

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA  
DEPARTAMENTO NACIONAL DA PRODUÇÃO MINERAL  
CONVÊNIO DNPM-CPRM

I-96

PHL-008012

CPRM	SUREMI
	SEBOTE
ARQUIVO TÉCNICO	
Relatório n.º	1008
N.º de Volumes:	1 de 5

**LIXIVIAÇÃO BACTERIANA  
SULFETO DE COBRE BAIXO TEOR  
CARAÍBA**

**ESTUDO EM ESCALA DE BANCADA  
RELATÓRIO FINAL**

*Vicente Paulo de Souza*

CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

CETEM

1980

**LIVIXIAÇÃO BACTERIANA  
SULFETO DE COBRE BAIXO TEOR  
CARAÍBA**

## SUMÁRIO

Foram realizados estudos em escala de bancada com o minério sulfetado de cobre de baixo teor de Ca raíba, utilizando-se bacterias do gênero thiobacillus ou um grupo delas, isoladas do próprio minério.

A bio-lixiviação em condições ideais: temperatura mantida constante em 36-37°C, granulometria inferior a 0.105 mm, pH 2.4-2.8, Eh 550-670 mv, agitação lenta e aeração, apresentou uma extração de cobre de 51% em um período de 30 dias. Com relação ao consumo de ácido, este foi reduzido em até 50% com a adição de pirita à lixiviação biológica.

Nos estudos realizados com 50 kg de material em colunas, foram testadas granulometrias de 3/4", 1", 2" e 5-6". Devido à compacidade do minério, baixa porosidade (2,5%) e outros fatores mineralógicos, os melhores resultados foram obtidos para a granulometria de 3/4", com uma extração de 16% do cobre contido e uma taxa de extração média de 5 g / ton. min./dia para um período de 4 meses de operação.

## INTRODUÇÃO

O aproveitamento de minérios sulfetados de baixo teor através da biometalurgia já vem sendo aplicada industrialmente em muitas partes do mundo há bastante tempo. As melhores condições de operação ou a conjunção dos fatores químicos, físicos e biológicos, geralmente são ditadas pelas características do próprio minério, bem como pelas condições micro e macro-ambientais. Fatores outros de ordem econômica, interesse e premência em se recuperar o metal também devem ser levados em consideração.

O processo de bio-extração em montes ou pilhas, requer um investimento de capital relativamente pequeno, bem como baixo custo operacional. Em contra partida, o processo é lento, requerendo períodos longos (meses ou mesmo anos) para uma recuperação substancial do metal.

Os testes realizados no CETEM, em escala de laboratório, com o minério sulfetado de cobre de baixo teor da Caraíba -  $23 \times 10^6$  t com teor 0.2 à 0.4% em cobre, objetivaram verificar os efeitos dos parâmetros técnicos possíveis de serem estudados nesta escala. Fenômeno de empacotamento, dificultando a percolação da pilha e condições climáticas dentre outras, somente poderão ser avaliados em escala piloto. Desta forma, após o encerramento desta fase, deverão ser realizados testes de preferência na própria mina em escala ampliada para que se possa fazer uma real avaliação técnico-econômica da viabilidade do processo.

## I. MATERIAIS E MÉTODOS

### 1.1 - Caracterização da Amostra

Recebidas 1 tonelada do minério de baixo teor proveniente da Mina Caraíba, o material foi convenientemente preparado e amostrou-se 125 kg para a fase de caracterização. Esta, constou de caracterização petrográfica, química e mineralógica.

### 1.2 - Caracterização Petrográfica

O estudo petrográfico foi efetuado em dez amostras escolhidas do material. Desta forma foram vistos as seguintes variedades de rochas.

#### 1. Piroxenito

Hiperstênio + Biotita + Plagioclásio  
(Labradorita com 55% de anortita) +  
opacos (sulfetos).

#### 2. Biotita-Xisto

Nesta amostra, observa-se um meio de composição granodiorítica com hiperstênio.

Esta amostra apresenta-se constituída essencialmente de: Biotita + Plagioclásio (às vezes bastante argilizados) + apatita (em quantidade considerável) + opacos.

Nos aglomerados essencialmente biotíticos, são vistos relictos de piroxênios bastante serpentinizados.

### 3. Cataclasito (de composição granítica)

Microclina (às vezes pertíticas) + quartzo + plagioclásio (com alguns cristais alterados para um material argilo-sericitico) + carbonato secundário + clorita como mineral acessório.

A maioria dos cristais prismáticos de piroxênio (hiperstênio) com inclusões de minerais de cobre e/ou óxido de ferro, encontram-se envolvidos e/ou ilhados por uma massa de cristais de plagioclásio não fraturados e sem linhas de clivagem.

1.3 - Análise Química

A análise química por via úmida apresentou os seguintes resultados:

Elementos	%
Cu	0,39
SiO <sub>2</sub>	53,82
S	0,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,10
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,91
CaO	2,41
MgO	1,08
RI	85,48

#### 1.4 - Composição Mineralógica Modal

Para o estudo da composição mineralógica e também para análise modal, o minério foi moído abaixo de 65 malhas (0,208 mm) onde observou-se que a liberação dos sulfetos de interesse era satisfatória.

Para estudo da composição mineralógica esta amostra foi separada por centrifugação em líquidos densos, em bromofórmio ( $d = 2,9$ ) e depois em iodeto de metileno ( $d = 3,3$ ). Obtendo-se assim três frações contendo minerais de diferentes densidades.

Desta forma, identificou-se através de lâminas delgadas e secções polidas, os minerais presentes no minério, bem como sua provável composição modal.

##### - Análise Modal do Minério:

Piroxênio .....	44,0%
Plagioclásio .....	27,0%
Biotita .....	10,0%
Microclina .....	8,0%
Quartzo .....	3,0%
Pirita .....	3,0%
Outros (Ox. de Fe., apatita, titanita, ect. ....)	3,0%

Calcopirita .....	0,8%
Bornita .....	0,5%

- Porosidade: 2.5%

## 2. ISOLAMENTO DA BACTERIA DO MINERIO

As amostras do minério sulfetado de baixo teor, vieram acondicionadas em sacos plásticos e alguns destes sacos estavam internamente úmidos. Um vez que, no momento em que se formulou o pedido para remessa das amostras, não nos ocorreu também fazer o pedido de amostra da água da mina, adotou-se o procedimento que se segue, visando ao isolamento da bactéria.

