

**Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Nova de Lisboa  
Departamento de Ciência dos Materiais**



# **Reciclagem de Placas de Circuitos Electrónicos**

**Por**

**Inês Pais Tenreiro Pereira Bernardes**

**Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade  
Nova de Lisboa para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais**

Orientadora: Prof. Doutora Maria Lucelinda Ferreira Alcântara da Cunha  
Co-Orientadora: Prof. Doutora Maria Margarida Rolim Augusto Lima

**Monte da Caparica**

**2009**

## **AGRADECIMENTOS**

Gostava de agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Maria Lucelinda Cunha e co-orientadora, Professora Doutora Margarida Lima, pelo o apoio na realização dos estudos apresentados, bem como a disponibilidade face aos obstáculos que surgiram no decurso da escrita deste trabalho.

Quero também agradecer aos colaboradores do CEMOP, Sr. Joel, Sr. António e Sr. Quintela pela ajuda nas reparações dos equipamentos.

Quero agradecer especialmente aos meus pais por me terem ensinado a importância da construção e coerência dos meus próprios valores, é a eles que devo tudo o que sou. Agradeço à minha mãe a paciência infinita, compreensão e a disposição incondicional em me ajudar a conquistar os meus objectivos e a tornar tudo possível. Aos meus irmãos o apoio e interesse sempre demonstrado.

Um grande obrigada aos meus amigos pelas injeções de motivação, incentivo e pelo apoio de uma maneira ou de outra, nestes últimos anos.

Muito obrigada a todos!

## SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES

A – massa total média da alimentação de cada ensaio de crivagem;

a – teor médio reconstituído do elemento considerado; a- número de observações por nível;

Aa-  $\Sigma$  ( massa retida de cada peneiro x % do elemento presente na amostra de cada peneiro);

Ag –Prata;

Al – Alumínio;

Amb3E – Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos;

ANOVA – Analysis of Variance;

Au – Ouro;

$\alpha$  - nível de significância ( $\alpha= 0,05$ );

B - dimensão da abertura de entrada da alimentação no aparelho ou “Boca”;

Ba – Bário;

Br – Bromo;

C – massa média do material retido em cada crivo;

c – teor do elemento considerado presente na amostra média;

Ca – Cálcio;

Cd – Cádmio;

Cl – Cloro;

cm – Centímetros;

Co – Cobalto;

Cr – Cromo;

Cu- Cobre;

CuO – Óxido de cobre;

d – diâmetro da partícula ;  $d$  – espaçamento interplanar (distância entre os planos reticulares);

DF – Degrees of freedom;

DRX – Difracção de Raio X;

EEE – Equipamentos eléctricos e electrónicos;

ERP – European Recycling Platform;

ERP Portugal – Associação Gestora de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos;

$\eta$  - rendimento em metal;

$f$  – parâmetro de forma das partículas fragmentadas;

Fe – Ferro;

FRX – Fluorescência de Raio X;

$\phi_{80}^a$  - Calibre a 80% da alimentação;

$\phi_{80}^p$  - Calibre a 80% do produto de fragmentação;

g – grama; g – dimensão de abertura de saída dos produtos em equipamentos de fragmentação;

g.l.- graus de liberdade.

Hg – Mercúrio;

I – Iodo;

k- número de factores;

kg – Quilograma;

$k_{80}$  – diâmetro correspondente a uma % cumulativa inferior = 80%;

l – parâmetro de individualização (variável entre 0 e 1);

$\lambda$  - comprimento de onda de raio X

M – massa da amostra (em gramas);

$m_\alpha$  - fracção estimada da classe granulométrica  $\alpha$  ;

min – Minutos

mm – Milímetros;

Mg – Magnésio;

Mn – Manganésio;

$MS_{\text{erro}}$ - variância do erro;

$MS_x$ - variância dos factores e interacções;

$n$  - número de ordem de difracção;  $n$  - número de amostras;

N- número total de observações;

Na – Sódio;

Nb – Nióbio;

Ni – Níquel;

O – Oxigénio;

P – Fósforo;

Pb – Chumbo;

PBB – Bifenilos polibromados;

PBDE – Éteres difenílicos polibromados;

PCI – Placas de circuito impresso;

PFE- Planeamento Factorial de Experiências;

psi – Unidade de pressão ( $1 \text{ Pa} \approx 145 \times 10^{-6} \text{ psi}$ )

PVC – Policloreto de vinilo;

R – massa retida de cada peneiro; r- % de elemento presente na amostra de cada peneiro; r- réplicas;

$R^2$  – coeficiente de correlação;

$R_{80}$  - Relação de fragmentação a 80%;

$R_a$  - Relação de fragmentação aparente;

REEE – Resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos;

$\rho$  – massa volúmica média das partículas do lote

S – Enxofre;  $S$  - desvio padrão;

Sb – Antimónio;

Si – Silício;

SMD – Surface Mount Device;

Sn – Estanho;

Sr – Estrôncio;

$SS_{\text{erro}}$  - variação do erro;

$SS_{\text{modelo}}$  – variação do modelo;

$SS_T$  - variação total;

StEP – Solving the E-waste problem;

$SS_x$  - variação dos factores e interacções X;

p- factores gerados;

$\sigma^2$  – variância do erro fundamental (em valor relativo).

T – Tesla;

$t$  - estatístico  $t_{\text{student}}$ ;

Ti – Titânio;

$\theta$ - ângulo de radiação incidente dos fótons (ângulo de Bragg)

UE – União Europeia;

WEEE – Waste electrical and electronic equipment;

$\bar{X}$  - média;

$x_i$  - valor da amostra  $i$

Zr – Zircónio;

$2\theta$ - ângulo de difracção;

## RESUMO

Segundo muitos autores, o crescimento exponencial do consumo e produção de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE) está a acontecer de ano para ano, tornando-se necessário o estudo de processos de reciclagem para evitar o desperdício de matérias-primas e/ou de recursos naturais não renováveis.

Embora existam diversas categorias de REEE, as placas de circuitos electrónicos (PCE) estão presentes em quase todas elas, pelo que este trabalho centra-se no estudo da reciclagem mecânica de PCE utilizando diversas operações e técnicas.

A reciclagem mecânica de PCE foi estudada por intermédio de diferentes operações, com a seguinte sequência: cominuição, amostragem, classificação granulométrica, aeroseparação, separação magnética, separação de meios densos e caracterização por fluorescência de raios-X (FRX) e difracção de raios-X (DRX).

As PCE começaram por ser fragmentadas até granulometrias de: 4mm, 1,7mm e 0,5mm. Após foi efectuada a amostragem por enquadramento e divisor de Jones e a classificação granulométrica por peneiração. Depois passou-se ao estudo da aeroseparação com a realização de 3 PFE 2<sup>3</sup>, um para cada granulometria, onde os factores independentes são: massa do sólido (g), tempo de aeroseparação (min) e pressão de ar (psi), a que se seguiu a separação com barra magnética. A separação por meios densos foi realizada usando água como meio separador e novas amostras representativas. A caracterização dos produtos permitiu a identificação das várias espécies, a avaliação quantitativa das diversas operações e a obtenção de modelos matemáticos simplificados para as granulometrias de <1,7 e <0,5mm. Os resultados obtidos permitiram ainda concluir que a cominuição em moinho de martelos com crivos de 1,7mm possibilita a separação magnética do ferro relativamente ao restante material, nomeadamente cobre e bromo.

Palavras-chave: Reciclagem mecânica; placas de circuitos electrónicos, aeroseparação separação magnética; separação de meios densos.

## **ABSTRACT**

According to many authors, the exponential growth of consumption and production of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), is happening from year to year. Therefore recycling processes should be studied, to avoid raw materials and non-renewable natural resources depletion.

There are various WEEE classified categories, where electronic circuit boards (ECB) are found almost in everyone. Then, this work is focus on the ECB mechanical recycling, through several operations and techniques.

Different operations of ECB mechanical recycling has been studied with the following sequence: comminution, sampling, size classification, air-separation, magnetic separation, dense medium separation, and characterization by wavelength dispersive X-ray fluorescence (WDXRF) and X-ray powder diffraction (XRD).

First, the boards were grinded until sizes: 4mm, 1.7mm and 0.5mm. After sampling by quartering and Jones divider, the size distribution of each comminute product was made by sieving tests. Then air-separation of representative samples was studied, with three  $2^3$  design experiments, one for each size product, where the independent factors are: mass of solid (g); time of air-separation (min) and air pressure (psi), followed by magnetic separation. Dense medium separation, with water as separator medium, took place on representative samples. Product characterization was able to identify and quantify the various species and operations. Also, several simplified mathematical models were achieved to the air-separation with the 1.7 and 0.5mm products. It was also conclude that hammer mill product of 1.7mm allows the magnetic separation which produces separate iron from the other material, namely copper and bromine.

**Key words:** Mechanical recycling; Printed circuit boards, air-separation, magnetic separation, dense medium separation.

## ÍNDICE DE MATÉRIAS

AGRADECIMENTOS .....	II
SIMBOLOGIA E NOTAÇÕES .....	III
RESUMO .....	VII
RESUMO .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
ÍNDICE DE MATÉRIAS .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE QUADROS .....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE) .....	3
1.2 Gestão dos REEE .....	6
1.3 Problemática das Placas de Circuitos Electrónicos (PCE) .....	10
2. RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS .....	12
2.1 Vias e/ou Processos de Reciclagem de PCE .....	13
2.1.1 Via Pirometalúrgica .....	13
2.1.1 Via Hidrometalúrgica .....	14
2.1.3 Via Electrometalúrgica .....	15
2.1.4 Via Biotecnológica .....	15
2.1.5 Processos de Tratamento Mecânico .....	15
2.2 Estado da Arte .....	18
3. PARTE EXPERIMENTAL .....	26
3.1 Operações de Reciclagem Mecânica .....	28
3.1.1 Cominuição .....	28
3.1.2 Amostragem .....	29
3.1.3 Classificação Granulométrica .....	30
3.1.4 Aeroseparação .....	31
3.1.5 Separação Magnética .....	33
3.1.6 Separação por Meios Densos .....	33
3.2 Técnicas de Caracterização .....	35
3.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios -X (FRX) .....	35
3.2.2 Microscopia Óptica .....	36
3.2.3 Difraccção de Raios-X .....	36
3.3 Metodologia de Cálculo e Interpretação de Resultados .....	37
3.3.1. Planeamento Factorial de Experiências .....	37
3.3.2 Plano factorial .....	37
3.3.3 Modelo Matemático Empírico .....	39
3.3.4 Análise de Variância .....	39
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	42
4.1 Cominuição .....	42
4.1.1 Caracterização Química de Produtos de Cominuição .....	42
4.1.2 Caracterização Granulométrica dos Produtos de Cominuição .....	45
4.1.3 Determinação das Relações de Fragmentação .....	51
4.1.4 Caracterização por Microscopia Óptica dos Produtos de Cominuição .....	53

4.1.5 Caracterização por Difraccção de Raios-X dos Produtos de Cominuição .....	55
4.2 Amostragem .....	57
4.3 Classificação Granulométrica.....	59
4.3.1 Concentração por Classificação Granulométrica do Produto <4mm .....	60
4.3.2 Concentração por classificação Granulométrica do Produto <1,7mm .....	61
4.3.3 Concentração por Classificação Granulométrica do Produto <0,5mm .....	63
4.4 Aeroseparação .....	65
4.4.1 Aeroseparação com Produto de Granulometria <4mm .....	66
4.4.2 Aeroseparação com Produto de Granulometria <1,7mm .....	72
4.4.3 Aeroseparação com Produto de Granulometria <0,5mm .....	79
4.4.6 Caracterização dos Produtos de Aeroseparação por Difraccção de Raio-X .....	87
4.5 Separação Magnética.....	89
4.5.1 Caracterização Química dos Produtos de Separação Magnética.....	89
4.5.2 Separação Magnética como Segunda Etapa de Concentração .....	90
4.5.3 Concentração por Separação Magnética.....	91
4.5.4 Caracterização por Difraccção de Raio-X de Produtos de Separação Magnética.....	91
4.6 Separação por Meios Densos.....	93
4.6.1 Determinação de Rendimentos na Separação por Meios Densos.....	93
4.6.2 Caracterização por Difraccção de Raio-X dos Produtos de Separação por Meios Densos .....	94
5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	96
6. BIBLIOGRAFIA .....	99

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1- Principais etapas de um diagrama hidrometalúrgico [27] .....	14
Figura 3.1-Diagrama do processamento mecânico e de caracterização dos diversos produtos ....	27
Figura 3.2- a) Guilhotina; b) Fragmentos das placas de 2cmx2cm .....	28
Figura 3.3-a) Moinho de martelos; b) Interior do moinho de martelos com grelha de 10mm. ....	29
Figura 3.4-a) Enquartação; b) Divisor de Jones .....	30
Figura 3.5-Agitador de peneiros e conjunto de peneiros empilhados. ....	31
Figura 3.6-Montagem de aeroseparação.....	32
Figura 3.7-Espectrómetro de FRXDCO [27] .....	35
Figura 4.1-Histograma do produto de cominuição de granulometria <10mm .....	45
Figura 4.2-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição de granulometria <10mm .....	46
Figura 4.3- Histograma do produto de cominuição de granulometria <4mm .....	47
Figura 4.4-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição <4mm .....	48
Figura 4.5- Histograma do produto de cominuição de granulometria <1,7mm .....	49
Figura 4.6-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição de granulometria <1,7mm .....	49
Figura 4.7- Histograma do produto de cominuição de granulometria <0,5mm .....	50
Figura 4.8-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição de granulometria <0,5mm .....	51
Figura 4.9-Amostra de granulometria <4mm.; representa a partícula metálica rodeada de fragmentos poliméricos e cerâmicos a) 100x; b) 200x.....	54
Figura 4.10- Amostra de granulometria <1, 7mm, da partícula de cobre e fragmentos poliméricos: a) 100x; b) 200x.....	54
Figura 4.11-Amostra de granulometria <0,5mm, partículas de cobre e ferro: a) 100x;b) 200x ...	55
Figura 4.12- Difractogramas de DRX dos produtos de cominuição .....	56
Figura 4.13- Curvas cumulativas do rendimento em metal na classificação granulométrica do produto <4mm .....	61
Figura 4.14- Curvas cumulativas do rendimento em metal na classificação granulométrica do produto <1,7mm .....	62
Figura 4.15- Curvas cumulativas do rendimento em metal da classificação granulométrica de 0,5mm.....	64
Figura 4. 16-Efeitos de factores principais dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm: a)para o Cu b) para o Fe; c) para o Br.....	72
Figura 4. 17- Efeitos de factores principais dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm: a)para o Cu b) para o Fe; c) para o Br.....	78
Figura 4. 18-Efeito do factor de interacção BC para o Cu .....	78
Figura 4.19- Efeitos de factores principais dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm: a)para o Cu b) para o Fe; c) para o Br.....	86
Figura 4.20- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm para o Fe:a)AC; b)BC e para o Br: c)AC; d)BC .....	87
Figura 4.21- Difractograma de DRX do ensaio 1 de aeroseparação, 1ª e 2ª fracção das diferentes granulometrias .....	88
Figura 4.22- Difractograma DRX da separação magnética da 1ª fracção do ensaio 2 (1,7mm) ...	92

Figura 4.23- Difractograma dos produtos do ensaio A da separação por meios densos .....	95
Figura AIX.24- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm para o Cu: a)AB; b)AC; c)BC. ....	139
Figura AIX.25- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm para o Fe: a)AB; b)AC; c)BC .....	140
Figura AIX.26-Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm para o Br: a)AB; b)AC; c)BC .....	140
Figura AIX.27- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <1,7mm para o Cu: a)AB; b)AC .....	141
Figura AIX. 28-- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <1,7mm para o Fe: a)AB; b)AC; c)BC .....	141
Figura AIX .29- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <1,7mm para o Br: a)AB; b)AC; c)BC .....	142
Figura AIX.30- Efeito de factor da interacção AB dos planos factoriais de ensaio de granulometria <0,5mm para o Fe .....	143
Figura AIX.31- Efeito de factor da interacção AB dos planos factoriais de ensaio de granulometria <0,5mm para o Br .....	143

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 -Algumas substâncias poluentes dos EEE [11] .....	7
Quadro 1.2-Composição de uma PCE[20] .....	10
Quadro 3.1- Tabela com as condições de cada ensaio .....	32
Quadro 3.2- Condições de aeroseparação dos ensaios utilizados em separação magnética.....	33
Quadro 3.3- Matriz de níveis codificados $2^3$ .....	38
Quadro 3.4-Exemplo de construção de uma tabela ANOVA.....	40
Quadro 4.1- Composição química duma amostra de PCE (exemplo).....	42
Quadro 4.2- Resultados de análise química dos produtos de cominuição e respectivo cálculo estatístico .....	43
Quadro 4.3- Valores de $\phi_{80}$ de todas as amostras e cálculo estatístico respectivo.....	52
Quadro 4.4-Relações de fragmentação dos produtos de diferentes granulometrias.....	53
Quadro 4.5- Erros de amostragem das distribuições granulométricas dos vários produtos de cominuição. ....	58
Quadro 4. 6- Rendimentos em metal das classes granulométricas do produto <4mm.....	60
Quadro 4.7- Rendimentos em metal das classes granulométricas do produto <1,7mm.....	62
Quadro 4.8- Rendimentos em metal das classes granulométricas do produto <0,5mm.....	63
Quadro 4. 9- Distribuição de massa resultante dos ensaios de aeroseparação .....	65
Quadro 4. 10-- Rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <4mm. ....	66
Quadro 4.11- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Cu -granulometria <4mm.....	67
Quadro 4.12- Análise da variância para o Cu –granulometria <4mm.....	68
Quadro 4. 13- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Fe -granulometria <4mm .....	69
Quadro 4.14- Análise da variância para o Fe –granulometria <4mm .....	70
Quadro 4.15- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Br -granulometria <4mm .....	70
Quadro 4.16- Análise da variância para o Br –granulometria <4mm .....	71
Quadro 4. 17- Rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <1,7mm .....	72
Quadro 4.18- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Cu -granulometria <1,7mm.....	73
Quadro 4.19- Análise da variância para o Cu –granulometria <1,7mm.....	74
Quadro 4.20-Coeficientes do PFE $2^3$ para o Fe -granulometria <1,7mm .....	75
Quadro 4.21-Análise da variância para o Fe –granulometria <1,7mm .....	75
Quadro 4.22- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Br -granulometria <1,7mm .....	76
Quadro 4. 23- Análise da variância para o Br –granulometria <1,7mm .....	76
Quadro 4.24- Rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <0,5mm .....	80
Quadro 4.25- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Cu -granulometria <0,5mm.....	81
Quadro 4.26- Análise da variância para o Cu –granulometria <0,5mm.....	81
Quadro 4.27- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Fe -granulometria <0,5mm .....	82
Quadro 4.28-Análise da variância para o Fe –granulometria <0,5mm .....	83
Quadro 4.29- Coeficientes do PFE $2^3$ para o Br -granulometria <0,5mm .....	84
Quadro 4.30- Análise da variância para o Br –granulometria <0,5mm .....	85
Quadro 4. 31-Valores de FRX para os produtos de separação magnética dos ensaios 2 (<1,7mm) e 5 (<0,5mm) de aeroseparação.....	89
Quadro 4.32- Rendimento em metal da separação com barra magnética como 2ªetapa de concentração de cada fracção dos ensaios de aeroseparação .....	90
Quadro 4.33- Rendimentos em metal da separação com barra magnética.....	91

Quadro 4.34 –Distribuição de massa nos produtos de separação por meios densos .....	93
Quadro 4.35- Valores de rendimento em metal de cada elemento nos ensaios.....	93

## 1.INTRODUÇÃO

A reciclagem é uma das chaves no que diz respeito ao desenvolvimento sustentável.

A reciclagem é o termo genericamente utilizado para designar o reaproveitamento de materiais beneficiados como matéria-prima para produção de novos produtos de materiais que podem ser reciclados. Como exemplos mais comuns de materiais reciclados tem-se: o papel, o vidro, o metal e o plástico.

As maiores vantagens da reciclagem são a minimização do consumo das fontes naturais, geralmente não renováveis, e da quantidade de resíduos a submeter a tratamento de confinamento, depósito em aterros ou incineração. Por isso o recurso à reciclagem está a despertar cada vez mais maior interesse da sociedade [1]

Os metais são muito utilizados em equipamentos, estruturas, embalagens, devido à sua elevada durabilidade, resistência e facilidade de conformação.

Quanto à sua composição, os metais são geralmente qualificados em dois grandes grupos: os ferrosos (compostos basicamente de ferro e aço) e os não ferrosos. Uma vez que têm um tempo de decomposição muito alargado, é essencial reciclar os metais a fim de reduzir impactes ambientais.

A reciclagem de metais é importante, dado que, reduz a extracção de recursos naturais, que são limitados e não são reconstituídos, para além de ser a melhor opção ecológica [2].

Assim, podem enumerar-se como benefícios da reciclagem de metais:

- Economia de matérias-primas;
- Economia de energia;
- Economia de água;
- Diminuição de áreas degradadas pela extracção de minérios;
- Diminuição de poluição;
- Diminuição de resíduos.

Por outro lado a produção de equipamentos eléctricos e electrónicos (EEE) é um dos sectores com maior produção, hoje em dia. Este desenvolvimento resulta num aumento de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) [3].

A rápida inovação da tecnologia origina a cada dia, modelos novos de equipamentos tornando os antigos em equipamento mais baratos e com um tempo de vida mais curto, consequentemente mais rapidamente obsoletos [4]. Estes equipamentos no final de vida eram descartados, juntamente com o lixo doméstico, sendo depositados em aterros ou queimados sem qualquer tratamento prévio.

Tendo em conta os problemas ambientais envolvidos na gestão de REEE, muitas organizações tentaram elaborar uma legislação para a reutilização, reciclagem e formas de valorização desses resíduos, de modo a reduzir a contaminação do ambiente [3].

As placas de circuitos electrónicos são muito utilizadas nos EEE. A sua composição é variada, contendo polímeros, cerâmicos, metais tradicionais e preciosos, o que torna sua reciclagem bastante difícil e complexa. O facto de conter metais preciosos leva a um maior interesse na sua reciclagem [5].

Por estes motivos a reciclagem de placas de circuitos electrónicos é um assunto importante, não só do ponto de vista ambiental, mas também no que diz respeito à recuperação dos metais valiosos.

## **1.1 Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (REEE)**

A produção de equipamentos eléctricos e electrónicos (EEE) constitui um dos mercados com crescimento exponencial no mundo. Ao mesmo tempo isso significa que a quantidade de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) irá a aumentar nas próximas décadas [6].

O termo REEE -Resíduos de Equipamento Eléctricos e Electrónicos e também a sigla inglesa WEEE (Waste of Electrical and Electronic Equipment) têm sido utilizados para designar os Equipamentos Eléctricos e Electrónicos (EEE) quando chegam ao final do seu ciclo de vida, ou seja, na fase pós-consumo [7].

Os REEE têm ganho importância nas últimas décadas, o que é uma manifestação clara da mudança de uma sociedade industrial para uma sociedade de informação com o aumento da utilização de equipamentos de informação e comunicação. De acordo com Cui e Forssberg, 2003, a produção de EEE constitui uma das áreas com maior crescimento [6].

O ciclo de uso e descarte desses equipamentos tem vindo a apresentar um crescimento preocupante, tanto pelas grandes quantidades de resíduos geradas e a presença de substâncias tóxicas que requerem tratamento especial quer na reciclagem quer na deposição final, além dos recursos naturais que são perdidos e não reaproveitados.

Como efeito, a ausência de regulamentações e de processos destinados à gestão específica destes resíduos, estes são dispostos para recolha juntamente com resíduos urbanos, sobre os quais não existe nenhum tipo de controlo, que representa risco de contaminação do solo e das águas, principalmente nos países que dispõem os seus resíduos urbanos no solo de maneira inadequada [8].

Como referido, o consumismo excessivo de materiais eléctricos e electrónicos, levanta problemas ambientais graves, devido às características poluentes dos componentes destes resíduos e sua consequente nocividade ambiental. Deste modo, os resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos merecem toda a atenção que lhes é dedicada em termos ambientais, pelo que já dispõem de uma estratégia de gestão, com prioridade à sua reutilização, reciclagem e outras formas de valorização.

Nesta perspectiva, este tipo de resíduos é classificado nas dez categorias seguintes:

- Grandes electrodomésticos
- Pequenos electrodomésticos
- Equipamentos informáticos e de telecomunicações
- Equipamentos de consumo
- Equipamentos de iluminação
- Ferramentas eléctricas e electrónicas (com excepção de ferramentas industriais fixas de grandes dimensões)
- Brinquedos e equipamento de desporto e lazer
- Aparelhos médicos (com excepção de todos os produtos implantados e infectados)
- Instrumentos de monitorização e controlo
- Distribuidores automáticos

Diversos problemas podem ser associados à geração e gestão desses resíduos. Entre eles podem ser citados a dificuldade de desmantelamento e reciclagem dos seus componentes, uma vez que estes processos exigem desenvolvimento de tecnologia, e a presença de substâncias perigosas, que envolvem risco para a saúde humana e ambiente, o rápido desenvolvimento tecnológico, que cria mais EEE e conseqüentemente REEE, e também a dificuldade em se estabelecer quem deve assumir o custo da sua adequada gestão.

Por exemplo, o chumbo proveniente dos REEE representava cerca de 50% das entradas deste elemento nas incineradoras (Comissão das Comunidades Europeias, 2000). Segundo a Comissão da União Europeia, cada cidadão europeu produzia por ano 14 quilos de lixo electrónico. Isto significa que a União Europeia acumula cerca de 6 milhões de toneladas desse tipo de lixo por ano (4% do fluxo de resíduos urbanos), prevendo-se que o seu volume aumente 3 a 5 % ao ano [3].

De facto, a União Europeia (UE) tem vindo a tomar medidas de prevenção contra a geração de resíduos eléctricos e electrónicos e a promover a reutilização, reciclagem e a recuperação com o objectivo não só de reduzir quantidade destes resíduos mas também de melhorar o desempenho ambiental das entidades económicas envolvidas. Ainda com o intuito da recuperação e

eliminação destes resíduos e de protecção da saúde pública, a UE está a adoptar a restrição de substâncias perigosas neste tipo de equipamentos [9].

Os REEE, como referido, contêm uma ampla gama de poluentes, que incluem um grande número de materiais, nomeadamente, metais pesados, tais como o chumbo e o cádmio, e outros metais como o alumínio, cobre, metais preciosos, para além de vários tipos de plástico, vidro, borrachas, entre outros. No quadro 1.1 apresentam-se algumas das substâncias nocivas que podem ser encontradas nos EEE.

## 1.2 Gestão dos REEE

O interesse pela reciclagem de REEE começou a crescer nos anos 80, devido principalmente à existência de metais nobres, como o ouro, prata, e metais do grupo da platina nas placas de circuitos electrónicos, que poderiam ser economicamente recuperados [10]. A reciclagem dos REEE é um assunto importante não só do ponto de vista do tratamento de resíduos, mas também do ponto de vista da recuperação de materiais valiosos. Substituir as matérias-primas naturais por matérias-primas recicladas, resulta numa significativa poupança de energia [3].

Dadas as características, os REEE têm tido como destino mais frequente as lixeiras, os aterros, a incineração ou valorização sem qualquer pré-tratamento nem preocupação ambiental. Por isso, vários países já perceberam a urgência em valorizar, reaproveitar ou reciclar em segurança os equipamentos electrónicos em fim de vida útil de modo a proteger o meio ambiente e a poupar os recursos naturais, cada vez mais reduzidos [12].

É necessário, para bem da humanidade, desenvolver uma indústria de reciclagem dos REEE, não só pelos impactos negativos na vida das pessoas, mas também porque é uma indústria com grande potencial. Comparando o teor em metais das minas e os metais dos REEE, pode facilmente constatar-se que os REEE contêm mais metais raros e metais nobres, ou seja, os REEE são um recurso rico em metais raros, e é adequado reciclar não só por contribuir para a protecção do ambiente mas também para um contínuo desenvolvimento em impactos sociais e recompensas económicas [13].

Segundo a directiva 2002/96/CE até 31/12/2006 tinha de estar garantida a recolha selectiva de REEE numa proporção de pelo menos, 4 kg/habitante/ano [14].

Em 2007 a ONU lançou o programa StEP (Solving the E-waste Problem), na tentativa de criar padrões mundiais de tecnologias e processos de reciclagem do lixo electrónico e incentivar o aumento da vida útil dos produtos electrónicos e os mercados para a sua reutilização.

O extraordinário desenvolvimento tecnológico das duas ultimas décadas, tem trazido enormes benefícios à sociedade mas em contrapartida, também apresenta efeitos colaterais, pois transforma produtos recém lançados nos mercados rapidamente obsoletos, gerando assim grandes volumes de resíduos, fruto da velocidade de inovação tecnológica utilizada como estratégia competitiva no sector industrial.

Isto é particularmente preocupante em relação aos bens de consumo duráveis que embora denominados duráveis, tem sido cada vez mais descartáveis, em especial no sector de produtos eléctricos e electrónicos, onde a velocidade de inovação tecnológica, a diversidade de produtos, a massificação do consumo e a tendência à miniaturização são factores de produção exponencial de resíduos, muitos deles contendo substâncias perigosas, tal como foi apresentado no quadro 1.1.

**Quadro 1.1 -Algumas substâncias poluentes dos EEE [11]**

<b>Substância</b>	<b>Utilizada em</b>	<b>Prejuízos aos seres vivos</b>
<b>Chumbo</b>	Soldagem de placas de circuitos impressos (PCI), vidro dos tubos de raios catódicos, solda e vidro das lâmpadas eléctricas e fluorescentes.	Danos nos sistemas nervosos central e periférico dos seres humanos. Efeitos negativos no sistema circulatório e nos rins.
<b>Mercúrio</b>	Termóstatos, sensores, interruptores (por exemplo em PCI, equipamentos de medição e lâmpadas de descarga), equipamentos médicos, de transmissão de dados, telecomunicações e telemóveis. Só na EU são utilizadas 300 ton de Hg em sensores de presença. Estima-se que 22% do Hg consumido anualmente seja utilizado em EEE.	O Hg(inorgânico) disperso na água é transformado em metilmercúrio depositando-se nos sedimentos. O metilmercúrio acumula-se facilmente nos organismos vivos e concentra-se através da cadeia alimentar pela via dos peixes. O metilmercúrio provoca efeitos crónicos e danos no cérebro.
<b>Cádmio</b>	Presente em componentes das PCI, como resistências de chips, semicondutores e detectores de infravermelhos. Tubos de raios catódicos mais antigos contêm cádmio. Além disso, o cádmio tem sido utilizado como estabilizador em PVC.	Os compostos de Cd são classificados como tóxicos e com risco de efeitos irreversíveis á saúde humana.
<b>PBB e PBDE</b>	Mais conhecidos por retardadores de chama bromados; especialmente utilizados em quatro aplicações; PCI, conectores, coberturas de plástico e cabos (televisores, componentes e nos electrodomésticos).	Quando libertados no meio ambiente, estes compostos podem atingir a cadeia alimentar (já foram detectados PBB em peixes).

Embora em Portugal já existam empresas de reciclagem de REEE como a Interecycling e a Recielectric e duas entidades gestoras: Amb3E -Associação Portuguesa de Gestão de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos) e ERP (European Recycling Plataform) Portugal - Associação Gestora de Resíduos de Equipamentos Eléctricos e Electrónicos, o País precisa de mais acções de sensibilização e campanhas mais directas, já que (segundo um inquérito realizado pela Amb3E) as pessoas ainda não sabem o que fazer com os REEE [15].

Em 2007 Portugal recolheu, cerca de 29 mil de toneladas de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos, estando ainda longe do objectivo apontado pela Comissão Europeia de 4kg por habitante/ano (40 mil toneladas por ano). A Amb3E registou um valor próximo das 20 mil toneladas de resíduos recolhidos e valorizados mas, de acordo com a licença atribuída à Amb3E (em Abril de 2006) esta entidade deveria ter contribuído em 2007 com cerca de 34 mil toneladas. Já a ERP Portugal fechou o primeiro ano completo de actividade com um volume de 9092 toneladas de resíduos recolhidos. Em 2007, a meta imposta pela licença desta entidade gestora exigia a recolha de 8796 toneladas, o que foi ultrapassado [16].

Apesar de ter uma capacidade instalada para 35 mil toneladas, a Interecycling reciclou em 2007 cerca de 7500 toneladas de REEE, o que não significa que não existiram resíduos disponíveis para reciclar, isto é, os resíduos não chegaram à empresa para serem reciclados [15], razão que reforça a necessidade de mais campanhas de sensibilização, como as que têm ocorrido recentemente, e a introdução dos pontos electrão.

O que quer dizer que ainda não se atingiram as metas e Portugal, como País da UE terá a forte missão, que deveria ser seguida à risca, de elevar a qualidade de vida da sua população e minimizar os problemas ambientais de que é alvo.

Segundo Lamy Fontoura, Director geral da Amb3E, «muito poucos países da União Europeia estão em condições de cumprir, desde já, os objectivos definidos pela directiva europeia de REEE», acrescentando que a actividade da Amb3E «é considerada uma das mais promissoras da Europa» [16].

Bruno Vidal, Director geral de uma das empresas portuguesas especializadas na reciclagem de resíduos eléctricos e electrónicos, a Interecycling, admite que a reciclagem em Portugal “ainda está a anos luz de outros países da Europa”, onde esta actividade vai servir de “fonte de matérias

primas para a indústria europeia” [17], diz também que “será muito difícil para Portugal cumprir as metas europeias de reciclagem de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE)” [18].

No caso da Interecycling, os diversos materiais desmantelados manualmente dos REEE são encaminhados para diferentes destinos. As baterias dos telemóveis, por exemplo, que contêm materiais nocivos são enviadas para a Ecopilhas. Em relação à extracção dos metais preciosos contidos nas placas de circuitos electrónicos, essa é uma tarefa para empresas europeias exteriores à Península Ibérica, como é o caso da belga Umicore Precious Metals Refining.

“Estas empresas precisam de quantidades abissais (de circuitos), porque têm capacidade enorme instalada; é uma questão de sinergias”, destaca Vidal [17].

No entanto existem países cujos resultados comprovam que as metas são exequíveis, como a Suíça, Holanda, Noruega ou Suécia. A Noruega e a Holanda por exemplo, reciclaram respectivamente, cerca de 16 e 9 kg por habitante.

### 1.3 Problemática das Placas de Circuitos Electrónicos (PCE)

A comissão europeia exige que todos os estados membros reutilizem, reciclem e recuperem os REEE, em vez de simplesmente os depositarem em aterros. Como se viu, os REEE constituem uma vasta variedade de equipamentos, incluindo, máquinas de lavar, televisões, computadores, telemóveis, ferramentas eléctricas, equipamentos médicos, instrumentos de controlo, entre outros. Como parte da abordagem de tratamento desses resíduos a directiva 2002/96/CE requer que as PCE sejam processadas de forma sustentável.

A generalidade dos equipamentos eléctricos, tais como televisões e computadores, contêm placas de circuitos impressos bem como outros electrodomésticos como a máquina de lavar a roupa, sendo cada vez mais utilizadas placas temporizadoras e de pré-programação [19]

A produção das PCE está a crescer por todo o mundo a quantidade de metais, em especial o cobre, torna estas sucatas uma matéria-prima interessante do ponto de vista económico. Também a presença do chumbo na sua composição estimula os estudos para a sua reciclagem do ponto de vista ambiental, já que o chumbo é um metal pesado que pode causar danos ao ambiente se descartado de maneira incorrecta [5].

A composição típica de uma PCE inclui metais e não metais, e apresenta-se no quadro 1.2.

**Quadro 1.2-Composição de uma PCE[20]**

	<b>Composição</b>	<b>%</b>
<b>Não metais</b>	<b>ex: vidro, plásticos, resinas epoxy</b>	<b>&gt;70 %</b>
<b>Metais</b>	<b>Cobre</b>	<b>~16%</b>
	<b>Solda</b>	<b>~4%</b>
	<b>Ferro, ferrite</b>	<b>~3%</b>
	<b>Níquel</b>	<b>~2%</b>
	<b>Prata</b>	<b>~0,05%</b>
	<b>Ouro</b>	<b>~0,03%</b>
	<b>Paládio</b>	<b>~0,01%</b>
	<b>bismuto, antimónio, tântalo</b>	<b>&lt;0,01%</b>

As PCE também podem ser compostas por filmes poliméricos, por poliamidas, e menos frequentemente por polietileno tereftalato ou compósitos de fibra de vidro coladas com resinas termoendurecíveis [21].

A maioria dos materiais utilizados para a fabricação das PCI depende da sua aplicação futura. Por exemplo, as placas mais utilizadas em equipamentos de comunicação e computadores são feitas de resinas epoxy fibra de vidro reforçada de (com a designação comercial FR-4; aplicado em sectores de especificações mais rígidas), enquanto que as de televisões e electrodomésticos são feitas em papel reforçado com resina fenólica (FR-2), embora cada vez mais se utilizem as placas FR-4 em os equipamentos de mais elevado valor económico [19].

As PCI são compostas de camadas isolantes de fibra de vidro e resina, no qual é impresso o circuito de cobre sobre as quais são montados os componentes electrónicos e feitas as suas interconexões (o conjunto das PCI com os componentes electrónicos montados é que constitui as PCE). O número de PCE fabricadas no mundo cresce a uma taxa de 9% ao ano, com a China e Tailândia, sozinhos, a produzir mais de 200 milhões de metros quadrados todos os anos.

Actualmente, só uma pequena quantidade de PCE passa por um processo de reciclagem. Tipicamente elas são colocadas em metalurgias de cobre, onde durante a operação de fusão libertam de fumos tóxicos. A maioria continua, todavia, a ser colocada em incineradoras ou em aterros. No caso da deposição em aterros a libertação de poluentes tóxicos, como os metais pesados pode vir a contaminar águas subterrâneas e, se expostas ao ar, a atmosfera.

A produção de PCE é a base da indústria electrónica como parte de quase todos os EEE [22].

## **2. RECICLAGEM DE PLACAS DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS**

As PCE contêm a maior parte dos elementos da tabela periódica. Embora contenham metais preciosos e raros, as PCE também têm elementos tóxicos que podem causar danos irreversíveis no ser humano, plantas animais e microrganismos. A sua reciclagem, além de interessante economicamente, também se torna ambientalmente necessária. Contudo, se a reciclagem imprópriamente realizada a estes elementos tóxicos podem conduzir a um perigo ambiental grave [4].

Os processos de reciclagem de PCE utilizam, basicamente, métodos pirometalúrgicos ou hidrometalúrgicos, os quais podem gerar poluição atmosférica, através da liberação de dioxinas e furanos, ou grandes volumes de efluentes [5].

## **2.1 Vias e/ou Processos de Reciclagem de PCE**

Várias têm sido as tecnologias a ser desenvolvidas para reciclagem de sucata electrónica, incluindo processos mecânicos, químicos e térmicos. Destes, o tratamento mecânico é o que gera menos resíduos finais prejudiciais ao ambiente.

Estas técnicas têm sido adaptadas por investigadores, à recuperação de metais e plásticos a partir das PCE. Assim podem considerar-se as seguintes vias e ou processos de reciclagem para as PCE:

### **2.1.1 Via Pirometalúrgica**

A pirometalurgia é o ramo da metalurgia extractiva que envolve o tratamento dos materiais a altas temperaturas, convertendo-os em metais de diversos graus de pureza. Os processos pirometalúrgicos requerem consumos de energia elevados para atingir as temperaturas às quais os processos ocorrem. Essa energia é normalmente fornecida sob a forma de combustíveis fósseis, promoção de reacções exotérmicas do material ou calor eléctrico [23].

Dentro deste processo podemos ter a incineração, fusão, pirólise, sinterização, entre outros.

Neste método as placas são submetidas a uma temperatura de cerca de 200 °C na presença de oxigénio o que deixa uma substância de metal preto com uma rica concentração de cobre, o metal é então recuperado pela electro-refinação [24].

