO DE FORÇA: BALANÇA DE PERMEABILIDADE

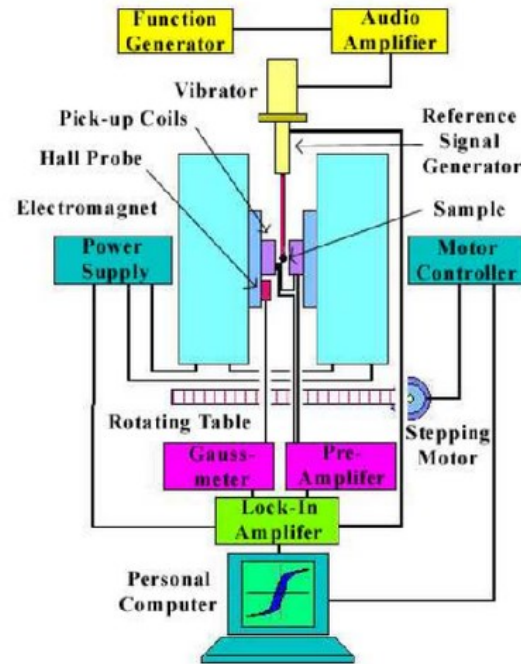
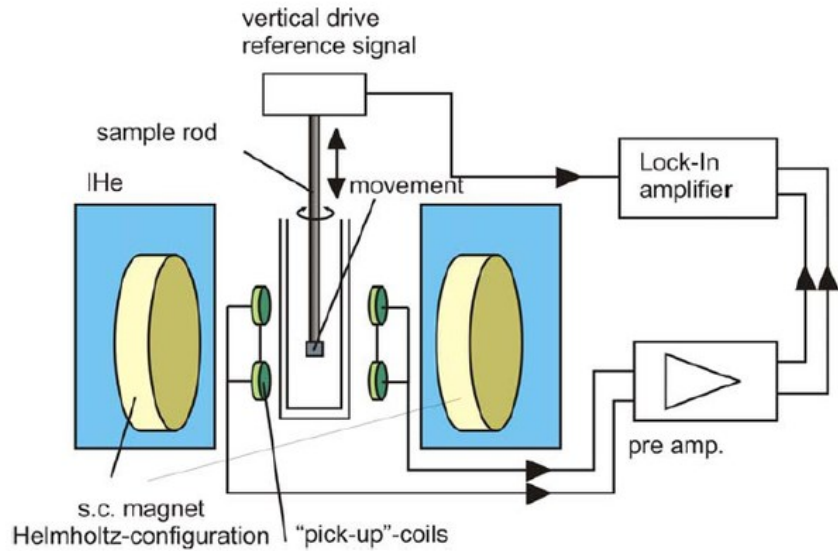