Todos os sacos plásticos após a retirada do minério, foram mergulhados em um balde com água, sofrendo uma espécie de lavagem. Algumas partículas grosseiras que estavam umedecidas, foram imediatamente fragmentadas, sendo colhidas diretamente dentro do balde com a água de lavagem. Desta forma, simulou-se aquilo que seria a amostra da água da mina, onde se encontra a bactéria a ser isolada.

Esta "água da mina", passou a ser a base dos testes que se seguiram, objetivando ao isolamento da (s)

bactéria (s). A bactéria oxidante do enxofre pertence a um grupo seletivo, do qual existem somente quatro membros distintos. O thiobacillus ferrooxidans é o mais utilizado uma vez que é o único que é capaz de oxidar tanto enxofre quanto sulfeto a ácido sulfúrico e ions ferrosos a ions férricos. Quase sempre é encontrado com o thiobacillus thiooxidans que é uma bactéria oxidante de enxofre. Na prática o que ocorre é uma cooperação ainda não bem conhecida entre os diferentes tipos de bactéria na oxidação de alguns minérios (1)

Bactéria	Fonte de Nitrogênio	Oxidação		
		Enxofre	Tiosulfato	10N Fe <sup>2+</sup>
T. Thiooxidans	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+	+	-
T. Ferrooxidans	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	+	±	+

Preparou-se três tipos de testes distintos: dois por percolação à temperatura ambiente e um por agitação à temperatura de 30 - 35°C.

As condições em que foram realizados os testes são as seguintes:

Teste Nº 1

Características : percolação c/temp. ambiente  
Granulometria : 3,36 mm  
Massa do Minério : 100 g  
Volume da Lixívia : 200 ml  
Tipo de Solução : "água de lavagem acidulada"  
 $H_2SO_4 = 0,5 \text{ gl}^{-1}$   
pH = 2.26  
O valor do pH é periodicamente corrigido

Teste Nº 2

Característica : percolação c/temp. ambiente  
Granulometria : 3,36 mm  
Massa do minério : 100 g  
Volume da Lixívia : 200 ml  
Tipo de Solução : água potável acidulada  
 $H_2SO_4 = 0.5 \text{ gl}^{-1}$   
pH<sub>i</sub> = 2.26  
O valor do pH é periodicamente corrigido

Teste Nº 3

Característica : agitação à temp. 30-35°C  
 Granulometria : 0,105 mm  
 Massa do Minério : 100 g  
 Volume da Lixívia: 200 ml  
 Tipo de Solução : Água de lavagem acidulada  
 $H_2SO_4 = 0.5 \text{ g l}^{-1}$   
 pH = 2.26

O valor do pH é periódicamente corrigido

Após o período de uma semana, adicionou-se 0.2 g  $Fe^{2+}$  aos testes 1 e 3. Pode-se observar que as soluções preparadas a partir da "água de lavagem" apresentaram turbidez, enquanto aquela preparada com água potável apresentava-se límpida.

Duas semanas após o início dos ensaios, retirou-se uma alíquota da amostra nº 3 e observou-se ao microscópio com aumento de 500 X, a presença de micro-organismo que tudo leva a crer (comparação com fotografias) tratar-se do Thiobacillus Thiooxidans.

Deste material partiu-se para a semeadura primária em meio de cultura modificado a partir do meio de Silverman e Lundgren. Este meio consiste de 2 soluções. Solução A e Solução B. Na primeira participam os seguintes sais:

$K_2HPO_4$  .....0,5 g;  $(NH_4)_2 SO_4$  .....3 g; KCl .....0,1 g;

$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  .....0,5 g;  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$  .....0,01 g e completar o volume para 1000 ml com  $\text{H}_2\text{O}$  destilada. O pH desta solução deverá ficar entre 2.5 e 3.0 e deve ser ajustado com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  10 N. O pH desta solução logo após o preparo e sem adição de ácido sulfúrico é em torno de 4.85. A solução B contém  $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  na proporção de 25 g para 100 ml de água destilada e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado 0.75 ml de densidade 1.78.

As soluções de A e B são esterilizados em separado a  $120^\circ\text{C}$  por 20 minutos em autoclave. Após esterilização procede-se à mistura das duas soluções na proporção de 100 ml da primeira (A) para 4 ml da segunda (B) em frascos erlenmeyer de capacidade 250 ml. Após a mistura das soluções observa-se uma ligeira turvação que segundo alguns autores não interfere com o crescimento bacteriano. O inóculo foi proveniente dos testes 1, 2 e 3 e foi inicialmente semeada da seguinte maneira:

100 ml da solução nutriente A + 4 ml da  
solução B + 5 ml do inóculo de solução  
lixivante nº 1.

100 ml da solução nutriente A + 4 ml da  
solução B + 5 ml do inóculo de solução  
lixivante nº 2.

100 ml da solução nutriente A + 4 ml da  
solução B + 5 ml do inóculo de solução  
lixivante nº 3.

Estes inóculos foram repicados em duplicata. De 5 em 5 dias a bactéria foi semeada em meio novo e mantida à 35°C em estufa bacteriológica. Partindo-se destas 3 soluções lixiviantes nº 1, 2 e 3, foram repicados por transferências sucessivas para 130 frascos erlenmeyer com capacidade para 250 ml. Estes repiques sucessivos além da finalidade principal de manter as bactérias ativas para testes com minérios de baixo teor, serviram para mostrar alguns dados importantes para o crescimento de bactérias semelhantes ao gênero *Thiobacillus* e *Ferrobacillus*. Uma temperatura boa para o seu desenvolvimento faz-se prevalecer quando em torno de 35°C. Culturas mantidas à temperatura ambiente demoraram a se desenvolver ou mesmo não se desenvolveram. Culturas guardadas ao abrigo da luz e na temperatura de 35°C são bastantes propícias para testes com minério de baixo teor. Culturas expostas a luz desenvolvem-se lentamente ou mesmo não se desenvolvem. Parece também que culturas envelhecidas perdem sua atividade bacteriológica. Sua motilidade é bastante reduzida. Todas estas observações foram feitas tanto macroscopicamente como microscopicamente. Macroscopicamente observa-se toda vez que há mudança de cor no meio original. Denota-se a presença de inúmeras bactérias quando o material é observado microscopicamente. Bactérias destes gêneros oxidam o Ferro ferroso para férrico e propiciam ao meio uma coloração amarelada. Microscopicamente temos utilizado 2 técnicas: A fresco ou após coloração pelo método de Gram. Em ambas colocou-se uma alíquota do material em tubo de centrífuga e centrifugou-se 5 ml do material a 3.500 rpm por 20 minutos. O sobrenadante é desprezado

e o precipitado que se destina ao exame a fresco é colocado na lâmina e coberto com lamínula. O aumento utilizado na técnica de microscopia a fresco é de 600 vezes. Neste observam-se bactérias ativamente móveis além de precipitado do próprio meio.