A incineração tem como objectivo desfazer-se dos materiais plásticos e outros materiais orgânicos presentes nos concentrados de metais [25].

Este método é desencorajado devido à sua alta exigência energia.

Já os processos pirometalúrgicos estudados por Bernardes, A. (1997), originam uma liga metálica e óxidos metálicos na forma de pó, que são retirados através da filtração do ar [26].

Um outro processo de reciclagem de placas de circuitos impressos e recuperação de materiais orgânicos e não orgânicos, é a pirólise. Esta é uma técnica térmica de reciclagem que tem sido muito pesquisada como um método de reciclagem de polímeros sintéticos, incluindo polímeros misturados com fibras de vidro [19].

### 2.1.1 Via Hidrometalúrgica

O termo hidrometalurgia designa processos de extracção nos quais a principal etapa de separação metal envolve reacções de dissolução do material em meio aquoso - lixiviação.

As aplicações tradicionais da hidrometalurgia incluem a produção de alumina, ouro, zinco, níquel, cobre, titânio, entre outros [27].

A figura 2.1 apresenta as várias etapas de um diagrama hidrometalúrgico genérico.

Assim, as técnicas hidrometalúrgicas baseiam-se na dissolução dos metais em soluções de lixiviantes, ácidas ou alcalinas, e na subsequente precipitação dos metais dissolvidos.



Figura 2. 1- Principais etapas de um diagrama hidrometalúrgico [27]

Esta via de tratamento tem como vantagens o facto de ser bastante flexível e de poder conduzir a significativas poupanças de energia. No entanto como muitos dos lixiviantes usados são concentrados de ácido nítrico, água régia, por exemplo, e soluções de cianeto [24], as suas

desvantagens situam-se nas propriedades corrosivas e venenosas das soluções lixiviantes utilizadas.

### **2.1.3 Via Electrometalúrgica**

Designa-se por electrometalurgia o conjunto de procedimentos metalúrgicos que empreguem a electricidade, seja como fonte de energia térmica, ou como agente de redução química. Contudo o princípio básico da electrometalurgia consiste na obtenção de metal através da electrólise. Esta é utilizada tanto para extracção como para afinação dos metais (refinação). Em qualquer um dos casos o electrólito é uma solução aquosa ou como uma mistura de sais fundidos [28].

A separação electrostática é definida como a separação de escolha selectiva de corpos pesados ou polarizados por um campo eléctrico. Apresenta uma reciclagem de metais e não metais a partir de REEE eficaz, sem nenhum impacto negativo para o ambiente, isso acontece especialmente nas partículas já previamente moídas, das placas de circuitos impressos [29].

### **2.1.4 Via Biotecnológica**

A utilização de bactérias na reciclagem de metais, tem sido uma das mais promissoras tecnologias de processamento metalúrgico. A biolixiviação tem sido utilizada para a recuperação de metais preciosos e cobre [30]. Esta técnica permite a reciclagem de metais reduzindo a procura de recursos naturais e o alto consumo de energia.

As sucatas electrónicas são preparadas bem como as culturas de bactérias termófilas. Depois de alguns dias consegue-se recuperar cobre, ferro zinco chumbo e níquel como demonstra Sadia Ilyas [31].

### **2.1.5 Processos de Tratamento Mecânico**

O processamento mecânico é uma alternativa para concentrar e/ou separar os metais numa fracção e os polímeros e cerâmicos noutra ou, ainda, para separar os metais entre si [1].

Um exemplo deste método é aquele em que a separação dos metais das PCE, foi realizado por redução de tamanho, seguindo-se, e separação por correntes de Eddy e por meios densos. Para além dos bons resultados de separação que terão sido obtidos por este método, os efeitos de poluição são considerados mínimos [32].

Os processos mecânicos podem ser vistos como um pré-tratamento para se obter uma separação prévia dos materiais e só de seguida é que os metais serão encaminhados para os processos metalúrgicos anteriormente descritos.

Jioa Tong da Universidade de Shanghai, na China, desenvolveram uma técnica que envolve a moagem das PCE e a utilização de um campo eléctrico de alta voltagem para separar os materiais metálicos dos não metálicos. A diferença de condutividade eléctrica entre os dois tipos de materiais, metais e não metais, permite a separação. Os metais podem então ser recuperados por destilação fraccionada a vácuo, enquanto os componentes não metálicos podem ser compactados em placas para utilização como material de construção.

Jianzhi Li, afirma que os métodos e problemas da reciclagem das PCE, podem ser divididos em dois tipos, de acordo com o material a recuperar no processo:

- Tratamento térmico: inclui pirólise, hidratação e abordagem metalúrgica;
- Tratamento não térmico: este inclui o desmantelamento (no qual começam por retirar os componentes perigosos, a fim de isolá-los do tratamento posterior; a desmontagem manual é o processo mais comum, embora não seja uma opção economicamente muito viável), separação (com aeroseparadores ou separadores por densidades, electrostáticos e magnéticos, entre outros) e tratamento químico.

Jianzhi Li assegura ainda que o maior problema da reciclagem das placas de circuitos impressos está associado à sua complexa estrutura e composição do material. Alguns desses problemas estão citados de seguida:

- É extremamente difícil saber detalhadamente a composição das PCE, pois estas são de longe os componentes mais complicados dos produtos eléctricos. As PCE diferem muito na sua

composição, o que dificulta uma análise compreensiva de grande exactidão, devido à constante inovação da tecnologia e dos materiais.

- A maioria das abordagens praticadas na reciclagem só consegue recuperar 28% do do peso total do conteúdo metálico das PCE, pelo que mais de 70% desta sucata não consegue ser eficientemente valorizada e reciclada, tendo frequentemente como destino final a incineração ou a deposição em aterros controlados (com os poluentes de toxicidade e custos inerentes a estes processo) pelo que se justifica um estudo mais profundo da reciclagem para obtenção de melhores resultados de eficiência.

- Os materiais raros como o tântalo (Ta), estão dispersos em pequenas quantidades na sucata das PCE. Embora já entendam o valor da recuperação dos materiais preciosos, os recicladores ainda não têm uma forma eficaz da recuperação destes materiais. Para se ter uma noção do como existe material precioso existente nas placas deve referir-se, como estimativa, que uma tonelada de PCE, produz aproximadamente 284g de ouro [33].

Dos materiais presentes nas PCE, os metais são, sem dúvida, a parte mais valiosa e que justificam a sua reciclagem, tornando-a “economicamente mais atractiva” [34].

Como o processo mecânico é a base do presente trabalho, as técnicas utilizadas são genericamente no anexo I.

## 2.2 Estado da Arte

Como se viu existem várias vias e/ou processos de reciclagem possíveis de serem aplicados aos resíduos de equipamentos eléctricos electrónicos. Seguidamente são apresentados alguns estudos, que têm sido propostos por diferentes autores, para a recuperação desses materiais existentes nos REEE.

Em 1997, Chmielewski et al [35] apresentam o estudo de um processo para a recuperação de ouro a partir de resíduos originados pelas indústrias de joalheria e electrónica.

Este processo hidrometalúrgico é constituído pelas operações de carbonização (a baixas temperaturas) e calcinações dos resíduos, lixiviação com solução de ácido nítrico, para a remoção de prata e outros metais e lixiviação com água régia, como solvente selectivo de ouro, seguida de extracção com solventes (com diversos extractores). Com base nos resultados obtidos, o dietil malonato foi seleccionado como o melhor extractor, para aplicações industriais.

Em 2001, Brandl et al. [36] desenvolvem um processo de biolixiviação, com fungos (*Aspergillus niger*, *Penicillium simplicissimum*) e bactérias (*Thiobacillus*, thiooxidans e *T. ferrooxidans*) dos resíduos electrónicos. Como a adição de quantidades elevadas de resíduos electrónicos conduziu a um aumento do pH inicial (devido alcalinidade dos resíduos), com o intuito da redução dos efeitos tóxicos provocados nos microorganismos, o processo teve de ser realizado em duas etapas. Na primeira etapa, a biomassa foi produzida na ausência de resíduos electrónicos (tempo de adaptação). Posteriormente, os resíduos electrónicos foram adicionados, em diferentes concentrações, e as culturas foram incubadas por um prazo adicional. Nestas condições os resultados da biolixiviação mostraram que com concentrações de REEE de 5 e 10 g / L, respectivamente, os *Thiobacilli* foram capazes de lixiviar mais de 90% do Al, Cu, Ni e Zn. Este grupo de investigadores demonstrou que é possível solubilizar metais de resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos através da utilização de microorganismos, tais como bactérias e fungos. As bactérias (*Thiobacilli*) e os fungos (*A. niger*, *P. simplicissimum*) foram capazes de crescer na presença de resíduos electrónicos. No entanto, para que a recuperação de metais seja economicamente viável, o processo de biolixiviação deverá ser desenvolvido em duas etapas onde se separa o crescimento microbiano do processo de lixiviação dos metais.

Em 2002, Veit et al [37] estudam um processo de tratamento mecânico que começa com a cominuição das placas de circuitos electrónicos (granulometria <1mm), sendo seguidamente separada granulometricamente em 3 fracções (<0,25mm, -0,25+0,5mm, -0,5+1,0mm). Após análise química procederam à separação por diferença de densidades com o TBE (tetrabromoetano; densidade de 2,96g/cm<sup>3</sup>) diluído com acetona [(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO] na proporção 1:0,27 (reduz a densidade para 2,5 g/cm<sup>3</sup> e baixa a viscosidade) tornando o processo de separação mais rápido, em todas as fracções e obtendo novas fracções pesadas (ricas em metais) fracções leves (ricas em plásticos e cerâmicos), que foram analisadas quimicamente. Os metais principais estão presentes em maior percentagem nas fracções pesadas, o que valida o processo de separação por diferença de densidade. Assim, concluíram que é possível concentrar 30% dos metais com a classificação granulométrica e 65% com a separação por densidade. Considerando os diferentes metais presentes nas amostras, este processo de separação denotou ser bastante eficaz na recuperação de cobre (55%).

Tendo em conta a investigação acabada de referir, em 2004, este grupo de investigadores com mais um elemento [38], procede ao estudo da recuperação de cobre, utilizando a cominuição, classificação granulométrica separação magnética e separação electrostática. Dois tipos de amostras, PCE (placas de circuitos electrónicos) e CE (componentes electrónicos), foram cominuídas em moinhos de lâminas para granulometrias <1mm, e separadas em 3 fracções (com as mesmas granulometrias anteriormente descritas). Cada fracção foi separada magneticamente em separador magnético por via seca, com um campo magnético de 6000 a 6500 Gauss. Da separação magnética obtiveram uma fracção magnética e outra não magnética, que apresentaram altos teores de Fe, comprovando a eficiência deste método. A fracção não magnética obtida da separação magnética foi utilizada para a separação electrostática a fim de separar materiais condutores de não condutores (separador ES 1010 Equimag), sendo os produtos obtidos analisados quimicamente. A maior quantidade de material magnético e condutor está presente na fracção mais grosseira. As fracções separadas magneticamente alcançaram, em média, 43% de Fe nas PCE e 46% de Fe nos CE. As fracções de PCE separadas electrostaticamente apresentaram, em média, 50% de cobre, 25% de estanho e 7% de chumbo, enquanto das fracções de CE resultaram concentrações de 46% Cu, 23% Sn e 8% Pb.

Em 2006, dois anos mais tarde, um grupo renovado Veit et al [5], procede à continuação do estudo da recuperação do cobre, utilizando a electroextração. Começam por proceder à lixiviação com duas soluções lixiviantes, uma de ácido sulfúrico e outra de água régia, da fracção mais grosseira das PCE e dos componentes electrónicos, a que se segue à electroextração, com uma densidade de corrente de  $40\text{mA/cm}^3$ , durante 30, 60 e 120 minutos. Os ensaios de electroextração, permitiram concluir que é possível recuperar separadamente os metais, especialmente o cobre, cujo teor atingiu mais de 98% na maioria dos ensaios.

Em 2003, Jirang Cui e Eric Forssberg [3] estudam a reciclagem mecânica dos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE), dizendo que este tipo de reciclagem, baseado na caracterização dos resíduos, proporciona um meio alternativo de recuperação de materiais economicamente valiosos, visto que processos mecânicos, tais como a cominuição, a separação magnética e por corrente de Eddy e a jigagem têm sido amplamente utilizados na indústria extractiva e de reciclagem.

Para o máximo de separação dos diversos tipos de materiais, estes autores referem que os REEE têm de ser cortados e moídos até uma granulometria entre 5 e 10mm, onde observaram que o alumínio se concentra nas fracções mais grosseiras (+6,7mm), enquanto outros metais se distribuem por fracções mais finas (-5mm).

A biolixiviação com *A. ferrooxidans* do cobre presente nas placas de circuitos electrónicos (moídas em moinho de lâminas e crivadas para obter amostras de granulometria na gama de -14 +20 malhas) foi estudada por Choi et al [39] em 2004. Nos ensaios de biolixiviação  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  formado por acção de *A. ferrooxidans* oxida o cobre presente nas placas de circuitos electrónicos (PCE), dando origem à formação do íão cúprico que entra em solução. Para melhorar a solubilidade do cobre e eficiência deste processo de biolixiviação foi experimentada a adição de um agente complexante – ácido cítrico. Antes de adição de ácido cítrico cerca de 37% em peso total de cobre lixiviado permanecia dissolvido, aumentando para mais de 80% em peso com a adição do ácido cítrico, o que indica que a adição de um agente complexante, tal como o ácido cítrico, à solução de biolixiviação pode aumentar a solubilidade dos iões metálicos lixiviados e permitir um processo de recuperação mais eficiente.

Em 2004 Cunha et al [10] propõem, alternativamente ou o desmantelamento de placas de circuitos electrónicos (PCE) por via térmica ou a via de tratamento mecânico directo. Começam

pelo desmantelamento das PCE, cabos e suportes metálicos foram tirados manualmente das PCE e estas separadas em amostras representativas. No processo de remoção dos CE foram estabelecidas condições de ensaio, variando a temperatura (200, 215, 220 e 230°C e o tempo (10, 15, 20, 25 e 30 min). Efectuados os testes de aquecimento em estufa e analisados os resultados obtidos por FRXDE e DRX, verificou-se que a máxima eficiência do processo ocorria a 220° C e com o tempo de aquecimento de 5 minutos sendo removidos cerca de 70% dos CE presentes nas PCE. Alterando as condições de ensaio, ou seja, colocando uma folha de papel de alumínio em cima da PCE, a eficiência passa para 100%. Para a via de tratamento mecânico as PCE foram cortadas em 2x2cm e moídas no moinho de martelos com uma granulometria <3mm. Uma nova etapa de amostragem foi concretizada por enquadramento e divisor de Jones, até obter amostra com 0,080kg. A classificação granulométrica foi feita por peneiração.

Em relação à separação por concentração, foram consideradas a separação magnética, utilizando uma barra magnética de 5x25cm para obtenção de produtos magnéticos e não-magnéticos), a aereoseparação com 3 frascos lavadores que reduziram progressivamente o fluxo de ar de um frasco para o seguinte, um quarto frasco com um filtro de vidro para reter as partículas mais finas e por último um balão também de vidro para assegurar que as partículas não saiam do sistema, e a flutuação em coluna de vidro, com agitação mecânica e injeção de ar comprimido para promover a operação. A observação dos resultados de separação magnética por análise química (FRX), revelaram uma concentração de ferro e níquel no produto metálico. Os resultados de difracção de raios-X e de FRX/DE para a aereoseparação mostraram que na fracção mais grosseira existe concentração de cobre. Quanto à concentração de bromo este elemento estava presente principalmente na fracção das partículas finas. Em relação aos resultados da flutuação, observaram que existe separação do cobre no afundado, enquanto no flutuado existia uma concentração de bromo. Este grupo, com o intuito de melhoramento dos processos, propôs diversos diagramas de tratamento.

Ainda em 2004, os mesmos autores mostram que no desmantelamento das PCE cerca de 40% em peso refere-se às placas de circuitos impressos, 2% à solda (onde se identifica Sn e Pb), 8-18% aos de polímeros e 40-50% aos metais e cerâmicos. É de salientar a grande quantidade de Br detectada e a sua permanência nos CE, mesmo após exposição às condições experimentais de desmantelamento das PCE por via térmica [40].

O mesmo grupo de trabalho nesse mesmo ano efectuou outro estudo, em complemento do anteriormente realizado, utilizando a moagem, amostragem e concentração por separação magnética para obter produtos capazes de constituir matérias primas de valor para serem usadas na indústria [41]. Após a operação de separação de cabos e suportes as PCE foram moídas em moinhos de martelos para as granulometrias inferiores a 3; 1,5 e 0,5mm respectivamente. Com o intuito de certificar a representatividade das amostras a utilizar, procederam-se à amostragem com o divisor de Jones. Posteriormente foi efectuada a peneiração e separação magnética (com uma barra magnética), onde verificaram (caracterização por fluorescência de raios X) que a granulometria <3mm apresentam a concentração de cobre nas classes granulométricas entre 1,25-5,00mm. Nos produtos magnéticos obtiveram concentrações significativas em ferro e níquel (mais selectiva nos produtos de maior granulometria, 3mm). A percentagem em peso da fracção magnética das PCE atingiu em média os 13%.

Concluíram também pela viabilidade da reciclagem dos resíduos da industria eléctrica e electrónica, nomeadamente das PCE e pela possibilidade de obtenção de produtos concentrados que poderão ser incorporados em várias indústrias.

Continuando a investigação da reciclagem de placas de circuitos electrónicos, Cunha et al, no ano seguinte [42], utilizando as técnicas anteriormente referidas, apresentam um desenvolvimento do estudo em que propuseram como hipótese de melhoramento dois diagramas, um para o tratamento dos CE e da solda provenientes do desmantelamento e outro diagrama de tratamento por reciclagem mecânica. É neste último diagrama que se baseia o presente trabalho, ou seja, no diagrama de tratamento que propõe as operações de cominuição, separação magnética e, em alternativa, a flutuação ou a arosetração.

Em 2006, C.Eswaraiah et al [32] estudam a arosetração pelo facto de ser um método de separação mecânica limpa e ser um método em que poderiam atingir uma boa separação entre os metais e os plásticos. Para isso iniciaram o estudo com a redução do tamanho, utilizando a guilhotina, cortando as PCE em 25x15mm. O passo seguinte foi a moagem em moinho de martelos para atingir uma granulometria <2mm, a que se seguiu a classificação granulométrica por peneiração. Seguidamente foi utilizada a separação por meios densos, utilizando a solução de cloreto de zinco, com 1,85 g/cm<sup>3</sup> de densidade fazendo com que os sólidos de densidade superior à solução afundem (metais) e os de menor densidade flutuem (plásticos), com vista a definir os

parâmetros necessários à aplicação do modelo utilizado no estudo da aeroseparação -modelo de Lynch e Rao. A amostra moída, em estudo, foi separada em plásticos e metais por meio de uma coluna vertical, um aeroclassificador. Este equipamento tem como objectivo separar as partículas consoante a sua granulometria e densidade. Procederam ao estudo detalhado desta aeroseparação por meio da determinação da curva de eficiência do processo e dos parâmetros do modelo (“classifier model”) -o modelo de simulação de Lynch e Rao. Os resultados mostram que o modelo de simulação é capaz de prever os resultados de forma bastante satisfatória.

Um novo processo de reciclagem mecânica foi investigado em 2007, pelo grupo de investigadores J. Li et al [22], que envolve a cominuição (por moinho de martelos), triagem, secagem (numa estufa a 100°C durante 3 horas) e separação electrostática de corona. Os resultados mostram que o processo realizado com duas etapas de cominuição retira, completamente, os metais das PCI. As partículas de calibre entre 0,6 e 1,2 mm foram as que se mostraram mais viáveis para a separação e futura aplicação industrial. A separação electrostática de corona foi considerada como um meio eficiente e ambientalmente adequado à recuperação de metais a partir de placas de circuitos impressos. Devido à diferença de densidade e condutividade entre os materiais metálicos e não metálicos das amostras, a separação electrostática de corona, mostrou-se eficaz, na separação entre as fracções condutoras e não condutoras.

Este grupo de investigadores, acrescido de outros dois elementos [13], ainda apresentou uma continuação do trabalho acabado de referir em que utilizaram duas amostras diferentes de resíduos, a amostra A com alguns componentes electrónicos e a amostra B sem componentes electrónicos. Ambas as amostras sofreram cominuição para a granulometrias <0,3mm a 1,2mm e foram separadas em separador electrostático de corona, donde resultaram fracções concentradas de material metálico e não metálico, esta com cerca de 70% em peso e que propõem que seja aplicada, em construção civil (após avaliação mais pormenorizada do efeito dos poluentes).

A. H. Martins [43] executa um trabalho experimental com vista à extracção de estanho e cobre. Para isso as PCE são desmanteladas, fragmentadas em moinhos de rolos e peneirado ficando a amostra com granulometria <0,208mm. Este material sofreu uma separação por meios densos com água destilada, com o objectivo de remover a parte não metálica (para não interferir nas subsequentes etapas de lixiviação e precipitação), onde existiu uma perda de 13% de Cu e 9% de

Sn inicialmente presentes na amostra moída. De seguida o material foi lixiviado com soluções aquosas 2,18N de  $H_2SO_4$ , 2,18N  $H_2SO_4+3,0N HCl$ , 3,0N  $HCl$  e 3,0N  $HCl+1,0N HNO_3$  a uma temperatura de 60°C e analisadas quimicamente. A lixiviação 2,18N  $H_2SO_4$  foi a que obteve piores resultados para Sn 2,7% e Cu <0,01%, enquanto a solução 3,0N  $HCl+1,0N HNO_3$  foi a que apresentou melhores resultados – Sn 98% e Cu 93%. As soluções de lixiviação (lixívia) foram neutralizadas com NaOH, originando precipitados ricos em Cu e Sn. A solução com melhores resultados de recuperação foi a de 3,0N  $HCl+1,0N HNO_3$ , na qual o precipitado obtido apresentou a maior massa de Cu recuperado (0,26g com pH=4,2).

A pirólise é estudada como alternativa à reciclagem de placas de circuitos impressos (PCI) [44]. Amostras de 2,0x2,0cm foram submetidas a pirólise sob uma atmosfera de azoto num forno tubular a 300, 400, 500, 600 e 700°C, durante 30 minutos.

Durante o processo de pirólise a parte orgânica é decomposta em piro-óleos e piro-gases, que podem ser usados como combustíveis ou fontes de materiais químicos: os resíduos sólidos têm cerca de 75-80%, os líquidos cerca de 9% e os gases 12-14% em peso. Não foi observada influência significativa da temperatura abaixo dos 500°C, embora, exista alguma volatilização até essa temperatura. Os piro-óleos têm valores caloríficos bastante elevados e são compostos principalmente por compostos aromáticos e oxigenados. O piro-gás é muito rico em CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e, numa pequena parte em O<sub>2</sub>, o qual depois de purificado pode vir a tornar a pirólise auto-sustentável.

Em 2009, Jae-Min Yoo et al [45], estudam um processo de separação mecânica para a recuperação de materiais metálicos a partir de placas de circuitos electrónicos. Neste estudo as placas de circuitos electrónicos foram moídas em moinho de lâminas a uma granulometria <10mm e de seguida classificadas em fracções de granulometrias: <0,6mm, 0,6-1,2, 1,2-2,5, 2,5-5,0 e >5mm. As placas moídas com a granulometria <0,5mm foram separados através da separação por gravidade, utilizando um classificador em zig-zag, onde as variações de velocidade de ar para as diferentes granulometrias foram as seguintes: 1,4 m/s para <0,6mm, 1,7m/s para 0,6-1,2mm, 2,6m/s para 1,2-2,5mm, e 3,5m/s para 2,5-5,0mm com umcaudal de alimentação do moinho a 100g/min. As amostras obtidas (leves e pesadas) foram analisadas, observando-se que a separação de metais para as fracções pesadas aumenta com o aumento de granulometria. Cerca de 95% dos metais foram separados em fracções >0,6mm, reduzindo-se para 60% quando a

granulometria passou a ser  $<0,6\text{mm}$ . A fracção  $>5,0\text{mm}$  e fracção pesada foram sujeitas a separação magnética em duas etapas. Na primeira etapa de separação magnética, cerca de 83% do ferro e níquel foram recuperados (fracção magnética) e 92% do cobre foi recuperado na fracção não magnética. A segunda etapa de separação magnética foi realizada com um campo magnético de 3000 Gauss, tendo a recuperação de níquel-ferro aumentado, mas o seu teor diminuiu de 76% para 56%. Como conclusão, os autores acrescentaram que estes métodos de separação enriqueceram a concentração de níquel-ferro e cobre, pelo que estes concentrados poderão ser utilizados como matérias-primas na indústria metalúrgica.

### **3. PARTE EXPERIMENTAL**

Neste trabalho o processamento das placas de circuitos impressos envolveu várias operações etapas de reciclagem mecânica com o intuito de separar alguns metais presentes nomeadamente o cobre e ferro. O diagrama representado na figura 3.1 mostra o esquema de todo o tratamento mecânico que foi realizado em associação com a caracterização mineralógica e química.

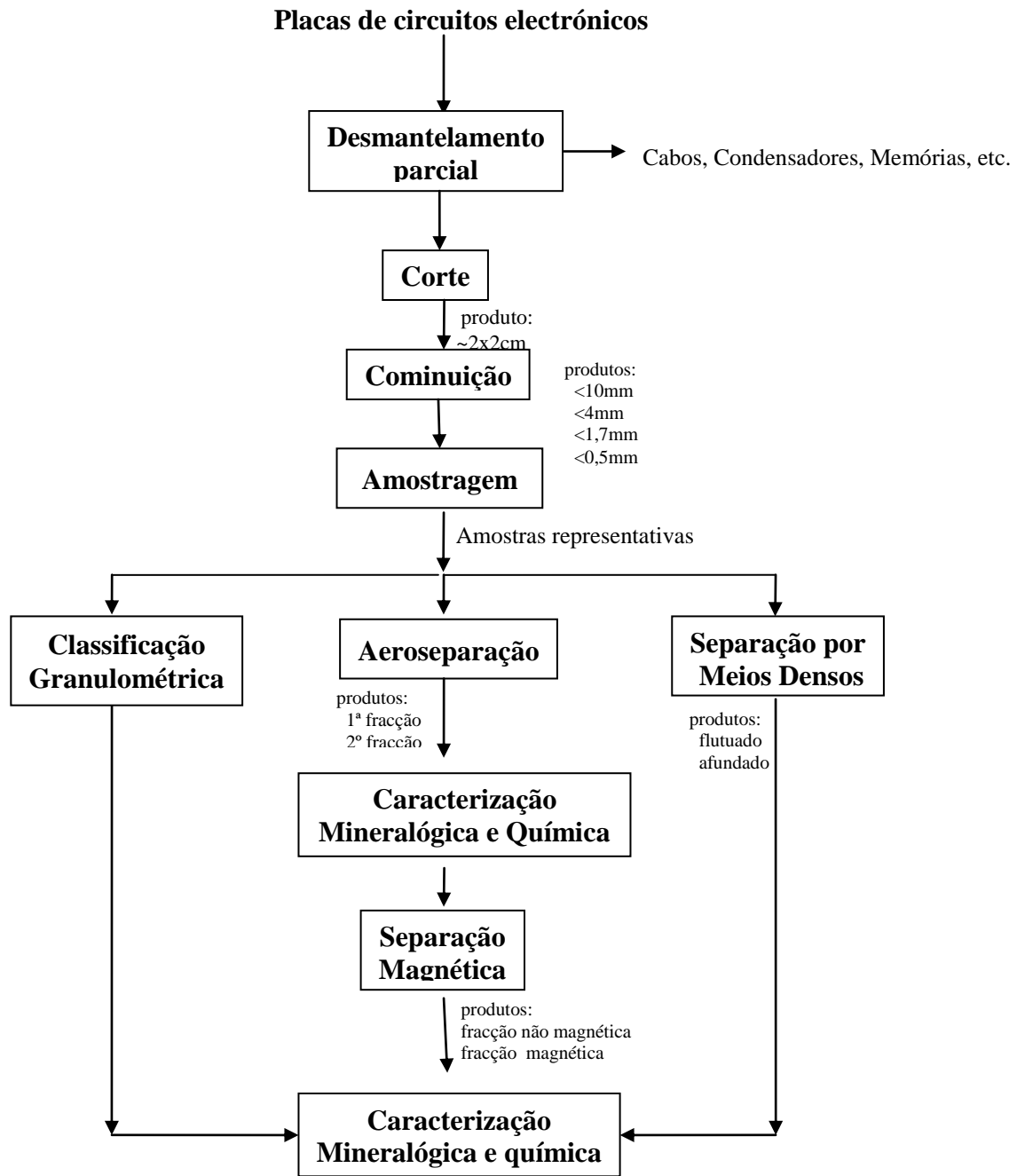


Figura 3.1-Diagrama do processamento mecânico e de caracterização dos diversos produtos

## 3.1 Operações de Reciclagem Mecânica

### 3.1.1 Cominuição

Antes de proceder à cominuição procedeu-se ao desmantelamento manual de condensadores, as memórias e alguns cabos. Após este desmantelamento parcial, passou-se à redução de tamanho das PCE, por corte à guilhotina até atingirem as dimensões de 2 x 2cm, aproximadamente, para permitir o procedimento seguinte, a cominuição. A figura 3.2 mostra a guilhotina e os fragmentos das PCE.



a)



b)

**Figura 3.2- a) Guilhotina; b) Fragmentos das placas de 2cmx2cm**

A cominuição foi efectuada no moinho de martelos (*Retsch SK100*), apresentado na figura 3.3

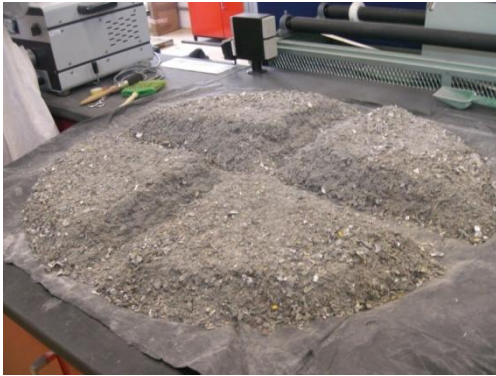


**Figura 3.3-a) Moinho de martelos; b) Interior do moinho de martelos com grelha de 10mm.**

Todo o material sofreu uma primeira etapa de fragmentação com a grelha de 10mm, passando depois à segunda etapa com a grelha de 4mm. Por fim procedeu-se ainda a uma terceira etapa de moagem com as grelhas de 1,5mm e 0,5mm, montadas no mesmo moinho de martelos.

### **3.1.2 Amostragem**

Com o objectivo de realizar as diferentes fases de tratamento das PCE sempre com amostras representativas, foi efectuada a amostragem por enquadração e divisor de Jones, figura 3.4 a) e b), respectivamente, repetindo-se o processo as vezes necessárias até obter a fracção pretendida, representativa do lote inicial



a)



b)

Figura 3.4-a) Enquartação; b) Divisor de Jones

### 3.1.3 Classificação Granulométrica

A classificação granulométrica das amostras obtidas foi efectuada por peneiração, utilizando o agitador de peneiros, *Retscher AS200*, regulado para uma amplitude de vibração de 1,2 mm, agitação permanente e um tempo de ensaio de 15 minutos, como representa a figura 2.6, e com diferentes séries de crivos, escolhidos de acordo com as grelhas utilizadas na respectiva etapa de cominuição.

Após a peneiração de cada amostra, recolheu-se o material retido de cada peneiro para os sacos de plástico, devidamente etiquetados e fechados com o selador de amostras.



**Figura 3.5-Agitador de peneiras e conjunto de peneiras empilhados.**

### **3.1.4 Aeroseparação**

Após definição da matriz de níveis codificados  $2^3$  (quadro 3.3), a escolha da ordem dos ensaios, a partir da tabela de números aleatórios, apresentadas no anexo AII, e terem sido previamente testados os factores a estudar, nomeadamente os seus intervalos de variação, foram realizados os ensaios de aeroseparação (como apresenta o quadro 3.1), a montagem utilizada no trabalho está representada na figura 3.6.

Esta montagem é constituída por três frascos lavadores a que se junta um último frasco provido dum filtro de vidro para recolher possíveis perdas de material fino, bem como o balão final.

No primeiro frasco põe-se a amostra que se pretende analisar e consoante o nível dos factores seleccionados, vai-se obter diferentes resultados da aeroseparação.



**Figura 3.6-Montagem de aeroseparação**

Neste ensaios obtiveram-se 2 fracções por ensaio, ou seja juntou-se as amostras obtidas dos últimos 3 frascos lavadores e considerou-se como sendo só uma fracção, optou-se por esta solução pois as amostras obtidas nos últimos dois frascos eram tão pequenas que não fazia sentido ter 3 a 4 fracções. No final de cada ensaio o equipamento tinha de ser muito bem limpo, para extrair e minimizar as perdas de amostra e também para melhores resultados do ensaio seguinte.

**Quadro 3.1- Tabela com as condições de cada ensaio**

<b>Ensaio</b>	<b>A- Massa sólida (g)</b>	<b>B- Tempo de aeroseparação (min)</b>	<b>C- Pressão de ar (psi)</b>
<b>1</b>	10	5	10
<b>2</b>	30	5	10
<b>3</b>	10	15	10
<b>4</b>	30	15	10
<b>5</b>	10	5	20
<b>6</b>	30	5	20
<b>7</b>	10	15	20
<b>8</b>	30	15	20

### 3.1.5 Separação Magnética

Para a execução da separação magnética, utilizou-se um bloco magnético com o qual, manualmente, se passou por cima da amostra espalhada num plástico. As partículas que ficaram agarradas ao bloco foram denominadas de magnéticas, as que continuaram sobre o plástico de não magnéticas. O procedimento repetiu-se da mesma forma para as outras amostras. Foram apenas utilizadas duas amostras (quadro 3.2), seleccionadas a partir de cálculos feitos dos resultados obtidos de FRX dos ensaios de aereoseparação.

**Quadro 3.2- Condições de aereoseparação dos ensaios utilizados em separação magnética**

Granulometria (mm)	A- Massa sólida (g)	B- Tempo de aereoseparação (min)	C- Pressão de ar (psi)
<b>0,5</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>20</b>
<b>1,7</b>	<b>30</b>	<b>5</b>	<b>10</b>

A escolha destas amostras teve em consideração a percentagem em metal obtidas e as variáveis de ensaio. O ensaio de 0,5mm foi escolhido por ser o melhor ensaio com melhores resultados e onde a massa era menor. O de 1,7mm foi seleccionado por existir uma maior % de metal na primeira fracção e ter uma massa elevada.

### 3.1.6 Separação por Meios Densos

Após a moagem e homogeneização, foi realizada a separação por meios densos com o fim de observar o comportamento das diferentes granulometrias do material, este processo consiste na separação de partículas sólidas em função da diferença de densidades.

A separação por meios densos foi conseguida através da molhagem das amostras, com a ajuda de uma vareta. O líquido utilizado foi a água, pois era o mais simples, de menor custo e mais acessível.

Depois de uma hora de repouso, as partículas mais pesadas foram para o fundo e as mais leves flutuavam à superfície, obtendo-se assim duas amostras, afundado e flutuado. O flutuado e

afundado, foram recolhidos e passaram pela filtração com o Kitassato e funil de Buchner, mais conhecida por filtração de vácuo. Quando feita a filtração, deixou-se secar o material filtrado, 2 dias ao ar livre, de modo a se poder recolher seco o material para se proceder à pesagem do mesmo.

De seguida fez-se a observação através do FRX, para ver se realmente existiu separação do material. E após a observação dos resultados obtidos de FRX de cada duas amostras de cada granulometria de 0,5;1,7 e 4mm, verificou-se que poderia ser possível a separação de material nos ensaios da granulometria de 0,5mm, por isso efectuou-se mais dois ensaios desta granulometria.

## 3.2 Técnicas de Caracterização

### 3.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios -X (FRX)

Para a caracterização química das diversas amostras, utilizou-se o espectrómetro Fluorescência de Raio-X de dispersão por comprimentos de onda (FRXDCO) (Axios PANalytical, 4.0 kW, apresentado na figura 3.7), o qual permite análises químicas elementares, rápidas, não destrutivas. Para a análise bastou retirar uma pequena quantidade representativa de cada amostra a estudar coloca-la no porta amostras do espectrómetro, proceder aos varrimentos adequados (previamente programados), aplicando as seguintes condições: uma diferença de potencial de 20-60 kV; uma intensidade de corrente de 10-125 mA; detectores de sintonização e de fluxo; cristais analisadores LiF200, LiF220, PE002, Ge e PX1; máscara de 37mm e meio de hélio. Fazendo a leitura do teor dos elementos existentes em cada amostra com o software de identificação e quantificação IQ<sup>+</sup>.



Figura 3.7-Espectrómetro de FRXDCO [27]

### 3.2.2 Microscopia Óptica

A caracterização por microscopia óptica, foi efectuada nos produtos de fragmentação com granulometria inferior a 4;1,7 e 0,5mm, utilizando o microscópio óptico – *Metallux, Leitz*, com ampliações de 100x e 200x.

### 3.2.3 Difraccção de Raios-X

Para a identificação das espécies existentes na PCE, foram realizados ensaios de difracção de raio-X (DRX) em difractómetro Rigaku, modelo DMAX III-C 3KW, utilizando a radiação  $K_{\alpha}$  característica do cobre ( $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ ) e monocromadores de grafite. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente, e as amostras foram preparadas em forma de pastilhas, com uma massa de 0,5g e uma carga de 1T, utilizando prensa hidráulica, Specac P/N apresentada na figura 3.7. Teve-se como condições de realização dos ensaios de DRX, 30 kV de alta tensão; 20 mA de corrente de filamento, o incremento de  $0,08^{\circ}$ , gama angular ( $2\theta^{\circ}$ ) 30-90 e o modo utilizado foi por degraus.

### **3.3 Metodologia de Cálculo e Interpretação de Resultados**

#### **3.3.1. Planeamento Factorial de Experiências**

Para uma boa aplicação do planeamento factorial de experiências é essencial efectuar uma abordagem sistemática, começando por uma identificação e definição do tipo de plano a realizar, passando pela selecção dos factores a variar e respectivos níveis, pelas eventuais restrições à experiência e culminando pela definição da sua resposta - variável quantificadora do sistema.

A realização do desenho ou planeamento de experiências é particularmente útil a quando da concepção ou melhoramento dum processo pois possibilita a identificação das características principais do produto, dos factores determinantes do processo e a que nível estes o afectam.

Denomina-se por factores os parâmetros ou variáveis independentes que podem influenciar as características da qualidade que se pretende otimizar. Em geral, são divididos em factores de controlo, como por exemplo a massa dum sólido a ensaiar, e factores de ruído, como por exemplo, a humidade ou temperatura ambiente. Os primeiros são possíveis de controlar, enquanto que os segundos por razões técnicas/económicas não podemos ou não queremos intervir.

Designa-se por níveis de factores os valores discretos considerados para controlar os efeitos da experimentação. São valores tecnicamente justificados e que permitem a operação a esses níveis.

As interacções são fenómenos de interferência. Estas provocam não só a influência de um factor sobre a característica da qualidade de uma forma desconhecida, como também criam uma interferência com outros factores. Entende-se por resposta o resultado experimental obtido.

#### **3.3.2 Plano factorial**

O objectivo dos planos factoriais é estudar os efeitos individuais dos factores e as relações entre eles na variável resposta [46].

É usual representar-se um plano factorial por uma base e um expoente. O expoente indica o número de factores em análise e a base o número de níveis de cada factor. Quando se pretende

estudar o efeito entre  $k$  factores a dois níveis, o número de experiências necessária a efectuar é dada pela expressão  $2^k$ . Geralmente, os níveis dos factores de controlo (massa de sólido, tempo de aereoseparação e pressão de ar) são nomeados pelos sinais – para o nível baixo e + para o nível alto, porém o que importa é a relação inicial entre o sinal dado e o efeito obtido, não sendo um critério definido a nomeação dos sinais. Tendo em conta a minimização do erro devem efectuar-se aleatoriamente várias réplicas, isto é, várias repetições do plano factorial de experiências.