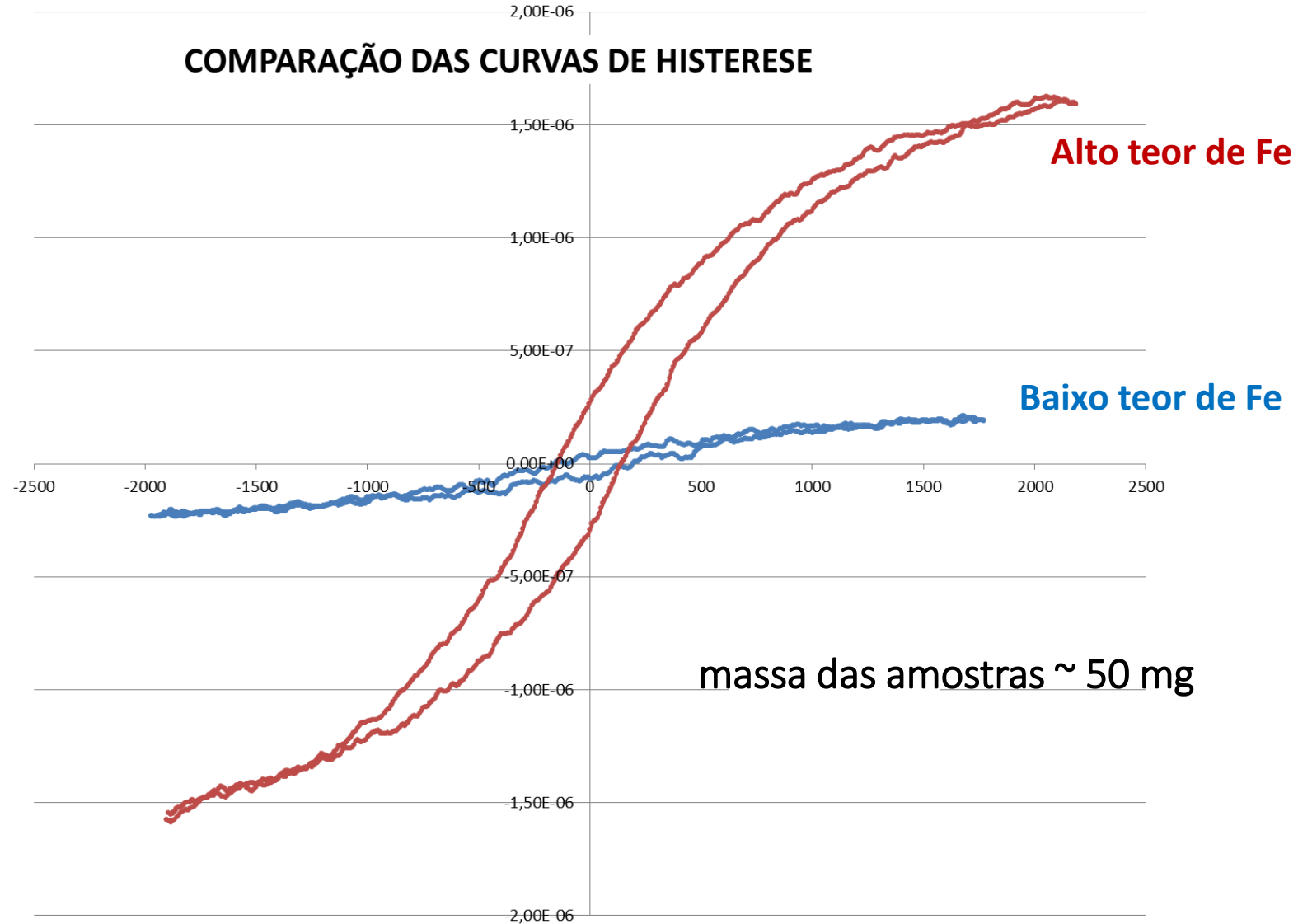
## MÉTODO INDUTIVO: HISTERESÍGRAFO



## MÉTODO VSM (Magnetômetro de amostra vibrante)

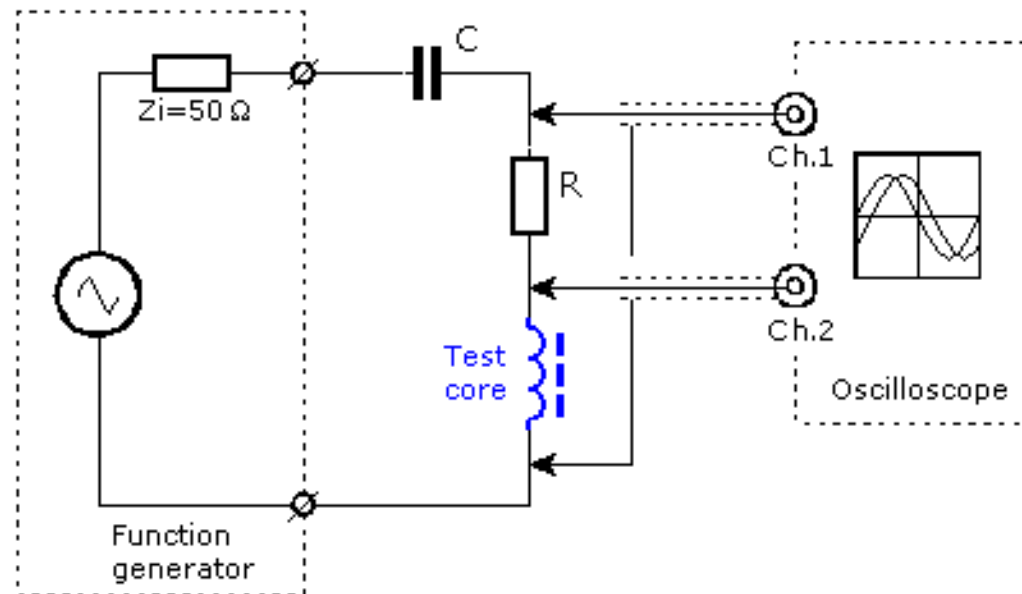


## EXEMPLO DE MEDIDAS OBTIDAS EM VSM



## MÉTODO DA PERMEABILIDADE AC

- A amostra é colocada como núcleo no centro de uma bobina, provocando alterações na sua impedância (indutância e resistência)