O precipitado que se destina a coloração pelo método de Gram é fixado na lâmina limpa e desengordurada passando na chama do bico de bunsen. Fixando o material, procede-se a coloração pelo método de Gram que é a seguinte:

1. Recobre-se a lâmina com cristal violeta por 1 minuto.
2. Despreza-se o corante usado na etapa inicial e recobre-se com lugol também por 1 minuto.
3. Descora-se o material com álcool absoluto e lava-se com água.
4. Recobre-se a lâmina com Fucsina de Gram por 30 segundos. Lava-se o material com água destilada.

Após esta última lavagem deixa-se o material secar espontaneamente e observa-se ao microscópio com aumento de 1.250 vezes usando objetiva de imersão. Ao microscópio temos visto bastonetes gram negativos, semelhantes aos bacilos descritos na literatura como sendo do Genero Thiobacil

lus e Ferrobacillus. Posteriormente tentou-se o isolamento de bactérias em meio sólido para melhor caracterização morfológica deste genero. Até o presente momento não se conseguiu isolar bactérias observadas microscopicamente em placas contendo meio sólido. Para a semeadura em placas utilizou-se duas técnicas: Esgotamento total e Pour-place.

Na técnica do Esgotamento total faz-se a semeadura com alça de platina esgotando o inóculo totalmente na placa. Na Pour-place coloca-se o inóculo e recobre-se com o meio que ao se solidificar é levado à estufa. O procedimento para confecção de meio sólido é a seguinte:

Prepara-se como no meio líquido as soluções A e B. Para solidificar o meio usa-se agar-agar (substância extraída de algas marinhas e que quando usada tem por finalidade solidificar qualquer meio de cultura). O agar-agar apresenta a vantagem de se fundir na temperatura de ebulição da água e o seu ponto de solidificação é em torno de 45°C. Prepara-se o agar-agar a 3% em H<sub>2</sub>O destilada e ferve-se esta solução. A mistura é constituída de 1 parte da solução nutriente A + 1 parte da solução, nutriente B + 2 partes de agar-agar a 3%. Autoclava-se em separado todas as soluções e no momento faz-se a mistura. Verte-se na placa de petri e espera-se a solidificação à temperatura ambiente. Para a semeadura por Esgotamento total inoculou-se 0,005 ml (aproximadamente uma alça de platina). Além da semeadura em placas tentou-se isolar em tubos com agar inclinado. Procedimento seme

lhante ao anterior (de placas) só que com este o inóculo foi acrescentado ao meio por diversas vezes. No início o inóculo foi do próprio meio de cultura e depois passou-se a fazer um inóculo enriquecido. Este era obtido mediante centrifugação de um material rico em bactérias. O sobrenadante era desprezado e o precipitado rico era semeado por esgotamento total e/ou por Pour-place. No final de 20 a 25 dias observou-se uma mudança de cor no meio contido na placa sem que fosse possível evidenciar crescimento bacteriano (2).

#### - Determinação da População Bacteriana

Dentre as técnicas empregadas: medida da turbidez da solução, contagem em placas, contagem direta usando-se a câmara de Petroff-Hausser e contagem indireta através da determinação do nitrogênio celular pelo método Micro-Kjeldahl, os dois últimos apresentam-se como sendo os que fornecem resultados satisfatórios.

O processo da câmara de Petroff-Hausser é utilizado para baixas concentrações de bactérias e pequenos volumes de amostra.

O método Micro-Kjeldahl por sua vez é empregado para grandes volumes de amostra e concentrações de bactérias da ordem de  $1 \times 10^7$ /ml. (3), (4).

Embora apresentando relativa importância, não se determinou a população bacteriana em nenhum dos ensaios efetuados. Por outro lado, manteve-se um controle periódico

dico da existência e atuação da bactéria, inoculando-se 1 ml de solução lixiviante em meio de cultura 9 k que era colocado em estufa bacteriológica, fazendo-se o acompanhamento diário das evoluções das concentrações de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$ .

Na figura 1, pode-se observar a atuação da bactéria na oxidação de  $Fe^{2+}$  em meio próprio de cultura.

### 3. TESTES PRELIMINARES

#### 3.1 - Condições Operacionais

Este procedimento tem por objetivo verificar o comportamento do minério, quando submetido às condições ideais de lixiviação. Uma vez não apresentando resultados satisfatórios-extração do metal em tempo hábil a baixo consumo de ácido, não é recomendável proceder-se aos ensaios em escala mais ampla. Por outro lado, mesmo obtendo-se bons resultados nestas condições dificilmente seria cogitado a implantação deste processo em escala de produção pois a economicidade do mesmo provavelmente o tornaria inexecuível.

Para estes testes, amostrou-se 3 kg do material em granulometria inferior a 0,105 mm (150 malhas) e manteve-se constante para os três testes os seguintes parâmetros:

- 500 g de minério

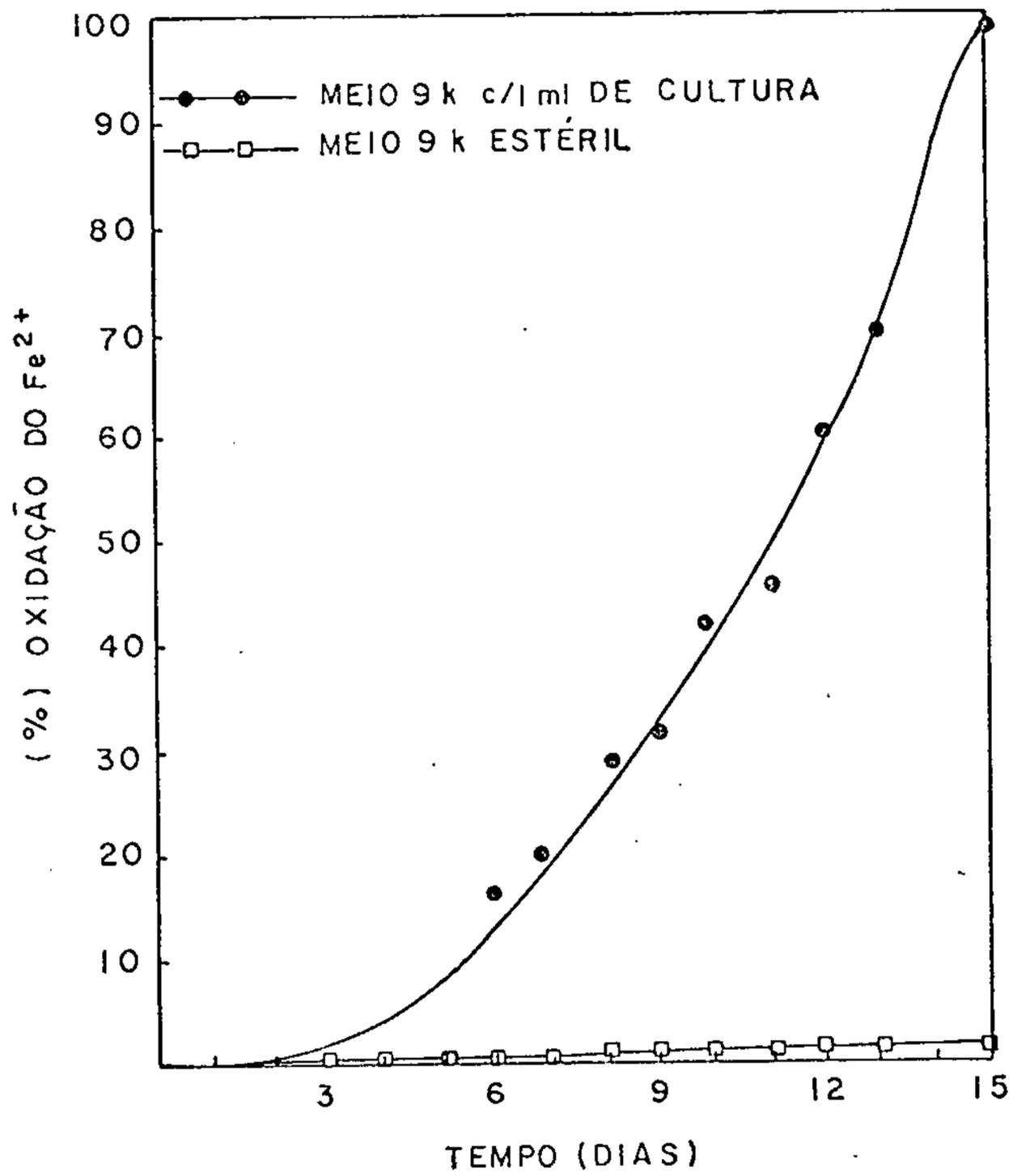


FIG. I - ATUAÇÃO DA BACTERIA NA OXIDAÇÃO DO  $Fe^{2+}$  EM  $pH=2,5$  E  $T=36^{\circ}C$

- 1000 ml de solução
- 250 rotações por minuto

Os ensaios, foram os seguintes:

Parâmetro	pH	Eh	Inóculo	Temp	Ar
Teste		mv	ml	°C	l. min <sup>-1</sup>
A	2.3-2.8	530-640	10	36-37	1.5
B*	2.3-2.8	530-640	10	36-37	-
C**	2.0	500-580	-	amb.	1.5

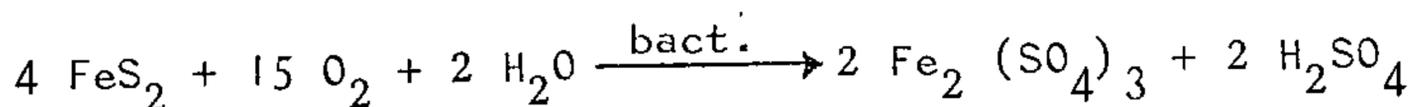
\* - adicionados 50 g de pirita.

\*\* - adicionados 25 ml de bactericida

O pH das lixívias foi mantido constante sendo corrigido sempre que se fazia necessário. A evolução das concentrações de  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  e  $Cu^{2+}$  realizou-se a cada 2 dias pelos métodos dicromato para ferro ferroso e espectrofotometria de absorção atômica para ferro total e cobre. Retirava-se 1 ml de solução matriz e diluía-se convenientemente em solução sulfúrica conservando o pH original. A aeração não foi efetuada durante todo o tempo, sofrendo interrupções periódicas. A adição de pirita teve por finalidade a produção de ácido sulfúrico pela atuação da bactéria, diminuindo desta forma o consumo de ácido provocado pela ganga do minério.

### 3.2 - Resultados Obtidos

A lixiviação em condições ideais, apresentou resultados satisfatórios no que tange a extração do metal. Por outro lado, como era de se esperar, o consumo de ácido foi elevado devido ao aumento da superfície de contato, propiciando ainda mais a solubilização da ganga que acompanha o minério. A adição de pirita proporcionou um decréscimo neste consumo provocado pela ação dos catalisadores biológicos (enzimas) na reação de oxidação da pirita, gerando ácido sulfúrico como se observa na reação abaixo:



Quanto à lixiviação química do mesmo material, esta apresentou a menor extração e maior consumo de ácido demonstrando com isso a ineficácia da lixiviação ácida para este tipo de minério.

Os resultados podem ser melhor visualizados na Tabela II e nas Figuras 2, 3, 4 e 5.

Condições de Lixiviação	Cobre Contido (g)	Cobre Extraído		Consumo H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g)	Consumo
		g	%		g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /g Cu
Bactéria + Ar	2	1.02	51	14.4	14.1
Bactéria + Pirita	2	0.82	41	9.6	11.7
Química Esterelizada	2	0.50	25	28.8	57.6

Tabela 2 - Resultados obtidos em 30 dias.