No caso presente o plano factorial utilizado é o  $2^3$ , em que as experiências devem ser realizadas tendo em conta todas as combinações possíveis entres os factores bem como os seus efeitos isolados.

Os sinais para os efeitos de interacção de 2ª ordem e de ordem superior entre todas as variáveis do plano são obtidas pelo produto algébrico dos sinais originais das variáveis envolvidas. Desta maneira, obtém-se, para o caso em estudo a matriz dos níveis codificados  $2^3$  do quadro 3.3.

**Quadro 3.3- Matriz de níveis codificados  $2^3$**

Nº de ordem dos ensaios	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	-	+	-	-	-
5	-	-	+	+	-	-	+
6	+	-	+	-	+	-	-
7	-	+	+	-	-	+	-
8	+	+	+	+	+	+	+

### 3.3.3 Modelo Matemático Empírico

Pretende-se obter um modelo matemático empírico que forneça uma relação entre os factores e a resposta obtida, a qual é normalmente dada por um polinómio que neste estudo, é um polinómio simples, dado que contêm apenas termos lineares. Considerando os três factores,  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$  o tem a forma:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (3.1)$$

O coeficiente  $b_0$  é o valor populacional da média de todas as respostas obtidas (normalmente chamamos de coeficiente independente), o  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  são os coeficientes das variáveis  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , e  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$  os coeficientes relacionados com as variáveis de interacção  $x_1x_2$ ,  $x_1x_3$ ,  $x_2x_3$  e  $x_1x_2x_3$  respectivamente.

Este modelo linear é capaz de interpretar correctamente o processo na gama de variações dos factores significativos (previamente determinados por análise da variância) utilizados nas experiências do plano factorial [47].

### 3.3.4 Análise de Variância

Para se proceder à análise dos resultados obtidos experimentalmente recorre-se à denominada “Análise da Variância” (ANOVA; sigla do inglês “Analysis of Variance”), em que utiliza a distribuição de *t Student* para avaliar a significância dos factores e a distribuição F (Fisher-Snedecor) para a adequação do modelo matemático. Esta análise da variância foi efectuada com o programa *JMP 6.0*.

De posse dos valores calculados para o estatístico t, se a probabilidade calculada for menor que o nível de significância estipulado (5%), pode dizer-se que é um factor significativo.

No caso da distribuição F, se o valor de  $F_0$  (valor calculado de F) for maior que o valor de  $F_{tab}$  (valor retirado da tabela de distribuição de Fisher-Snedecor com o nível de significância de a 5%)

pode afirmar-se a adequação do modelo matemático e se  $F_0$  menor do que  $F_{tab}$  deve optar-se pela não adequação do modelo matemático.

Outro parâmetro estatístico a ter em conta é o coeficiente de correlação ( $R^2$ ), que é dado pelo programa, mas pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$R^2 = \frac{SS_{modelo}}{SS_{Total}} \quad (3.2)$$

Onde:

$R^2$  – coeficiente de correlação

$SS_{modelo}$  – variação do modelo

$SS_{Total}$  – variação total

O valor de  $R^2$  representa a fracção da variação que é explicada pelo modelo matemático. Quanto mais próximo de 1 for o valor de  $R^2$ , melhor será o ajuste do modelo às respostas observadas [48].

No quadro 3.4 exemplifica-se a construção duma tabela de análise de variância.

**Quadro 3.4-Exemplo de construção de uma tabela ANOVA**

Fonte de variação	SS	g.l.	Ms	$F_0$
Factores/Interacções	$SS_x$	a-1	$MS_x = SS_x / g.l._x$	$F_0 = MS_x / MS_{erro}$
Erro	$SS_{erro}$	N-a	$MS_{erro} = SS_{erro} / g.l._{erro}$	
Total	$SS_T$	N-1		

Do quadro 3.4 tem-se que:

$SS_x$ - variação dos factores e interacções X;

$SS_{erro}$ - variação do erro;

$SS_T$ - variação total;

$MS_x$ - variância dos factores e interacções;

$MS_{erro}$ - variância do erro;

a- número de observações por nível;

N- número total de observações;

g.l.- graus de liberdade.

Para o cálculo da variação dos factores e interacções X e variação do erro utilizam-se as seguintes expressões, respectivamente:

$$SS_x = \frac{(\text{Contraste } X)^2}{r \cdot 2^{k-p}} \quad (3.3)$$

$$SS_{\text{erro}} = SS_T - SS_x \quad (3.4)$$

Em que:

Contraste X- representa a soma das respostas com X n nível alto e  $\sum X$  a soma das respostas no nível baixo;

r- réplicas;

k- número de factores;

p- factores gerados;

SS<sub>erro</sub>- variação do erro;

SS<sub>T</sub>- variação total;

SS<sub>x</sub>- variação dos factores e interacções;

## 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

### 4.1 Cominuição

Após o corte à guilhotina das PCE até ficarem com cerca de 2x2cm, procedeu-se à sua cominuição, obtendo-se sucessivamente produtos de granulometria inferior a 10, 4, 1,7 e 0,5mm.

#### 4.1.1 Caracterização Química de Produtos de Cominuição

Com o objectivo de conhecer a composição química das PCE, que se pretendia estudar, procedeu-se à análise química por FRX/DCO/IQ+ de amostras representativas dos diversos produtos de cominuição.

O quadro 4.1 mostra uma significativa variedade de elementos presentes nas PCE, resultante da sua complexidade de constituição, o que indicia a dificuldade existente na reciclagem deste material.

Quadro 4.1- Composição química duma amostra de PCE (exemplo)

Elemento	Concentração (%)	Elemento	Concentração (%)	Elemento	Concentração (%)
<b>O</b>	3	<b>Cr</b>	0,4	<b>Nb</b>	0,06
<b>Na</b>	0,01	<b>Mn</b>	2	<b>Ag</b>	0,1
<b>Mg</b>	0,02	<b>Fe</b>	16	<b>Sn</b>	4
<b>Al</b>	1	<b>Co</b>	0,04	<b>Sb</b>	2
<b>Si</b>	7	<b>Ni</b>	0,5	<b>I</b>	0,4
<b>P</b>	0,4	<b>Cu</b>	31	<b>Ba</b>	0,5
<b>S</b>	0,5	<b>Zn</b>	3	<b>Pb</b>	4
<b>Cl</b>	0,4	<b>Br</b>	16	<b>Ti</b>	0,5
<b>Ca</b>	7	<b>Sr</b>	0,07	<b>Zr</b>	0,04

No quadro 4.1 a soma das concentrações dos elementos analisados é inferior a 100 %, facto que resultar da existência doutros elementos químicos não detectados, em percentagens menores e vestígios (eventualmente, hidrocarbonetos).

O quadro 4.2 compara os resultados obtidos na análise química de seis amostras de cada um dos produtos de cominuição de granulometria inferior a 4, 1,7 e 0,5mm para os elementos seleccionados para controlo das operações de reciclagem das PCE:

- Cobre e Ferro, como metais de valor e/ou mais abundantes;
- Bromo, como o elemento poluente em percentagem mais elevada.

**Quadro 4.2- Resultados de análise química dos produtos de cominuição e respectivo cálculo estatístico**

Produtos de cominuição (mm)	Amostra (Nº.)	Cu (%)	Fe (%)	Br (%)
4	1	15	20	25
	2	16	22	25
	3	15	22	25
	4	14	18	25
	5	15	19	24
	6	17	20	22
	<b>Média</b>	15	20	24
	<b>Desvio padrão</b>	1,1	2,6	1,5
	<b>Intervalo de confiança de 95%</b>	14< $\mu$ <17	18< $\mu$ <22	23< $\mu$ <26
1,7	1	21	16	23
	2	21	16	22
	3	20	17	25
	4	20	16	24
	5	19	15	24
	6	22	16	24
	<b>Média</b>	21	16	24
	<b>Desvio padrão</b>	1,1	0,4	1,1
	<b>Intervalo de confiança de 95%</b>	19< $\mu$ <22	15< $\mu$ <17	22< $\mu$ <25
0,5	1	31	16	16
	2	33	16	16
	3	32	15	15
	4	30	16	16
	5	31	16	15
	6	31	16	15
	<b>Média</b>	31	16	16
	<b>Desvio padrão</b>	1,1	0,2	0,3
	<b>Intervalo de confiança de 95%</b>	30< $\mu$ <33	15< $\mu$ <16	15< $\mu$ <16

Para o cálculo estatístico da média, desvio padrão e intervalo de confiança apresentado no quadro 4.2 foram, respectivamente usadas as fórmulas seguintes:

$$1) \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4.1)$$

$$2) \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

$$3) \quad \bar{X} - t_{\frac{\alpha}{2}; n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\frac{\alpha}{2}; n-1} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

Em que:

$\bar{X}$  - média, valor médio ( $\mu = \bar{X}$ );

$x_i$  - valor da amostra  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ );

$n$  - número de amostras;

$S$  - desvio padrão;

$t$  - estatístico  $t_{\text{student}}$ , para  $n < 30$ ;

$\alpha$  - nível de significância ( $\alpha = 0,05$ ).

Do estudo estatístico apresentado no quadro 4.2 constata-se que nem todos os resultados de análise química se encontram no interior dos respectivos intervalos de confiança a 95%.

Os resultados do quadro 4.2 revelam, uma variabilidade não desprezável, de granulometria para granulometria, dos valores de percentagem dos elementos seleccionados para controlo das operações de reciclagem.

De facto, o nível de exposição das partículas fragmentadas variam com a granulometria do material fragmentado, efeito este que não é colmatado pelo tipo de preparação das amostras utilizado na análise química.

Assim, para evitar tanto quanto possível este efeito, os rendimentos em metal das diferentes operações foram calculados, tendo sempre em consideração valores de alimentação reconstituídos a partir dos resultados observados nos respectivos produtos.

## 4.1.2 Caracterização Granulométrica dos Produtos de Cominuição

A partir do conjunto de valores de massa registados na classificação granulométrica dos produtos de cada uma das etapas de cominuição calcularam-se as percentagens em peso e cumulativas, de cada amostra, como mostram os quadros AIII.1 a AIII.4 do anexo III.

### 4.1.2.1 Caracterização Granulométrica do Produto <10mm

Com base nos dados do quadro AIII.1 (anexo III) procedeu-se à representação gráfica dos resultados da análise granulométrica, sob a forma de histograma, que se apresenta na figura 4.1.

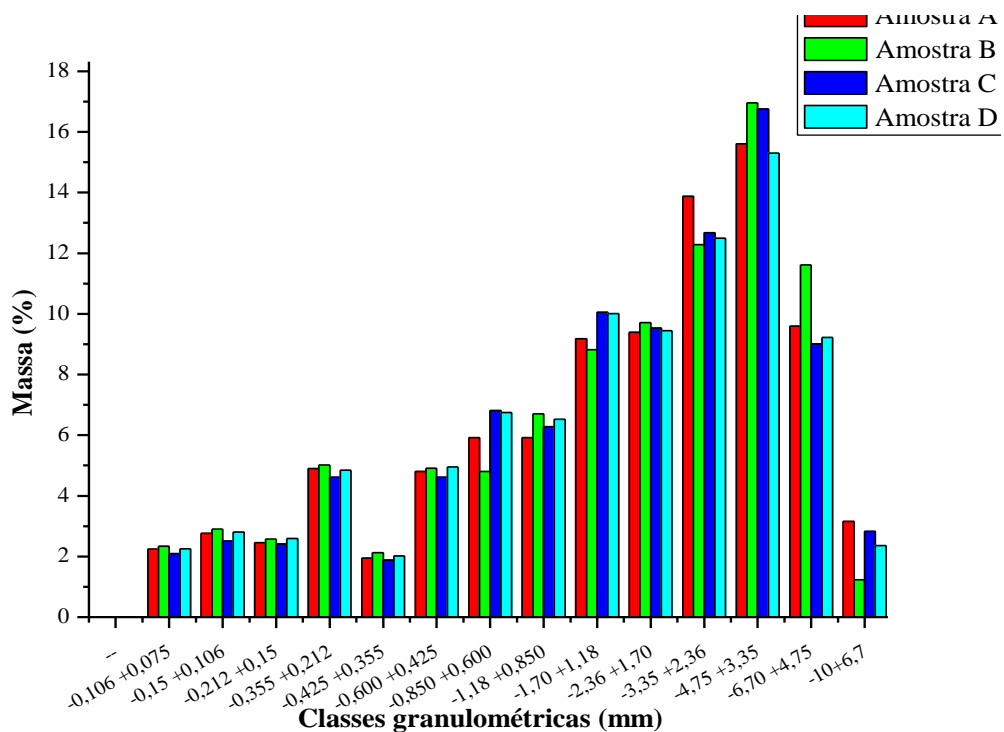
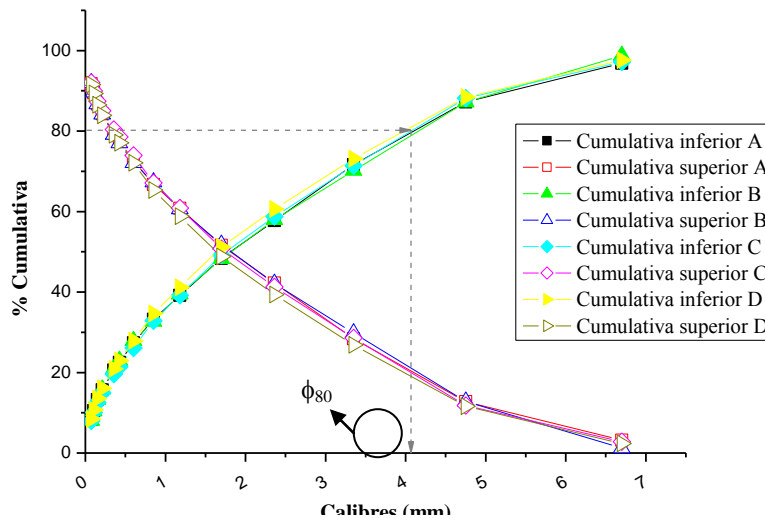


Figura 4.1-Histograma do produto de cominuição de granulometria <10mm

Da figura 4.1, verifica-se que (-4,75 +3,35) é a classe granulométrica de maior frequência com cerca de 16%, seguida de perto da classe (-3,35 +2,36), com cerca de 12,6 %, e das classes

(-6,70+4,75), (-2,36+1,70) e (-1,70 + 1,18), todas com uma percentagem de massa de material próxima de 9%.

Da mesma maneira, a figura 4.2 ilustra as curvas cumulativas inferiores e superiores das quatro replicações do produto de cominuição de granulometria <10mm.



**Figura 4.2-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição de granulometria <10mm**

Estas curvas cumulativas permitem conhecer a distribuição granulométrica obtida na fragmentação primária. Assim, a malha através da qual passa 80% do produto de cominuição com granulometria <10mm,  $\phi_{80}$ , é de cerca de 4mm, tal como se pode ver na figura 4.2 ou, mais em pormenor, nas figuras AIV.1 a AIV. 4 (anexo IV) para cada uma das amostras (A, B, C e D) ensaiadas.

### 4.1.2.2 Caracterização Granulométrica do Produto <4mm

Da mesma maneira o quadro AIII.2 o anexo III, resume os valores obtidos para os produtos de cominuição com granulometria <4mm.

Na figura 4.3 estão representadas as distribuições de frequências das amostras do produto de cominuição de granulometria <4mm.

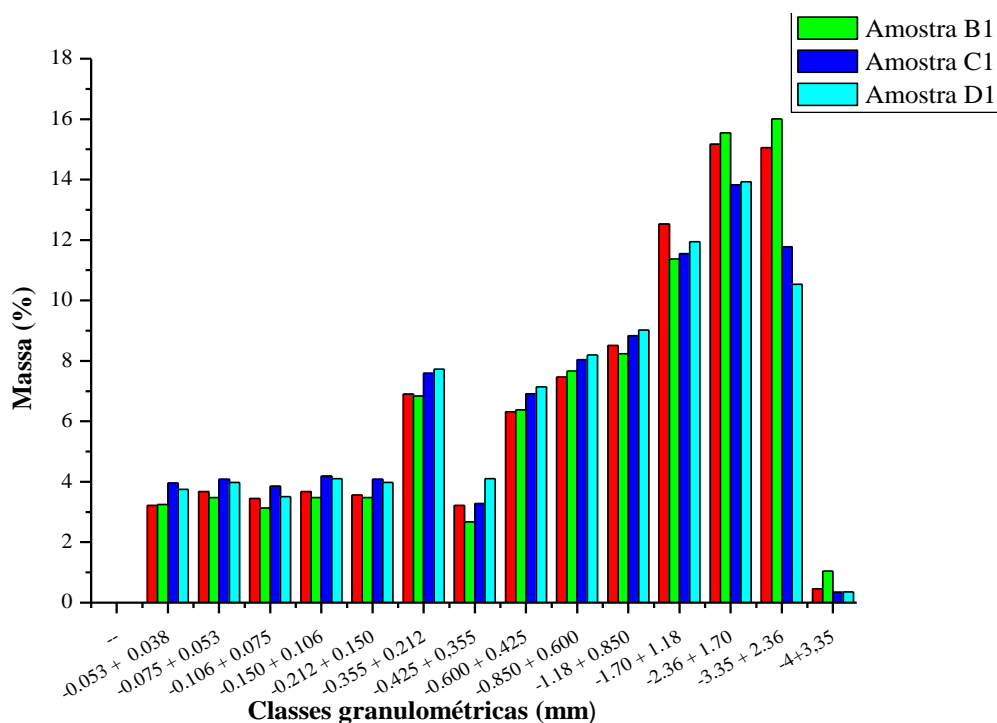
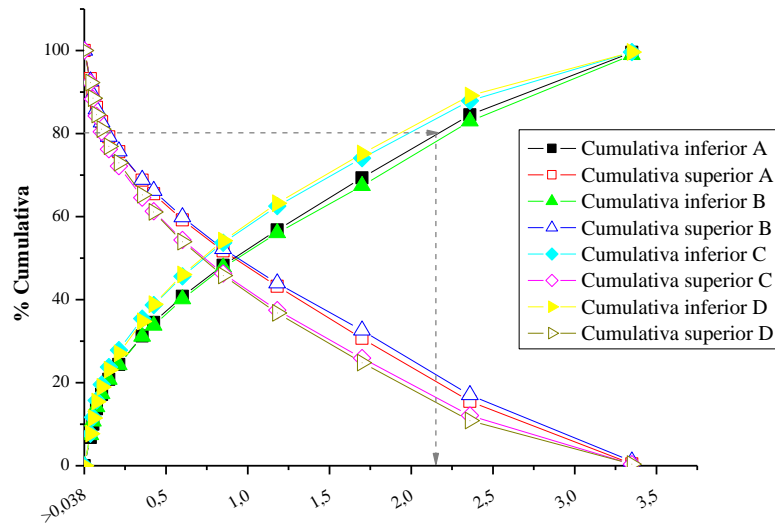


Figura 4.3- Histograma do produto de cominuição de granulometria <4mm

Ao visualizar a figura 4.3 pode reparar-se que as classes granulométricas de maior frequência, com cerca de 15%, são as (-3,35+2,36) e (-2,36+1,70) logo seguidas da classe (-1,70+1,18) com cerca de 13%.

As curvas cumulativas da figura 4.4 permitem conhecer a distribuição granulométrica obtida na fragmentação com o crivo de 4mm.



**Figura 4.4-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição <4mm**

Assim, a malha através da qual passa 80% do produto de cominuição com granulometria <4mm,  $\phi_{80}$ , é de cerca de 2mm, tal como se pode ver em pormenor nas figuras AIV.5 a AIV. 8 (anexo IV) para cada uma das amostras ensaiadas.

### 4.1.2.3 Caracterização Granulométrica do Produto <1,7mm

Após os ensaios para esta granulometria, calcularam-se as percentagens de massa retida em cada peneiro e acumulada (apresentados no quadro AIII.3, no anexo III), cujas representações gráficas são ilustradas nas figuras 4.5 e 4.6.

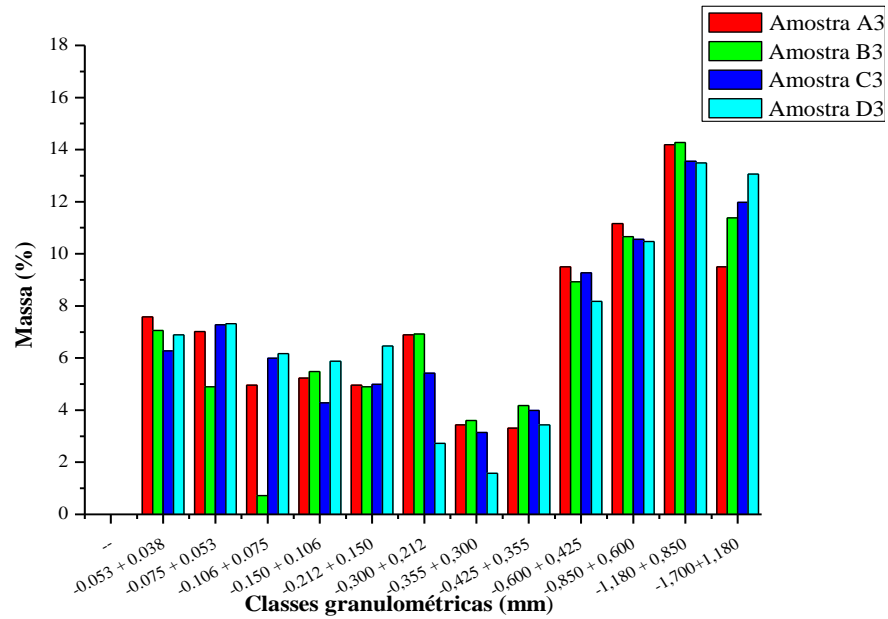


Figura 4.5- Histograma do produto de cominuição de granulometria <1,7mm

No histograma das amostras de granulometria <1,7mm (figura 4.5) pode ver-se que a percentagem de massa na classe granulométrica mais frequente (-1,18+0,850) é da ordem dos 14%, seguindo-se com cerca de 12% a classe (-1,700+1,18) e com de cerca de 11% a classe (-850+0,600).

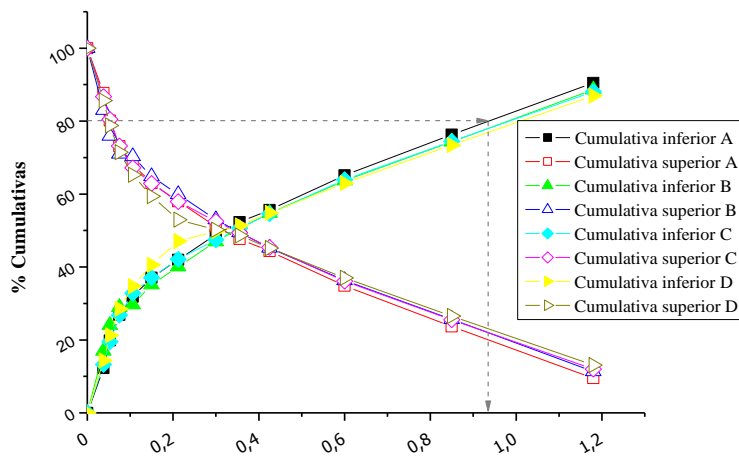


Figura 4.6-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição de granulometria <1,7mm

A malha através da qual passa 80% do produto de cominuição com granulometria  $<1,7\text{mm}$  ( $\phi_{80}$ ) é de cerca de  $0,9\text{mm}$  (figura 4.6), tal como se pode ver em pormenor nas figuras AIV.9 a AIV.12 (anexo IV) para cada um dos ensaios efectuados.

#### 4.1.2.3 Caracterização Granulométrica do Produto $<0,5\text{mm}$

Da mesma forma se utiliza o quadro AIII.4, obtendo-se o histograma e as curvas cumulativas, representadas nas figuras 4.7 e 4.8, respectivamente.

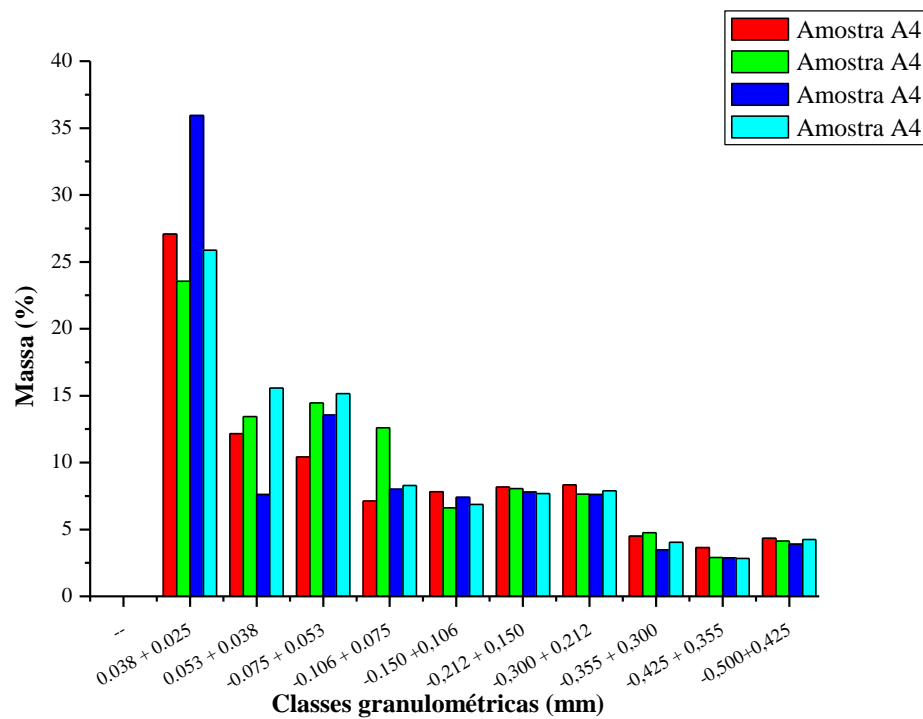
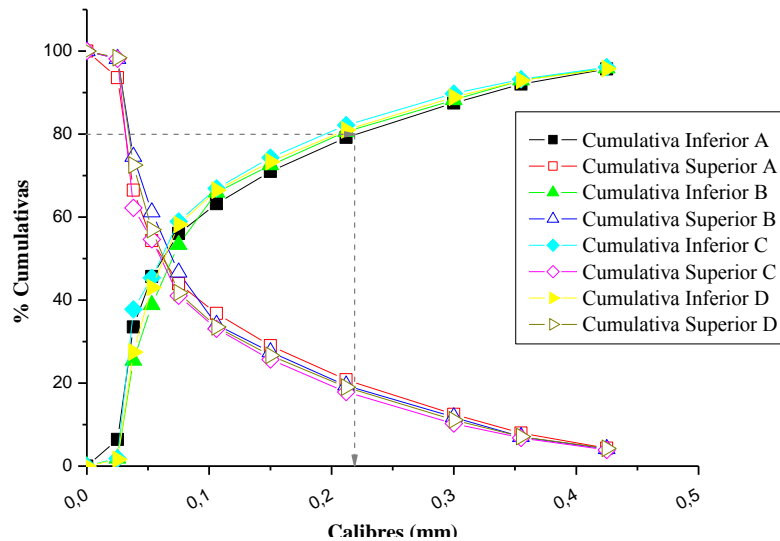


Figura 4.7- Histograma do produto de cominuição de granulometria  $<0,5\text{mm}$

Ao analisar o histograma vê-se com grande destaque, que na classe granulométrica mais frequente, (-0,038+0,025), existe uma percentagem de massa cerca de 28%, seguindo-se as classes (-0,053+0,038) e (-0,075+0,053) com uma frequência da ordem dos 13% de massa.



**Figura 4.8-Curvas cumulativas inferiores e superiores do produto de cominuição de granulometria <0,5mm**

Ao observar as curvas cumulativas da figura 4.8, vê-se que a malha através da qual passa 80% ( $\phi_{80}$ ) do produto de cominuição com granulometria <0,5mm é de cerca de 0,2mm, tal como se pode ver em pormenor nas figuras AIV.13 a AIV.16 (anexo IV).

### 4.1.3 Determinação das Relações de Fragmentação

O quadro 4.3 sumariza os resultados obtidos para  $\phi_{80}$  nos diversos ensaios de fragmentação, bem como para o respectivo cálculo estatístico.

**Quadro 4.3- Valores de  $\phi_{80}$  de todas as amostras e cálculo estatístico respectivo**

<b>Ensaio</b>	$\phi_{80}$ produto <b>&lt;10mm</b>	$\phi_{80}$ produto <b>&lt;4mm</b>	$\phi_{80}$ produto <b>&lt;1,7mm</b>	$\phi_{80}$ produto <b>&lt;0,5mm</b>
<b>A</b>	4,09	2,16	0,925	0,219
<b>B</b>	4,15	2,23	0,976	0,205
<b>C</b>	4,02	1,97	0,985	0,189
<b>D</b>	3,98	1,92	1,00	0,202
<b>Média</b>	4,06	2,07	0,97	0,204
<b>Desvio padrão</b>	0,077	0,023	0,032	0,012
<b>Intervalo de confiança a 95%</b>	4,011< $\mu$ <4,092	2,010< $\mu$ <2,130	0,919< $\mu$ <1,022	0,185< $\mu$ <0,223

A média, desvio padrão e intervalo de confiança de 95%, foram calculadas por intermédio das expressões (4.1) a (4.3) anteriormente referidas.

O desvio padrão existente é pequeno e os valores estão dentro do intervalo de confiança a 95%.

Para caracterizar a redução do calibre teoricamente possível no moinho de martelos, foi ainda calculada a relação de fragmentação aparente  $R_a$ , através da equação:

$$R_a = \frac{B}{g} \quad (4.4)$$

sendo:

$B$  - dimensão da abertura de entrada da alimentação em aparelho de fragmentação, “Boca”;

$g$  – dimensão de abertura de saída dos produtos em equipamentos de fragmentação, “goela”.

Os valores de  $\phi_{80}$  retirados das curvas cumulativas inferiores das figuras AIV.1 a AIV.16 (anexo IV) para cada uma das amostras dos vários produtos de cominuição são a base para o cálculo da relação de fragmentação a 80%,  $R_{80}$ , utilizando a expressão:

$$R_{80} = \frac{\phi_{80}^a}{\phi_{80}^p} \quad (4.5)$$

Em que:

$\phi_{80}^a$  - Calibre a 80% da alimentação;

$\phi_{80}^p$  - Calibre a 80% do produto de fragmentação.

O quadro 4.4 resume os valores observados para as diversas relações de fragmentação aparente e a 80%

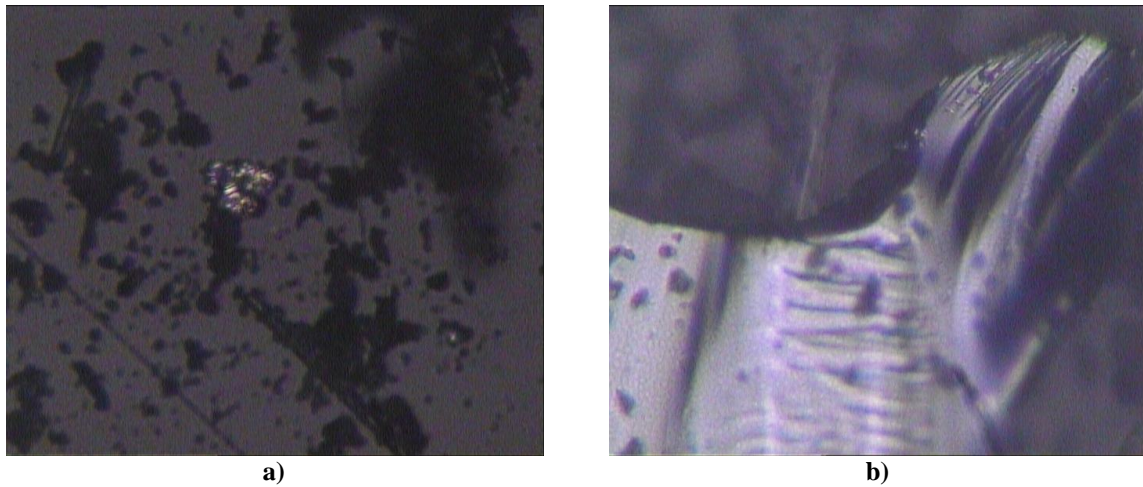
**Quadro 4.4-Relações de fragmentação dos produtos de diferentes granulometrias**

<b>Produto</b>	<b>&lt;10mm</b>	<b>&lt;4mm</b>	<b>&lt;1,7mm</b>	<b>&lt;0,5mm</b>
<b>R<sub>a</sub></b>	2,0	2,5	2,4	3,4
<b>R<sub>80</sub></b>	4,924	1,962	2,132	4,767

#### **4.1.4 Caracterização por Microscopia Óptica dos Produtos de Cominuição**

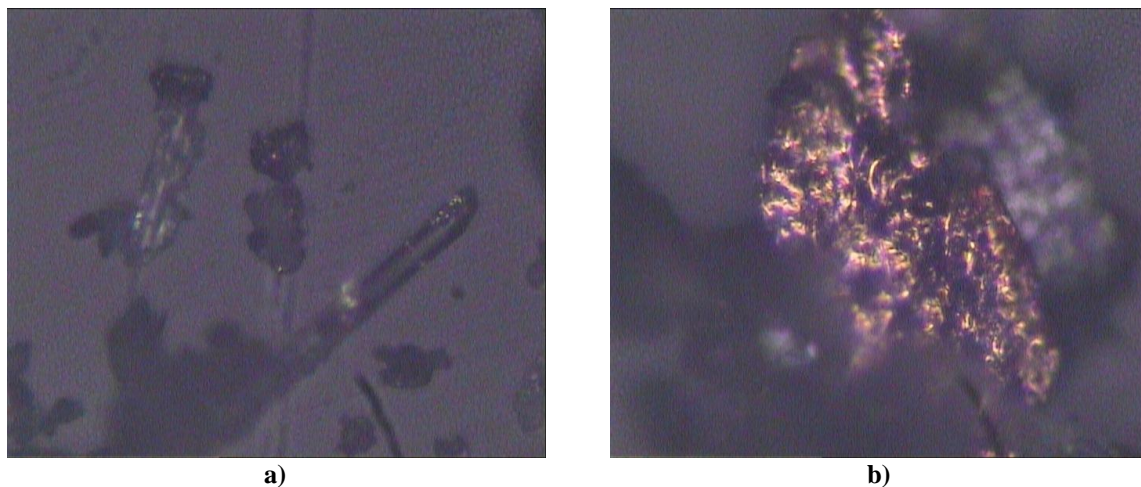
A microscopia óptica teve como objectivo completar a caracterização do produtos pela visualização de alguns elementos metálicos presentes nas granulometrias que iam servir de matéria prima para os subseqüentes ensaios de separação ou concentração.

A figura 4.9 ilustra uma partícula metálica, eventualmente de aço, rodeada de fragmentos poliméricos e cerâmicos (negros) existentes na amostra observada de granulometria <4mm com ampliações de 100 e de 200 vezes.



**Figura 4.9-**Amostra de granulometria <4mm.; representa a partícula metálica rodeada de fragmentos poliméricos e cerâmicos a) 100x; b) 200x

A figura 4.10 apresenta uma partícula de cobre e o respectivo pormenor (com uma ampliação de 200 vezes), presente na amostra de granulometria <1,7mm.



**Figura 4.10-** Amostra de granulometria <1,7mm, da partícula de cobre e fragmentos poliméricos: a) 100x; b) 200x

Na figura 4.11 a) podem ver-se diversas partículas de cobre e de ferro. As partículas de ferro apresentam a forma de varão. Na figura 4.11b) tem-se uma melhor visualização da partícula de cobre.

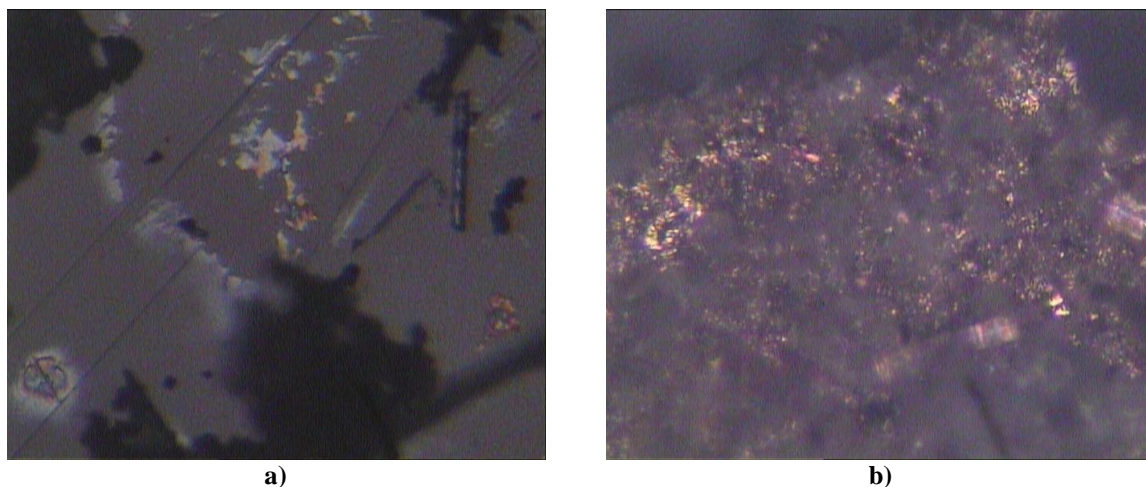


Figura 4.11-Amostra de granulometria <0,5mm, partículas de cobre e ferro: a) 100x;b) 200x

Nas amostras observadas com o microscópio óptico os diversos elementos, foram visualizados com tamanhos diferentes, devido à respectiva granulometria.

#### **4.1.5 Caracterização por Difracção de Raios-X dos Produtos de Cominuição**

Para a identificação dos picos de difracção foram utilizados o programa informático EVA e a base de dados com as fichas de identificação das espécies JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards). Este programa possibilita a sobreposição, ao difractograma de difracção das linhas de uma (ou mais) fichas, que contêm a informação da zona angular e das intensidades a que aparecem os picos de cada espécie, ou fase cristalina.

A figura 4.12 apresenta os difractogramas correspondentes a cada uma das granulometrias analisadas com a identificação respectiva (anexo V).

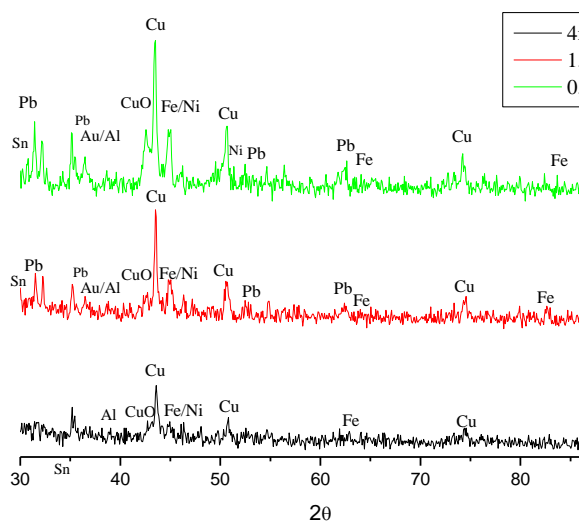


Figura 4.12- Difractogramas de DRX dos produtos de cominuição

Ao observar-se os difractogramas obtidos para os produtos de cominuição, verifica-se que, os picos de difracção das espécies identificadas apresentam intensidade crescente à medida que diminui a granulometria da amostra analisada. Este facto constitui nova comprovação de influência da granulometria das amostras na exposição das diversas espécies fragmentadas. Com a caracterização por DRX foi possível identificar a presença de cobre, livre e na forma de óxido, ferro, níquel, chumbo, estanho, alumínio e ouro.

## 4.2 Amostragem

A amostragem por enquadramento e divisor de Jones foi efectuada com o objectivo de realizar as diferentes fases de tratamento das PCE sempre com amostras representativas.