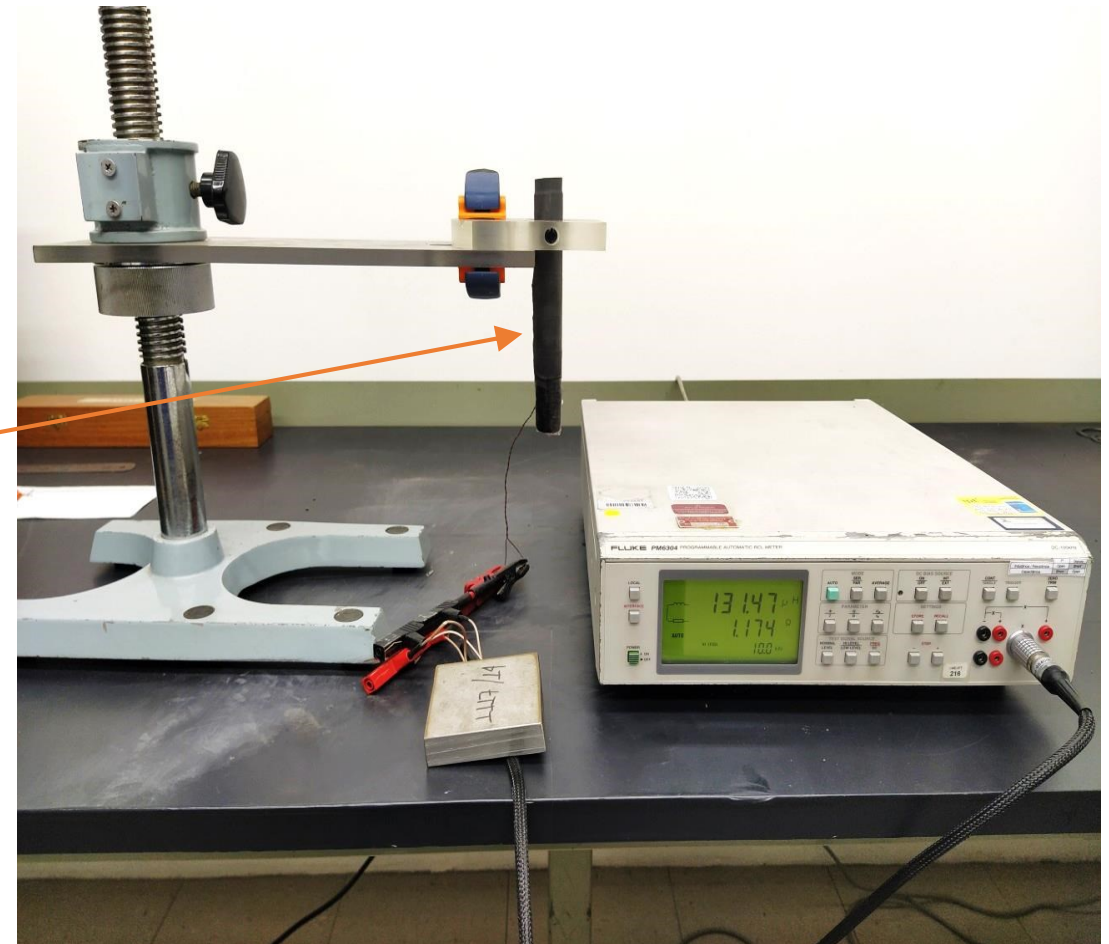


# MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

## MEDIDA DA SUSCEPTIBILIDADE ATRAVÉS DA INDUTÂNCIA

**PORTA AMOSTRAS**

**SOLENOIDE ENROLADO  
SOBRE TUBO DE ENSAIO**



**ARRANJO EXPERIMENTAL COM MEDIDOR DE  
IMPEDÂNCIAS ( L, R )**

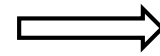


## RELAÇÃO ENTRE INDUTÂNCIA E SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA



Susceptibilidade magnética:

$$\chi = \frac{M}{H}$$

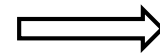


$$\chi = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\mu_r = 1 + \chi$$

Permeabilidade magnética relativa:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$



$$\mu_r = \frac{L}{L_0}$$

Susceptibilidade magnética específica:

$$\chi_e = \frac{\chi}{d}$$

$M$  – magnetização [A/m]

$H$  - campo aplicado [A/m]

$B$  - indução magnética [ T ]

$d$  - densidade [kg/m<sup>3</sup>]

$L_0$ - indutância em vazio [Henry]

$L$  - indutância com amostra [Henry]

$R_0$ - resistência em vazio [ $\Omega$ ]