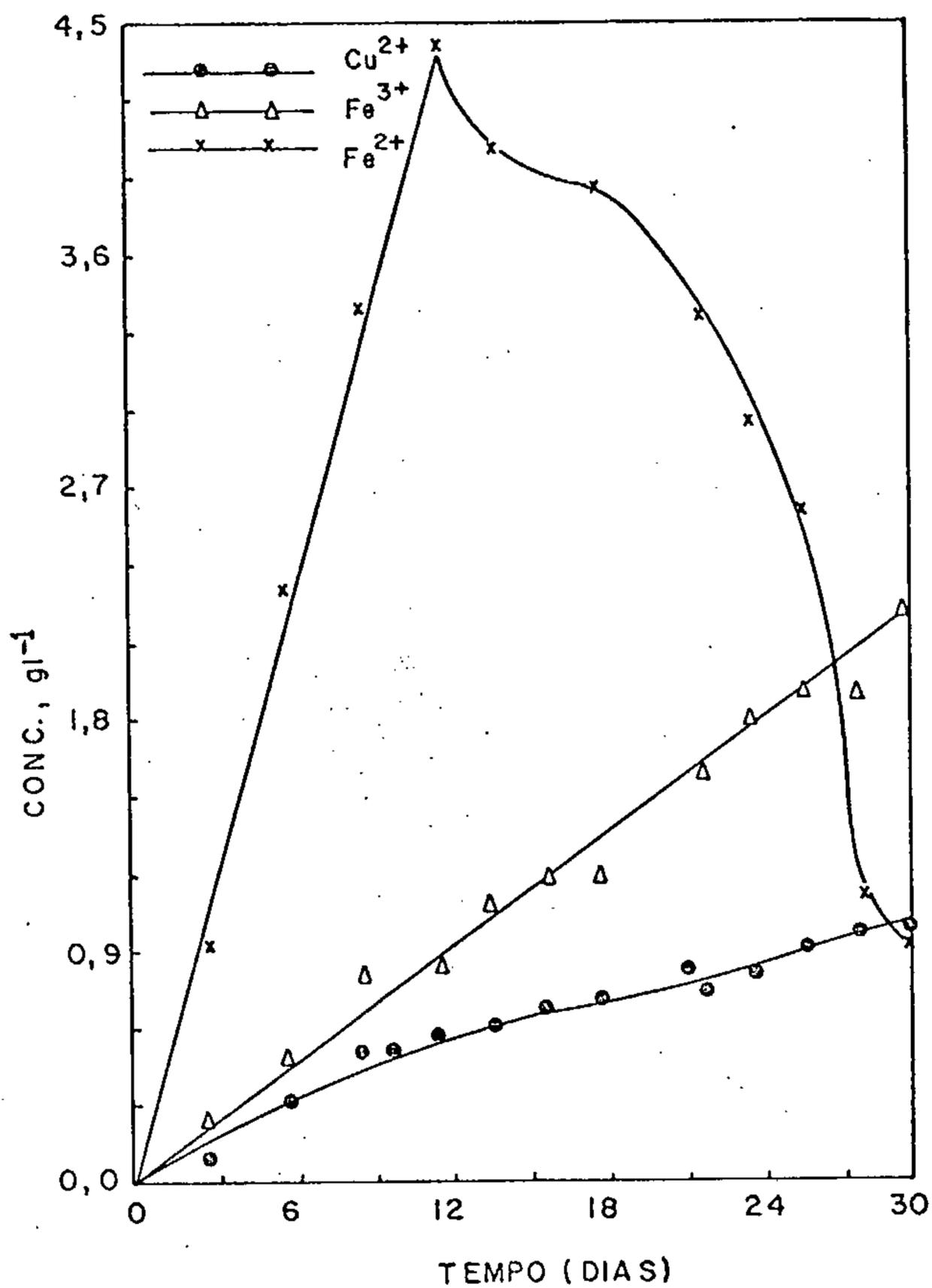


FIG. 2 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA, EM CONDIÇÕES IDEAIS COM AERAÇÃO.

GRAN. : <0,105 mm  
 Eh. : 550 - 650 mv  
 pH. : 2.3 - 2.8  
 AGIT. : 250 ROT. min<sup>-1</sup>  
 TEMP. : 36 °C