Como foi referido no anexo I, Pierre Gy deduziu as expressões analíticas que quantificam a variância dos erros cometidos, na colheita de amostras de materiais a granel. Assim, com vista à quantidade do erro cometido na amostragem dos diversos produtos da cominuição destinados a análise granulométrica utilizaram-se as expressões:

$$\sigma^2 = \frac{f \cdot \rho \cdot d_\alpha^3}{M} \times \left[ \frac{1}{m_\alpha} - g - 2 \right] \quad (4.6)$$

Em que:

$\sigma^2$  – variância do erro fundamental (em valor relativo).

$f$  – parâmetro de forma: partículas sub-esféricas (normais):  $f = 0,5$ ; partículas lamelares (micas, etc.).

$\rho$  – massa volúmica média das partículas do lote (em  $\text{g/cm}^3$ )

$d_\alpha^3$  – calibre médio, ao cubo, das partículas da classe granulométrica,  $\alpha$ ,

$d_\alpha^3 = \frac{d_\alpha^3 \text{máx} + d_\alpha^3 \text{min}}{2}$ , em que,  $d_\alpha^3 \text{máx}$  e  $d_\alpha^3 \text{min}$  são, respectivamente, os calibres mais grosseiros e mais finos, ao cubo, da classe granulométrica  $\alpha$ .

$M$  – massa da amostra (em gramas).

$m_\alpha$  – fracção estimada da classe granulométrica  $\alpha$ ,  $m_\alpha = \frac{M_\alpha}{M}$ , na qual  $M_\alpha$  - massa da classe granulométrica  $\alpha$ .

$g$  – parâmetro de distribuição granulométrica;  $g=0,5$  em (materiais estreitamente calibrados).

Nesta conformidade, para além dos dados já obtidos na análise granulométrica dos diversos produtos de cominuição, torna-se necessário determinar a massa volúmica (massa específica ou

densidade) média das partículas para o cálculo do erro de amostragem . Para tal, foi utilizada a picnometria de hélio, quadro AVI.1 do anexo VI.

Os resultados de picnometria de hélio, com valores decrescentes à medida que a granulometria diminui, mais uma vez, confirmam a influência deste parâmetro no tratamento das PCE.

De seguida calculou-se o erro cometido na análise granulométrica dos diversos produtos de cominuição, tendo em conta as massas retidas na classe granulometrica considerada de cada amostra (quadros AIII.1 a AIII.4 do anexo III).

Os valores utilizados e os resultados obtidos no cálculo dos erros de amostragem das distribuições granulométricas dos produtos de cominuição são apresentados no quadro 4.5.

**Quadro 4.5- Erros de amostragem das distribuições granulométricas dos vários produtos de cominuição.**

	<b>10mm</b>	<b>4mm</b>	<b>1,7mm</b>	<b>0,5mm</b>
Classes Granulométricas	-10,0+6,70	-4,0+3,35	-1,7+1,18	-0,5+0,425
$\overline{M} \equiv \mu$ (g)	93,00	86,73	70,45	53,08
$\overline{M}_\alpha$ (g)	2,25	0,475	8,08	2,13
$\overline{m}_\alpha$	0,024	0,00548	0,114	0,04
$d_a^3$ (cm)	0,65	0,051	0,82	$1,01 \times 10^{-4}$
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,58	2,57	2,42
$\sigma^2 \equiv S^2$	0,36	0,14	0,094	$5,20 \times 10^{-5}$
S	0,60	0,37	0,31	$7,20 \times 10^{-3}$
Intervalo de confiança a 95%	92,04< $\mu$ <93,96	86,14< $\mu$ <87,32	69,96< $\mu$ <70,94	52,07< $\mu$ <53,09

Os resultados do quadro 4.5 confirmam que os valores de massa de todas as amostras de classificação granulométrica dos vários produtos de cominuição se encontram no interior dos respectivos intervalos de confiança a 95%.

Destes resultados também se constata que o erro de amostragem diminui com decréscimo da granulometria, o que está de acordo com a teoria, da amostragem de materiais granel de Pierre Gy.

### 4.3 Classificação Granulométrica

A classificação granulométrica encarada como operação de separação ou concentração tem como objectivo avaliar a possibilidade de separação das espécies presentes numa ou em várias classes granulométricas, aproveitando as análises granulométricas efectuadas para os vários produtos de cominuição.

Uma vez que a massa em cada classe granulométrica amostras A, B, C e D de cada um dos diversos produtos de cominuição nem sempre era suficiente para se fazer a respectiva análise química por FRX, juntou-se cada classe numa só fracção A+B+C+D, representativa do material fragmentado na correspondente classe granulométrica. Sempre que a quantidade de material numa dada fracção A+B+C+D se tornou excessiva, procedeu-se à colheita duma amostra representativa por enquarteração.

Depois da análise química por FRX, de cada uma das amostras acabadas de descrever, procedeu-se ao cálculo do rendimento em metal de todas as classes granulométricas, baseado na equação seguinte:

$$\eta = \frac{Cc}{Aa} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Em que:

$\eta$  – rendimento em metal;

C – massa média do material retido em cada crivo;

c – teor do elemento considerado (Cu, Fe ou Br) presente na amostra média;

A – massa total média da alimentação de cada ensaio de crivagem;

a – teor médio reconstituído do elemento considerado (Cu, Fe ou Br) na alimentação.

### 4.3.1 Concentração por Classificação Granulométrica do Produto <4mm

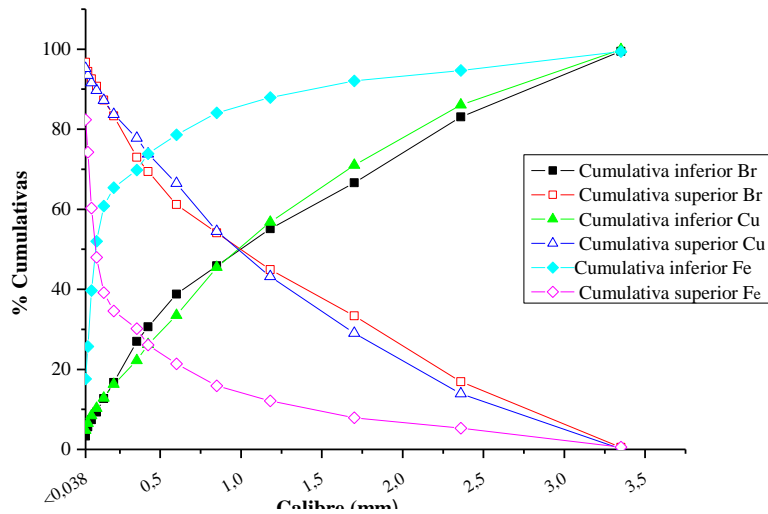
Após realização dos cálculos dos rendimentos em cada um dos elementos e em cada classe granulométrica, apresentados no quadro 4.6, procedeu-se aos cálculos necessários para a representação gráfica das curvas cumulativas inferior e superior (quadro AVII.1, no anexo VII).

**Quadro 4. 6- Rendimentos em metal das classes granulométricas do produto <4mm**

Classe Granulométrica (mm)	Massa (%)	Análise Química (%)			Rendimento (%)		
		Br	Cu	Fe	Br	Cu	Fe
-4+3,35	1,90	27	3	12	0,5	0,1	0,6
-3,35 + 2,36	46,3	38	19	4	16,4	13,8	4,7
-2,36 + 1,70	50,7	35	19	2	16,5	15,1	2,6
-1,70 + 1,18	41,1	30	22	4	11,5	14,2	4,2
-1,18 + 0,85	30,0	33	24	5	9,2	11,3	3,8
-0,850 + 0,600	27,2	28	28	8	7,1	12,0	5,5
-0,600 + 0,425	23,2	38	20	8	8,2	7,3	4,7
-0,425 + 0,355	11,5	34	22	14	3,6	4,0	4,1
-0,355 + 0,212	25,2	44	15	7	10,3	5,9	4,4
-0,212 + 0,150	13,1	33	17	14	4,0	3,5	4,6
-0,150 + 0,106	13,4	27	12	26	3,4	2,5	8,8
-0,106 + 0,075	12,1	17	10	40	1,9	1,9	12,3
-0,075 + 0,053	13,2	15	9	42	1,8	1,9	14,0
-0,053 + 0,038	12,3	20	9	26	2,3	1,7	8,1
<0,038	25,7	14	12	27	3,3	4,8	17,6

Do quadro 4.6 pode dizer-se que o rendimento em ferro mais elevado se encontra na classe granulométrica <0,038 (finos), enquanto que para o bromo e cobre aparece nas classes - 3,35+2,36, -2,36+1,70 e -1,70+1,18 (zona de calibres grosseiros).

Com base nos valores calculados no quadro AVII.1 do anexo VII obteve-se a representação gráfica apresentada na figura 4.13.



**Figura 4.13- Curvas cumulativas do rendimento em metal na classificação granulométrica do produto <4mm**

Desta representação gráfica pode-se verificar que as curvas cumulativas do rendimento em cada elemento, permitem conhecer a distribuição do rendimento em metal obtida na classificação granulométrica do produto <4mm. Assim, com a observação da figura 4.13 e dos resultados do quadro 4.6 verifica-se que existe uma separação de ferro, com concentração nas classes granulométricas mais finas,  $-0,106+0,075$ ,  $-0,075+0,053$ ,  $-0,053+0,038$  e  $<0,038$ , tendo nesta última classe a maior concentração. Em relação ao cobre e bromo observa-se que estes elementos têm um comportamento semelhante, tendo uma maior concentração conjunta nas classes mais grosseiras,  $-3,35+2,36$ ,  $-2,36+1,70$ ,  $-1,70+1,18$  e menor concentração nas classes mais finas, podendo-se assim afirmar a existência de separação de ferro dos outros elementos.

### 4.3.2 Concentração por classificação Granulométrica do Produto <1,7mm

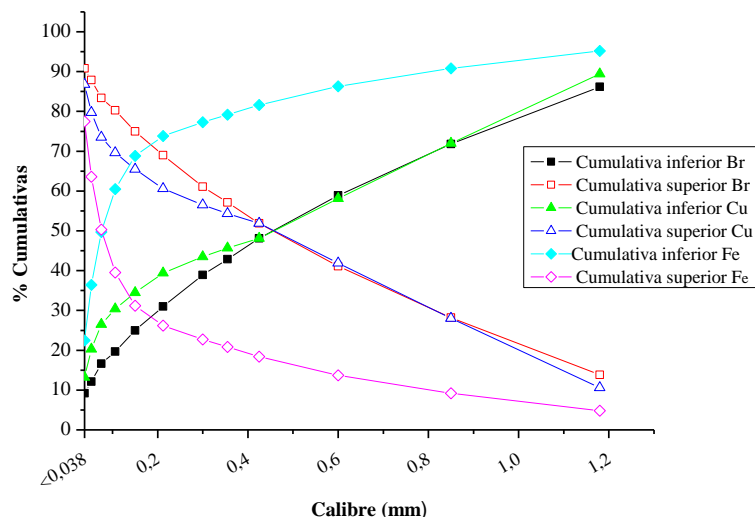
Os cálculos para obtenção dos rendimentos em metal do produto <1,7mm foram efectuados por aplicação da equação 4.6 e são apresentados no quadro 4.7.

**Quadro 4.7- Rendimentos em metal das classes granulométricas do produto <1,7mm**

Classe Granulométrica (mm)	Massa (%)	Análise Química (%)			Rendimento (%)		
		Br	Cu	Fe	Br	Cu	Fe
-1,70+1,180	32,30	37	20	4	13,8	10,6	4,8
-1,180 + 0,850	39,10	32	27	3	14,4	17,4	4,4
-0,850 + 0,600	30,20	37	28	4	12,9	13,9	4,5
-0,600 + 0,425	25,30	37	24	5	10,8	10	4,7
-0,425 + 0,355	10,50	43	14	6	5,2	2,4	2,4
-0,355 + 0,300	8,30	42	16	6	4,0	2,2	1,9
-0,300 + 0,212	15,50	44	16	6	7,9	4,1	3,5
-0,212 + 0,150	15,00	35	20	9	6,0	4,9	5,0
-0,150 + 0,106	14,70	31	17	15	5,3	4,1	8,3
-0,106 + 0,075	12,60	21	19	23	3,1	3,9	10,8
-0,075 + 0,053	18,70	21	20	19	4,5	6,2	13,3
-0,053 + 0,038	19,60	13	22	19	2,9	7,1	13,9
<0,038	40,00	20	20	15	9,2	13,2	22,5

Em relação ao quadro 4.7 pode verificar-se que o Br e o Cu estão, em geral, presentes em percentagem mais elevada nas classes granulométricas mais grosseiras, enquanto o ferro está presente em maior quantidade nas classes granulométricas de menor calibre.

Com os valores calculados para as curvas cumulativas do quadro AVII.2 do anexo VII fez-se a representação gráfica da figura 4.14.



**Figura 4.14- Curvas cumulativas do rendimento em metal na classificação granulométrica do produto <1,7mm**

Ao se analisar o quadro 4.7 e a figura 4.14 constata-se que o cobre e o bromo têm um comportamento parecido estando presente em maior concentração nas classes granulométricas mais grosseiras, -1,70+1,180, -1,180+0,850, -0,850+0,600, -0,600+0,425. Relativamente ao ferro, este elemento tem um comportamento semelhante ao manifestado para o produto <4mm, estando presente em maior concentração na classes granulométricas mais finas (-0,106+0,075, -0,075+0,053, -0,053+0,038 e <0,038; tendo esta última classe a maior concentração). Posto isto, pode-se dizer que existiu separação de ferro em relação ao cobre e ao bromo.

### 4.3.3 Concentração por Classificação Granulométrica do Produto <0,5mm

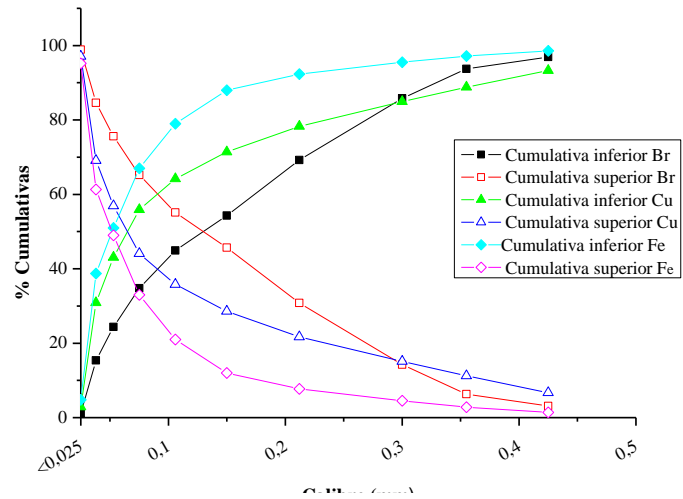
Para se obter os valores dos rendimentos em metal apresentados no quadro 4.8, utilizou-se, novamente, a equação 4.1.

**Quadro 4.8- Rendimentos em metal das classes granulométricas do produto <0,5mm**

Classe Granulométrica (mm)	Massa (%)	Análise Química (%)			Rendimento (%)		
		Br	Cu	Fe	Br	Cu	Fe
-0,50+0,425	8,50	13	50	5	3,1	6,7	1,4
-0,425 + 0,355	6,30	18	45	7	3,2	4,5	1,4
-0,355 + 0,300	8,60	33	29	6	7,9	3,9	1,7
-0,300 + 0,212	16,10	37	26	6	16,6	6,6	3,2
-0,212 + 0,150	16,20	33	27	8	14,9	6,9	4,3
-0,150 + 0,106	14,70	23	31	19	9,4	7,2	9,0
-0,106 + 0,075	18,20	20	29	20	10,1	8,3	12,0
-0,075 + 0,053	27,10	14	30	18	10,4	12,8	16,0
-0,053 + 0,038	24,90	13	31	15	9,0	12,2	12,3
-0,038 + 0,025	57,30	9	31	18	14,3	28,0	33,9
<0,025	6,30	6	29	23	1,1	2,9	4,8

Ao observar o quadro dos rendimentos em metal, pode-se dizer que a percentagem mais elevada de Cu e Fe está presente na classe granulométrica -0,038+0,025, ou seja, numa fracção muito fina. No que diz respeito ao Br, a maior percentagem está na classe -0,300+0,212, correspondente a uma granulometria mais grosseira, muito embora denote uma significativa dispersão da sua concentração que se estende até às fracções finas.

Com os cálculos efectuados para a determinação das curvas cumulativas apresentados em anexo AVII, quadro AVII.3, procedeu-se à respectiva representação gráfica, figura 4.15.



**Figura 4.15- Curvas cumulativas do rendimento em metal da classificação granulométrica de 0,5mm**

Observando o gráfico 4.15 e o quadro 4.8 pode-se afirmar que com granulometria <math><0,5\text{mm}</math> não se conseguiu a separação de nenhum dos elementos.

#### 4.4 Aeroseparação

Após executados todos os ensaios de aeroseparação, com as condições de ensaio indicadas no quadro 3.1 determinou-se a distribuição de massas entre a primeira e segunda fracções, que se apresenta no quadro 4.9. De referir que existiram algumas perdas de massa, devido relativamente ao deficiente isolamento dos frascos lavadores que, apesar de todos os cuidados, não se revelaram completamente estanques.

Ao analisar os resultados obtidos para a distribuição de massa, verifica-se que não existe um comportamento padrão. Em relação aos ensaios com granulometria <4mm as diferenças registadas parecem pouco significativas.

**Quadro 4. 9- Distribuição de massa resultante dos ensaios de aeroseparação**

Ensaio	4mm		1,7mm		0,5mm	
	1ª fracção (%)	2ª fracção (%)	1ª fracção (%)	2ª fracção (%)	1ª fracção (%)	2ª fracção (%)
1	98,70	1,30	77,06	22,94	73,54	26,46
2	98,39	1,61	90,76	9,24	58,61	41,39
3	98,99	1,01	60,33	39,67	59,46	40,54
4	84,39	15,61	81,23	18,77	34,76	65,24
5	96,82	3,18	75,71	24,29	17,56	82,44
6	90,35	9,65	85,06	14,94	48,54	51,46
7	93,78	6,22	54,83	45,17	25,20	74,80
8	93,80	6,20	74,87	25,13	40,91	59,09

No que diz respeito à granulometria <1,7mm, observa-se que os ensaios 2 e 6 são o que têm maiores percentagens de massa na 1ª e na 2ª fracção, respectivamente.

Para a granulometria <0,5mm os ensaios 1 e 5 são os que apresentam maior % massa na 1ª e 2ª fracção, respectivamente. Estes ensaios diferem unicamente na pressão de ar, tendo a mesma massa e tempo de aeroseparação (30g e 5 min), o que leva a crer que a pressão de ar poderá ser um factor significativo.

#### 4.4.1 Aeroseparação com Produto de Granulometria <4mm

##### 4.4.1.1 Caracterização Química dos Produtos de Aeroseparação de Granulometria <4mm

Os resultados de análise química, por FRX, dos produtos de aeroseparação estão patentes no quadro AVIII.1 do anexo VIII.

O quadro 4.10 apresenta os rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <4mm.

**Quadro 4. 10-- Rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <4mm.**

Ensaio	Br		Cu		Fe	
	1ªfracção	2ªfracção	1ªfracção	2ªfracção	1ªfracção	2ªfracção
1	99,42	0,58	99,34	0,66	98,70	1,30
2	99,19	0,81	99,07	0,93	98,69	1,31
3	99,47	0,53	99,05	0,95	99,20	0,80
4	84,83	15,17	91,54	8,46	81,84	18,16
5	97,17	2,83	97,99	2,01	96,44	3,56
6	91,41	8,59	95,21	4,79	92,49	7,51
7	95,69	4,31	96,45	3,55	95,38	4,62
8	93,55	6,45	96,59	3,41	95,52	4,48

Pode observar-se que os rendimentos dos elementos estudados para a granulometria de 4mm dão resultados semelhantes. Isto poderá querer dizer, tanto faz os níveis dos factores altos ou baixos, os valores dos rendimentos não sofrem alteração.

##### 4.4.1.2 Planos Factoriais de Ensaio de Aeroseparação com Produtos de Granulometria <4mm

Depois de efectuados os ensaios de aeroseparação e calculados os valores de rendimento em metal, passou-se ao estudo do plano factorial  $2^3$ , utilizando o software *JMP 6.0*, com o qual se pode estudar os factores significativos e concluir acerca da adequação dos modelos matemáticos estimados.

Neste plano factorial de ensaios  $2^3$  foram utilizadas as variáveis de controlo, apresentadas no quadro 3.2.

No quadro 4.11 observam-se os resultados obtidos pelo programa, para os coeficientes dos modelos matemáticos estimados do Cu nas duas fracções de aeroseparação, que utiliza a distribuição de *t Student* para avaliar a significância dos factores.

Devido ao valor da probabilidade de *t*,  $\text{prob}>t$ , não ser menor que o nível de significância estipulado, 0,05, considera-se que nenhum é factor significativo. O valor de  $R^2$ , dado pelo programa mas podendo ser calculado com a seguinte fórmula:

$$R^2 = \frac{SS_{\text{modelo}}}{SS_{\text{Total}}} \quad (4.8)$$

Onde:

$R^2$  – coeficiente de correlação;

$SS_{\text{modelo}}$  – variação do modelo;

$SS_{\text{Total}}$  – variação total;

Este valor não está muito perto de 1, quanto mais perto de 1 melhor será o ajuste do modelo às respostas observadas, pelo que não se prevê que os modelos sejam adequados

**Quadro 4.11- Coeficientes do PFE  $2^3$  para o Cu -granulometria <4mm**

	Termo	Coeficiente	Prob> t
1ªfracção	Independente	96,905	0,008
	A - Massa (10,30)	-1,303	0,502
	B - Tempo aero (5,15)	-0,998	0,576
	C - Pressão ar (10,20)	-0,345	0,831
	AB - Massa*Tempo aero	-0,540	0,744
	AC - Massa*Pressão ar	0,643	0,702
	BC - Tempo aero*Pressão ar	0,958	0,589
	$R^2=0,733169$		
	2ªfracção	Termo	Coeficiente
Independente		3,095	0,248
A - Massa (10,30)		1,303	0,502
B - Tempo aero (5,15)		0,998	0,576
C - Pressão ar (10,20)		0,345	0,831
AB - Massa*Tempo aero		0,540	0,744
AC - Massa*Pressão ar		-0,643	0,702
BC - Tempo aero*Pressão ar		-0,958	0,589
$R^2=0,733169$			

Assim, tem-se como modelo linear relativo à granulometria <4mm de cobre, 1ª fracção e 2ª fracção respectivamente, as seguintes equações:

$$Y_{1Cu} = 96,905 - 1,303A - 0,998B - 0,345C - 0,540AB + 0,643AC + 0,958BC \quad (4.9)$$

$$Y_{2Cu} = 3,095 + 1,303A + 0,998B + 0,345C + 0,540AB - 0,643AC - 0,958BC \quad (4.10)$$

O quadro 4.12 apresenta a análise da variância, para os dois modelos (1ª e 2ª fracção), efectuada por intermédio do cálculo do estatístico F (Fisher-Snedecor), que verifica a adequação do modelo matemático.

Para tal retirou-se da tabela dos limites unilaterais da distribuição de Fisher-Snedecor, para o nível de significância de 5%, o valor do  $F_{tab}$ ,  $F_{0,05;1;1} = 161,4$  e se  $F_0 > F_{tab}$  significa que os factores se adequam ao modelo. De considerar, em simultâneo, é também a já referida importância do valor de  $R^2$ .

**Quadro 4.12- Análise da variância para o Cu –granulometria <4mm**

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
<b>A - Massa (10,30)</b>	13,572	1	13,572	1,052
<b>B - Tempo aero (5,15)</b>	7,960	1	7,960	0,617
<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	0,952	1	0,952	0,074
<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	2,333	1	2,333	0,181
<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	3,303	1	3,303	0,256
<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	7,335	1	7,335	0,568
<b>Modelo</b>	35,454	6	5,9090	0,458
<b>Erro</b>	12,903	1	12,9032	
<b>Total</b>	48,357	7		

Do quadro 4.12 pode pois concluir-se pela não adequação dos modelos (4.10) e (4.11).

No quadro 4.13 são apresentados os resultados obtidos para o Fe, onde também se verifica que não existem factores significativos, pois não têm valores de probabilidade de t abaixo do nível de significância estipulado, e o valor de  $R^2$  continua pouco perto da unidade.

**Quadro 4. 13- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Fe -granulometria <4mm**

	Termo	Coeficiente	Prob> t
1ªfracção	Independente	94,782	0,018
	A - Massa (10,30)	-2,648	0,504
	B - Tempo aero (5,15)	-1,798	0,624
	C - Pressão ar (10,20)	0,175	0,959
	AB - Massa*Tempo aero	-1,658	0,647
	AC - Massa*Pressão ar	1,695	0,641
	BC - Tempo aero*Pressão ar	2,290	0,550
	$R^2=0,746$		
2ªfracção	Termo	Coeficiente	Prob> t
	Independente	5,218	0,302
	A - Massa (10,30)	2,647	0,504
	B - Tempo aero (5,15)	1,798	0,624
	C - Pressão ar (10,20)	-0,175	0,959
	AB - Massa*Tempo aero	1,658	0,647
	AC - Massa*Pressão ar	-1,695	0,641
	BC - Tempo aero*Pressão ar	-2,290	0,550
$R^2=0,746$			

Os modelos lineares completos relativos à granulometria <4mm de ferro nas 1ª e 2ªfracções, respectivamente, são expressos pelas seguintes equações:

$$Y_{1Fe} = 94,783 - 2,648A - 1,798B + 0,175C - 1,658AB + 1,695AC + 2,290BC \quad (4.11)$$

$$Y_{2Fe} = 5,218 + 2,648A + 1,798B - 0,175C + 1,658AB - 1,695AC - 2,290BC \quad (4.12)$$

No quadro 4.14 dá-se conta da análise de variância para os modelos (4.11) e (4.12). Os valores de  $F_0$  continuam muito inferiores ao  $F_{tab}$  ( $F_{0,05;1;1} = 161,4$ ), ou seja, estes modelos também são inadequados sendo também não aceitável o valor do coeficiente de correlação.

**Quadro 4.14- Análise da variância para o Fe –granulometria <4mm**

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
<b>A - Massa (10,30)</b>	56,074	1	56,074	0,976
<b>B - Tempo aero (5,15)</b>	25,848	1	25,848	0,449
<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	0,245	1	0,245	0,0043
<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	21,979	1	21,979	0,383
<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	22,984	1	22,984	0,400
<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	41,953	1	41,953	0,730
<b>Modelo</b>	169,083	6	28,180	0,490
<b>Erro</b>	57,459	1	57,459	
<b>Total</b>	226,542	7		

Os resultados obtidos para o bromo com a granulometria <4mm, onde se verifica que não existem factores significativos e o valor de R<sup>2</sup> continua longe de 1, são apresentados no quadro 4.15.

**Quadro 4.15- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Br -granulometria <4mm**

	Termo	Coefficiente	Prob> t
<b>1ª fracção</b>	<b>Independente</b>	95,091	0,015
	<b>A - Massa (10,30)</b>	-2,846	0,426
	<b>B - Tempo aero (5,15)</b>	-1,706	0,588
	<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	-0,636	0,825
	<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	-1,349	0,657
	<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	0,871	0,765
	<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	1,871	0,559
	<b>R<sup>2</sup>=0,775</b>		
<b>2ª fracção</b>	<b>Termo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Prob&gt; t </b>
	<b>Independente</b>	4,908	0,274
	<b>A - Massa (10,30)</b>	2,846	0,426
	<b>B - Tempo aero (5,15)</b>	1,706	0,588
	<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	0,636	0,825
	<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	1,349	0,657
	<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	-0,871	0,765
	<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	-1,871	0,559
<b>R<sup>2</sup>=0,775</b>			

As equações 4.13 e 4.14 representam os modelos lineares completos relativos à granulometria <4mm 1ª e 2ª fracções, respectivamente, para o bromo.

$$Y_{1Br} = 95,091 - 2,846A - 1,706B - 0,636C - 1,349AB + 0,871AC + 1,871BC \quad (4.13)$$

$$Y_{2Br} = 4,908 + 2,846A + 1,706B + 0,636C + 1,349AB - 0,871AC - 1,871BC \quad (4.14)$$

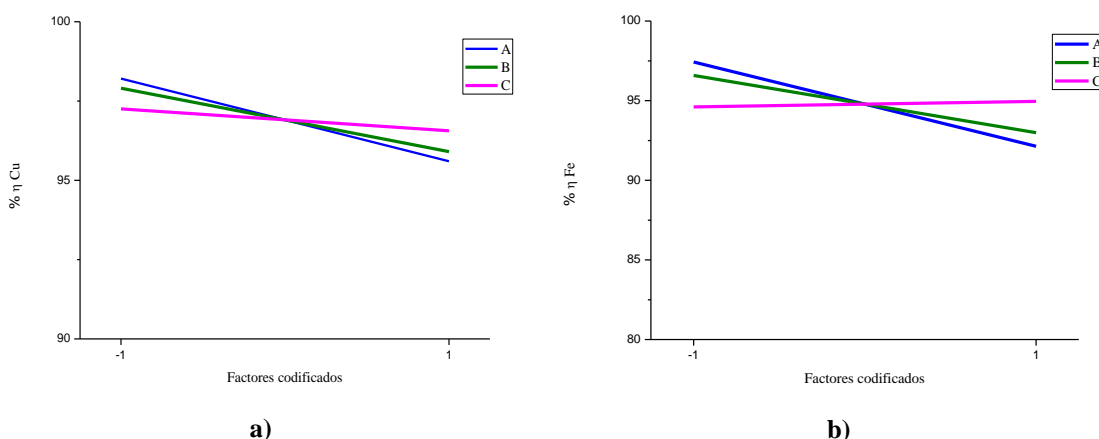
O quadro 4.16 contém os resultados da análise da variância para o bromo, onde se pode verificar que o modelo matemático é inadequado.

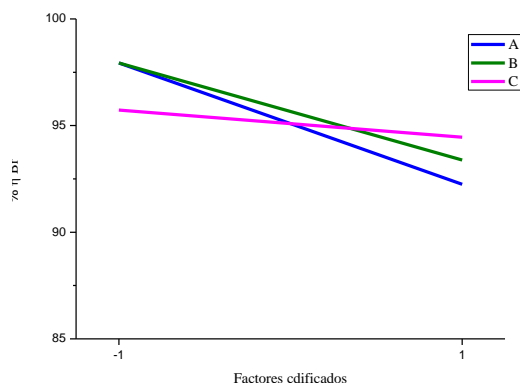
Quadro 4.16- Análise da variância para o Br –granulometria &lt;4mm

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
A - Massa (10,30)	64,809	1	64,809	1,595
B - Tempo aero (5,15)	23,290	1	23,290	0,573
C - Pressão ar (10,20)	3,239	1	3,239	0,080
AB - Massa*Tempo aero	14,553	1	14,553	0,358
AC - Massa*Pressão ar	6,073	1	6,073	0,149
BC - Tempo aero*Pressão ar	28,013	1	28,013	0,689
<b>Modelo</b>	139,976	6	23,3294	0,574
<b>Erro</b>	40,635	1	40,6351	
<b>Total</b>	180,611	7		

Para uma melhor percepção do efeito de cada factor principal no rendimento de cada um dos elementos considerados (Cu, Fe e Br), apresenta-se a representação gráfica da figura 4.16 e as interacções dos factores no anexo IX, anexo AIX.1 a AIX.3.

Na figura 4.16 verifica-se que a recta representativa do efeito do factor C (pressão de ar) está praticamente na horizontal, o que indica que não é significativo. Com efeito, quanto maior for o declive da recta representativa do efeito do factor mais significativo será esse factor. Assim, em relação aos factores A (massa do sólido) e B (tempo de aereoseparação), poder-se-ia pensar que eram significativos, mas pelo estudo da análise da variância verificou-se, sem margem para dúvidas, que nenhum dos factores principais é significativo.





c)

Figura 4. 16-Efeitos de factores principais dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm: a)para o Cu b) para o Fe; c) para o Br

#### 4.4.2 Aeroseparação com Produto de Granulometria <1,7mm

##### 4.4.2.1 Caracterização Química dos Produtos de Aeroseparação de Granulometria <1,7mm

O quadro 4.17 relaciona os rendimentos em metal que foram obtidos nas 1ª e 2ª fracções dos ensaios de aeroseparação do material com granulometria <1,7mm, tendo em conta os resultados da análise química do quadro AVIII.1 do anexo VIII e de distribuição de massa do quadro 4.9.

Quadro 4. 17- Rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <1,7mm

Ensaio	Br		Cu		Fe	
	1ªfracção	2ªfracção	1ªfracção	2ªfracção	1ªfracção	2ªfracção
1	80,61	19,39	73,32	26,68	79,95	20,05
2	92,40	7,60	88,93	11,07	91,76	8,24
3	53,68	46,32	67,54	32,46	74,66	25,34
4	83,85	16,15	81,23	18,77	84,57	15,43
5	73,05	26,95	78,19	21,81	83,30	16,70
6	86,18	13,82	87,14	12,86	87,82	12,18
7	25,37	74,63	62,64	37,36	72,96	27,04
8	71,10	28,90	70,91	29,09	85,63	14,37

No quadro 4.17 pode observar-se que somente o ensaio 7 apresenta separação do bromo, que se concentra na 2ª fracção, em relação ao cobre e ferro, que se concentram na 1ª fracção. Este ensaio foi realizado com uma massa de sólido de 10g (nível baixo) e com um tempo de aeroseparação e uma pressão de ar comprimido de 15 minutos e 20 psi, respectivamente (níveis altos; quadro 3.1).

#### 4.4.2.2 Planos Factoriais de Ensaio de Aeroseparação com Produtos de Granulometria <1,7mm

Nos planos factoriais dos ensaios com a granulometria <1,7mm foram utilizados os factores de controlo já conhecidos do quadro 3.1, com os mesmos níveis de variação.

Para a determinação dos modelos matemáticos, recorreu-se ao cálculo automático utilizando, novamente, o software JMP 6.0.

No quadro 4.18, observa-se os resultados obtidos pelo programa, que utiliza a distribuição de *t-Student* para avaliar a significância dos factores.

Como factores significativos tem-se a considerar, relativamente à 1ª e 2ª fracção de Cu, a massa, tempo de aeroseparação e a interacção tempo\*pressão de ar, devido ao valor de prob>t ser menor que o nível de significância estipulado, 0,05.

Verifica-se que o valor de  $R^2$  é muito perto do 1 (0,999), o que significa um bom ajuste do modelo às respostas observadas.

Quadro 4.18- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Cu -granulometria <1,7mm

	Termo	Coeficiente	Prob> t
1ªfracção	Independente	76,238	0,001
	A - Massa (10,30)	5,815	0,017
	B - Tempo aero (5,15)	-5,658	0,017
	C - Pressão ar (10,20)	-1,518	0,065
	AB - Massa*Tempo aero	-0,325	0,283
	AC - Massa*Pressão ar	-1,510	0,065
	BC - Tempo aero*Pressão ar	-2,2875	0,043
	$R^2=0,999$		
2ªfracção	Termo	Coeficiente	Prob> t
	Independente	23,763	0,004
	A - Massa (10,30)	-5,815	0,017
	B - Tempo aero (5,15)	5,658	0,017
	C - Pressão ar (10,20)	1,518	0,065

	<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	0,325	0,283
	<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	1,510	0,065
	<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	2,288	<b>0,043</b>
	<b>R<sup>2</sup>=0,999</b>		

Assim, as equações dos modelos lineares para a 1ª e 2ª frações do Cu tomam a seguinte forma:

$$Y_{1Cu} = 76,238 + 5,815A - 5,658B - 1,518C - 0,325AB - 1,51AC - 2,288BC \quad (4.15)$$

$$Y_{2Cu} = 23,763 - 5,815A + 5,658B + 1,518C + 0,325AB + 1,51AC + 2,288BC \quad (4.16)$$

Para a verificação da possível adequação dos modelos, utilizou-se, novamente, o teste F.

O quadro 4.19 confirma a significância dos factores anteriormente analisados, visto apresentarem valores de  $F_0$  maiores do que  $F_{0,05;1;1} = 161,4$  e o coeficiente de correlação,  $R^2$ , ser óptimo (>99%).

**Quadro 4.19- Análise da variância para o Cu –granulometria <1,7mm**

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
<b>A - Massa (10,30)</b>	270,514	1	270,514	<b>1408,926</b>
<b>B - Tempo aero (5,15)</b>	256,059	1	256,059	<b>1333,638</b>
<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	18,420	1	18,42	95,950
<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	0,845	1	0,845	4,401
<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	18,241	1	18,241	95,004
<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	41,861	1	41,861	<b>218,027</b>
<b>Modelo</b>	605,942	6	100,990	525,444
<b>Erro</b>	0,192	1	0,192	
<b>Total</b>	606,134	7		

Feita a análise de variância pode afirmar-se que os modelos matemáticos (4.15) e (4.16) admitem as formas simplificadas, adequadas, para a 1ª e 2ª frações com as formas:

$$Y_{1Cu} = 76,238 + 5,815A - 5,658B - 2,288BC \quad (4.17)$$

$$Y_{2Cu} = 23,763 - 5,815A + 5,658B + 2,288BC \quad (4.18)$$

O quadro 4.20, apresenta os resultados obtidos para o Fe com a granulometria <1,7mm, onde pode observar-se que nenhum valor de prob>t é menor que o 0,05 (à excepção do termo

independente), o que significa que não existem factores significativos, tanto para a primeira como para a segunda fracções, embora o valor de  $R^2$  esteja perto de 1.

**Quadro 4.20-Coefficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Fe -granulometria <1,7mm**

1ª fracção	Termo	Coefficiente	Prob> t
	Independente	82,5813	0,010
	A - Massa (10,30)	4,864	0,161
	B - Tempo aero (5,15)	-3,126	0,243
	C - Pressão ar (10,20)	-0,154	0,923
	AB - Massa*Tempo aero	0,781	0,646
	AC - Massa*Pressão ar	-0,566	0,730
	BC - Tempo aero*Pressão ar	-0,0063	0,997
	$R^2=0,956$		
2ª fracção	Termo	Coefficiente	Prob> t
	Independente	17,419	0,046
	A - Massa (10,30)	-4,864	0,161
	B - Tempo aero (5,15)	3,126	0,243
	C - Pressão ar (10,20)	0,154	0,923
	AB - Massa*Tempo aero	-0,781	0,646
	AC - Massa*Pressão ar	0,566	0,730
	BC - Tempo aero*Pressão ar	0,0063	0,997
	$R^2=0,956$		

Então deveria ter-se como modelos lineares completos para as primeira e segunda fracções de ferro:

$$Y_{1Fe} = 82,5813 + 4,864A - 3,126B - 0,154C + 0,781AB - 0,566AC - 0,0063BC \quad (4.19)$$

$$Y_{2Fe} = 17,419 - 4,864A + 3,126B + 0,154C - 0,781AB + 0,566AC + 0,0063BC \quad (4.20)$$

No quadro 4.21 estão apresentados os respectivos valores da análise de variância, verificando-se que os valores de  $F_0 < F_{tab}$  (sendo  $F_{tab} = F_{0,05;1;1} = 161,4$ ), ou seja, confirma-se que os modelos não são adequados, embora tenha um coeficiente de correlação  $R^2 \approx 0,97$ , bastante aceitável.

**Quadro 4.21-Análise da variância para o Fe -granulometria <1,7mm**

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
A - Massa (10,30)	189,249	1	189,249	14,990
B - Tempo aero (5,15)	78,188	1	78,188	6,193
C - Pressão ar (10,20)	0,189	1	0,189	0,0150
AB - Massa*Tempo aero	4,883	1	4,883	0,387
AC - Massa*Pressão ar	2,565	1	2,565	0,203
BC - Tempo aero*Pressão ar	0,00031	1	0,00031	$2,460 \times 10^{-5}$

<b>Modelo</b>	3306,4956	6	551,083	21,8026
<b>Erro</b>	25,2760	1	25,276	
<b>Total</b>	3331,7716	7		

No quadro 4.22. pode verificar-se que, tal como acontece com o Fe da mesma granulometria, não existem coeficientes significativos para o Br, embora o coeficiente de correlação esteja perto de 1.