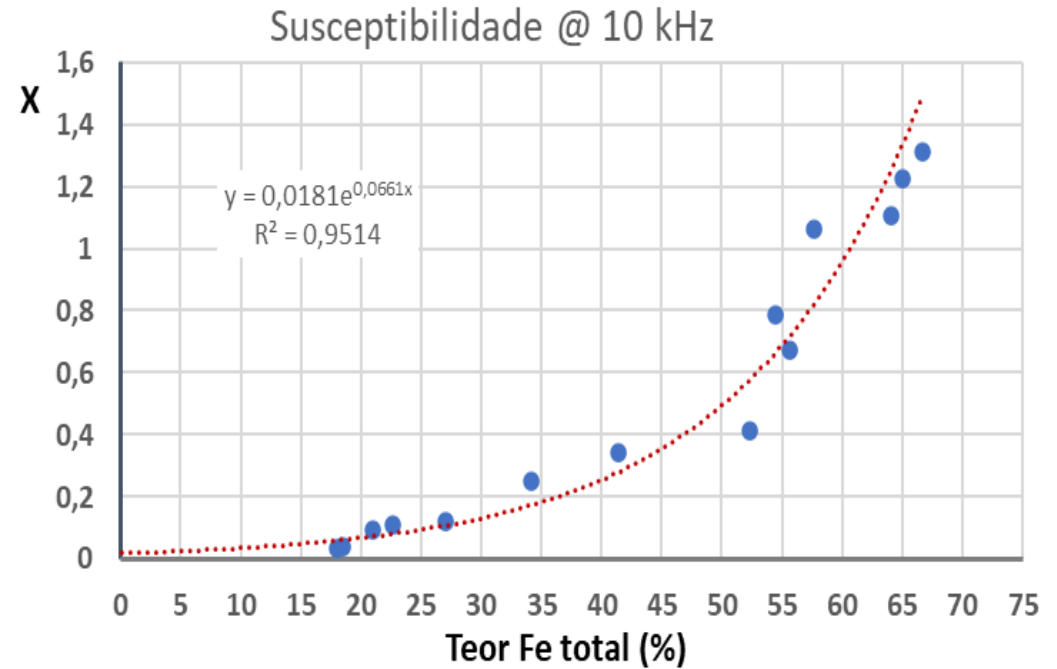
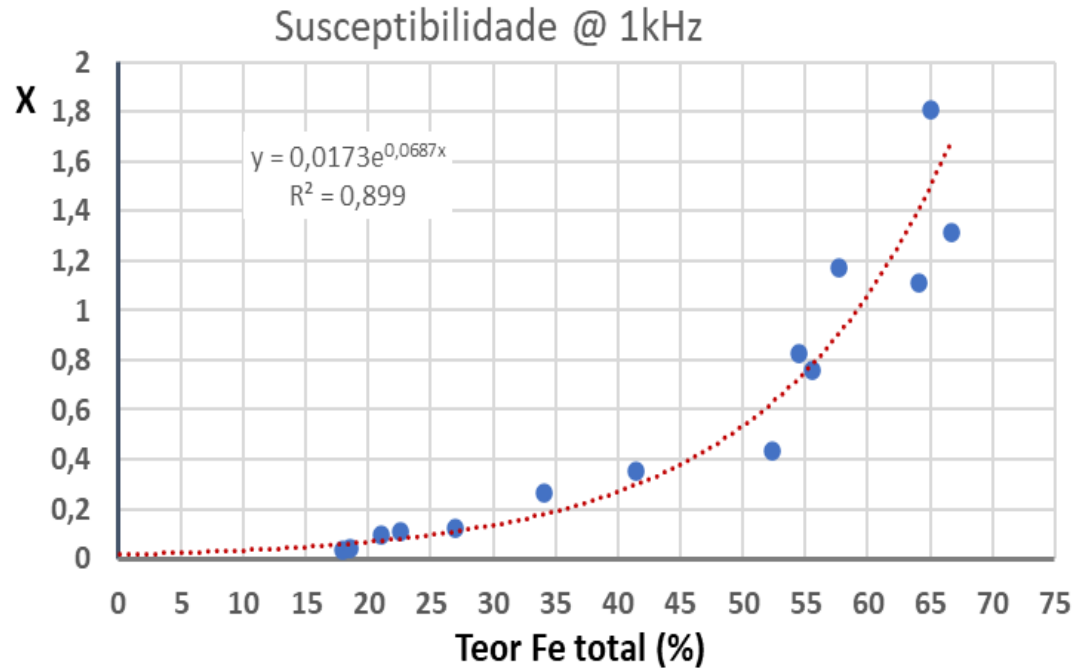
$R$  - resistência com amostra [ $\Omega$ ]

A susceptibilidade magnética está relacionada com a concentração e a forma de Fe presente na amostra, enquanto a perda resistiva ( $R - R_0$ ) /  $R_0$  é proporcional à sua condutividade e granulação.



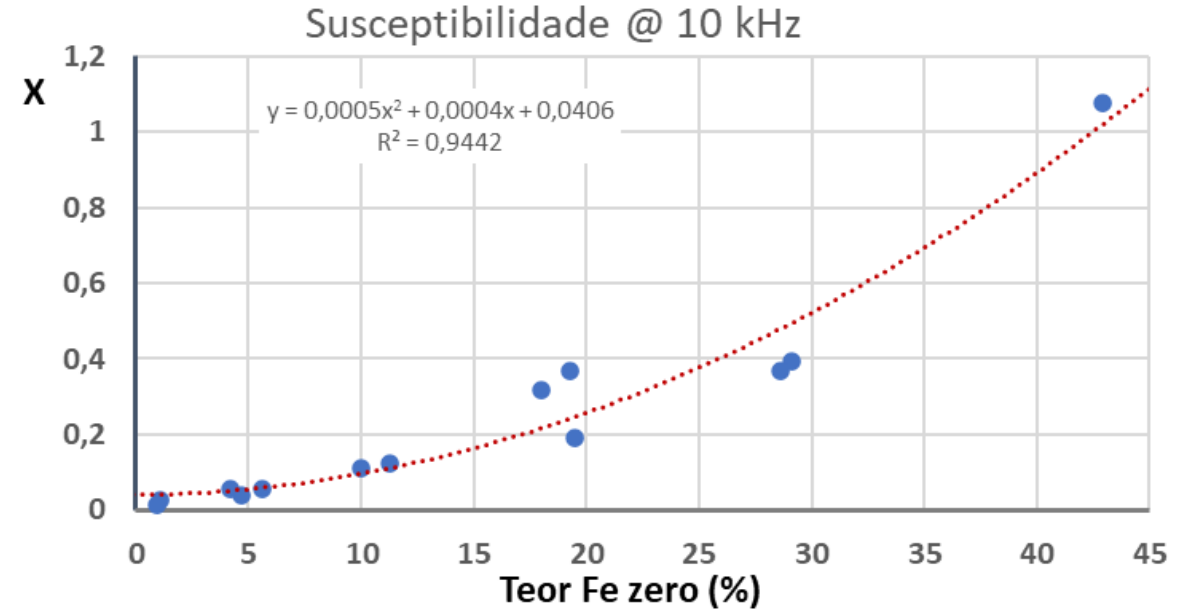
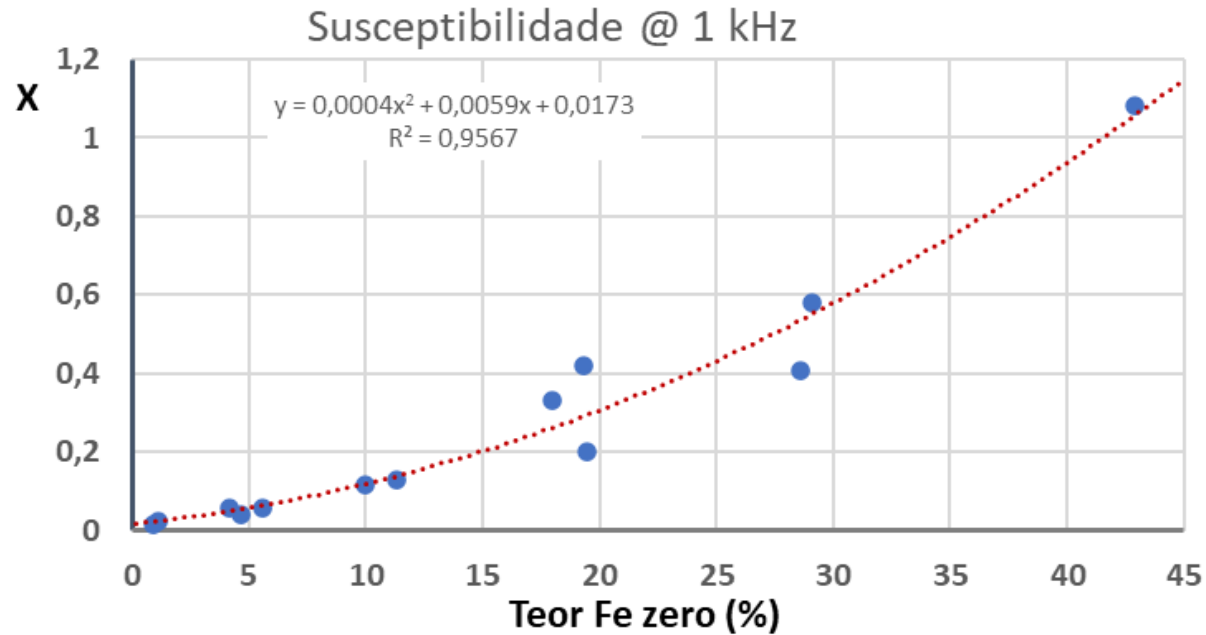
# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