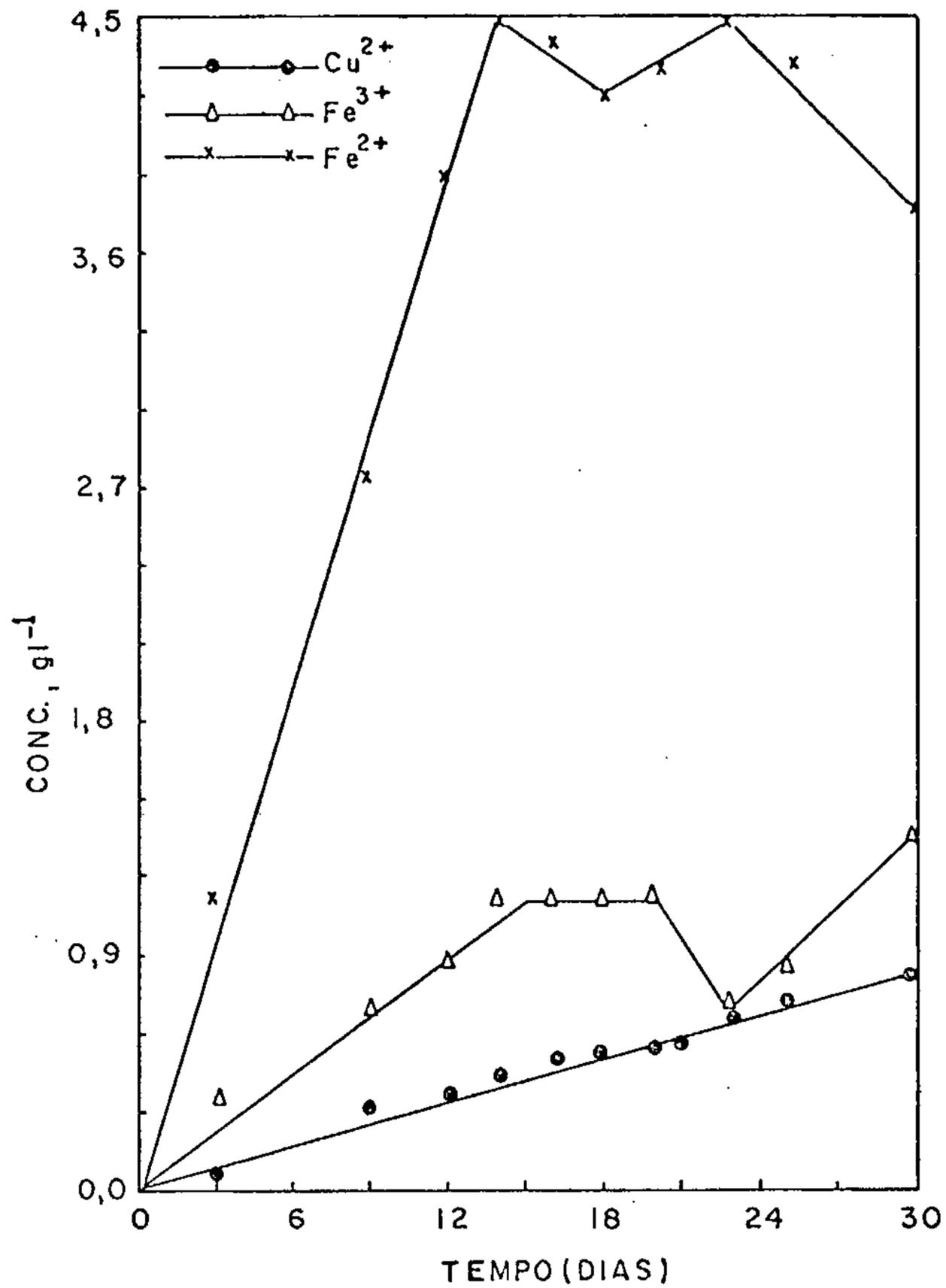


FIG. 3 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> e Cu<sup>2+</sup> NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA, EM CONDIÇÕES IDEAIS SEM AERAÇÃO.

GRAN. : < 0,105 mm  
 Eh : 550 - 600 mv  
 pH : 2.4 - 2.8  
 AGIT. : 250 ROT. min<sup>-1</sup>  
 TEMP. : 36 °C

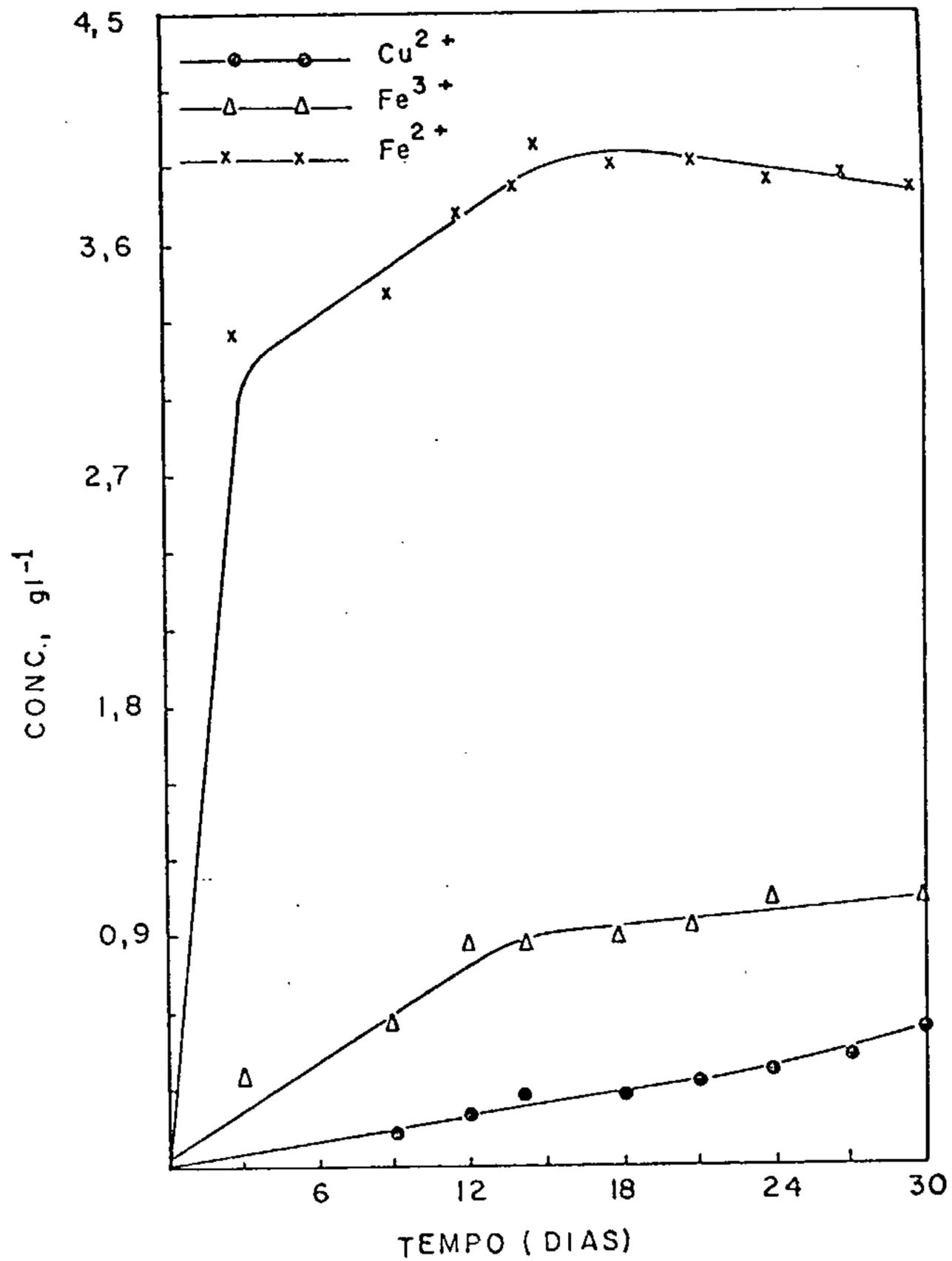


FIG. 4 -EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup> e Cu<sup>2+</sup> NA LIXIVIAÇÃO QUÍMICA.