**Quadro 4.22- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Br -granulometria <1,7mm**

	<b>Termo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Prob&gt; t </b>
<b>1ª fracção</b>	<b>Independente</b>	70,780	0,0160
	<b>A - Massa (10,30)</b>	12,603	0,0892
	<b>B - Tempo aereo (5,15)</b>	-12,280	0,0915
	<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	-6,855	0,1615
	<b>AB - Massa*Tempo aereo</b>	6,373	0,1732
	<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	2,113	0,4453
	<b>BC - Tempo aereo*Pressão ar</b>	-3,41	0,3059
	<b>R<sup>2</sup>=0,992</b>		
<b>2ª fracção</b>	<b>Termo</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>Prob&gt; t </b>
	<b>Independente</b>	29,220	0,0387
	<b>A - Massa (10,30)</b>	-12,603	0,0892
	<b>B - Tempo aereo (5,15)</b>	12,280	0,0915
	<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	6,855	0,1615
	<b>AB - Massa*Tempo aereo</b>	-6,373	0,1732
	<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	-2,113	0,4453
	<b>BC - Tempo aereo*Pressão ar</b>	3,410	0,3059
<b>R<sup>2</sup>=0,992</b>			

Assim podem escrever-se as expressões dos modelos matemáticos lineares completos, para a 1ª e 2ª fracções, respectivamente, da seguinte forma:

$$Y_{1Br} = 70,78 + 12,603A - 12,280B - 6,855C + 6,373AB + 2,113AC - 3,410BC \quad (4.21)$$

$$Y_{2Br} = 29,220 - 12,603A + 12,280B + 6,855C - 6,373AB - 2,113AC + 3,410BC \quad (4.22)$$

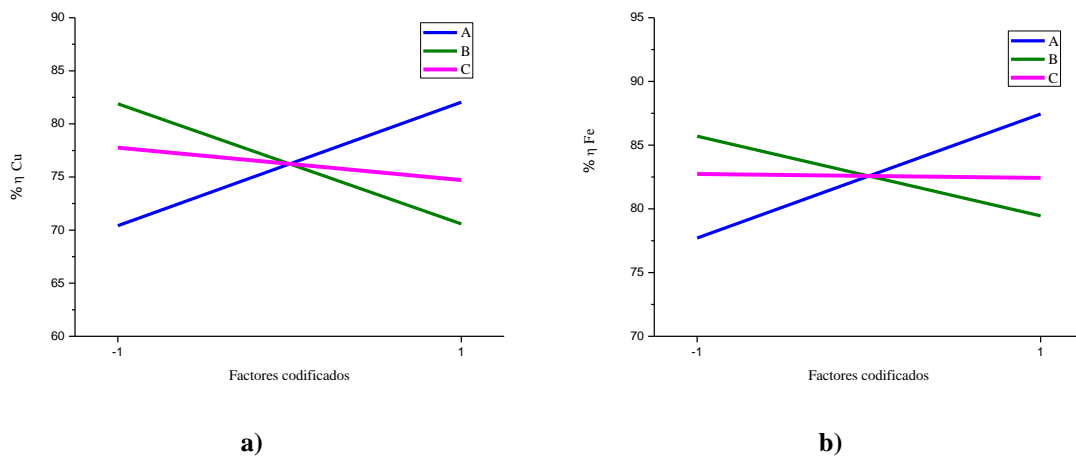
O quadro 4.23 apresenta os valores da ANOVA para o bromo, com os quais pode confirmar-se a não existência de factores significativos e consequentemente do modelo simplificado, apesar do R<sup>2</sup> estar muito próximo de 1.

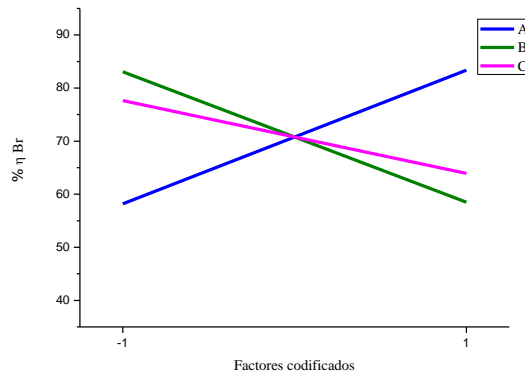
**Quadro 4. 23- Análise da variância para o Br -granulometria <1,7mm**

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
<b>A - Massa (10,30)</b>	1270,584	1	1270,584	50,268
<b>B - Tempo aereo (5,15)</b>	1206,387	1	1206,387	47,729
<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	375,928	1	375,928	14,873
<b>AB - Massa*Tempo aereo</b>	324,870	1	324,870	12,853
<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	35,701	1	35,701	1,413
<b>BC - Tempo aereo*Pressão ar</b>	93,024	1	93,024	3,680
<b>Modelo</b>	275,073	6	45,8456	3,6312
<b>Erro</b>	12,625	1	12,6253	
<b>Total</b>	287,699	7		

Com a figura 4.17 pode visualizar-se os efeitos dos factores principais com a granulometria <1,7mm para cada elemento.

O significativo declive das rectas representativas dos factores A, B ilustra a significância destas variáveis (figura 4.17-a).



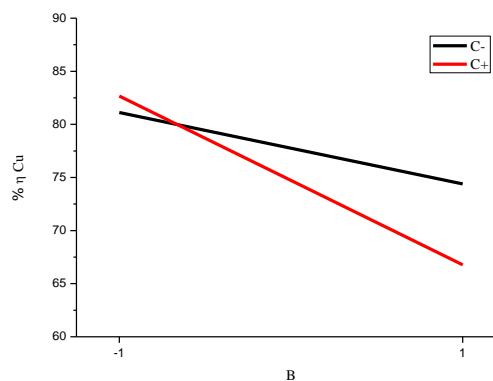


c)

**Figura 4. 17- Efeitos de factores principais dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm: a)para o Cu b) para o Fe; c) para o Br**

Com efeito no gráfico do cobre, figura 4.17 a), pode ver-se que os factores A (massa do sólido) e B (tempo de aeroseparação) são aqueles que estão menos na horizontal, o que significa que são significativos. O mesmo acontece com BC (interacção tempo de aeroseparação\*pressão de ar) que também é significativo, embora com um valor de probabilidade de t relativamente próxima de 0,05 (0,0431).

Contudo, a figura 4.17 c) poderia levar a pensar que o bromo também teria factores significativos, visto que parecem existir alguns factores com declive a considerar, mas com o estudo efectuado já se mostrou a inexistência de factores significativos tanto para o bromo como para o ferro.



**Figura 4. 18-Efeito do factor de interacção BC para o Cu**

A figura 4.18 apresenta a representação gráfica da interacção BC (interacção tempo de aeroseparação\*pressão de ar) em que, como se pode verificar as rectas  $C^+$  e  $C^-$  intersectam-se, o que significa que esta interacção é significativa, como já se tinha verificado na análise de variância. As representações dos efeitos das interacções do AC no ferro e AC no cobre, embora pela representação gráfica (anexo IX.4) se possa pensar que são significativas pela análise da variância verifica-se que não são.

### **4.4.3 Aeroseparação com Produto de Granulometria <0,5mm**

#### **4.4.3.1 Caracterização Química dos Produtos de Aeroseparação de Granulometria <0,5mm**

O quadro 4.24 apresenta os rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação de granulometria <0,5mm, determinados tendo em consideração os resultados de análise química por FRX, dos produtos de aeroseparação que estão patentes no quadro AVIII.3 do anexo VIII.

**Quadro 4.24- Rendimentos em metal dos produtos de aeroseparação <0,5mm**

Ensaio	Br		Cu		Fe	
	1ª fracção	2ª fracção	1ª fracção	2ª fracção	1ª fracção	2ª fracção
1	77,38	22,62	76,43	23,57	75,90	24,10
2	60,08	39,92	61,71	38,29	65,38	34,62
3	62,86	37,14	61,01	38,99	63,77	36,23
4	40,30	59,70	37,75	62,25	39,98	60,02
5	12,43	87,57	22,97	77,03	16,58	83,42
6	51,88	48,12	50,21	49,79	51,67	48,33
7	17,39	82,61	32,26	67,74	22,77	77,23
8	50,29	49,71	44,07	55,93	46,72	53,28

Nesta granulometria de 0,5mm verifica-se um elevado rendimento sem separação entre os elementos químicos considerados, no ensaio 5. Tendo em conta o quadro 3.2 (condições de ensaio) pode ver-se que os valores de rendimento mais baixos da 2ª fracção (ensaios 1,2 e 3), são obtidas quando a pressão está no nível mais baixo.

Comparando os ensaios com valores de rendimento mais elevados com as granulometrias de 0,5 e 1,7mm (ensaios 5 e 2, respectivamente) pode verificar-se que a granulometria do material é um factor com grande influência na aeroseparação. Por exemplo, na granulometria mais fina e com as condições do ensaio 5 (10g, 5min, 20 psi) existe uma maior diferença entre os valores da 1ª e 2ª fracções, enquanto que com a granulometria de 1,7mm é no ensaio 2 que se observam as maiores diferenças.

#### **4.4.3.2 Planos Factoriais de Ensaio de Aeroseparação com Produtos de Granulometria <0,5mm**

O quadro 4.25, apresenta os valores dos coeficientes para os modelos matemáticos o Cu com a granulometria <0,5mm, com os quais pode afirmar-se que o coeficiente de correlação está muito perto de um mas apesar disso, não se observam valores significativos.

Quadro 4.25- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Cu -granulometria <0,5mm

	Termo	Coeficiente	Prob> t
1ªfracção	Independente	48,301	0,0114
	A - Massa (10,30)	0,134	0,9019
	B - Tempo aero (5,15)	-4,529	0,1196
	C - Pressão ar (10,20)	-10,924	0,0501
	AB - Massa*Tempo aero	-2,996	0,1782
	AC - Massa*Pressão ar	9,629	0,0568
	BC - Tempo aero*Pressão ar	5,316	0,1022
	$R^2=0,997$		
2ªfracção	Termo	Coeficiente	Prob> t
	Independente	51,699	0,0106
	A - Massa (10,30)	-0,134	0,9019
	B - Tempo aero (5,15)	4,529	0,1196
	C - Pressão ar (10,20)	10,924	0,0501
	AB - Massa*Tempo aero	2,996	0,1782
	AC - Massa*Pressão ar	-9,629	0,0568
	BC - Tempo aero*Pressão ar	-5,316	0,1022
$R^2=0,997$			

No entanto podem escrever-se as equações que representam os modelos matemáticos lineares, para o Cu na primeira e segunda fracções:

$$Y_{1Cu} = 48,301 + 0,134A - 4,529B - 10,924C - 2,996AB + 9,629AC + 5,316BC \quad (4.23)$$

$$Y_{2Cu} = 51,699 - 0,134A + 4,529B + 10,924C + 2,996AB - 9,629AC - 5,316BC \quad (4.24)$$

Com a análise de variância obtiveram-se os valores apresentados no quadro 4.26, onde se obtém a confirmação da inexistência de factores significativos e a inadequação do modelo, visto  $F_0 < F_{tab}$ .

Quadro 4.26- Análise da variância para o Cu -granulometria &lt;0,5mm

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
A - Massa (10,30)	0,143	1	0,143	0,0241
B - Tempo aero (5,15)	164,076	1	164,076	27,6502
C - Pressão ar (10,20)	954,626	1	954,626	160,8737
AB - Massa*Tempo aero	71,820	1	71,820	12,1031
AC - Massa*Pressão ar	741,702	1	741,702	124,9918
BC - Tempo aero*Pressão ar	226,100	1	226,100	38,1024
Modelo	2158,469	6	359,745	60,6242
Erro	5,934	1	5,934	
Total	2164,403	7		

No caso do quadro 4.27, observa-se que se tem como factores significativos para o Fe, o tempo de aeroseparação, a pressão de ar e as interacções, massa\*pressão de ar e tempo de aeroseparação\*pressão de ar, pois em todas a probabilidade de t é inferior a 0,05.

Para a 2ª fracção do Fe podem observar-se os mesmos factores significativos.

Relativamente ao R<sup>2</sup> observa-se que também apresenta um valor muito perto de um.

**Quadro 4.27- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Fe -granulometria <0,5mm**

	Termo	Coeficiente	Prob> t
1ªfracção	Independente	47,845	0,0035
	A - Massa (10,30)	3,091	0,0547
	B - Tempo aero (5,15)	-4,536	0,0373
	C - Pressão ar (10,20)	-13,411	0,0126
	AB - Massa*Tempo aero	-3,051	0,0554
	AC - Massa*Pressão ar	11,669	0,0145
	BC - Tempo aero*Pressão ar	4,846	0,0349
	R <sup>2</sup> =0,999		
2ªfracção	Termo	Coeficiente	Prob> t
	Independente	52,154	0,0032
	A - Massa (10,30)	-3,091	0,0547
	B - Tempo aero (5,15)	4,536	0,0373
	C - Pressão ar (10,20)	13,411	0,0126
	AB - Massa*Tempo aero	3,051	0,0554
	AC - Massa*Pressão ar	-11,669	0,0145
	BC - Tempo aero*Pressão ar	-4,846	0,0349
R <sup>2</sup> =0,999			

A única diferença entre estas fracções do Fe com a granulometria <0,5mm, para além dos sinais dos respectivos factores, é realmente no valor do termo independente. Assim, as expressões dos modelos matemáticos completos, para a primeira e segunda fracções tomam a seguinte forma:

$$Y_{1Fe} = 47,845 + 3,091A - 4,536B - 13,411C - 3,051AB + 11,669AC + 4,846BC \quad (4.25)$$

$$Y_{2Fe} = 52,154 - 3,091A + 4,536B + 13,411C + 3,051AB - 11,669AC - 4,846BC \quad (4.26)$$

No quadro 4.28 está patente a confirmação dos factores significativos, utilizando o estatístico F.

Quadro 4.28-Análise da variância para o Fe –granulometria &lt;0,5mm

Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
<b>A - Massa (10,30)</b>	76,447	1	76,447	134,826
<b>B - Tempo aero (5,15)</b>	164,621	1	164,621	290,336
<b>C - Pressão ar (10,20)</b>	1438,893	1	1438,893	2537,73
<b>AB - Massa*Tempo aero</b>	74,481	1	74,481	131,359
<b>AC - Massa*Pressão ar</b>	1089,278	1	1089,278	1921,12
<b>BC - Tempo aero*Pressão ar</b>	187,889	1	187,889	331,374
<b>Modelo</b>	3031,608	6	505,268	890,948
<b>Erro</b>	0,567	1	0,567	
<b>Total</b>	3032,175	7		

Sendo assim os modelos tomam as seguintes formas adequadas e simplificadas, para a 1ª e 2ª fracções:

$$Y_{1Fe} = 47,845 - 4,536B - 13,411C + 11,669AC + 4,846BC \quad (4.28)$$

$$Y_{2Fe} = 52,154 + 4,536B + 13,411C - 11,669AC - 4,846BC \quad (4.29)$$

A observação do quadro 4.29 permite dizer que se tem como factores significativos para o Br com a granulometria <0,5mm, a massa, o tempo de aeroseparação, a pressão de ar e as interacções massa\*pressão de ar e tempo de aeroseparação\*pressão de ar, tendo ainda um valor de coeficiente de correlação muito próximo de 1, tanto para a primeira como para a segunda fracções.

**Quadro 4.29- Coeficientes do PFE 2<sup>3</sup> para o Br -granulometria <0,5mm**

	Termo	Coeficiente	Prob> t
1ªfracção	Independente	46,576	0,0022
	A - Massa (10,30)	4,061	0,0253
	B - Tempo aero (5,15)	-3,866	0,0265
	C - Pressão ar (10,20)	-13,579	0,0076
	AB - Massa*Tempo aero	-1,476	0,0693
	AC - Massa*Pressão ar	14,026	0,0073
	BC - Tempo aero*Pressão ar	4,708	0,0218
	$R^2=0,999$		
2ªfracção	Termo	Coeficiente	Prob> t
	Independente	53,424	0,0019
	A - Massa (10,30)	-4,061	0,0253
	B - Tempo aero (5,15)	3,866	0,0265
	C - Pressão ar (10,20)	13,579	0,0076
	AB - Massa*Tempo aero	1,476	0,0693
	AC - Massa*Pressão ar	-14,026	0,0073
	BC - Tempo aero*Pressão ar	-4,708	0,0218
$R^2=0,999$			

A diferença entre as duas fracções do Br com a granulometria <0,5mm está no valor do factor independente e logicamente, nos sinais dos factores. Posto isto, temos como expressões dos modelos lineares completos, da 1ª e 2ª fracções, respectivamente:

$$Y_{1B} = 46,576 + 4,061A - 3,866B - 13,579C - 1,476AB + 14,026AC - 4,708BC \quad (4.29)$$

$$Y_{2B} = 53,424 - 4,061A + 3,866B + 13,579C + 1,476AB - 14,026AC - 4,708BC \quad (4.30)$$

No quadro 4.30 observa-se que os factores significativos são os mesmos que foram obtidos por intermédio do teste t. Pode então dizer-se que os modelos matemáticos simplificados são adequados.

Quadro 4.30- Análise da variância para o Br –granulometria <0,5mm

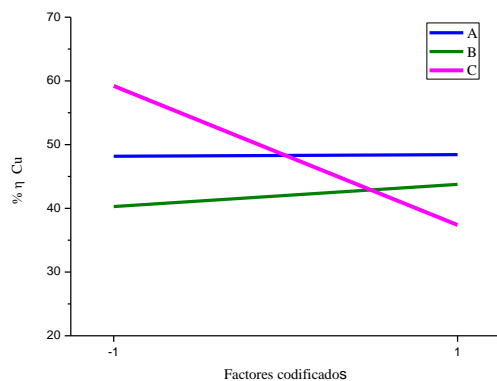
Proveniência	SS	g.l	MS	F <sub>0</sub>
A - Massa (10,30)	131,950	1	131,950	634,375
B - Tempo aereo (5,15)	119,583	1	119,583	574,919
C - Pressão ar (10,20)	1475,060	1	1475,060	7091,633
AB - Massa*Tempo aereo	17,435	1	17,436	83,820
AC - Massa*Pressão ar	1573,886	1	1573,886	7566,757
BC - Tempo aereo*Pressão ar	177,379	1	177,379	852,781
<b>Modelo</b>	3495,291	6	582,549	2800,546
<b>Erro</b>	0,208	1	0,208	
<b>Total</b>	3495,499	7		

Posto isto, a forma simplificada:

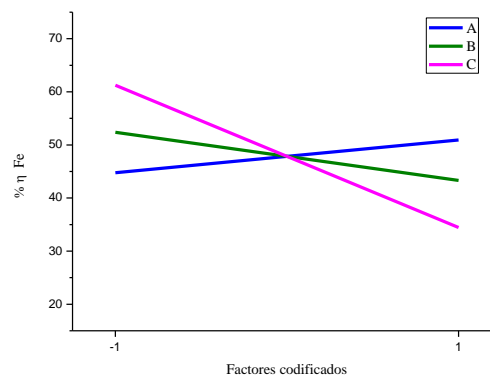
$$Y_{1Br} = 46,576 + 4,061A - 3,866B - 13,579C + 14,026AC - 4,708BC \quad (4.31)$$

$$Y_{2Br} = 53,424 - 4,061A + 3,866B + 13,579C - 14,026AB - 4,708BC \quad (4.32)$$

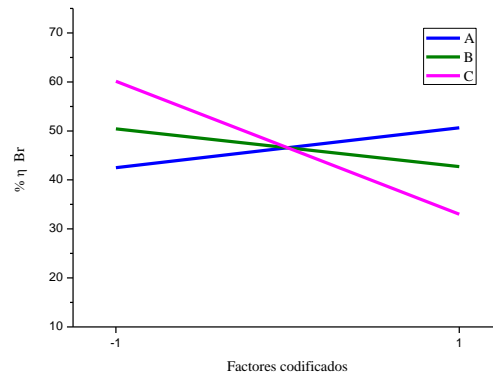
Como foi referido, quanto maior for o declive, mais significativo é o factor ou interacção. Assim, a figura 4.19 b) ilustra que os factores principais significativos em relação ao Fe são o B (tempo de aereoseparação) e o C (pressão de ar). Em relação ao Br observa-se que os factores principais significativos são o A (massa do sólido), B (tempo de aereoseparação) e C (pressão de ar), embora seja sempre necessário confirmar a significância dos factores pela probabilidade de t e/ou pelo valor da razão F (para não restarem dúvidas quanto ao declive das rectas representativas do efeito de cada um dos factores).



a)



b)

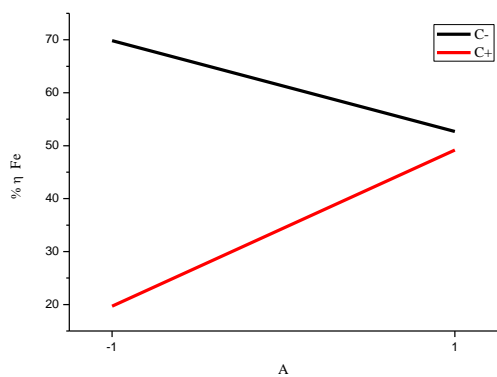


c)

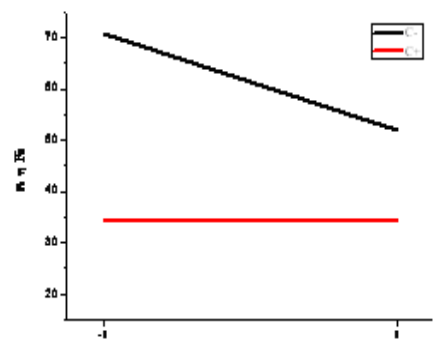
**Figura 4.19- Efeitos de factores principais dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm: a) para o Cu b) para o Fe; c) para o Br**

No que diz respeito à figura 4.20 observa-se que só as rectas da figura 4.20 c) se intersectam no interior da região experimental o que significa que AC (interacção massa do sólido\*pressão de ar) para o bromo é significativo, embora a análise da variância nos mostre que BC para o bromo e que AC (interacção massa\*pressão de ar) e BC (interacção tempo de aeroseparação\*pressão de ar) para o ferro também são significativos (figura 4.20 d) a) e b), as rectas representativas são nitidamente concorrentes).

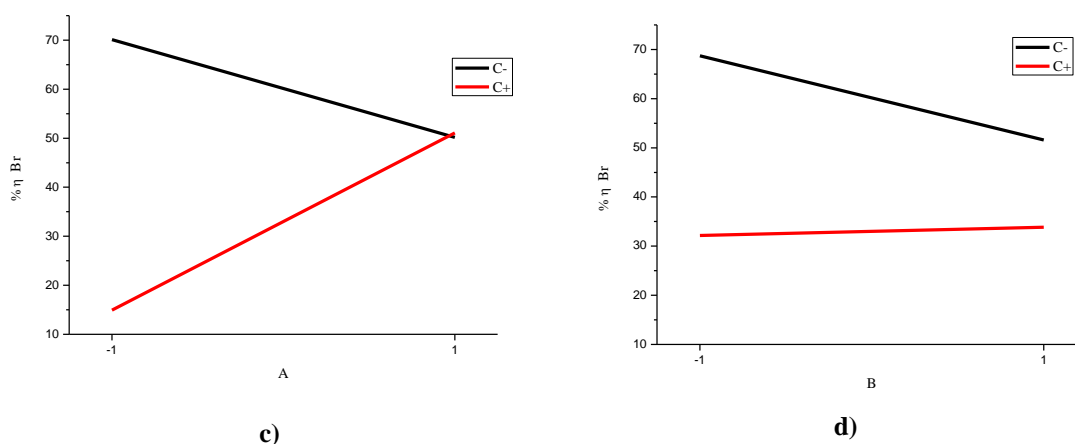
Em relação aos factores do cobre o estudo da análise da variância confirmou que não são significativos (figuras do anexo IX.7).



a)



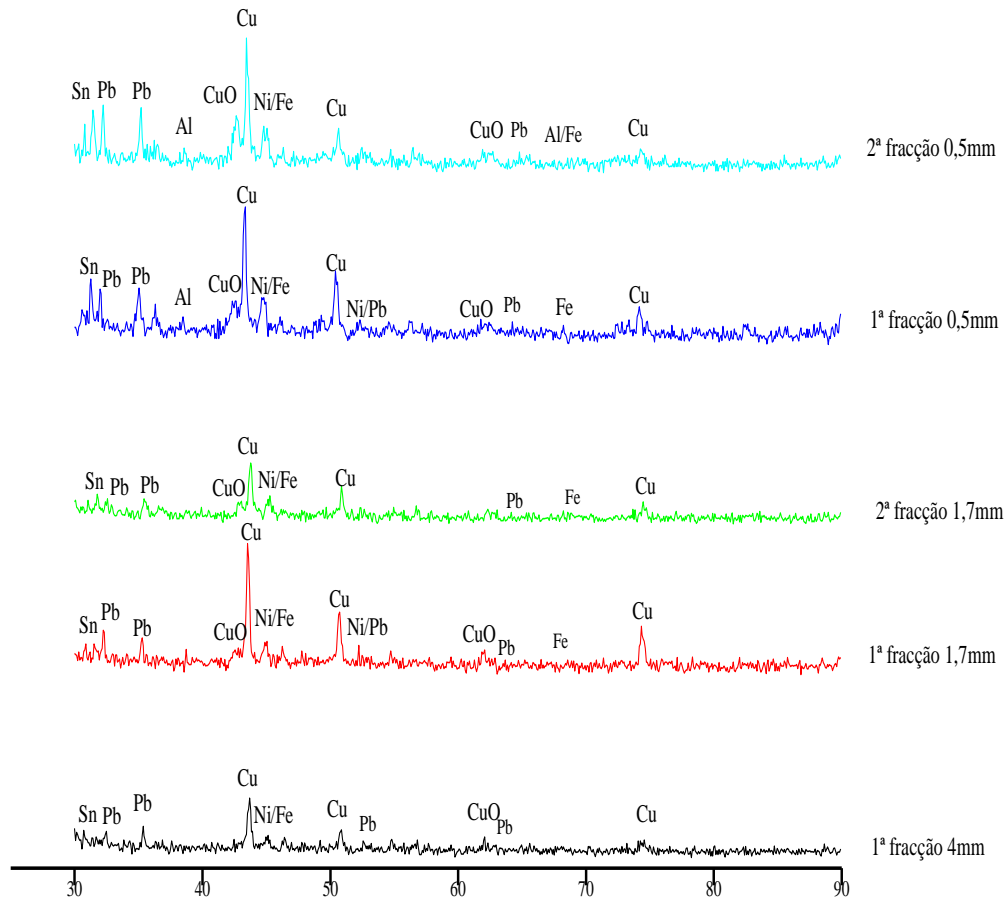
b)



**Figura 4.20- Efeitos de factores das interações dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm para o Fe:a)AC; b)BC e para o Br: c)AC; d)BC**

#### 4.4.6 Caracterização dos Produtos de Aeroseparação por Difrração de Raio-X

Na figura 4.21 estão representados os difractogramas do ensaio 1 de aeroseparação para as diferentes granulometrias. Por análise dos difractogramas foi possível identificar o cobre, livre e na forma de óxido, ferro, níquel, chumbo, estanho e alumínio.



**Figura 4.21- Difractograma de DRX do ensaio 1 de aeroseparação, 1ª e 2ª fracção das diferentes granulometrias**

Na figura 4.21 pode observar-se a diferença de intensidades dos picos entre a primeira e a segunda fracções, especialmente evidente nos produtos de granulometria <1,7. O facto de não existir um difractograma da 2ª fracção com granulometria <4mm deve-se à existência de pouco material insuficiente para a formação de uma pastilha.

## 4.5 Separação Magnética

Para os ensaios de separação magnética foram escolhidos os produtos dos ensaios de aeroseparação 2 e 5, respectivamente com granulometrias <1,7mm e <0,5mm, os quais tinham resultados de rendimentos mais elevados em fracções contrárias, isto é, na 1ª e 2ª fracção, respectivamente, sem que tivesse, verdadeiramente, ocorrido separação de materiais. Quanto à granulometria <4mm foi decidido nada fazer, visto o material ter ficado praticamente todo na primeira fracção de aeroseparação, o que deverá ter resultado da insuficiente individualização dos materiais existentes nas PCE.

Estas experiências deram origem aos resultados de distribuição de massa que são listados no quadro AX.1 do anexo X.

### 4.5.1 Caracterização Química dos Produtos de Separação Magnética

De seguida os produtos dos ensaios de separação magnética foram submetidos a análise química por FRX/DCO/IQ<sup>+</sup>, tendo-se obtido os valores são apresentados nos quadros 4.31.

**Quadro 4. 31-Valores de FRX para os produtos de separação magnética dos ensaios 2 (<1,7mm) e 5 (<0,5mm) de aeroseparação**

Ensaio	Fracção	Br	Cu	Fe
2	1ª NM	34	23	2
	1ª M	13	17	38
	2ª NM	12	21	7
	2ª M	17	22	15
5	1ª NM	34	23	2
	1ª M	13	17	38
	2ª NM	12	21	7
	2ª M	17	22	15

#### 4.5.2 Separação Magnética como Segunda Etapa de Concentração

Como referido, foram escolhidos os produtos dos ensaios de aereoseparação 2 e 5, respectivamente com <1,7 e <0,5mm de granulometria para separação com barra magnética, como uma segunda etapa de concentração.

Os cálculos de rendimento em metal para cada fracção de cada ensaio foram efectuados com base nos valores de FRX do quadro 4.31, adaptando a equação (4.7) aos valores obtidos na separação magnética. Os resultados destes cálculos são apresentados no quadro 4.32.

**Quadro 4.32- Rendimento em metal da separação com barra magnética como 2ªetapa de concentração de cada fracção dos ensaios de aereoseparação**

Aereoseparação		Produtos da Separação com Barra Magnética	Br	Cu	Fe
Ensaio	Produtos				
2	1ª	NM	77,35	64,63	8,60
		M	15,05	24,30	83,16
	2ª	NM	0,36	0,70	0,26
		M	7,24	10,37	7,98
5	1ª	NM	6,23	11,44	1,56
		M	6,20	11,53	15,02
	2ª	NM	24,70	28,32	3,08
		M	62,88	48,71	80,34

NM- não-magnética; M- magnética

Do quadro 4.32 verifica-se que na primeira fracção não-magnética do ensaio 2 existem valores de rendimento elevados tanto para o Br (77,35%) como para o Cu (64,63%) e que na primeira fracção magnética do mesmo ensaio o Fe é o metal que tem valores de concentrações muito elevados (83,16%), podendo dizer-se que existe separação com concentração de Br e Cu na 1ªfracção não magnética e de Fe na 1ª fracção magnética, obtida por separação magnética. No que diz respeito à 2ª fracção não-magnética e magnética os valores de rendimento são muito mais baixos (inferiores a 1% na fracção não magnética e da ordem de 7-10% na magnética), sem que tenha ocorrido qualquer separação.

Da análise dos resultados obtidos no ensaio 5 verifica-se que não existiu separação de nenhum dos elementos pretendidos.

### 4.5.3 Concentração por Separação Magnética

O estudo da separação com barra magnética também foi realizado considerando esta operação como uma única etapa de concentração do processo de tratamento das PCE, ou seja, uma etapa independente da aeroseparação.

Os resultados dos rendimentos em metal para cada produto da separação magnética são apresentados no quadro 4.33.

Quadro 4.33- Rendimentos em metal da separação com barra magnética

Granulometria (mm)	Produtos	Br	Cu	Fe
<1,7	1ª e 2ª NM	79,11	66,39	8,80
	1ª e 2ª M	20,89	33,61	91,20
<0,5	1ª e 2ª NM	35,08	40,75	5,38
	1ª e 2ª M	64,92	59,25	94,62

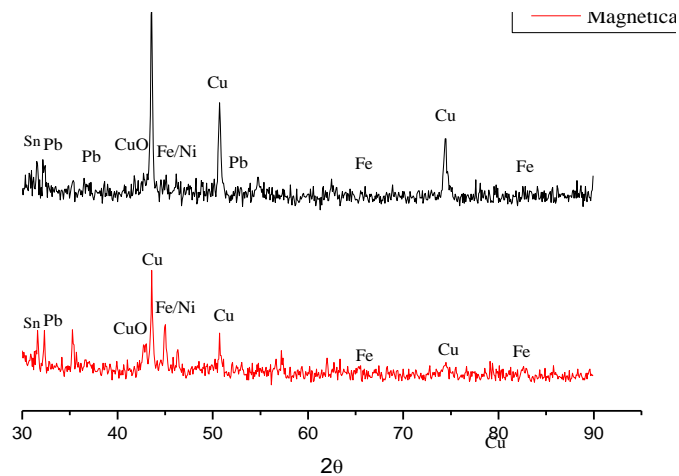
Nos resultados de rendimento em metal do quadro 4.33 observa-se que com a granulometria <1,7mm houve concentração do bromo e cobre no produto não-magnético e do ferro no produto magnético, com valores que ascendem a 79,11% Br, 66,39% Cu e 91,20 % Fe, respectivamente.

No ensaio com granulometria <0,5mm verifica-se que não existiu separação de nenhum dos elementos, pois os valores mais elevados de rendimento estão sempre no produto magnético o que significa que não existiu concentração de nenhum dos elementos considerados.

### 4.5.4 Caracterização por Difraccção de Raio-X de Produtos de Separação Magnética

Ao analisar os valores de rendimento em metal da separação magnética do quadro 4.33, verifica-se que os valores do ensaio 2 na 1ª fracção são realmente os mais significativos, mostrando que terá existido uma separação do ferro no produto magnético, relativamente ao cobre e bromo que se concentraram no produto não magnético.

Para avaliar mais em pormenor estes resultados procedeu-se à análise por DRX, de duas amostras dos produtos de separação magnética (material não-magnético e material magnético) da 1ª fracção de aeroseparação do ensaio 2 -figura 4.22.



**Figura 4.22- Difractograma DRX da separação magnética da 1ª fracção do ensaio 2 (1,7mm)**

Como pode observar-se nos difractogramas da figura 4.22, as intensidades de raios-X das varias espécies e/ou elementos diferem, principalmente no que diz respeito ao cobre, ferro e níquel. Em relação aos picos do cobre pode referir-se que são sem dúvida, mais intensos no difractograma correspondente ao material não-magnético, enquanto que o do ferro se identifica com o material magnético.

Embora não devesse existir Cu no ensaio do material magnético, a sua existência neste material poderá resultar do facto da granulometria fina ser mais propícia à sua aglomeração, fazendo com que a barra magnética ao atrair as partículas magnéticas arrastem consigo partículas aglomeradas finas não-magnéticas.

## 4.6 Separação por Meios Densos

Numa perspectiva de obter melhores resultados de separação de material ainda se procedeu à realização de ensaios de separação por meios densos, utilizando água destilada como meio separador. Estes ensaios, após filtração e secagem, permitiram obter valores de distribuição de massa que são apresentados no quadro 4.34.

**Quadro 4.34 – Distribuição de massa nos produtos de separação por meios densos**

Ensaio		Flutuado (%)	Afundado (%)
4mm	G	13,07	86,93
	H	9,39	90,61
1,7mm	E	28,49	71,51
	F	27,88	72,12
0,5mm	A	59,17	40,83
	B	45,17	54,83
	C	45,97	45,97
	D	54,71	45,29

Como a dificuldade de execução dos ensaios aumentava como decréscimo da granulometria, os ensaios com material <0,5mm foram replicados quatro vezes, a fim de assegurar que o possível erro experimental era minimizado.

### 4.6.1 Determinação de Rendimentos na Separação por Meios Densos

O quadro AXI.1 do anexo XI, apresenta os valores obtidos na análise química por fluorescência de raios-X dos produtos flutuados e afundados dos ensaios de separação por meios densos. Os respectivos rendimentos em Br, Cu e Fe, obtidos por adaptação da equação (4.7) encontram-se sumarizados no quadro 4.35.

Estes resultados, qualquer que seja o conjunto de granulometrias considerado, denotam uma variabilidade significativa dos rendimentos obtidos entre ensaios realizados nas mesmas condições e com a mesma granulometria.

**Quadro 4.35- Valores de rendimento em metal de cada elemento nos ensaios**

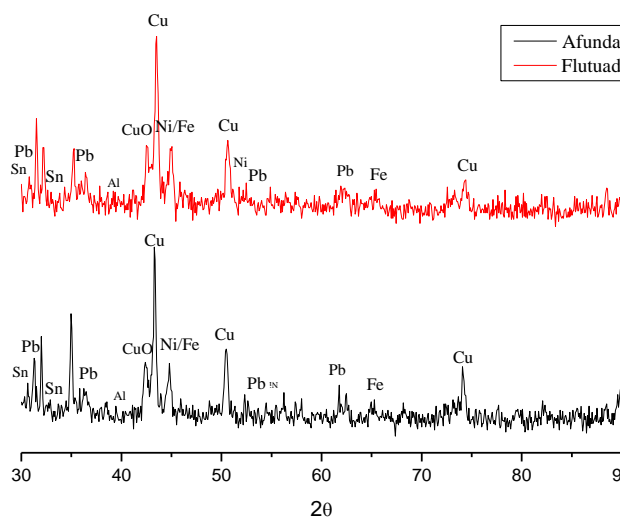
Ensaio			Br	Cu	Fe
4mm	G	flutuado	16,85	8,59	12,02

	<b>H</b>	<b>afundado</b>	83,15	91,41	87,98
		<b>Flutuado</b>	10,06	5,66	13,68
		<b>afundado</b>	89,94	94,34	86,32
<b>1,7mm</b>	<b>E</b>	<b>flutuado</b>	25,21	28,49	27,19
		<b>afundado</b>	74,79	71,51	72,81
	<b>F</b>	<b>flutuado</b>	32,81	29,66	21,94
		<b>afundado</b>	67,19	70,34	78,06
<b>0,5mm</b>	<b>A</b>	<b>flutuado</b>	68,49	60,72	48,59
		<b>afundado</b>	31,51	39,28	51,41
	<b>B</b>	<b>flutuado</b>	52,34	51,24	37,77
		<b>afundado</b>	47,66	48,76	62,23
	<b>C</b>	<b>flutuado</b>	53,15	50,66	36,71
		<b>afundado</b>	46,85	49,34	63,29
	<b>D</b>	<b>flutuado</b>	62,23	58,39	48,82
		<b>afundado</b>	37,77	41,61	51,18

De qualquer modo, os resultados do quadro 4.35 confirmam a inexistência de concentração não simultânea deste material com separação por meios densos, usando como meio de separação a água.

#### 4.6.2 Caracterização por Difrração de Raio-X dos Produtos de Separação por Meios Densos

Analisando os resultados de DRX obtidos para os produtos de separação por meios densos do ensaio A, figura 4.23, observa-se a inexistência de diferenças significativas na intensidade dos picos de difração.



**Figura 4.23- Difractograma dos produtos do ensaio A da separação por meios densos**

Complementarmente, deve referir-se que todos os difractogramas analisados neste trabalho foram identificados com base nas fichas JPCPDS 04-836, para identificação do Cu, 04-787 para identificação do Al, 04-850 para identificação do Ni, 06-696 para identificação do Fe, 04-686 para identificação do Pb e 78-428 para identificação do CuO, todas estas fichas podem-se observar no anexo VI.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Do estudo feito aos resultados da cominuição verifica-se uma variabilidade dos valores de percentagem dos elementos seleccionados, com a granulometria do material fragmentado. A caracterização granulométrica dos diferentes produtos permitiu observar-se que para o material de granulometria <10mm tem maior frequência (16%) na classe granulométrica (-4,75 +3,35), o de granulometria <4mm (15%) na classe granulométrica (-3,35 +2,36), o de granulometria <1,7mm (14%) na classe (-1,18 + 0,850) o de granulometria <5mm (28%) na classe (-0,038 + 0,025). Como complemento da caracterização dos produtos de cominuição procedeu-se à caracterização por difracção de raios-X, sendo possível comprovar a influência da granulometria das amostras na exposição para análise das diversas espécies fragmentadas.