## TEOR DE FERRO TOTAL



# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

## TEOR DE FERRO METÁLICO

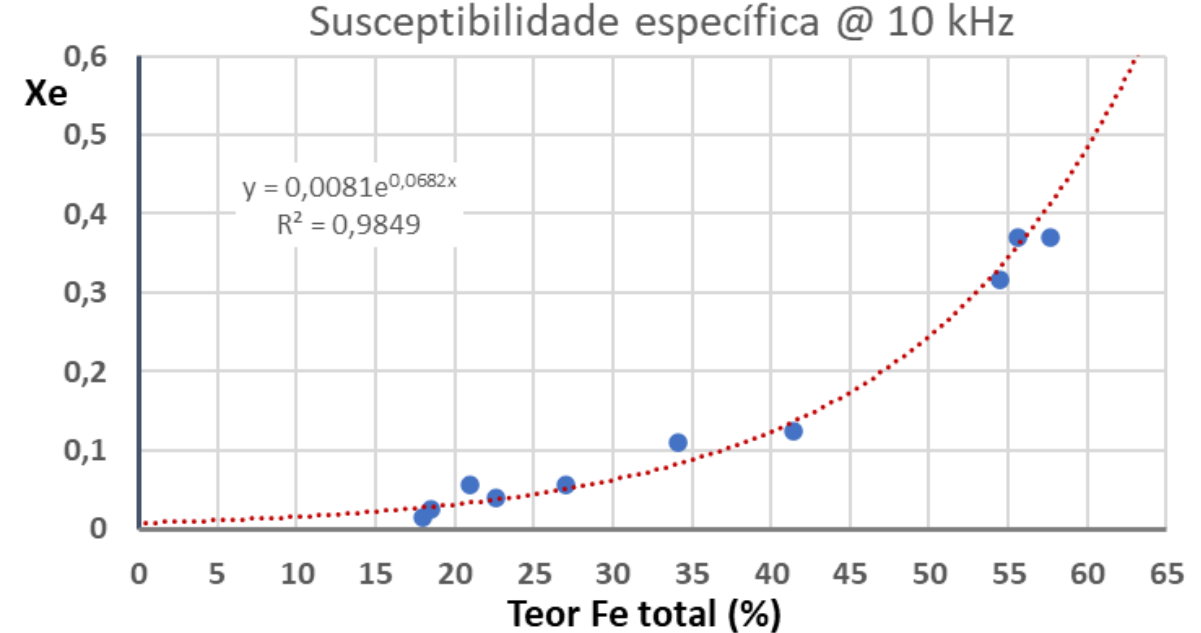
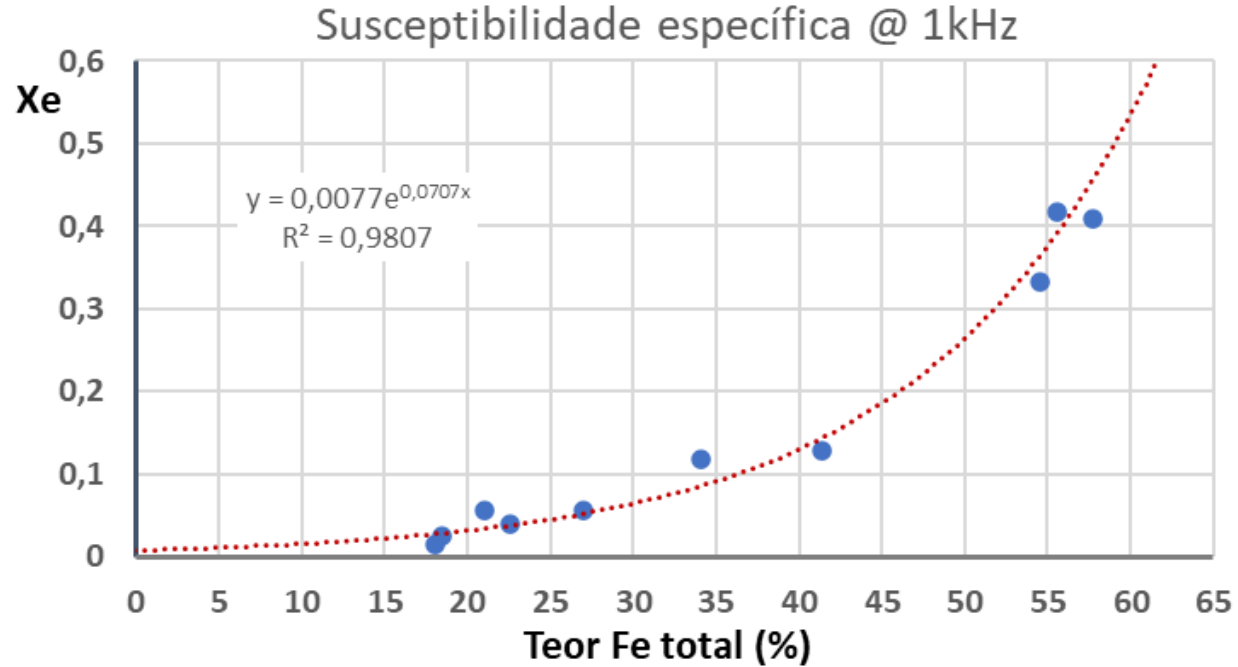


# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE ESPECÍFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA



$$\chi_e = \frac{\chi}{d}$$

**TEOR DE FERRO TOTAL**

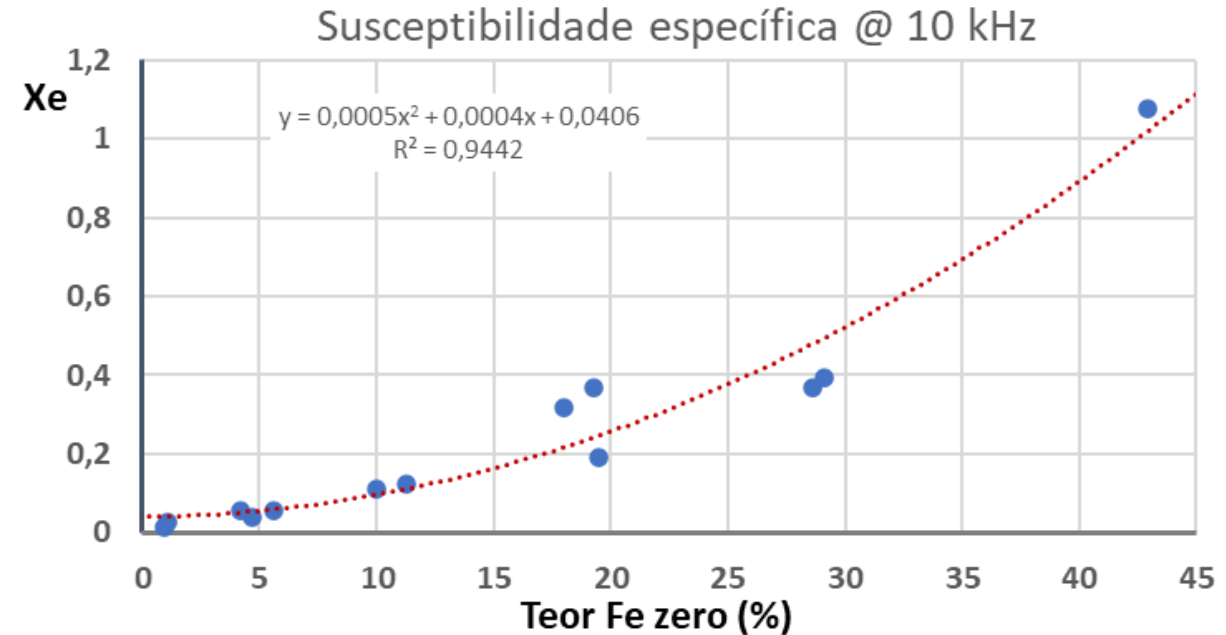
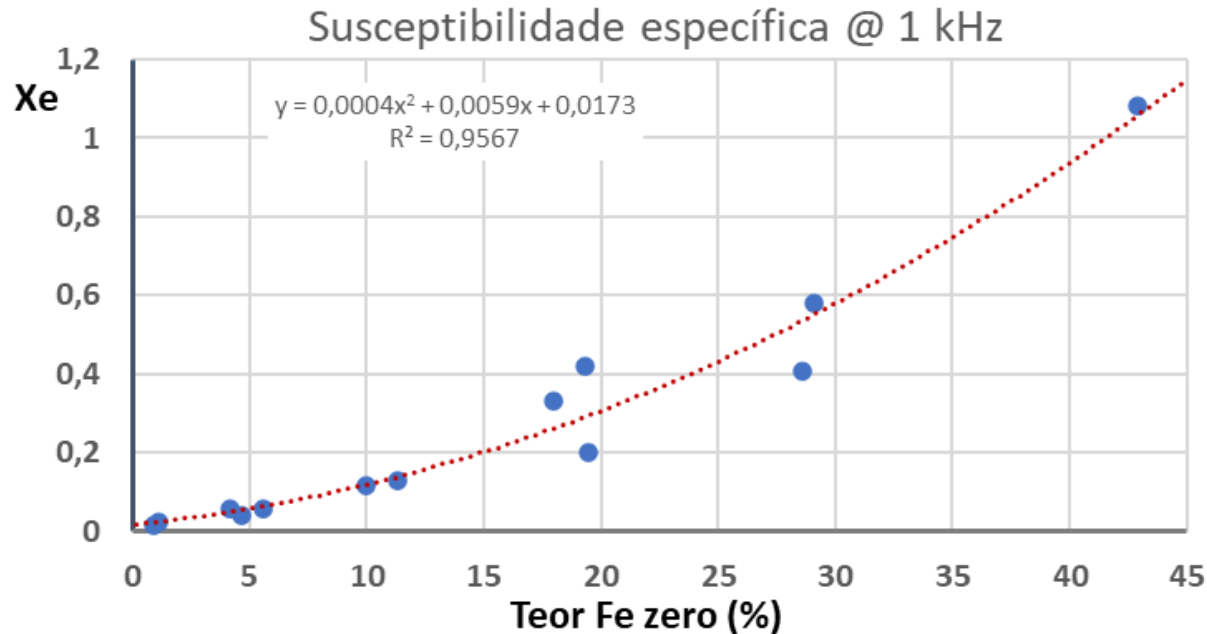