CONTROLE ESTÉRIL

GRAN.: <0,105 mm

pH: 2,0

AGIT.: 250 ROT. min<sup>-1</sup>

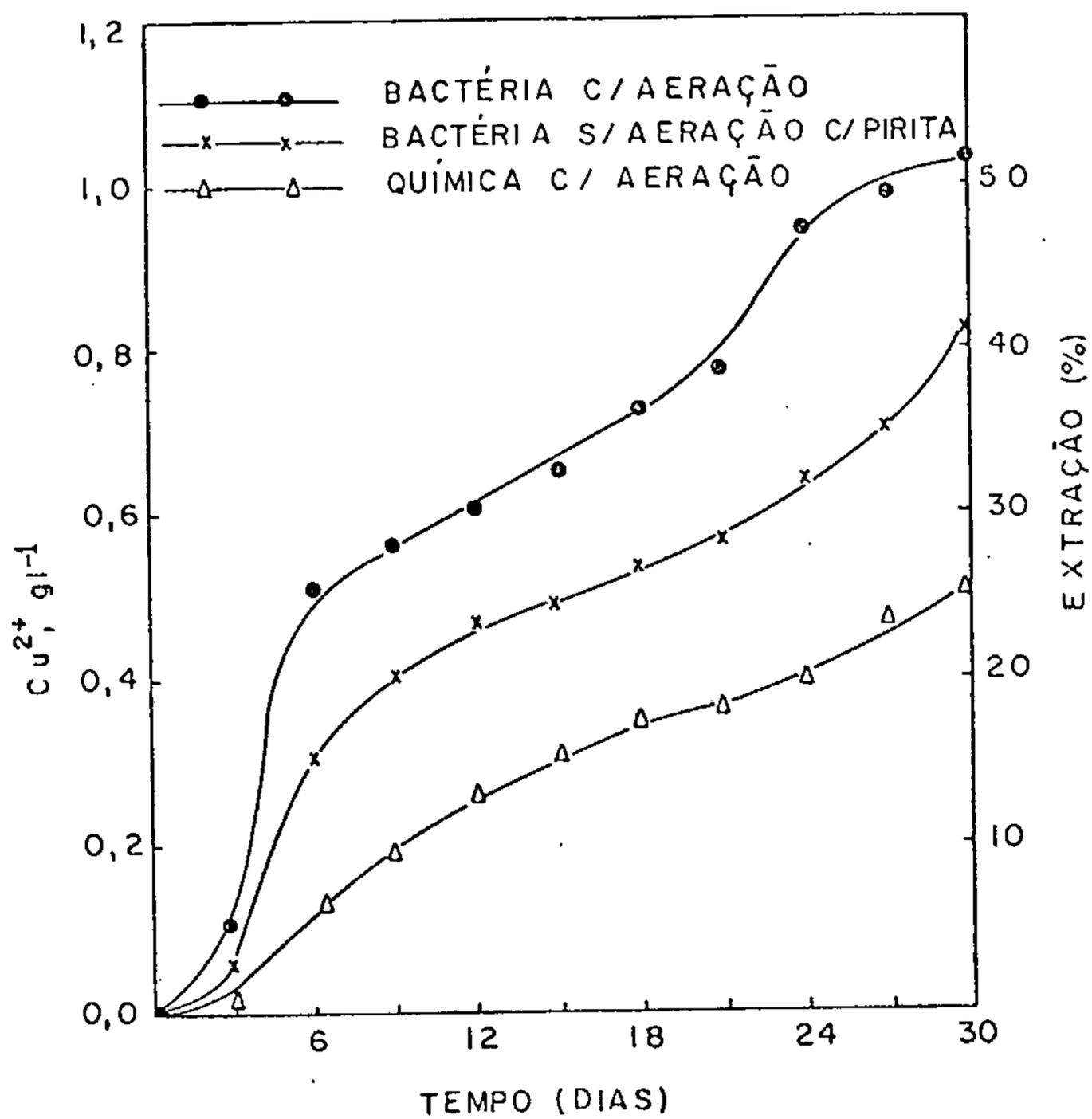


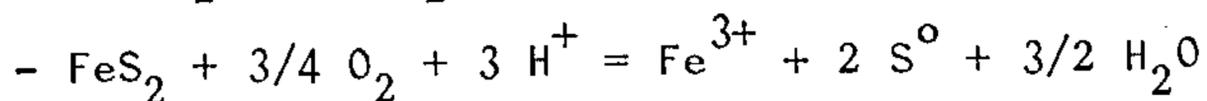
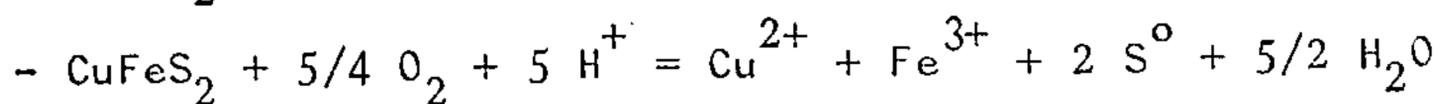
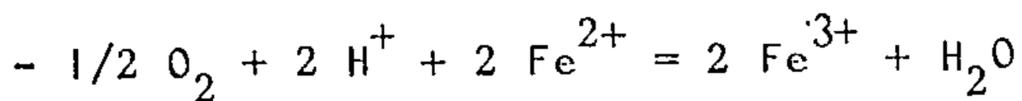
FIG. 5 - CURVAS COMPARATIVAS PARA AS TRÊS CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO.

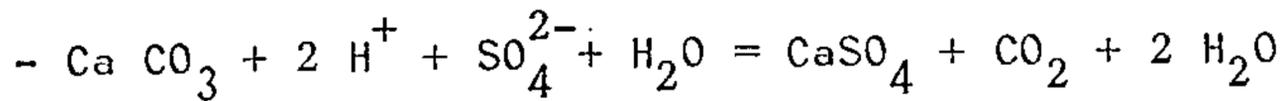
### 3.3 - Discussão dos Resultados

Como se pode observar nos gráficos apresentados, foram atingidos os principais objetivos a que se propunham os testes preliminares:

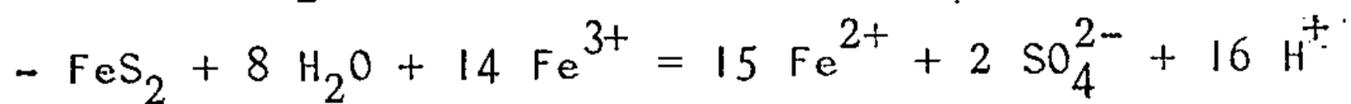
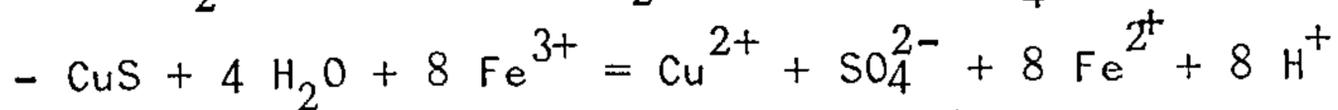
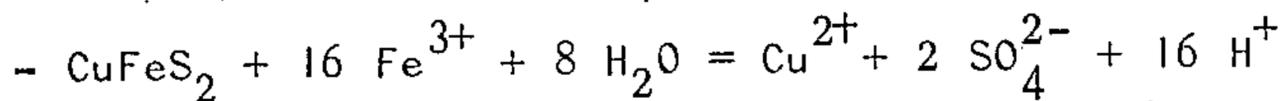
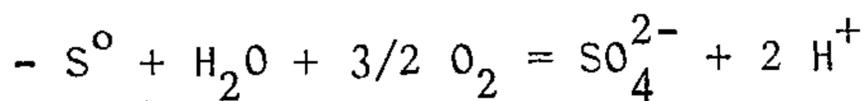
- Suscetibilidade do minério à bio-lixiviação
- Influência do ar na atuação da bactéria
- Adição de pirita para produção de ácido