Com os resultados da amostragem das distribuições granulométricas dos vários produtos de cominuição conclui-se que o erro diminui com o decréscimo da respectiva granulometria, o que está de acordo com a teoria de Pierre Gy.

Dos resultados de concentrações conclui-se que a granulometria <4mm e <1,7mm comportam-se de maneira semelhante, ou seja, existe separação de ferro nas classes granulométricas mais finas, enquanto o bromo e o cobre estão presentes nas zonas de calibres mais grosseiros. Em relação à granulometria <0,5mm, as concentrações com rendimentos em cobre e ferro mais elevados situam-se em fracções muito finas enquanto que o bromo se encontra em granulometrias mais grosseiras, embora a dispersão da sua concentração se estenda para fracções mais finas.

Através dos ensaios de arosetração observa-se que para a granulometria <4mm não existe qualquer separação seleccionados para controlo desta operação. No que diz respeito aos ensaios da granulometria <1,7mm, o ensaio 7 (massa no nível baixo e tempo de arosetração e pressão de ar nos respectivos níveis altos) apresenta separação do bromo, que se concentra na 2ª fracção, em relação ao cobre e ferro, que se concentram na 1ª fracção, enquanto que o ensaio 2 tem os valores de rendimento mais elevados, mas sem separação de qualquer elemento. Em relação à arosetração da granulometria <0,5mm tem-se um elevado rendimento, sem separação dos elementos químicos no ensaio 5 (massa e tempo de arosetração nos respectivos níveis baixos e pressão de ar no nível alto).

O estudo da aeroseparação pela metodologia dos planos factoriais de ensaios permitiu verificar a significância dos factores e a possível adequação dos modelos matemáticos estimados. Com este estudo comprovou-se que a granulometria  $<4\text{mm}$  não tem factores significativos e, conseqüentemente, a não adequação do modelo matemático completo. A granulometria  $<1,7\text{mm}$  tem como factores significativos a massa, o tempo de aeroseparação e a interacção entre o tempo de aeroseparação e a pressão de ar para as duas fracções do cobre, a que corresponde os modelos simplificados (4.15) e (4.16).

Quanto à granulometria  $<0,5\text{mm}$ , para o Fe tem-se como factores significativos o tempo de aeroseparação, a pressão de ar, a interacção entre massa e a pressão de ar e a interacção entre o tempo de aeroseparação e a pressão de ar, enquanto para o Br acrescentando-se a massa (aos mesmos factores), muito embora não se tenha conseguido obter um modelo matemático adequado que descreva o processo.

Os ensaios de separação magnética com os produtos de aeroseparação do ensaio 5 de granulometria  $<0,5\text{mm}$  e do ensaio 2 de granulometria  $<1,7\text{mm}$ , os resultados obtidos permitiram a concentração conjunta do cobre e bromo no produto não-magnético e a separação do Fe no produto magnético do ensaio 2 da primeira fracção confirmada com a análise dos respectivos difractogramas. No ensaio 5 não se conseguiu obter a desejada separação, provavelmente devido à granulometria ser muito fina e por isso existir mais tendência à formação de aglomerados de material que dificultam a separação das partículas magnéticas das não-magnéticas.

Os ensaios de separação por meios densos com água como meio separador não corresponderam as expectativas. A explicação para os resultados destes ensaios poderá residir na inadequação do meio separador utilizado, pelo que esta é uma operação a estudar mais detalhadamente.

Apesar de não ter sido referida, no desenvolvimento deste trabalho, também foi executada uma tentativa de separação por elutriação com uma amostra de granulometria  $<0,5\text{mm}$ , mas como nesse ensaio, com as condições existentes, não se conseguiu fazer a molhagem total do material, optou-se por não prosseguir com esta técnica.

No futuro, apesar de já existirem diversos estudos publicados, continua pertinente o estudo aprofundado da recuperação e reciclagem de placas de circuitos electrónicos, bem como dos outros resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos, a fim de preservar o ambiente e não esgotar os recursos naturais.

Tendo em vista o que foi exposto, considera-se que o interesse na reciclagem de placas de circuitos electrónicos, será ainda maior no futuro, permitindo que estudos mais aprofundados conduzam a maiores recuperações e à total reciclagem das PCE, considerando a sua importância ambiental, económica e social.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Disponível na WWW: [URL:http://pt.wikipedia.org/wiki/Reciclagem](http://pt.wikipedia.org/wiki/Reciclagem) [Consult. Setembro 2007]
- [2] Disponível na WWW:<URL [http://www.procobre.org/pr/noticias/2007/1207\\_02.html](http://www.procobre.org/pr/noticias/2007/1207_02.html) [Consult. Junho 2008]
- [3] Cui, J.; Forssberg, E.; “ *Mechanical recycling of waste electrical and electronic equipment: a review*”, J. Hazard. Mater. B 99 (2003) 243-263
- [4] Li, J; Shrivastava, P; Gao, Z; Zhang, H, “*Printed circuit board recycling: A State-of-the-Art Survey*”, IEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, VOL. 2, NO.1, 2004.
- [5] Veit, H.M; Bernardes, A.M, “Recovery of copper from printed circuit boards scraps by mechanical processing and electrometallurgy”2006
- [6] Hischer, R.; Wäger, P.; Gauglhofer, J.; “*Does WEE recycling make sense from environmental perspective? The environmental impacts of the Swiss take-back and recycling systems for waste electrical and electronic equipment (WEEE)*”, Environmental Impact Review 25 (2005) 525-539.
- [7] Disponível na WWW: <URL: [http://ww.cepis.ops-oms.org/bvsasv/e/red/reunion6/pages/Act\\_Cientificas/ponencias\\_Radiaciones/Angela%20Cassia%20TRAB%20Brasil.htm](http://ww.cepis.ops-oms.org/bvsasv/e/red/reunion6/pages/Act_Cientificas/ponencias_Radiaciones/Angela%20Cassia%20TRAB%20Brasil.htm)> [Consult. Setembro2007]
- [8] Disponível na WWW: [URL:http://www.ideiasambientais.com.pt/reec.html](http://www.ideiasambientais.com.pt/reec.html) [Consult. Abril 2008]
- [9] PARLAMENTO EUROPEU, Directiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 27 de Janeiro de 2003: Relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE), in jornal Oficial da União Europeia de 13.2.2003
- [10] Cunha, M.L.; Lima, M.M.R.A.; “Scrap of the Electrical and Electronic Industries: A Raw Materials Source”, “Paper” N° PA0489, Proceedings of “Waste 2004 - Integrated Waste Management and Pollution Control, Policy and Practice, Research and Solutions Biennial International Conference”, oral presentation, [www.thewasteconference.com](http://www.thewasteconference.com), (ISBN 0-9539301-2-8), Stratford-upon-Avon, U.K., 28-30 Sept. 2004, 863-872.

- [11] Disponível na WWW: <URL [http://www.rrr.cirp.usp.br/residuo\\_tec.html](http://www.rrr.cirp.usp.br/residuo_tec.html)> [Consult. Abril 2008]
- [12] Disponível na WWW: <URL [www.recielectric.pt](http://www.recielectric.pt)> [Consult. Setembro 2008]
- [13] Li, J.; Lu, H.; Guo, J.; Xu, Z.; Zhou, Y.; “*Recycle technology for recovering resources and products from waste printed circuit boards*”, Environ. Sci. Technol., VOL. 41, NO. 6, 2007
- [14] Disponível na WWW: <URL <http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l21210.htm>> [Consult. Setembro 2008]
- [15] Disponível na WWW: <URL <http://recicleblog.blogspot.com/2008/07/sucata-eletrnica-ou-lixo-eletrnico.html>> [Consult. Setembro 2008]
- [16] Disponível na WWW: <URL <http://www.ambienteonline.pt/noticias/detalhes.php?id=4963>> [Consult. Setembro 2008]
- [17] Disponível na WWW: <URL <http://www.publico.clix.pt/print.aspx?id=1317800>> [Consult. Novembro 2008]
- [18] Disponível na WWW: <URL <http://furacao-furacao.blogspot.com/2008/02/ser-muito-difcil-portugal-cumprir-as.html>> [Consult. Setembro 2008]
- [19] William J. Hall, Paul T. Williams “Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards, Conservation and Recycling” 51 (2007) 691-709.
- [20] Disponível na WWW: <URL <http://dspace.unimap.edu.my/bitstream/123456789/3274/5/Literature%20reiviem.pdf>> [Consult. Setembro 2008]
- [21] Goosey, M.; Kelineer, R.; “Recycling technologies for the treatment of end of life printed circuit boards”, Circuit World 293 (2003) 33-37.
- [22] Li, J; Xu, Z; Zhou, Y; “Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards” Journal of Electrostatics 65 (2007) 233-238.
- [23] Disponível na WWW: <URL <http://en.wikipedia.org/wiki/Pyrometallurgy>> [Consult. Novembro 2007]
- [24] Kinoshita, T; Akita, S.; Kobayashi, N.; Nii, S.; Kawaizumi, F.; Takahashi, K.; “Metal recovery from non-mounted printed wiring boards via hydrometallurgical processing” Hydrometallurgy 69, (2003), 73-79

- [25] SUM, Elaine Y.L. “The recovery of metal from electronic scrap” JOM, p-53-61, 1991.
- [26] Bernardes, A.Wuth, W. “Recycling of printed circuit boards by melting with oxidising/reducing top blowing process”. TMS Annual Meeting, Orlando, EUA, p. 363-375, 1997.
- [27] Disponível na WWW: <URL <http://www.cetem.gov.br/tendencias/livro/PARTE%20%20TECNOLOGIA%20MINERAL/CAP%204%20HIDROMETALURGIA%20FINALIZADO.pdf>> [Consult. Novembro 2007]
- [28] Disponível na WWW: <URL <http://www.accessscience.com/>> [Consult. Novembro 2007]
- [29] Wu, J. Li, J. Xu, Z. “Electrostatic Separation for Recovering Metals and Non-metals from Waste Printed Circuit Boards”, Environ. Sci. Technol. (2008) 42, 5272-5276.
- [30] Cui,j; Zhang, L. “Metallurgical recovery of metal: a review” Journal of Hazardous Materials,2007.
- [31] Ilyas, S.; Anwar, Munir; Niazi,S.; Ghauri,M. “Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria
- [32] Eswaraiyah, C.; Kavitha,T.; Vidyasagar,S.; Narayanan,S.S; “Classification of metals and plastics from printed circuit boards (PCB) using air classifier” Chemical Engineering and Processing 47 (2008) 565-576, 2006
- [33] Li, J; Shrivastava, P; Gao, Z; Zhang, H; “ Printed Circuit Board Recycling: A State-of-Art Survey”, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, VOL. 27, NO. 1, 2004.
- [34] Kopacek, B; Kopacek, P; Intelligent disassembly of Electronic Equipment. Annual Reviews in Control, v.23,p.165-170, 1999.
- [35] Chmielewski A.G.; Urbanski T.S.; Migdal W.;” Separation technologies for metals recovery from industrial wastes” Hydrometallurgy 45 (3) (1997) 333–344.
- [36] Brandl, H.; Bosshard, R.; Wegmann, M.; “Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi”, Hydrometallurgy 59 (2–3) (2001) 319–326.
- [37] Veit, H.M; Diehl, T.R.; Salami, A.P.; Rodrigues, J.S.; Bernardes, A.M;”Using Mechanical Processing in Recycling Printed wiring boards”, JOM (2002)
- [38] Veit, H.M; Diehl, T.R.; Salami, A.P.; Rodrigues, J.S.; Bernardes, A.M; “Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap” 28 Set, 2004

- [39] Choi, M.-S. ; Cho, K.-S.; Kim, D.-S “Microbial recovery of copper from printed circuit boards of waste computer by *Acidithiobacillus ferrooxidans*” J. Environ. Sci. Health – Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng. 39 (11–12) (2004) 2973–2982.
- [40] Ferreira, I.; Cunha, M.L Cunha, Lima, M.M.R.A, “*Reciclagem de Sucata das Indústrias Eléctrica e Electrónica: Problemática do Desmantelamento de Placas de Circuitos Electrónicos*”, oral presentation, 8ª Conferência Nacional de Ambiente, Lisboa, 27-29 Outubro 2004, Acta de resumos: 285-286, Artigo: TVGR\_005.pdf CD-ROM, 9pp.
- [41] Lima, M.M.R.A, Ferreira, I.; Cunha, M.L Cunha, “*Reciclagem de Sucata das Indústrias Eléctrica e Electrónica: Aptidão à Separação Magnética em Placas de Circuitos Electrónicos*”, oral presentation, 8ª Conferência Nacional de Ambiente, Lisboa, 27-29 Outubro 2004, Acta de resumos: 287-289, Artigo: TVGR\_006.pdf CD-ROM, 8pp.
- [42] Cunha, M.L.; Lima, M.M.R.A; Ferreira I; , “*Dismantling or Direct Mechanical Treatment: Two Routes to Recycle Electronic Circuit Boards*”, Proceedings of “Securing the Future - International Conference on Mining and the Environment, Metals and Energy Recovery”, oral presentation, [www.securing2005.skelleftea.se](http://www.securing2005.skelleftea.se), (ISBN: 91-9751190-1-4), June 27 – July 1, Skellefteå 2005”, Sweden, Vol. 1, 191-200.
- [43] Martins, A.H.;”Recuperação de estanho e cobre a partir da reciclagem de placas de circuito electrónico de microcomputadores sucitados”, Estudos Tecnológicos- Vol.3. nº 2:124-131, ISSN 1808-7310 (2007)
- [44] Jie, G.; Ying-Shun, L.; Mai-Xi, L. “Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis“ Journal Analytical and Applied Pyrolysis 83 (2008) 185–189
- [45] Yoo, J.-M.; Jeong, J.; Yoo, K.; Lee, J.-c \*, Kim W.; “Enrichment of themetallic componentes from waste prined circuit boards by a mechanical separation process using a stamp mill” Waste Management 29 (2009) 1132–1137
- [46] Sandra Inês da Cunha Monteiro- Planos factoriais de base dois, Lisboa 2007
- [47] Teófilo, R. T.; Ferreira, M. M. C.; “Quimiometria II: planilhas electrónicas para cálculos de planeamentos experimentais, um tutorial”, Quím. Nova vol.29 no.2 São Paulo, Mar./Apr. 2006.
- [48] Christensen, R.; *Analysis of variance, design and regression – applied statistical methods*, CRC: New York, 2000.

- [49] CUNHA, Lucelinda – *Reciclagem de Materiais - Técnicas de Trabalhos Práticos* (protocolos dos trabalhos práticos), Departamento de Ciências dos Materiais, FCT-UNL, ano lectivo 2007/2008.
- [50] Disponível na WWW: <URL <http://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/53832/1/P1.doc>> [Consult. Setembro2008]
- [52] M. Shapiro, V. Galperin “Air classification of solid particles: a review” Fevereiro de 2004
- [53] Disponível na WWW: <URL <http://www.geocities.com/Vienna/Choir/9201/recristalizacao.htm>> [Consult. Setembro2008]
- [54] Disponível na WWW: <URL <http://www.panalytical.com/index.cfm?pid=314>> [Consult. Setembro2008]
- [55] Disponível na WWW: <URL [http://web.cena.usp.br/apostilas/Virgilio/cen.5723/EDRF\\_TXRF.doc](http://web.cena.usp.br/apostilas/Virgilio/cen.5723/EDRF_TXRF.doc)> [Consult. Setembro2008]
- [56] Seabra, A. V., Metalurgia Geral- Volume II Metalografia, laboratório Nacional de Engenharia, 3ª edição;

## **ANEXOS**

## **ANEXO I - OPERAÇÕES E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO UTILIZADAS NO TRATAMENTO DAS PCE**

### **A. I.1.1 Cominuição**

A cominuição é um processo de redução de calibre, desde a frente de desmonte até à granulometria de libertação dos seus constituintes. Este processo, implica a obtenção de uma distribuição granulométrica específica e/ou malha de moagem.

A cominuição realiza-se em três etapas dependendo do tamanho da alimentação e da qualidade do produto final:

1. Britagem ou fragmentação primária (com britadeiras);
2. Granulação ou fragmentação secundária (com granuladores);
3. Moagem ou fragmentação terciária (com moinhos) [49].

### **A.2 Moinho de Martelos**

Nos moinhos de martelos, os martelos vão rodar e fazem com que o material a fragmentar bata contra as paredes da câmara de moagem e vá diminuindo de tamanho até que possa sair pelas aberturas da malha dum crivo ou rede (conforme os calibres pretendidos) posicionando na parte inferior da referida câmara de moagem.

Este crivo está colocado à saída do moinho para que o material que não é quebrado ao tamanho exigido seja retido e passe novamente para cima para que o processo se repita até que todo o material possa passar na rede.

Este tipo de equipamento é projectado para dar às partículas velocidades da mesma ordem da dos martelos.

A fractura ou é devida à severidade de impacto com os martelos e/ou ao impacto subsequente contra a cobertura da câmara de moagem.

Devido à elevada taxa de desgaste deste equipamento, o seu uso costuma estar limitado a materiais relativamente pouco abrasivos.

### A.I.1.2 Amostragem

Define-se amostragem como sendo uma sequência de operações com o objectivo de retirar uma parcela representativa de seu universo.

A importância da amostragem é ressaltada principalmente quando entram em jogo a avaliação de depósitos minerais, o controle de processos em laboratório e na indústria, bem como o controle de qualidade na comercialização de produtos.

Uma amostragem mal conduzida pode resultar em prejuízos consideráveis ou em distorção dos resultados com consequências técnicas imprevisíveis.

Estas técnicas são variáveis consoante os processos utilizados, laboratoriais ou industriais.

No caso da indústria, as técnicas de colheita de amostras estão relacionadas com processos contínuos, uma vez que neste caso, o controlo das características do material no tempo faz parte do objectivo.

Já nos processos descontínuos, são utilizadas técnicas semelhantes às da amostragem laboratorial. Na indústria, a amostragem é no geral realizada por corte transversal, total ou parcial efectuado mecanicamente. A necessidade da realização desta operação depende essencialmente da variação da matéria-prima e do erro admitido, dado que a amostragem é tanto mais precisa quanto maior for a ocorrência da colheita de amostras.

Os amostradores industriais consistem resumidamente em colheres com movimento de vaivém (pendular) ou, por outro lado, em sistemas com forma de sectores circulares rotativos, colocados em locais de passagem do material.

Esta colheita de amostras é uma etapa essencial em qualquer sistema de controlo da qualidade, para esta recolha temos que ter em conta sempre dois factores: quantidade de amostra a recolher e os princípios de selecção básicos.

Estes princípios de selecção básicos dependem de duas condições a cumprir:

**Correcção-** uma amostra considera-se correcta, se na sua selecção todas as partículas constituintes do lote têm a mesma probabilidade de serem escolhidas – a amostragem diz-se equiprovável;

**Justa ou Não Enviesada-** uma amostra é justa quando a média da distribuição de uma dada característica (*variável aleatória*) é igual à do lote ou encontra-se a tender para ela;

Para que isto se verifique é necessário garantir um caudal constante na colheita da amostra ou uma homogeneização perfeita, sendo também necessária uma lei aleatória da designação dos instantes ou dos pontos de amostragem.

Uma amostragem mal conduzida pode resultar em prejuízos consideráveis ou em distorção dos resultados com consequências técnicas imprevisíveis, e tal também pode acontecer ao não ter em conta as condições anteriores.

Pierre Gy deduziu expressões analíticas que podem quantificar a variância dos erros cometidos na colheita de amostras;

Assim, para amostras destinadas a análise química tem-se:

$$\sigma^2 = \frac{l.f.g.d^3.C}{M} \quad (\text{AI.1})$$

Em amostras para análise granulométrica tem-se segundo Pierre Gy:

$$\sigma^2 = \frac{f.\rho.d_\alpha^3}{M} \times \left[ \frac{1}{m_\alpha} - g - 2 \right] \quad (\text{AI.2})$$

Em que:

$\sigma^2$  – variância do erro fundamental (em valor relativo).

l – parâmetro de individualização (variável entre 0 e 1).

f – parâmetro de forma: partículas sub-esféricas (normais): f = 0,5; partículas lamelares (micas, etc.): f = 0,2.

$\rho$  – massa volúmica média das partículas do lote (em g/cm<sup>3</sup>)

d – calibre das partículas mais grosseiras do lote. Considera-se, em geral, d =  $\phi_{95}$  (calibre a 95%, isto é, o lado da malha que retém 5% do lote e deixa passar 95% em centímetros).

$d_\alpha$  – calibre médio das partículas da classe granulométrica,  $\alpha_i$ . Onde  $d_\alpha^3 = \frac{d_\alpha^3 máx + d_\alpha^3 \min}{2}$ ,  $d_\alpha^3 máx$  e  $d_\alpha^3 \min$  são, respectivamente os calibres mais grosseiros e mais finos da classe granulométrica  $\alpha$ .

M – massa da amostra (em gramas).

$m_\alpha$  - fracção estimada da classe granulométrica  $\alpha$ , onde  $m_\alpha = \frac{M_\alpha}{M}$ , na qual  $M_\alpha$  - massa da classe granulométrica  $\alpha$ .

$g$  - parâmetro de distribuição granulométrica:  $g = 0,25$  nos casos práticos normais;  $g=0,5$  em materiais estreitamente calibrados [47].

Em termos laboratoriais, a amostragem depende principalmente da quantidade do lote e do equipamento disponível, estando associada a processos contínuos, manuais ou mecânicos. Os processos manuais englobam as sondas (tubos metálicos cilíndricos), e os métodos que se aplicam a pequenas quantidades de material, como o padejamento, a enquartação e a quadrícula. Os processos mecânicos utilizam princípios de funcionamento semelhantes aos da amostragem industrial, apenas diferindo no factor de escala.

Na amostragem laboratorial utiliza-se normalmente dois tipos de aparelhos, como o Amostrador Jones (o utilizado neste trabalho) e o Amostrador/Divisor rotativo [49].

### AI.1.3 Enquartação

Este tipo de técnica aplica-se apenas a pequenas amostras, previamente homogeneizadas, através do achatamento de um monte cónico de material. Divide-se o monte em quatro partes, por meio de dois cortes diametrais perpendiculares entre si. Selecciona-se dois quartos opostos para a amostra, até se obter a quantidade desejada [47].

### AI.1.4 Amostrador de Jones

Consiste numa caixa aberta em forma de V, na qual existe uma série de divisores paralelos formados por calhas de largura não inferior a  $2d+5$  ( $d$  - calibre máximo das partículas em mm), com ângulos iguais, posicionados ao longo do eixo de modo a dar uma série de saídas rectangulares alternadas, iguais entre si. Estas fazem com que o material seja separado em duas fracções equivalentes as quais são depositadas em dois recipientes que se encontram colocados nas laterais do amostrador. Das duas amostras resultantes, uma delas é rejeitada e o procedimento

é repetido continuamente apenas com a outra fracção até se obter a quantidade de amostra desejada [49].

### AI.1.5 Classificação granulométrica

A classificação granulométrica, ou seja, o conhecimento da distribuição granulométrica das partículas minerais na alimentação nos produtos obtidos em cada etapa de fragmentação constitui, instrumento de avaliação de qualquer diagrama de cominuição.

Os objectivos principais da classificação granulométrica são:

- 1 Limitar superiormente o calibre da alimentação na fragmentação, a fim a não ser excedida a dimensão permitia pela boca dos aparelhos;
- 2 Limitar inferiormente a distribuição granulométrica da alimentação, para aumentar a capacidade e eficiência da fragmentação;
- 3 Dividir os produtos de fragmentação em lotes definidos, em termos de calibres máximos e mínimos, dado que os finos iriam sobrecarregar inutilmente a alimentação, para que os circuitos de concentração sejam alimentados de acordo com as suas características.

A classificação granulométrica laboratorialmente é efectuada, através da crivagem ou peneiração [49].

Neste trabalho a representação gráfica da distribuição de tamanhos de partículas vai ser representada por um histograma da massa de partículas em cada intervalo de diâmetro e pelas curvas cumulativas. Onde para a realização dos histogramas tem que se por no eixo das abcissas os intervalos dos calibres, e nas ordenadas as percentagens das massas retidas nos respectivos intervalos que tem de ser calculada, e para a realização das curvas cumulativas tem que se calcular as percentagens de material acumulado acima ou baixo dos calibres, ou seja as curvas cumulativas superiores ou inferiores em função dos calibres.

A caracterização rápida destas curvas cumulativas, da granulometria dum material, por um número, ou seja a sua medida é feita a partir do módulo do calibre.

O módulo de calibre pode corresponder ao calibre máximo, ou seja, calibre a 100% que corresponde ao lado da malha quadrada do crivo através do qual passa 100% do material, ou então, e também o mais utilizado pois traduz melhor a distribuição, o calibre a 80% ou  $\phi_{80}$ , que é

o lado da malha quadrada através do qual passa 80% do material. O conhecimento desta grandeza permite calcular a relação de fragmentação a 80% que caracteriza a redução de calibre operada na fragmentação e pode ser traduzida matematicamente pela seguinte expressão:

$$R_{80} = \frac{\phi_{80}^a}{\phi_{80}^p} \quad (\text{AI.3})$$

Em que:

$R_{80}$  \_ Relação de fragmentação a 80%

$\phi_{80}^a$  \_ Calibre a 80% da alimentação

$\phi_{80}^p$  \_ Calibre a 80% do produto

Na britagem primária  $2 < R_{80} < 8$  e tem como valor médio 4,5

Outro parâmetro passível de ser utilizado na caracterização da redução de calibre de um determinado equipamento é a relação de fragmentação aparente dada pela expressão:

$$R_a = \frac{B}{g} \quad (\text{AI.4})$$

Onde:

$B$  - Menor dimensão da abertura de entrada da alimentação no aparelho ou “Boca”

$g$  - Menor dimensão de saída do produto ou “Goela”.

### AI.1.6 Peneiração

Neste trabalho o método de medida do tamanho de partículas utilizado, foi a peneiração. Este método consiste em colocar um determinado número de crivos em série, verticalmente, em que o crivo de topo tem a malha mais larga do que todos os outros, e o da base uma malha mais estreita, estes são colocados sobre um recipiente de recolha e de seguida colocam os crivos num vibrador mecânico. Os crivos utilizados apresentam várias aberturas de malha [50].

Com a vibração, as partículas vão ficando retidas no peneiro com malha inferior ao seu tamanho como mostra a figura 6.4.

A distribuição do tamanho das partículas pode ser apresentada através de um histograma (no qual se representa a percentagem da fracção mássica de partículas dentro de um determinado intervalo de tamanhos) ou sob a forma de uma curva cumulativa (no qual se representa a percentagem da fracção mássica de partículas mais finas do que um dado valor, ou por contrário, maiores do que um dado valor).

Podemos caracterizar o tamanho de partículas de um determinado pó, sabendo qual o tamanho da malha que utilizamos e se esse pó passa por essa malha ou não.

A peneiração pode ser feita por:

- 1 **Via Seca:** usada mais frequentemente para partículas de maior tamanho (>325 mesh), sendo mais rápida e eficaz para pós maiores. É usada na indústria mineira e na indústria cerâmica.
- 2 **Via Húmida:** é feita com partículas suspensas numa pasta fluida, sendo mais eficiente para tamanhos finos.

No meu estudo a peneiração foi feita por via seca.

A peneiração tem limitações associadas às condições do equipamento (por exemplo, a fragilidade dos filamentos constitutivos da malha). Peneiros distorcidos ou partidos deixam passar partículas maiores do que o especificado.

Outro limite para a aplicação da peneiração está relacionado com a natureza do pó. Se este tiver tendência a aglomerar ou compactar, grupos de pequenas partículas actuarão como uma só partícula maior. Isto resulta numa peneiração inexacta. Além disso, se os buracos do peneiro forem obstruídos por esses aglomerados, as outras partículas isoladas vão ter mais dificuldade em passar pelas malhas, diminuindo a eficiência do processo [49].

### AI.1.7 Concentração

A concentração ou separação de minerais é uma das etapas unitárias fundamentais na preparação de minérios que vão ser submetidos a tratamentos metalúrgicos e consiste na separação das

diferentes espécies mineralógicas que constituem o material. Esta etapa realizada em equipamentos de concentração que se baseiam nas propriedades físicas dos materiais resultando desta forma diversos tipos de concentração.

Tipos de concentração e propriedades físicas em que se baseiam:

- **Calibre** = concentração hifrogravítica e concentração fílmica;
- **Densidade** = concentração em meios densos;
- **Susceptibilidade magnética** = concentração magnética;
- **Conductividade eléctrica** = concentração electroestática;
- **Molhabilidade** = concentração por flutuação.

Uma vez que as técnicas de concentração utilizadas no decorrer desta experiência foram a concentração por arooseparação, separação magnética e separação por meios densos, estas vão ser descritas com maior pormenor.

### AI.1.8 Arooseparação

A arooseparação é uma importante operação unitária para a separação de partículas sólidas dispersas baseada na diferença do seu tamanho e densidade. O princípio da separação é baseado no facto das partículas estarem suspensas num fluxo de gás, usualmente o ar move-se para diferentes pontos sob a influência de diferentes forças que estas conseguem separar umas partículas das outras [32]

Tal como o nome indica classificadores aéreos funcionam com base no fluxo aéreo. É um processo de elutriação cuja separação ocorre através do ar. As partículas finas pairam no ar e as partículas grossas que são demasiado pesadas para serem transportadas para cima, caem sob a influência da gravidade [51].

Existem numerosos desenhos de montagens e equipamentos de arooseparação. Nenhuma montagem pode ser recomendada para a separação de diferentes materiais, uma vez que cada dispositivo tem as suas técnicas específicas e adequadas para produtos específicos. Existem

diferentes zonas de separação e servem como base para sistematizar os equipamentos de aereoseparação, que podem ter várias zonas usadas em combinação no mesmo dispositivo. Como podemos verificar na figura 6.5 [51].

### AI.1.9 Separação Magnética

A separação magnética é um método muito usual na área do processamento de minérios, para a concentração e purificação de muitas substâncias minerais.

Pode ser feita a húmido, geralmente para partículas mais finas, e a seco para partículas mais grosseiras, são conhecidos separadores magnéticos que operam industrialmente com um campo que varia entre os 5 a 6 T (Tesla= $10^4$  G).

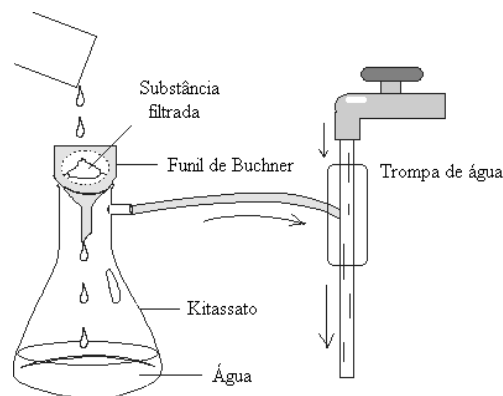
Neste trabalho foi utilizada uma simples barra magnética com um campo suficiente para separar o nosso material em magnético e não magnético. Na primeira categoria estão incluídos os ferromagnéticos (que são fortemente atraídos), e os paramagnéticos (que são fracamente atraídos); na segunda são os diamagnéticos (material que é repelido).

### AI.1.10 Separação por Meios Densos

A separação de meio denso é um processo de separação gravítica que consiste na separação de partículas em função da sua densidade, usando como meio de separação um fluído de densidade intermédia podendo ser constituído de líquidos orgânicos, soluções de sais inorgânicos, ou ainda, de uma suspensão estável de densidade predeterminada. As partículas de densidade inferior à desse fluído, flutuam, as de densidade superior afundam, as de densidade igual ao fluído, permanecem em suspensão. Este processo é um sistema heterogéneo constituído por um sólido insolúvel disperso em água, que oferece algumas vantagens sobre outros processos gravíticos. Nele existe a possibilidade de realizar separações precisas em uma determinada densidade, como elevada eficiência de separação, mesmo na presença de uma boa quantidade de minerais de densidade próxima à do meio.

Para a recolha do material utiliza-se a filtração, neste caso utilizou-se a filtração a vácuo. Este tipo de filtração tem vantagens sobre a filtração simples, devido ao ser muito mais rápida, deixar

o sólido com menos humidade e por deixar menor quantidades de impurezas e solvente no sólido, embora tenhamos utilizado água, O objectivo deste processo é o aceleração da filtração, neste caso da solução utilizada nos meios densos, pela diminuição da pressão., isto é ao abrir a torneira faz com que diminua a pressão dentro do Kitassato [53].



**Figura AI. 1- Montagem da filtração em vácuo [53]**

## AI.2 Técnicas de Caracterização

### AI.2.1 Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

A análise por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios X detectados por unidade de tempo) dos raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra. Para provocar a emissão dos raios X característicos, a excitação pode ser feita de várias maneiras: excitação por partículas aceleradas como electrões, prótons e iões, excitação por raio X, partículas alfa, beta negativa ou raios gamas emitidos por radionuclídeos e o mais utilizado actualmente, por tubos de raios X.

Os raios X incidentes excitam os átomos constituintes da amostra, que por sua vez emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cuja intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento da amostra.

Estas energias são medidas por dois sistemas:

- 1 Dispersão por comprimento de onda (WDXRF, wavelength dispersive X-ray fluorescence), que se baseia na lei de Bragg (apresentada na equação em baixo descrita), utilizando cristais difractores, detectores propocional e por cintilador [NaI(Tl)], são acoplados a um goniômetro de alta precisão. O detector proporcional é utilizado para as medidas de raio X de baixas energias e o cintilador para altas energias.

Equação da lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (\text{AI.5})$$

$n$ - número de ordem de difracção

$\lambda$ -comprimento de onda de raio X

$d$ - espaçamento das camadas (distancia dos planos reticulares)

$\theta$ - ângulo incidente dos fotões (ângulo de Bragg)

- 2 Dispersão por energia (EDXRF, energy dispersive X-ray fluorescence), também conhecida por fluorescência de raios X não dispersiva, que utiliza um detector de alta resolução, semiconductor de Si(Li), capaz de produzir pulsos eléctricos proporcionais às energias dos raios X.

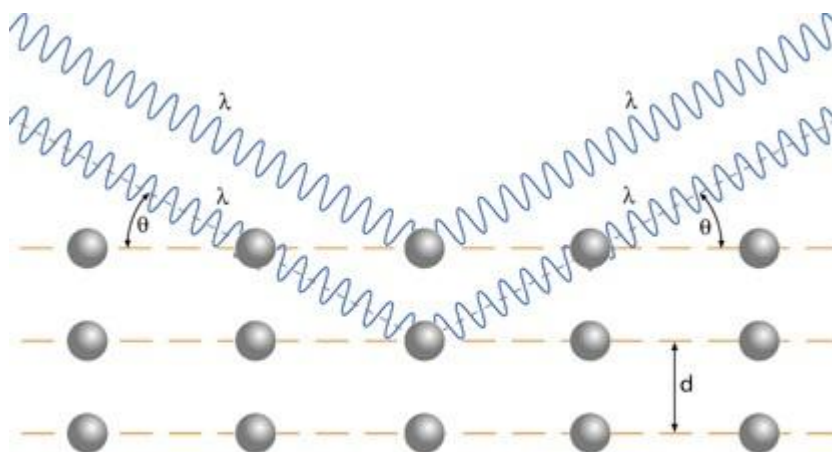


Figura AI.4- Esquema representativo da lei de Bragg [54]

Resumindo a análise por fluorescência de raios X consiste de três fases: excitação dos elementos que constituem a amostra, dispersão dos raios X característicos emitidos pela amostra e detecção desses raios X.

Ambos os sistemas permitem análises químicas multielementares, rápidas, não destrutivas, sem uso de curvas de calibração individuais (por meio do método de parâmetros fundamentais), preparação simplificada de amostra e limites de detecção comparáveis às técnicas de absorção/emissão atômica e as suas variantes.

O sistema WDXRF comparado com o EDXRF apresenta maior sensibilidade, principalmente para os elementos leves, tais como, cloro, enxofre, fósforo, silício, alumínio, magnésio, sódio, flúor, oxigênio carbono e boro. Como desvantagem, a necessidade de cristais difractores e quando se estraga os estragos são mais caros pois por si só o equipamento é caro e conseqüentemente os ensaios saem mais caros [55].

Neste trabalho foi determinada a composição química das placas de circuito elétricos, com o sistema WDXRF.

### AI.2.2 Difraccão de Raio-X (DRX)

Apesar das técnicas microscópicas permitirem essencialmente o estudo da superfície de uma amostra, as técnicas de difracção possibilitam identificar a presença das fases cristalinas da amostra, dando informação a estrutura dessas fases.

Os raios X incidem numa substância de estrutura completamente aleatória, são dispersos em todas as direcções. Se houverem, no entanto, planos cristalinos mais ou menos ordenados, haverá direcções preferenciais nas quais se dá interferência construtiva dos raios X. A lei de Bragg (apresentada em cima) estabelece essas direcções utilizando simplesmente um princípio de interferência construtiva.

Um padrão de raios X surge nas direcções para as quais a lei de Bragg é satisfeita. Esta equação impõe condições muito restritas aos valores de  $\lambda$  e  $\theta$  para ser satisfeita. Em geral, um feixe monocromático incidindo sobre um cristal não produz um padrão visível. A forma de satisfazer a

lei de Bragg para diversas direcções obtém-se variando ou o valor de  $\lambda$  ou o valor de  $\theta$  durante a experiência [56].

### AI.2.3 Microscopia Óptica

A microscopia óptica de polarização tem como objectivo identificar a diferentes espécies mineralógicas presentes numa amostra, sendo esta técnica muito utilizada em mineralogia. Nesta óptica, esta microscopia contribui para a avaliação quantitativa e/ou qualitativa no seguinte conjunto de propriedades:

1. Propriedades ópticas;
2. Dureza;
3. Propriedades dependentes da estrutura e morfologia dos cristais.

É de elevada robustez mecânica possui uma excelente qualidade óptica e ainda usufrui da grande possibilidade de acoplamento de diversos acessórios, como câmara de vídeo ou fotográfica, iluminação de campo escuro e contraste de fases.