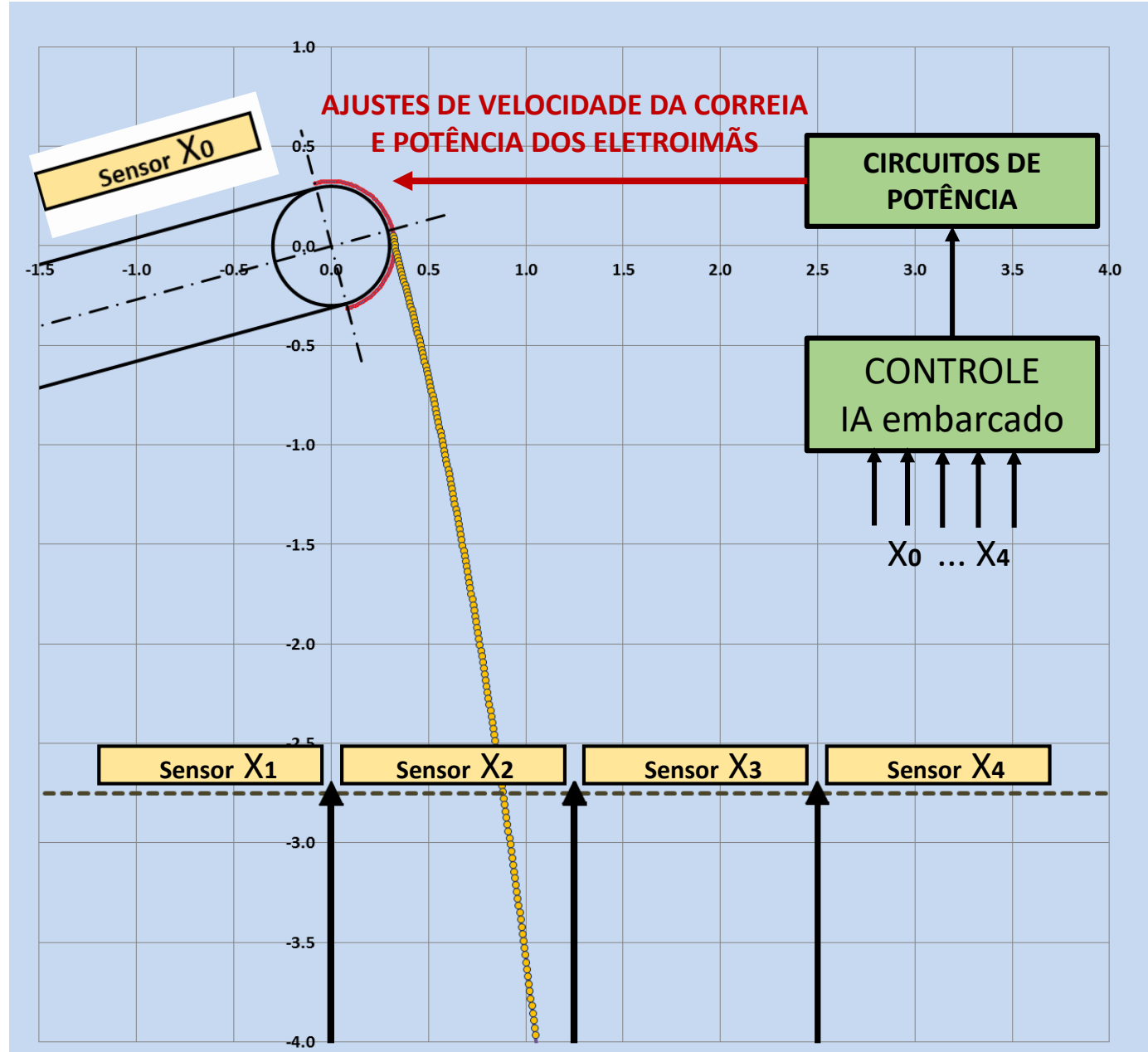
# CORRELAÇÕES ENTRE SUSCEPTIBILIDADE ESPECÍFICA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA



$$\chi_e = \frac{\chi}{d}$$

## TEOR DE FERRO METÁLICO









- 1-** O controle da quantidade de Fe nos produtos de reprocessamento de escórias de aciaria permite a obtenção de melhores propriedades para aplicações específicas, permitindo um maior reaproveitamento e redução do passivo ambiental representado por estes resíduos industriais.
- 2-** A medição automatizada por meios eletrônicos é uma forma rápida e robusta de verificação dos teores de Fe.
- 3-** A susceptibilidade magnética é uma propriedade representativa da quantidade de Fe.
- 4-** Dentre as várias formas para medir as propriedades magnéticas, o método das indutâncias permite medir de forma simples e rápida a susceptibilidade magnética e pode ser implementado em campo.
- 5-** A medição em tempo real das propriedades dos fluxos presentes em plantas de reprocessamento de escórias permitirá a otimização dos parâmetros de processos com a maximização da produção e a redução de custos.



Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais

24 a 28 de Novembro de 2024 | Fortaleza – CE - Brasil



**OBRIGADO!**

Contato: **Ramon Valls Martin**

[ramon@ipt.br](mailto:ramon@ipt.br)

[www.ipt.br](http://www.ipt.br)

[<< Voltar](#)

Ref.: MmeCa05-007

# Caracterização magnética de escórias de aciaria para otimização de seu reaproveitamento

Apresentador: Ramon Valls Martin

Autores (Instituição): Martin, R.V.(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo); Chotolí, F.F.(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo); Augustin, E.(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo); Pedrosa, F.J.(Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo);

Resumo:

A produção do aço gera uma grande quantidade de rejeitos que representam um enorme problema ambiental. Nos processos produtivos, as escórias das aciarias devem ser reaproveitadas para a redução do passivo ambiental das empresas siderúrgicas. Duas importantes destinações são a volta à aciaria e a fabricação de cimento. No primeiro caso, é essencial um alto teor de Fe para viabilizar economicamente o reaproveitamento, enquanto para a obtenção do clínquer, a carga dos fornos deve conter uma quantidade mínima de Fe, pois o excesso deste elemento pode deteriorar as características do cimento Portland. Plantas de reprocessamento utilizam uma grande variedade de equipamentos como moedores, peneiras e separadores magnéticos, cujos parâmetros operacionais

têm que ser ajustados para otimizar a separação das frações específicas. Métodos analíticos são muito delicados e demorados, e uma realimentação adequada exige resultados rápidos de medições feitas diretamente nas linhas de processamento em tempo real. Neste trabalho, descrevemos um método simples e robusto baseado em medidas magnéticas, que pode ser implementado em condições ambientais extremas de campo, como nas plantas de reprocessamento de rejeitos. São deduzidas as fórmulas que relacionam os parâmetros elétricos (indução magnética e perdas elétricas) com a presença de Fe metálico e óxidos. Basicamente, mede-se a indutância e as perdas elétricas de uma bobina que envolve um recipiente contendo o material. A relação entre o valor da indutância em vazio e aquele obtido com o preenchimento do material sob teste é diretamente proporcional à susceptibilidade magnética da amostra. Esta propriedade é afetada principalmente pelo conteúdo de materiais ferromagnéticos. A distinção entre Fe metálico e seus óxidos pode ainda ser relacionada à condutibilidade elétrica do particulado, tornando-se mais relevante quanto maior for a frequência de excitação do equipamento de medição. Para uma avaliação mais completa das variáveis envolvidas, a medição deve ser feita de forma vetorial através de técnicas de "lock-in" ou em pontes de impedância RLC. A solução foi testada numa batelada de escórias (60 toneladas) processada em uma planta piloto de processamento, e mostrou resultados coerentes com a análise química das frações. Utilizou-se uma ponte RLC para a detecção. A coleta das amostras foi feita diretamente nas pilhas dos produtos resultantes do processamento. Um sistema automatizado de medição está em desenvolvimento para ser posicionado diretamente nas esteiras de transporte dos processos de separação. Os sinais produzidos nos sensores deste sistema em tempo real poderão controlar ou ajustar condições do processo, como velocidade de transporte, potência de equipamentos de separação magnética e outros parâmetros operacionais de forma a aumentar a eficiência da planta e a qualidade dos produtos resultantes.