## ANEXO II- Tabela dos números aleatórios

Quadro AII.1- Tabela de números aleatórios (fragmento)

56	66	25	32	38	64	70	26	27	67	77	40	04	34	63	98	99	89	31	16	12	90	50	28	96
88	40	52	02	29	82	69	34	50	21	74	00	91	27	52	98	72	03	45	85	30	89	71	45	91
87	63	88	23	62	51	07	69	59	02	89	49	14	98	53	41	92	36	07	76	85	37	84	37	47
32	25	21	15	08	82	34	57	57	35	22	03	33	48	84	37	37	29	38	37	89	76	25	09	69
44	61	88	23	13	01	59	47	64	04	99	59	96	20	30	87	31	33	69	45	58	48	00	83	48
94	44	08	67	79	41	61	41	15	60	11	88	83	24	82	24	07	78	61	89	42	58	88	22	16
13	24	40	09	00	65	46	38	61	12	90	62	41	11	59	85	18	42	61	29	88	76	04	21	80
78	27	84	05	99	85	75	67	80	05	57	05	71	70	21	31	99	99	06	96	53	99	25	13	63
42	39	30	02	34	99	46	68	45	15	19	74	15	50	17	44	80	13	86	38	40	45	82	13	44
04	52	43	96	38	13	83	80	72	34	20	84	56	19	49	59	14	85	42	99	71	16	34	33	79
82	85	77	30	16	69	32	46	46	30	84	20	68	72	98	94	62	63	59	44	00	89	06	15	87
38	48	84	88	24	55	46	48	60	06	90	08	83	83	98	40	90	88	25	26	85	74	55	80	85
91	19	05	68	22	58	04	63	21	16	23	38	25	43	32	98	94	65	35	35	16	91	07	12	43
54	81	87	21	31	40	46	17	62	63	99	71	14	12	64	51	68	50	60	78	22	69	51	98	37
65	43	75	12	91	20	36	25	57	92	33	65	95	48	75	00	06	65	25	90	16	20	34	14	43
49	98	71	31	80	59	57	32	43	07	85	06	64	75	27	29	17	06	11	30	68	70	97	87	21
03	98	68	89	39	71	87	32	14	99	42	10	25	37	30	08	27	75	43	97	54	20	69	93	50
56	04	21	34	92	89	81	52	15	12	84	11	12	66	87	47	21	06	86	08	35	39	52	28	09
48	09	36	95	36	20	82	53	32	89	92	68	50	88	17	37	92	02	23	43	63	24	69	80	91
23	97	10	96	57	74	07	95	26	44	93	08	43	30	41	86	45	74	33	78	84	33	38	76	73
43	97	55	45	98	35	69	45	96	80	46	26	39	96	33	60	20	73	30	79	17	19	03	47	28
40	05	08	50	79	89	58	19	86	48	27	98	99	24	08	94	19	15	81	29	82	14	35	88	03
66	97	10	69	02	25	36	43	71	76	00	67	56	12	69	07	89	55	63	31	50	72	20	33	36
15	62	38	72	92	03	76	00	30	75	77	80	04	24	54	67	60	10	79	26	21	60	03	48	14
77	81	15	14	67	55	24	22	20	55	36	93	67	69	37	72	22	43	46	32	56	15	75	25	12
18	87	05	09	96	45	14	72	41	46	12	67	46	72	02	59	06	17	49	12	73	28	23	52	48
08	58	53	63	66	13	07	04	48	71	39	07	46	96	40	20	86	79	11	81	74	11	15	23	17
16	07	79	57	61	42	19	68	15	12	60	21	59	12	07	04	99	88	22	39	75	16	69	13	84

\* \*  
\*

**ANEXO III- Resultados da Classificação Granulométrica****Quadro AIII.1- Resultados da caracterização granulométrica dos produtos de cominuição <10mm**

Amostras	Classe Granulométrica (mm)	Abertura nominal da malha (mm)	Massa (g)	Massa (%)	%Cumulativa inferior	%Cumulativa superior
A	-10+6,70	6,70	3,1	3,2	96,8	3,2
	-6,70 + 4,75	4,75	9,4	9,6	87,2	12,8
	-4,75 + 3,35	3,35	15,3	15,6	71,6	28,4
	-3,35 + 2,36	2,36	13,6	13,9	57,8	42,2
	-2,36 + 1,70	1,70	9,2	9,4	48,4	51,6
	-1,70 + 1,18	1,18	9,0	9,2	39,2	60,8
	-1,18 + 0,850	0,850	5,8	5,9	33,3	66,7
	-0,850 + 0,600	0,600	5,8	5,9	27,4	72,7
	-0,600 + 0,425	0,425	4,7	4,8	22,6	77,5
	-0,425 + 0,355	0,355	1,9	1,9	20,6	79,4
	-0,355 + 0,212	0,212	4,8	4,9	15,7	84,3
	-0,212 + 0,150	0,150	2,4	2,5	13,3	86,7
	-0,150 + 0,106	0,106	2,7	2,8	10,5	89,5
-0,106 + 0,075	0,075	2,2	2,2	8,3	91,7	
<0,075		8,1	8,3		100,0	
B	-10+6,70	6,70	1,1	1,2	98,8	1,2
	-6,70 + 4,75	4,75	10,4	11,6	87,2	12,8
	-4,75 + 3,35	3,35	15,2	17,0	70,2	29,8
	-3,35 + 2,36	2,36	11,0	12,3	57,9	42,1
	-2,36 + 1,70	1,70	8,7	9,7	48,2	51,8
	-1,70 + 1,18	1,18	7,9	8,8	39,4	60,6
	-1,18 + 0,850	0,850	6,0	6,7	32,7	67,3
	-0,850 + 0,600	0,600	4,3	4,8	27,9	72,1
	-0,600 + 0,425	0,425	4,4	4,9	23,0	77,0
	-0,425 + 0,355	0,355	1,9	2,1	20,9	79,1
	-0,355 + 0,212	0,212	4,5	5,0	15,9	84,2
	-0,212 + 0,150	0,150	2,3	2,6	13,3	86,7
	-0,150 + 0,106	0,106	2,6	2,9	10,4	89,6
-0,106 + 0,075	0,075	2,1	2,3	8,0	92,0	
<0,075		7,2	8,0		100,0	
C	-10+6,70	6,70	2,7	2,8	97,2	2,8
	-6,70 + 4,75	4,75	8,6	9,0	88,2	11,8
	-4,75 + 3,35	3,35	16,0	16,8	71,4	28,6
	-3,35 + 2,36	2,36	12,1	12,7	58,7	41,3
	-2,36 + 1,70	1,70	9,1	9,5	49,2	50,8
	-1,70 + 1,18	1,18	9,6	10,1	39,2	60,8
	-1,18 + 0,850	0,850	6,0	6,3	32,9	67,1
	-0,850 + 0,600	0,600	6,5	6,8	26,1	73,9
	-0,600 + 0,425	0,425	4,4	4,6	21,5	78,5
	-0,425 + 0,355	0,355	1,8	1,9	19,6	80,4
	-0,355 + 0,212	0,212	4,4	4,6	15,0	85,0
	-0,212 + 0,150	0,150	2,3	2,4	12,6	87,4
	-0,150 + 0,106	0,106	2,4	2,5	10,1	90,0
-0,106 + 0,075	0,075	2,0	2,1	8,0	92,0	
<0,075		7,6	8,0		100,0	
D	-10+6,70	6,70	2,1	2,4	97,6	2,4
	-6,70 + 4,75	4,75	8,2	9,2	88,4	11,6
	-4,75 + 3,35	3,35	13,6	15,3	73,1	26,9
	-3,35 + 2,36	2,36	11,1	12,5	60,6	39,4
	-2,36 + 1,70	1,70	8,4	9,4	51,2	48,8
	-1,70 + 1,18	1,18	8,9	10,0	41,2	58,8
	-1,18 + 0,850	0,850	5,8	6,5	34,7	65,4
	-0,850 + 0,600	0,600	6,0	6,7	27,9	72,1
	-0,600 + 0,425	0,425	4,4	4,9	23,0	77,1
	-0,425 + 0,355	0,355	1,8	2,0	20,9	79,1
	-0,355 + 0,212	0,212	4,3	4,8	16,1	83,9
	-0,212 + 0,150	0,150	2,3	2,6	13,5	86,5
	-0,150 + 0,106	0,106	2,5	2,8	10,7	89,3
-0,106 + 0,075	0,075	2,0	2,2	8,4	91,6	
<0,075		7,5	8,4		100,0	

**Quadro AIII.2- Resultados da caracterização granulométrica dos produtos de cominuição <4mm**

Amostras	Classe Granulométrica (mm)	Abertura nominal da malha (mm)	Massa (g)	Massa (%)	%Cumulativa inferior	%Cumulativa superior
A	-4+3,35	3,35	0,4	0,5	99,5	0,5
	-3,35 + 2,36	2,36	13,1	15,1	84,5	15,5
	-2,36 + 1,70	1,70	13,2	15,2	69,3	30,7
	-1,70 + 1,18	1,18	10,9	12,5	56,8	43,2
	-1,18 + 0,850	0,850	7,4	8,5	48,3	51,7
	-0,850 + 0,600	0,600	6,5	7,5	40,8	59,2
	-0,600 + 0,425	0,425	5,5	6,3	34,5	65,5
	-0,425 + 0,355	0,355	2,8	3,2	31,3	68,7
	-0,355 + 0,212	0,212	6,0	6,9	24,4	75,6
	-0,212 + 0,150	0,150	3,1	3,6	20,8	79,2
	-0,150 + 0,106	0,106	3,2	3,7	17,1	82,9
	-0,106 + 0,075	0,075	3,0	3,5	13,7	86,3
-0,075 + 0,053	0,053	3,2	3,7	10,0	90,0	
-0,053 + 0,038	0,038	2,8	3,2	6,8	93,2	
<0,038		5,9	6,8		100,0	
B	-4+3,35	3,35	0,9	1,0	99,0	1,0
	-3,35 + 2,36	2,36	13,8	16,0	83,0	17,1
	-2,36 + 1,70	1,70	13,4	15,6	67,4	32,6
	-1,70 + 1,18	1,18	9,8	11,4	56,0	44,0
	-1,18 + 0,850	0,850	7,1	8,2	47,8	52,2
	-0,850 + 0,600	0,600	6,6	7,7	40,1	59,9
	-0,600 + 0,425	0,425	5,5	6,4	33,8	66,2
	-0,425 + 0,355	0,355	2,3	2,7	31,1	68,9
	-0,355 + 0,212	0,212	5,9	6,8	24,3	75,8
	-0,212 + 0,150	0,150	3,0	3,5	20,8	79,2
	-0,150 + 0,106	0,106	3,0	3,5	17,3	82,7
	-0,106 + 0,075	0,075	2,7	3,1	14,2	85,9
-0,075 + 0,053	0,053	3,0	3,5	10,7	89,3	
-0,053 + 0,038	0,038	2,8	3,3	7,4	92,6	
<0,038		6,4	7,4		100,0	
C	-4+3,35	3,35	0,3	0,3	99,7	0,3
	-3,35 + 2,36	2,36	10,4	11,8	87,9	12,1
	-2,36 + 1,70	1,70	12,2	13,8	74,1	25,9
	-1,70 + 1,18	1,18	10,2	11,6	62,5	37,5
	-1,18 + 0,850	0,850	7,8	8,8	53,7	46,3
	-0,850 + 0,600	0,600	7,1	8,0	45,6	54,4
	-0,600 + 0,425	0,425	6,1	6,9	38,7	61,3
	-0,425 + 0,355	0,355	2,9	3,3	35,5	64,6
	-0,355 + 0,212	0,212	6,7	7,6	27,9	72,1
	-0,212 + 0,150	0,150	3,6	4,1	23,8	76,2
	-0,150 + 0,106	0,106	3,7	4,2	19,6	80,4
	-0,106 + 0,075	0,075	3,4	3,9	15,7	84,3
-0,075 + 0,053	0,053	3,6	4,1	11,7	88,3	
-0,053 + 0,038	0,038	3,5	4,0	7,7	92,3	
<0,038		6,8	7,7		100,0	
D	-4+3,35	3,35	0,3	0,4	99,7	0,4
	-3,35 + 2,36	2,36	9,0	10,5	89,1	10,9
	-2,36 + 1,70	1,70	11,9	13,9	75,2	24,8
	-1,70 + 1,18	1,18	10,2	11,9	63,2	36,8
	-1,18 + 0,850	0,850	7,7	9,0	54,2	45,8
	-0,850 + 0,600	0,600	7,0	8,2	46,0	54,0
	-0,600 + 0,425	0,425	6,1	7,1	38,9	61,1
	-0,425 + 0,355	0,355	3,5	4,1	34,8	65,2
	-0,355 + 0,212	0,212	6,6	7,7	27,1	73,0
	-0,212 + 0,150	0,150	3,4	4,0	23,1	76,9
	-0,150 + 0,106	0,106	3,5	4,1	19,0	81,0
	-0,106 + 0,075	0,075	3,0	3,5	15,5	84,5
-0,075 + 0,053	0,053	3,4	4,0	11,5	88,5	
-0,053 + 0,038	0,038	3,2	3,8	7,7	92,3	
<0,038		6,6	7,7		100,0	

Quadro AIII.3- Resultados da caracterização granulométrica dos produtos de cominuição &lt;1,7mm

Amostras	Classe Granulométrica (mm)	Abertura nominal da malha (mm)	Massa (g)	Massa (%)	%Cumulativa inferior	%Cumulativa superior
A	-1,70+1,180	1,18	6,9	9,5	48,9	51,1
	-1,180 + 0,850	0,850	10,3	14,2	42,0	58,0
	-0,850 + 0,600	0,600	8,1	11,2	42,0	58,0
	-0,600 + 0,425	0,425	6,9	9,5	37,1	63,0
	-0,425 + 0,355	0,355	2,4	3,3	37,1	63,0
	-0,355 + 0,300	0,300	2,5	3,4	31,8	68,2
	-0,300 + 0,212	0,212	5,0	6,9	31,8	68,2
	-0,212 + 0,150	0,150	3,6	5,0	26,9	73,1
	-0,150 + 0,106	0,106	3,8	5,2	26,9	73,1
	-0,106 + 0,075	0,075	3,6	5,0	19,8	80,2
	-0,075 + 0,053	0,053	5,1	7,0	12,3	87,7
-0,053 + 0,038	0,038	5,5	7,6	12,3	87,7	
<0,038		8,9	12,3		100,0	
B	-1,70+1,180	1,18	7,9	11,4	88,6	11,4
	-1,180 + 0,850	0,850	9,9	14,3	74,4	25,7
	-0,850 + 0,600	0,600	7,4	10,7	63,7	36,3
	-0,600 + 0,425	0,425	6,2	8,9	54,8	45,2
	-0,425 + 0,355	0,355	2,9	4,2	50,6	49,4
	-0,355 + 0,300	0,300	2,5	3,6	47,0	53,0
	-0,300 + 0,212	0,212	4,8	6,9	40,1	59,9
	-0,212 + 0,150	0,150	3,4	4,9	35,2	64,8
	-0,150 + 0,106	0,106	3,8	5,5	29,7	70,3
	-0,106 + 0,075	0,075	0,5	0,7	29,0	71,0
	-0,075 + 0,053	0,053	3,4	4,9	24,1	75,9
-0,053 + 0,038	0,038	4,9	7,1	17,0	83,0	
<0,038		11,8	17,0		100,0	
C	-1,70+1,180	1,18	8,4	12,0	88,0	12,0
	-1,180 + 0,850	0,850	9,5	13,6	74,5	25,5
	-0,850 + 0,600	0,600	7,4	10,6	63,9	36,1
	-0,600 + 0,425	0,425	6,5	9,3	54,6	45,4
	-0,425 + 0,355	0,355	2,8	4,0	50,6	49,4
	-0,355 + 0,300	0,300	2,2	3,1	47,5	52,5
	-0,300 + 0,212	0,212	3,8	5,4	42,1	57,9
	-0,212 + 0,150	0,150	3,5	5,0	37,1	62,9
	-0,150 + 0,106	0,106	3,0	4,3	32,8	67,2
	-0,106 + 0,075	0,075	4,2	6,0	26,8	73,2
	-0,075 + 0,053	0,053	5,1	7,3	19,5	80,5
-0,053 + 0,038	0,038	4,4	6,3	13,3	86,7	
<0,038		9,3	13,3		100,0	
D	-1,70+1,180	1,18	9,1	13,1	86,9	13,1
	-1,180 + 0,850	0,850	9,4	13,5	73,5	26,5
	-0,850 + 0,600	0,600	7,3	10,5	63,0	37,0
	-0,600 + 0,425	0,425	5,7	8,2	54,8	45,2
	-0,425 + 0,355	0,355	2,4	3,4	51,4	48,6
	-0,355 + 0,300	0,300	1,1	1,6	49,8	50,2
	-0,300 + 0,212	0,212	1,9	2,7	47,1	52,9
	-0,212 + 0,150	0,150	4,5	6,5	40,6	59,4
	-0,150 + 0,106	0,106	4,1	5,9	34,7	65,3
	-0,106 + 0,075	0,075	4,3	6,2	28,6	71,5
	-0,075 + 0,053	0,053	5,1	7,3	21,2	78,8
-0,053 + 0,038	0,038	4,8	6,9	14,4	85,7	
<0,038		9,3	14,3		100,0	

Quadro AIII.4-Resultados da caracterização granulométrica dos produtos de cominuição &lt;0,5mm

Amostras	Classe Granulométrica (mm)	Abertura nominal da malha (mm)	Massa (g)	Massa (%)	%Cumulativa inferior	%Cumulativa superior
A	-0,50+0,425	0,425	2,5	4,3	95,7	4,3
	-0,425 + 0,355	0,355	2,1	3,7	92,0	8,0
	-0,355 + 0,300	0,300	2,6	4,5	87,5	12,5
	-0,300 + 0,212	0,212	4,8	8,3	79,2	20,8
	-0,212 + 0,150	0,150	4,7	8,2	71,0	29,0
	-0,150 +0,106	0,106	4,5	7,8	63,2	36,8
	-0,106 + 0,075	0,075	4,1	7,1	56,1	43,9
	-0,075 + 0,053	0,053	6,0	10,4	45,7	54,3
	-0,053 + 0,038	0,038	7,0	12,2	33,5	66,5
	0,038 + 0,025	0,025	15,6	27,1	6,4	93,6
	<0,025		3,7	6,4		100,0
B	-0,50+0,425	0,425	2,0	4,1	95,9	4,1
	-0,425 + 0,355	0,355	1,4	2,9	93,0	7,0
	-0,355 + 0,300	0,300	2,3	4,8	88,2	11,8
	-0,300 + 0,212	0,212	3,7	7,6	80,6	19,4
	-0,212 + 0,150	0,150	3,9	8,1	72,5	27,5
	-0,150 +0,106	0,106	3,2	6,6	65,9	34,1
	-0,106 + 0,075	0,075	6,1	12,6	53,3	46,7
	-0,075 + 0,053	0,053	7,0	14,5	38,8	61,2
	-0,053 + 0,038	0,038	6,5	13,4	25,4	74,6
	0,038 + 0,025	0,025	11,4	23,6	1,9	98,1
	<0,025		0,9	1,9		100,0
C	-0,50+0,425	0,425	1,9	3,9	96,1	3,9
	-0,425 + 0,355	0,355	1,4	2,9	93,2	6,8
	-0,355 + 0,300	0,300	1,7	3,5	89,7	10,3
	-0,300 + 0,212	0,212	3,7	7,6	82,1	17,9
	-0,212 + 0,150	0,150	3,8	7,8	74,3	25,7
	-0,150 +0,106	0,106	3,6	7,4	66,9	33,1
	-0,106 + 0,075	0,075	3,9	8,0	58,9	41,1
	-0,075 + 0,053	0,053	6,6	13,6	45,4	54,6
	-0,053 + 0,038	0,038	3,7	7,6	37,8	62,2
	0,038 + 0,025	0,025	17,5	35,9	1,9	98,2
	<0,025		0,9	1,9		100,0
D	-0,50+0,425	0,425	2,1	4,2	95,8	4,2
	-0,425 + 0,355	0,355	1,4	2,8	92,9	7,1
	-0,355 + 0,300	0,300	2,0	4,0	88,9	11,1
	-0,300 + 0,212	0,212	3,9	7,9	81,0	19,0
	-0,212 + 0,150	0,150	3,8	7,7	73,3	26,7
	-0,150 +0,106	0,106	3,4	6,9	66,5	33,5
	-0,106 + 0,075	0,075	4,1	8,3	58,2	41,8
	-0,075 + 0,053	0,053	7,5	15,2	43,0	57,0
	-0,053 + 0,038	0,038	7,7	15,6	27,5	72,5
	0,038 + 0,025	0,025	12,8	25,9	1,6	98,4
	<0,025		0,8	1,6		100,0

## ANEXO IV- DETERMINAÇÃO DO $\phi_{80}$

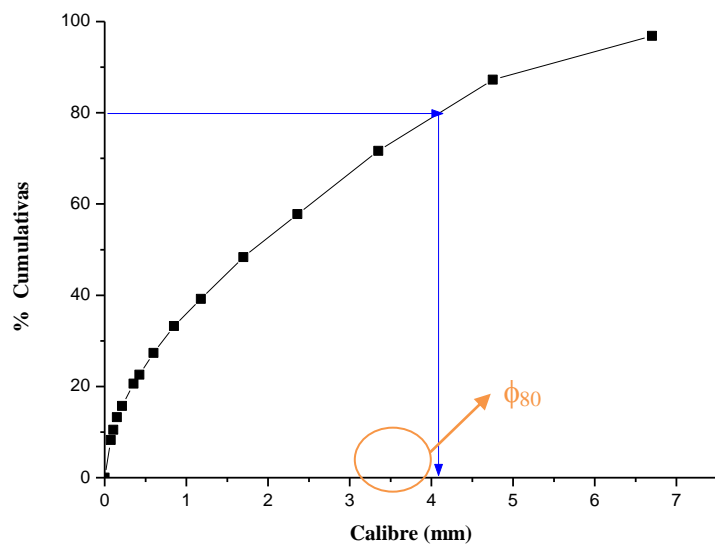


Figura AIV.1- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra A <10mm

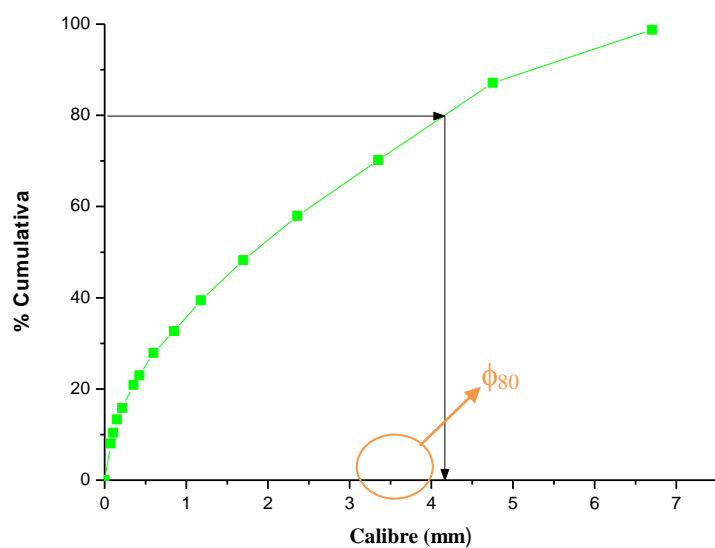


Figura AIV.2- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra B <10mm

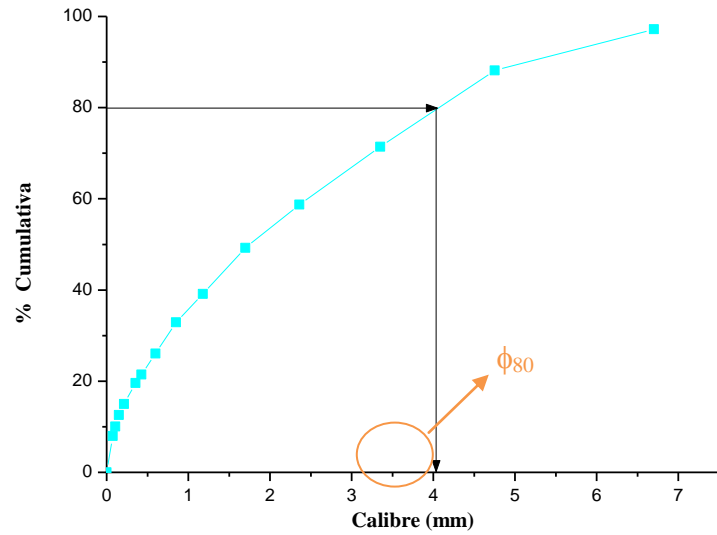


Figura AIV.3- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra C <10mm

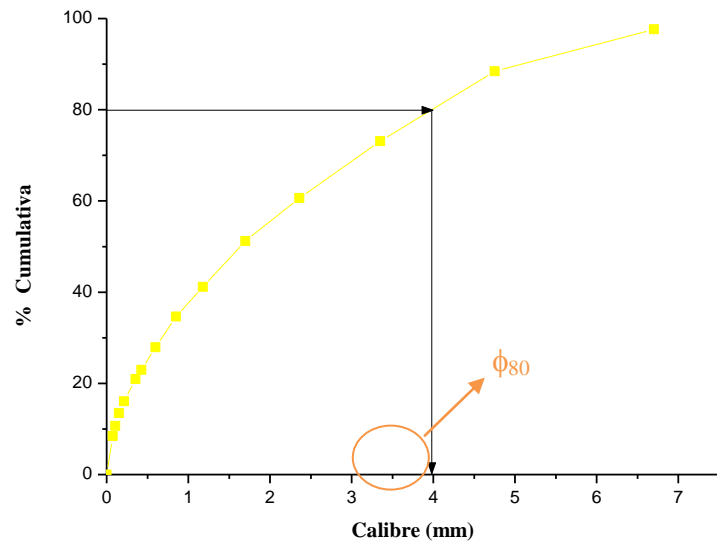


Figura AIV.4- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra D <10mm

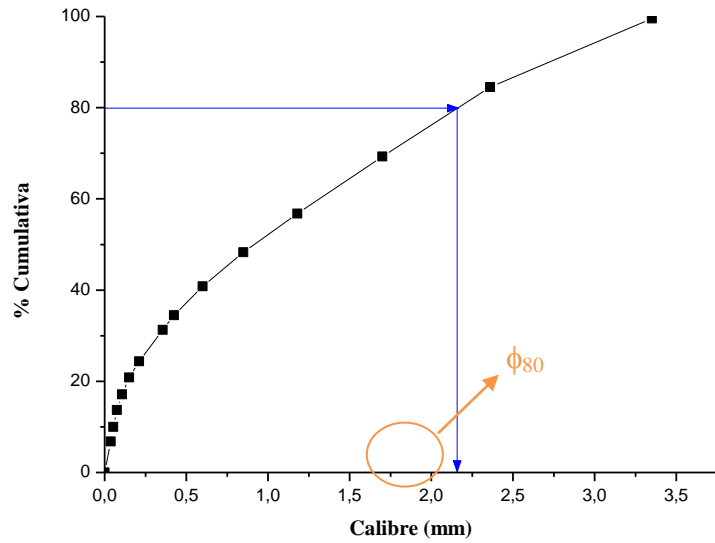


Figura AIV.5- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra A < 4mm

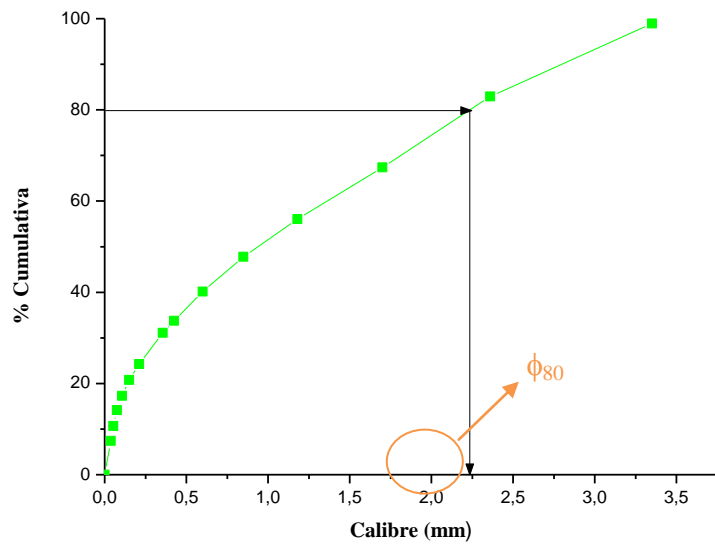


Figura AIV.6- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra de B < 4mm

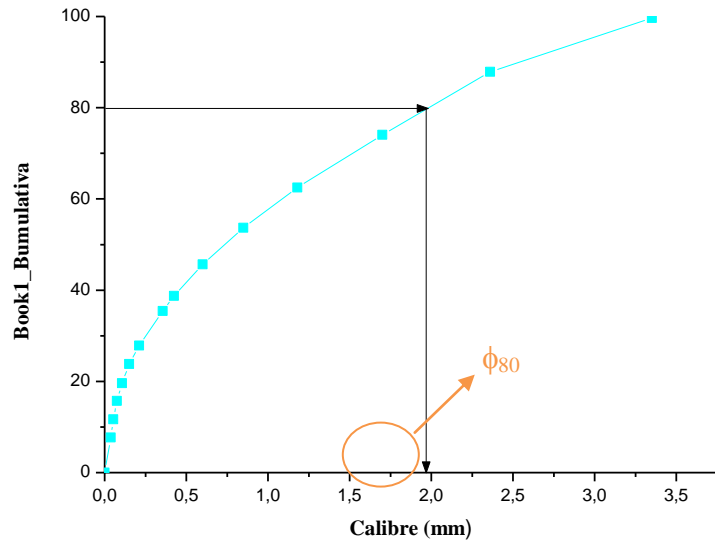


Figura AIV.7- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra C <4mm

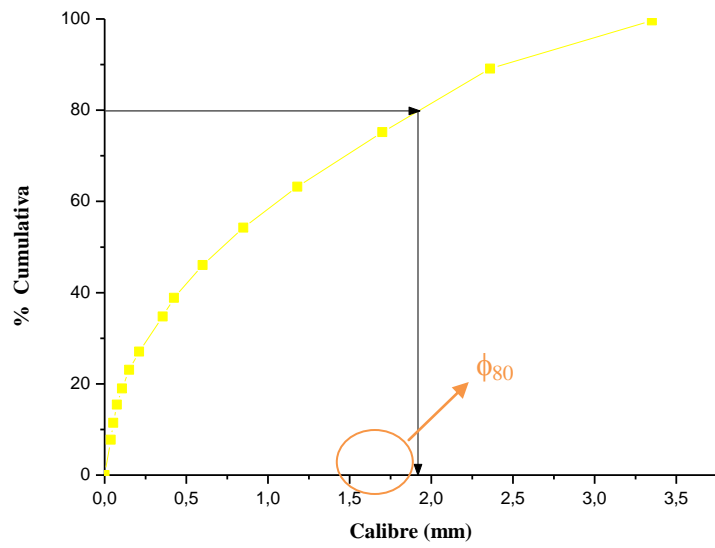


Figura AIV.8- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra D <4mm

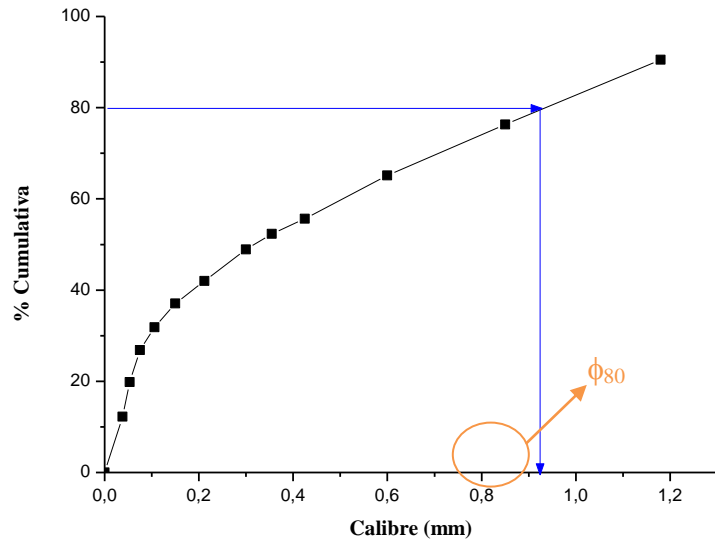


Figura AIV.9- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra A <1,7mm

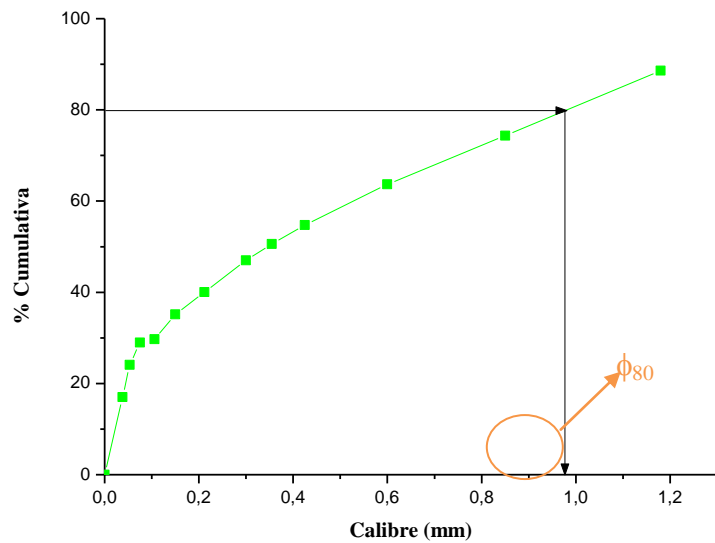
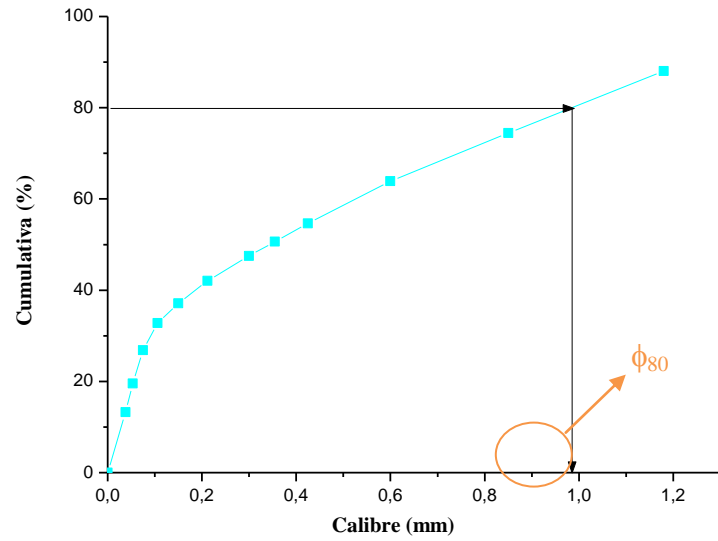


Figura AIV.10- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra B <1,7mm



B

Figura AIV.11- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra C < 1,7mm

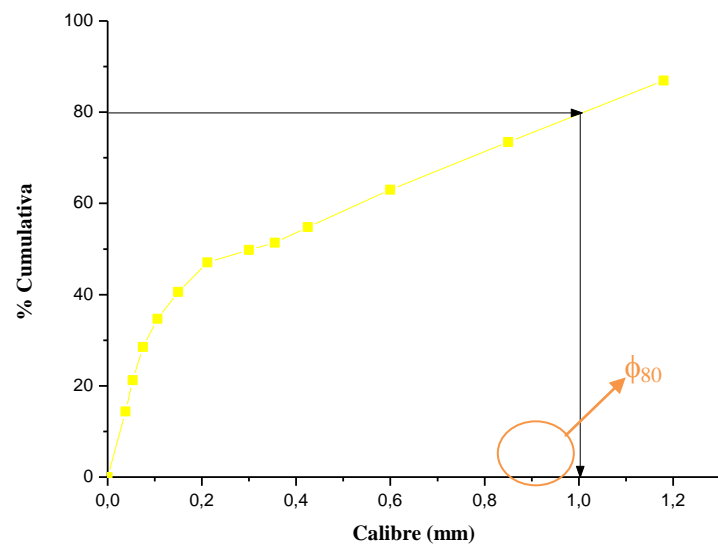
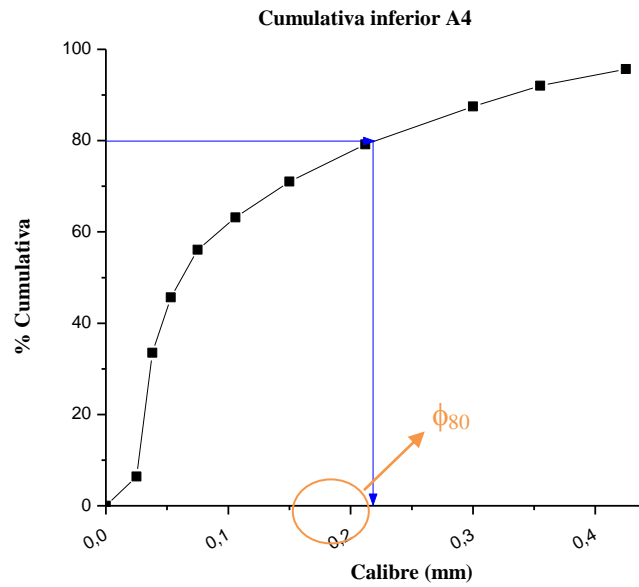
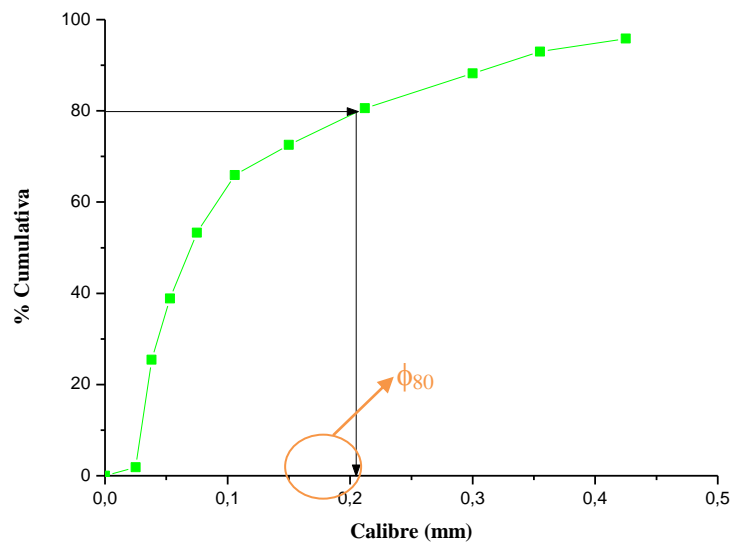


Figura AIV.12- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra D < 1,7mm



**Figura AIV.13- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra A <0,5mm**



**Figura AIV.14- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra B <0,5mm**

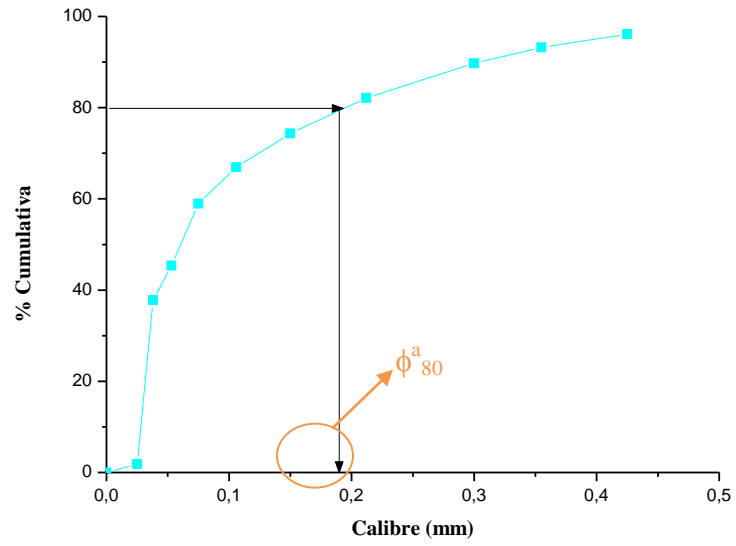


Figura AIV.15- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra C <0,5mm

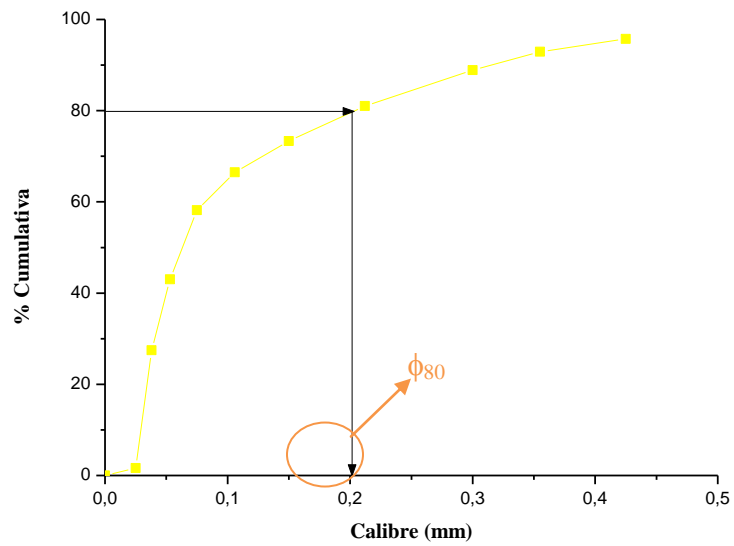


Figura AIV.16- Determinação de  $\phi_{80}$  da amostra D <0,5mm

## ANEXO V- Fichas de DRX


- Ficha do Ni

04-0850		Wavelength= 1.5405			
Ni	$d_{\theta}$	Int	h	k	l
Nickel	44.505	100	1	1	1
	51.844	42	2	0	0
	76.366	21	2	2	0
Nickel, syn	92.939	20	3	1	1
	98.440	7	2	2	2
	121.922	4	4	0	0
	144.655	14	3	3	1
	155.632	15	4	2	0
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:					
Cut off: Int.: Diffract. I/keor.:					
Ref: Swanson, <i>Talge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 13 (1953)</i>					
Sys.: Cubic		S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)			
a: 3.5238	b:	c:	A:	C:	
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:	
Ref: <i>ibid.</i>					
Dx: 8.911		Dm: SS/FOM: F $\theta$ = 87(.0115 , 8)			
Color: White					
Pattern taken at 26 C. Sample obtained from Johnson Matthey Company, Ltd. CAS #: 7440-02-0. Spectrographic analysis show <0.01% each of Mg, Si and Ca. Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSC: cF4. See KSD 64989 (PDF 87-712). Mwt: 58.70. Volume[CD]: 43.76.					

 . 2001 ICDD—International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Cu

04-0836		Wavelength= 1.5405			
Cu	$d_{\theta}$	Int	h	k	l
Copper	43.286	100	1	1	1
	50.491	46	2	0	0
	74.127	20	2	2	0
Copper, syn	89.926	17	3	1	1
	95.135	5	2	2	2
	116.911	3	4	0	0
	136.496	9	3	3	1
	144.70	8	4	2	0
Rad.: CuK $\alpha$ $\lambda$ : 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:					
Cut off: Int.: Diffract. I/keor.:					
Ref: Swanson, <i>Talge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 15 (1953)</i>					
Sys.: Cubic		S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)			
a: 3.6150	b:	c:	A:	C:	
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp: 1083	
Ref: <i>ibid.</i>					
Dx: 8.935		Dm: 8.950 SS/FOM: F $\theta$ = 86(.0112 , 8)			
Color: Red					
Pattern taken at 26 C. Sample from metallurgical laboratory of NBS, Gaithersburg, Maryland, USA. CAS #: 7440-50-8. It had been heated in an H $_2$ atmosphere at 300 C. Impurities from 0.001-0.01%, Ag, Al, Bi, Fe, Si, Zn. Measured density and color from Dana's System of Mineralogy, 7th Ed., 199. Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSC: cF4. See KSD 64699 (PDF 85-1326). Opaque mineral optical data on specimen from unspecified locality. K3KZ=60.65, Disp.—Std. VHM100=96-104. Mwt: 63.55. Volume[CD]: 47.24.					

 . 2001 ICDD—International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Au

04-0784		Wavelength= 1.54056 *				
Au		2 $\theta$	Int	h	k	l
Gold		38.184	100	1	1	1
		44.382	52	2	0	0
		64.576	32	2	2	0
Gold, syn		77.547	36	3	1	1
		81.721	12	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$	: 1.54056	Filter: Ni	Beta	d-sp:		
Cut off:	Int.: Diffract.	I/ksr.:				
Ref: Swanson, <i>Talge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 33 (1953)</i>		110.798	23	3	3	1
		115.259	22	4	2	0
		135.416	23	4	2	2
Sys.: Cubic		S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 4.0786	b:	c:	A:	C:		
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp: 1061.6-1063.2		
Ref: <i>ibid.</i>						
Dx: 19.283	Dm: 19.300	SS/FOM: F g = 125(.0078 . 9)				
$\omega$ :	$\eta\omega\beta$ : 0.366	$\sigma$ :	Sign: 2V:			
Ref: Winchell, <i>Elements of Optical Mineralogy, 17</i>						
Color: Yellow metallic Pattern taken at 25 C. Sample purified at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA and is about 99.997% Au. CAS #: 7440-57-5. Spectrographic analysis (X): Si 0.001, Ca 0.001, Ag 0.001(?). Opaque mineral optical data on specimen from unspecified locality. REZRe=71.6, Disp.=16, VHN100=53-58, Color values=.384, .391, 72.7, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF, Cu type. Gold SuperGroup, 1G-disordered Group. PSC: cF4. Optical data reference: Winchell, <i>Elements of Optical Mineralogy, 17</i> . Structural reference: Winchell, <i>Elements of Optical Mineralogy, 17</i> . Mwt: 196.97. Volume[CD]: 67.85.						



© 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha de Al

04-0787		Wavelength= 1.54056 *				
Al		2 $\theta$	Int	h	k	l
Aluminum		38.472	100	1	1	1
		44.738	47	2	0	0
		65.133	22	2	2	0
Aluminum, syn		76.227	24	3	1	1
		82.435	7	2	2	2
Rad.: CuK $\alpha$	: 1.54056	Filter: Ni	Beta	d-sp:		
Cut off:	Int.: Diffract.	I/ksr.:	3.62			
Ref: Swanson, <i>Talge, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 11 (1953)</i>		99.078	2	4	0	0
		112.041	8	3	3	1
		116.569	8	4	2	0
		137.455	8	4	2	2
Sys.: Cubic		S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)				
a: 4.0494	b:	c:	A:	C:		
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:		
Ref: <i>ibid.</i>						
Dx: 2.699	Dm:	SS/FOM: F g = 93(.0108 . 9)				
Color: Light gray metallic Pattern taken at 25 C. CAS #: 7429-90-5. The material used for the NBS sample was a melting point standard sample of aluminum prepared at NBS, Gaithersburg, Maryland, USA. The chemical analysis (X): Si 0.011, Cu 0.006, Fe 0.007, Ti 0.0001, Zr 0.003, Ga 0.004, Mo 0.00002, S 0.0001, Al 99.9+ (by difference). Mineral species of doubtful validity, <i>Am. Mineral., 65 205 (1980)</i> . Cu type. Gold SuperGroup, 1G-disordered Group. PSC: cF4. See KSD 64700 (PDF 85-1327). Mwt: 26.98. Volume[CD]: 66.40.						



© 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

• Ficha do CuO

78-0428		Wavelength= 1.54060				C
CuO	2 <sub>θ</sub>	Int	h	k	l	
Copper Oxide	36.637	769	1	1	1	
	42.559	999*	2	0	0	
	61.761	450	2	2	0	
	74.00	171	3	1	1	
	77.893	109	2	2	2	
Rad.: CuKα1 λ: 1.54060 Filter: d-sp: Calculated						
Cut off: 17.7 Int.: Calculated I/lor.: 5.43						
Ref: Calculated from ICSD using POWD-12+, (1997)						
Ref: Schmahl, N.G., Eikerling, G.F., Z. Phys. Chem. Neue Folge. (Wiesbaden), 62, 268 (1968)						
Sys.: Cubic S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)						
a: 4.245(5)	b:	c:	A:	C:		
α:	β:	γ:	Z: 4	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 6.907 Dm: ICSD #: 061323						
Peak height intensity, Cu O type, PSC: cFB, No R value given. At least one TF missing. Structural reference: Schmahl, N.G., Eikerling, G.F., Z. Phys. Chem. Neue Folge. (Wiesbaden), 62, 268 (1968). Mwt: 79.55. Volume[CD]: 76.49.						

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2


• Ficha do Fe

06-0696		Wavelength= 1.5405				*
Fe	2 <sub>θ</sub>	Int	h	k	l	
Iron	44.671	100	1	1	0	
	65.018	20	2	0	0	
	82.329	30	2	1	1	
Iron, syn	98.940	10	2	2	0	
	116.378	12	3	1	0	
	137.125	6	2	2	2	
Rad.: CuKα1 λ: 1.5405 Filter: Ni Beta d-sp:						
Cut off: Int.: Diffract. I/lor.:						
Ref: Swanson et al, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, IV, 3 (1955)						
Sys.: Cubic S.G.: Im $\bar{3}$ m (229)						
a: 2.8664	b:	c:	A:	C:		
α:	β:	γ:	Z: 2	mp:		
Ref: Ibid.						
Dx: 7.875 Dm: SS/FOM: F g = 225(.0044 . 6)						
Color: Gray, light gray metallic Pattern taken at 25 C. CAS #: 7439-89-6. The iron used was an exceptionally pure rolled sheet prepared at the NBS, Gaithersburg, Maryland, USA., [Moore, G., J. Met., 5 1443 (1953)]. It was annealed in an He atmosphere for 3 days at 1100 C and slowly cooled in a He atmosphere. Total impurities of sample <0.0013% each metals and non-metals. γ-Fe (fcc)=(1390 C) ε-Fe (bcc). Opaque mineral optical data on specimen from Meteorite: RR2Re= 57.7, Disp.=16, VHN=158 (mean at 100, 200, 300), Color values=.311, .316, 57.9, Ref.: IMA Commission on Ore Microscopy QDF. W type, Iron SuperGroup, 1C-disordered Group. Also called: ferrite, PSC: cE. See KSD 64795 (PDF 85-1410). Mwt: 55.85. Volume[CD]: 23.55.						

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

- Ficha do Pb

04-0696		Wavelength= 1.54056 *			
Pb	$d_{\theta}$	Int	h	k	l
Lead	31.305	100	1	1	1
	36.266	50	2	0	0
	52.228	31	2	2	0
Lead, syn	62.119	32	3	1	1
	65.236	9	2	2	2
Rad: CuK $\alpha$ 1	: 1.54056	Filter: Ni	Beta	d-sp:	
Cut off:	Int.: Diffract.		l/ksr.:		
Ref: Swanson, Taige, Natl. Bur. Stand. (U.S.), Circ. 539, I, 34 (1953)					
	76.954	2	4	0	0
	85.394	10	3	3	1
	88.196	7	4	2	0
	99.331	6	4	2	2
	107.920	5	5	1	1
Sys.: Cubic	S.G.: Fm $\bar{3}$ m (225)	123.313	1	4	4
a: 4.9506	b:	c:	A:	C:	133.969
$\alpha$ :	$\beta$ :	$\gamma$ :	Z: 4	mp:	137.993
Ref: Ibid.					
Dx: 11.343	Dm: 11.365	SS/FOM: F <sub>13</sub> = 68(.0148 , 13)			
Color: Light gray metallic					
Pattern taken at 26 C. Sample obtained from American Smelting and Refining Company. CAS #: 7439-92-1. It was annealed for 1 hour and 180 C in petroleum. Spectrographic analysis shows faint traces of Bi and Mg. Purity >99.999%. Cu type. Gold SuperGroup, 1C-disordered Group. PSC: cF4. Mwt: 207.20. Volume[CD]: 121.33.					

 . 2001 JCPDS-International Centre for Diffraction Data. All rights reserved  
PCPDFWIN v. 2.2

**ANEXO VI- Resultados da Picnometria de Hélio**

Os resultados obtidos nas determinações da massa específica por picnometria de hélio são apresentados no quadro AVI.1.

**Quadro AVI.1- Resultados da picnometria de hélio dos produtos de cominuição**

	<b>4mm</b>	<b>1,7mm</b>	<b>0,5mm</b>
<b>Massa (g) <math>\equiv \mu</math></b>	7,08	5,99	5,01
<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	2,74	2,33	2,07
<b><math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,58	2,57	2,42
<b>S</b>	$0,10 \times 10^{-2}$	$0,15 \times 10^{-2}$	$0,24 \times 10^{-2}$
<b>Intervalo de confiança a 95%</b>	$7,077 < \mu < 7,083$	$5,985 < \mu < 5,995$	$5,002 < \mu < 5,018$

## ANEXO VII- Curvas Cumulativas da Concentração por Classificação Granulométrica

**Quadro AVII.1- Rendimentos em metal e curvas cumulativas inferiores e superiores das amostras de granulometria <4mm**

Classe Granulométrica (mm)	$\eta_{Br}$ (%)	$\eta_{Cu}$ (%)	$\eta_{Fe}$ (%)	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Br	%Cumulativa superior de $\eta$ de Br	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Cu	%Cumulativa superior de $\eta$ de Cu	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Fe	%Cumulativa superior de $\eta$ de Fe
-4+3,35	0,5	0,1	0,6	99,5	0,5	99,9	0,1	99,4	0,6
-3,35 + 2,36	16,4	13,8	4,7	83,1	16,9	86,1	13,9	94,7	5,3
-2,36 + 1,70	16,5	15,1	2,6	66,6	33,4	71,0	29,0	92,1	7,9
-1,70 + 1,18	11,5	14,2	4,2	55,1	44,9	56,8	43,2	87,9	12,1
-1,18 + 0,85	9,2	11,3	3,8	45,9	54,1	45,5	54,5	84,1	15,9
-0,850 + 0,600	7,1	12,0	5,5	38,8	61,2	33,5	66,5	78,6	21,4
-0,600 + 0,425	8,2	7,3	4,7	30,6	69,4	26,2	73,8	73,9	26,1
-0,425 + 0,355	3,6	4,0	4,1	27,0	73,0	22,2	77,8	69,8	30,2
-0,355 + 0,212	10,3	5,9	4,4	16,7	83,3	16,3	83,7	65,4	34,6
-0,212 + 0,150	4,0	3,5	4,6	12,7	87,3	12,8	87,2	60,8	39,2
-0,150 + 0,106	3,4	2,5	8,8	9,3	90,7	10,3	89,7	52,0	48,0
-0,106 + 0,075	1,9	1,9	12,3	7,4	92,6	8,4	91,6	39,7	60,3
-0,075 + 0,053	1,8	1,9	14,0	5,6	94,4	6,5	93,5	25,7	74,3
-0,053 + 0,038	2,3	1,7	8,1	3,3	96,7	4,8	95,2	17,6	82,4
<0,038	3,3	4,8	17,6		100		100		100

**Quadro AVII.2- Rendimentos em metal e curvas cumulativas inferiores e superiores das amostras de granulometria <1,7mm**

Classe Granulométrica (mm)	$\eta_{Br}$ (%)	$\eta_{Cu}$ (%)	$\eta_{Fe}$ (%)	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Br	%Cumulativa superior de $\eta$ de Br	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Cu	%Cumulativa superior de $\eta$ de Cu	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Fe	%Cumulativa superior de $\eta$ de Fe
-1,70+1,180	13,8	10,6	4,8	86,2	13,8	89,4	10,6	95,2	4,8
-1,180 + 0,850	14,4	17,4	4,4	71,8	28,2	72,0	28,0	90,8	9,2
-0,850 + 0,600	12,9	13,9	4,5	58,9	41,1	58,1	41,9	86,3	13,7
-0,600 + 0,425	10,8	10	4,7	48,1	51,9	48,1	51,9	81,6	18,4
-0,425 + 0,355	5,2	2,4	2,4	42,9	57,1	45,7	54,3	79,2	20,8
-0,355 + 0,300	4	2,2	1,9	38,9	61,1	43,5	56,5	77,3	22,7
-0,300 + 0,212	7,9	4,1	3,5	31,0	69,0	39,4	60,6	73,8	26,2
-0,212 + 0,150	6,0	4,9	5,0	25,0	75,0	34,5	65,5	68,8	31,2
-0,150 + 0,106	5,3	4,1	8,3	19,7	80,3	30,4	69,6	60,5	39,5
-0,106 + 0,075	3,1	3,9	10,8	16,6	83,4	26,5	73,5	49,7	50,3
-0,075 + 0,053	4,5	6,2	13,3	12,1	87,9	20,3	79,7	36,4	63,6
-0,053 + 0,038	2,9	7,1	13,9	9,2	90,8	13,2	86,8	22,5	77,5
<0,038	9,2	13,2	22,5		100		100		100

**Quadro AVII.3- Rendimentos em metal e curvas cumulativas inferiores e superiores das amostras de granulometria <0,5mm**

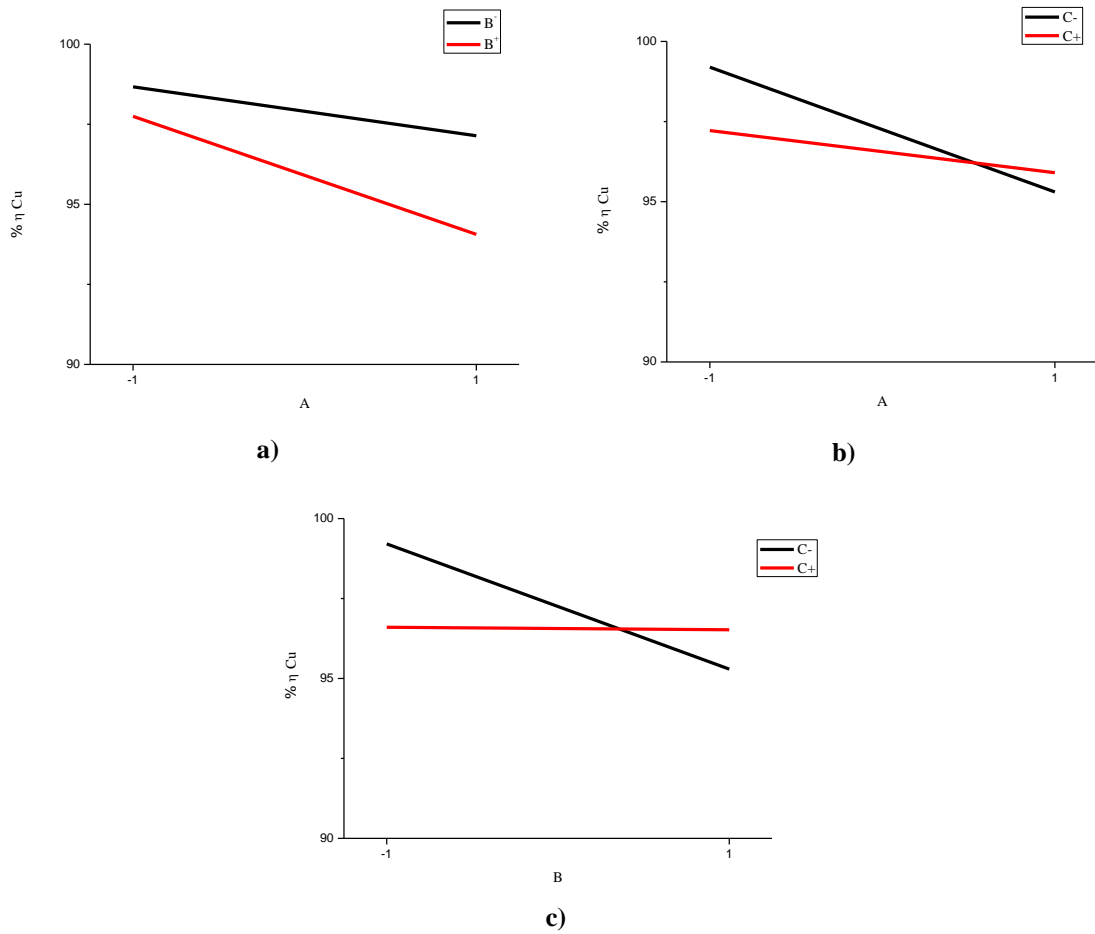
Classe Granulométrica (mm)	$\eta_{Br}$ (%)	$\eta_{Cu}$ (%)	$\eta_{Fe}$ (%)	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Br	%Cumulativa superior de $\eta$ de Br	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Cu	%Cumulativa superior de $\eta$ de Cu	%Cumulativa inferior de $\eta$ de Fe	%Cumulativa superior de $\eta$ de Fe
<b>-0,50+0,425</b>	3,1	6,7	1,4	96,9	3,1	93,3	6,7	98,6	1,4
<b>-0,425 + 0,355</b>	3,2	4,5	1,4	93,7	6,3	88,8	11,2	97,2	2,8
<b>-0,355 + 0,300</b>	7,9	3,9	1,7	85,8	14,2	84,9	15,1	95,5	4,5
<b>-0,300 + 0,212</b>	16,6	6,6	3,2	69,2	30,8	78,3	21,7	92,3	7,7
<b>-0,212 + 0,150</b>	14,9	6,9	4,3	54,3	45,7	71,4	28,6	88,0	12,0
<b>-0,150 +0,106</b>	9,4	7,2	9,0	44,9	55,1	64,2	35,8	79,0	21,0
<b>-0,106 + 0,075</b>	10,1	8,3	12,0	34,8	65,2	55,9	44,1	67,0	33,0
<b>-0,075 + 0,053</b>	10,4	12,8	16,0	24,4	75,6	43,1	56,9	51,0	49,0
<b>-0,053 + 0,038</b>	9,0	12,2	12,3	15,4	84,6	30,9	69,1	38,7	61,3
<b>0,038 + 0,025</b>	14,3	28,0	33,9	1,1	98,9	2,9	97,1	4,8	95,2
<b>&lt;0,025</b>	1,1	2,9	4,8		100,0		100,0		100,0

## ANEXO VIII- Valores de FRX da Aeroseparação

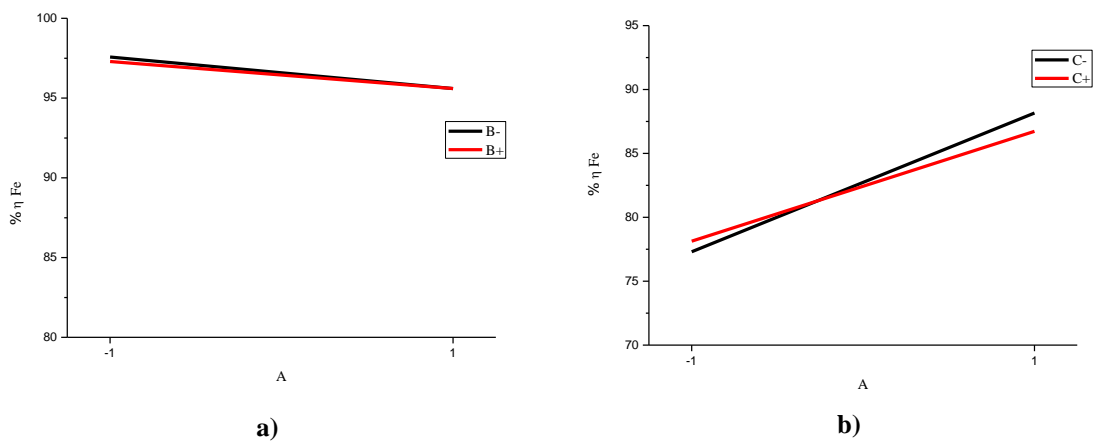
Quadro AVIII.1 –Análise química por FRX das primeira e segunda fracções dos ensaios de aeroseparação com diferentes granulometrias.

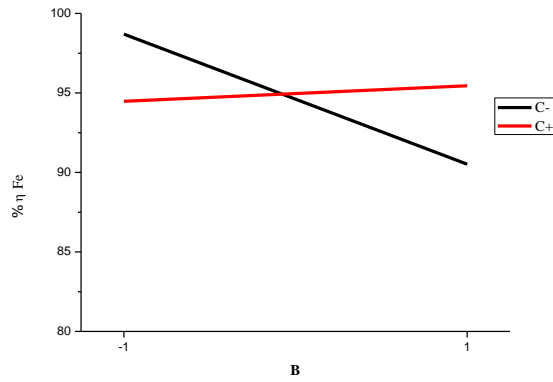
Ensaio	Granulometria <4mm						Granulometria <1,7mm						Granulometria <0,5mm					
	Br		Cu		Fe		Br		Cu		Fe		Br		Cu		Fe	
	Fracção		Fracção		Fracção		Fracção		Fracção		Fracção		Fracção		Fracção		Fracção	
	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>
1	27	12	16	8	16	16	26	21	18	22	19	16	16	13	35	30	17	15
2	24	12	14	8	21	17	26	21	18	22	17	15	17	16	33	29	20	15
3	27	14	16	15	19	15	16	21	26	19	31	16	15	13	32	30	18	15
4	30	29	16	8	15	18	24	20	21	21	19	15	19	15	30	29	20	16
5	27	24	16	10	16	18	20	23	23	20	24	15	10	15	42	30	14	15
6	25	22	17	8	25	19	23	21	25	21	19	15	16	14	31	29	17	15
7	25	17	18	10	26	19	7	25	29	21	40	18	10	16	41	29	14	16
8	24	25	15	8	24	17	19	23	22	20	28	14	19	13	32	29	19	15

**ANEXO IX- Efeitos de Interações**



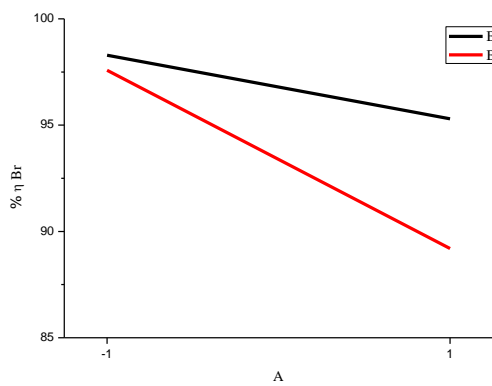
**Figura AIX.24- Efeitos de factores das interações dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm para o Cu: a)AB; b)AC; c)BC.**



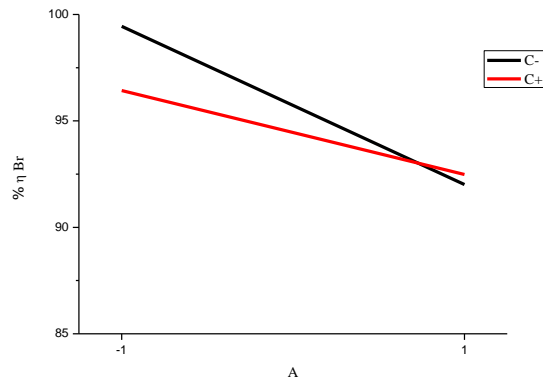


c)

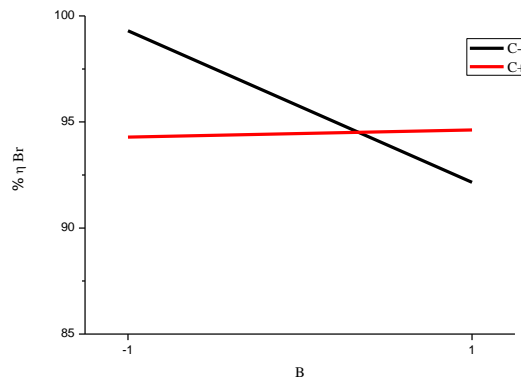
Figura AIX.25- Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm para o Fe: a)AB; b)AC; c)BC



a)



b)



c)

Figura AIX.26-Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <4mm para o Br: a)AB; b)AC; c)BC

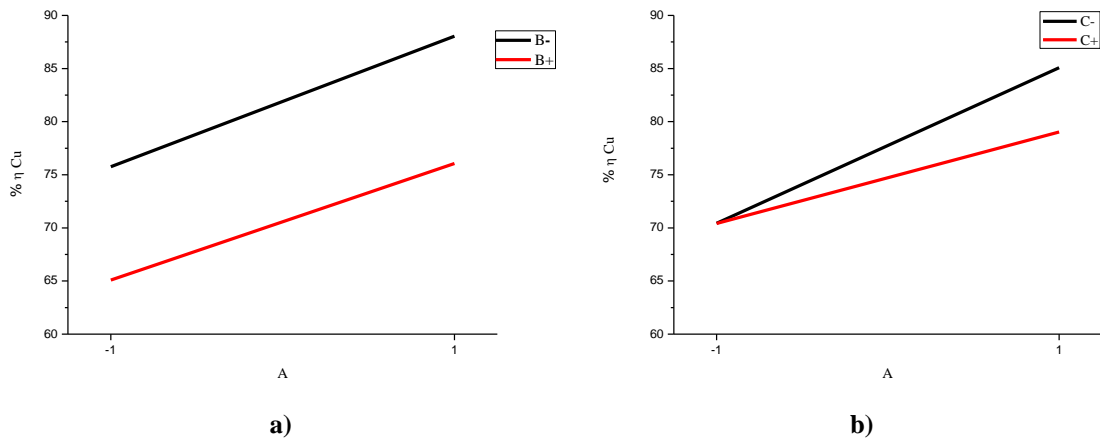


Figura AIX.27- Efeitos de factores das interações dos planos factoriais de ensaios de granulometria <math><1,7\text{mm}</math> para o Cu: a)AB; b)AC

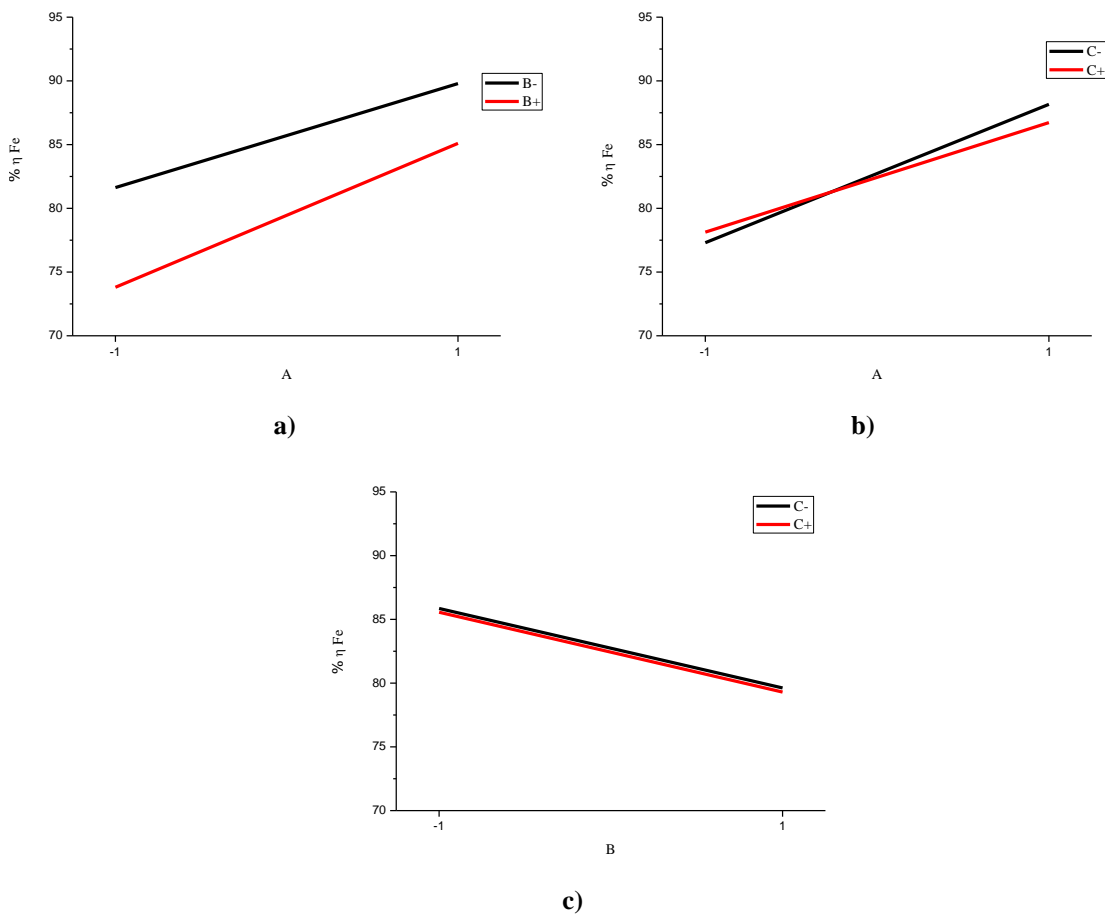
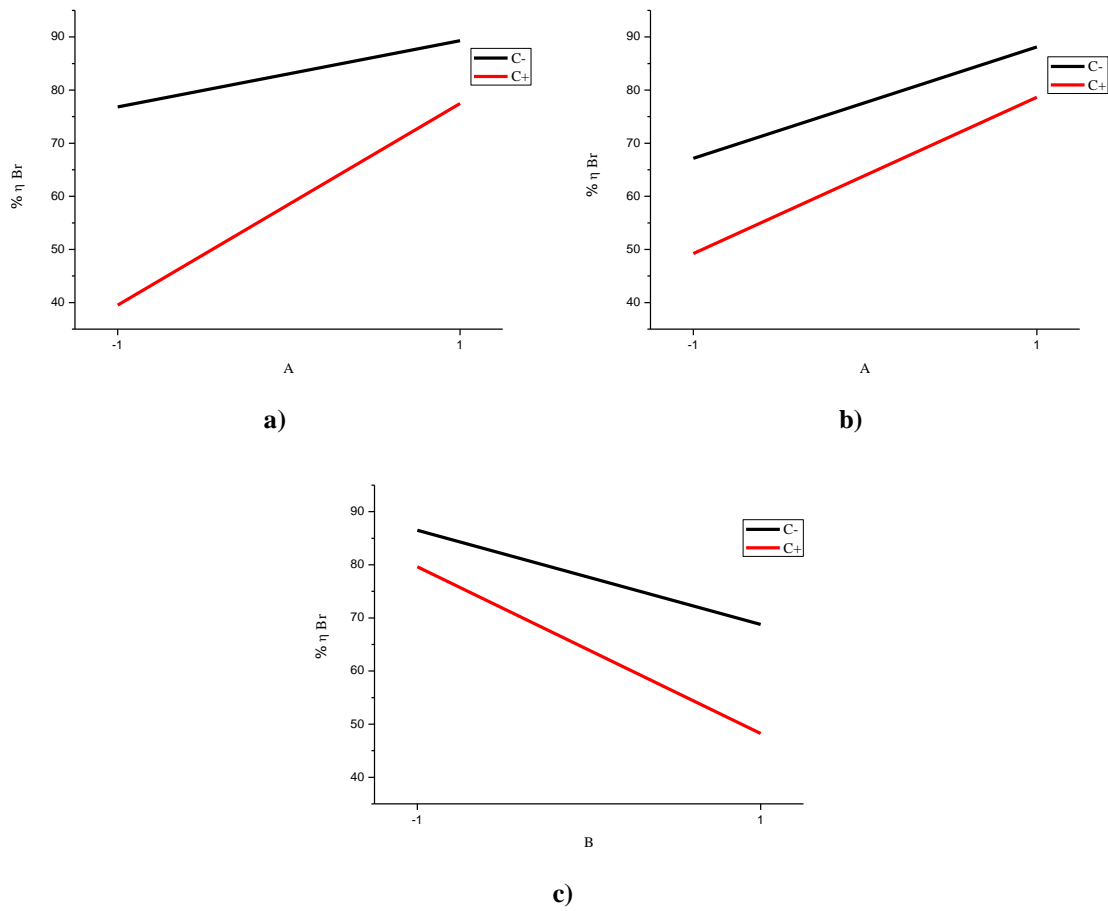
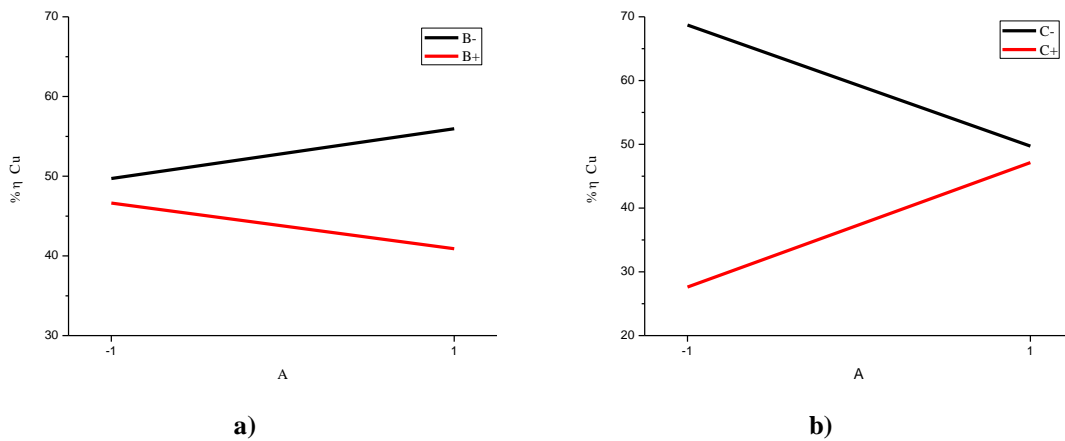
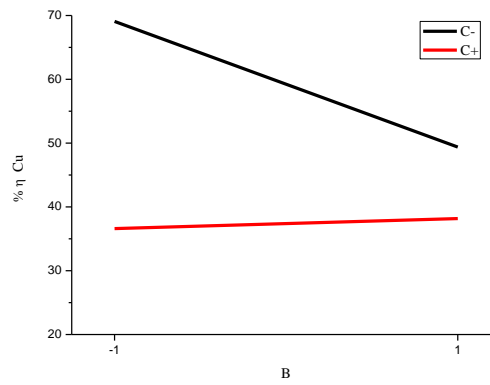


Figura AIX. 28-- Efeitos de factores das interações dos planos factoriais de ensaios de granulometria <math><1,7\text{mm}</math> para o Fe: a)AB; b)AC; c)BC



**Figura AIX .29- Efeitos de factores das interações dos planos factoriais de ensaios de granulometria <1,7mm para o Br: a)AB; b)AC; c)BC**





c)

Figura AIX.7 - Efeitos de factores das interacções dos planos factoriais de ensaios de granulometria <0,5mm para o Cu: a)AB; b)AC; c)BC

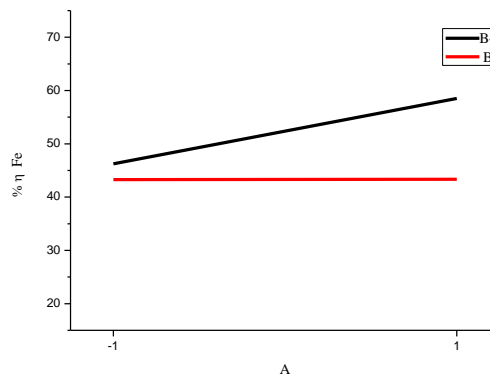


Figura AIX.30- Efeito de factor da interacção AB dos planos factoriais de ensaio de granulometria <0,5mm para o Fe

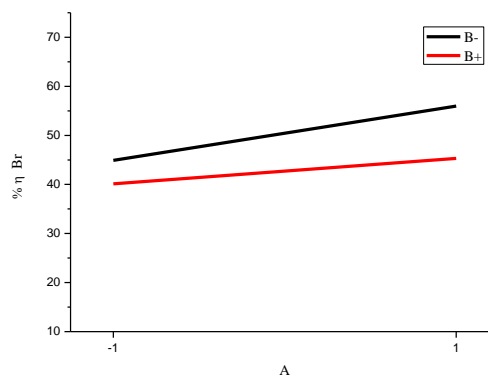


Figura AIX.31- Efeito de factor da interacção AB dos planos factoriais de ensaio de granulometria <0,5mm para o Br

## ANEXO X - Resultados da Separação Magnética

Quadro AX.1-Valores da percentagem de massa obtidas após a separação magnética

Ensaio	1ª Fracção		2ª Fracção	
	Não Magnético (%)	Magnético (%)	Não Magnético (%)	Magnético (%)
<b>1,7mm (30g,5min,10psi)</b>	60,26	30,66	0,60	8,48
<b>0,5mm (10g,5min,20psi)</b>	12,96	18,73	18,26	50,05

Quadro AX.2-Valores de FRX para o ensaio 2 de 1,7mm

<b>2</b>	<b>Br</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>
<b>1ª Fracção NM</b>	34	23	2
<b>1ª Fracção M</b>	13	17	38
<b>2ª Fracção NM</b>	12	21	7
<b>2ª Fracção M</b>	17	22	15

Quadro AX. 3-Valores de FRX para o ensaio 5 de 0,5mm

<b>5</b>	<b>Br</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>
<b>1ª Fracção NM</b>	16	43	3
<b>1ª Fracção M</b>	11	30	20
<b>2ª Fracção NM</b>	14	51	2
<b>2ª Fracção M</b>	13	32	19

## ANEXO XI- Resultados da Separação por Meios Densos

Quadro XI.1-Valores de percentagem de cada elemento nos ensaios de separação de meios densos

Ensaio		Br	Cu	Fe	
4mm	G	flutuado	31	10	20
		afundado	23	16	22
	H	flutuado	27	11	26
		afundado	25	19	17
1,7mm	E	flutuado	22	23	15
		afundado	26	23	16
	F	flutuado	24	24	16
		afundado	19	22	22
0,5mm	A	flutuado	15	32	15
		afundado	10	30	23
	B	flutuado	16	37	14
		afundado	12	29	19
	C	flutuado	16	35	15
		afundado	12	29	22
	D	flutuado	15	36	15
		afundado	11	31	19