Embora ainda não estejam bem elucidados os mecanismos de atuação da bactéria no processo de lixiviação, o minério mostrou-se favorável a este tipo de tratamento. Na representação gráfica da Fig. 5 observa-se uma significativa extração, além de indicar também quanto foi lixiviado quimicamente e quando foi lixiviado pela atuação da bactéria. Por outro lado, também verificou-se um elevado consumo de ácido ocasionado não só pelas reações de solubilização do cobre e oxidação do ferro ferroso, como principalmente pela presença de cálcio e magnésio sob a forma de óxido e/ou carbonato na ganga. Alguns exemplos de reações consumidoras de ácido que ocorrem durante a lixiviação:





Com a finalidade de provocar um acréscimo na formação de ácido, utilizando a bactéria na oxidação direta das espécies reduzidas do enxofre, adicionou-se pirita ao sistema. Esta adição não obedeceu a nenhum critério e foi estipulado aleatoriamente em 10% em relação ao peso do minério utilizado no teste. O resultado foi satisfatório, podendo contudo ser otimizado visando a sua aplicação posterior. Cabe a discussão da disponibilidade de pirita ou não e da economicidade em transportá-la até ao local da lixiviação. Algumas reações regeneradoras de ácido que ocorrem no processo:



#### 4. TESTE EM PERCOLADORES

Como pode ser visto na Tabela III, o minério quando britado a + 1/2", apresenta 48% do material em uma granulometria inferior a - 1/4". Este elevado percentual é um fator limitante para as operações em grande escala devido a grande quantidade de finos produzidos (5). Por outro lado, para que também fosse conhecido o comportamento do minério no tocante à extração nesta granulometria, realizaram-se ensaios em percoladores de vidro de pequeno porte.

As condições do teste foram as seguintes:

- 500 g de minério 0,4% Cu
- 500 ml de solução
- granulometria 1/2" (Tabela III)
- pH - 2.3 - 2.8
- inóculo - 25 ml
- pirita - 50 g
- vazão de ar -  $1.6 \text{ l min}^{-1}$  (60 min./dia)

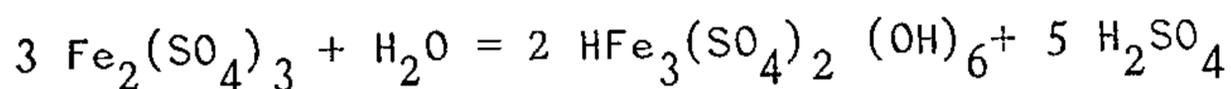
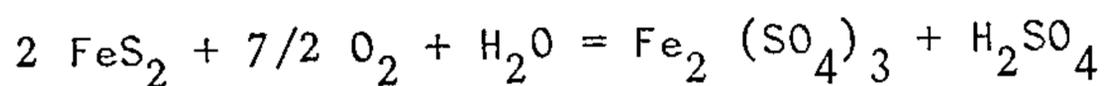
O teste teve um período de duração de 130 dias e as evoluções das concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Cu}^{2+}$  vinham sendo controladas normalmente a cada dez dias. Devido a problema operacional o controle teve que ser interrompido e o cálculo da extração foi efetuado analisando-se o teor de cobre do rejeito da lixiviação.

Malha	Retido	Acumulado
(mm)	%	%
12.50	8.8	8.8
5.66	43.2	52.0
4.76	5.4	57.4
3.36	7.1	64.5
2.38	6.5	71.0
1.68	4.4	75.4
1.19	3.6	79.0
0.84	2.6	81.6
0.59	2.0	83.6
0.42	1.8	85.4
0.297	1.8	87.2
0.210	2.2	89.4
0.149	1.6	91.0
0.105	1.8	92.8
0.074	1.0	93.8
0.053	1.0	94.8
0.044	2.7	97.5
<0.044	2.0	99.5

Tabela III - Análise Granulométrica do Material Britado à 1/2".

#### 4.1 - Resultados e Discussão

Como se observa na Tabela IV, os resultados alcançados são satisfatórios tanto no que concerne à extração como na produção de ácido efetuados pela bactéria. No teste P<sub>2</sub> em que adicionou-se pirita ocorreu uma maior concentração de ions Fe<sup>3+</sup> e produção de ácido sulfúrico que podem ser ilustrados da seguinte forma:



Esta produção de ácido pode ser melhor analisada no gráfico representado na Fig. 7, onde se observa um decréscimo no valor do pH por um determinado período e conseqüentemente um menor consumo de ácido. Por outro lado, observa-se que o teste realizado sem adição de pirita, a extração atingiu um valor significativamente maior.

Diante disto, pode-se afirmar que o ar e a bactéria no presente caso tem uma atuação muito mais efetiva como agentes oxidantes do que o ion Fe<sup>3+</sup>. Além disto, a lixiviação deve ser realizada em presença de pirita, pois como se observa, contribui efetivamente para o menor consumo de ácido.

Teste	Parâmetro	Alimentação (g)	Teor (%)	Rejeito (g)	Teor (%)	Cobre Extraído		Ácido (g)	Consumo g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /g Cu
						(g)	(%)		
	P <sub>1</sub>	500	0.40	457	0.28	0.72	36	4.1	5.7
	P <sub>2</sub> *	550	0.40	503	0.32	0.40	20	2.2	5.5

Tabela IV - Resultados Obtidos nos Testes com Granulometria 1/2".

\* - Adição de 50 g de pirita.

Embora se tenham obtido resultados signi-  
ficativos, é pouco provável que se possa operar a esta granu-  
lometria com grandes quantidades, devido ao elevado percen-  
tual de finos produzidos, pois estes acarretariam problemas na  
percolação da lixívia bem como na circulação do ar.

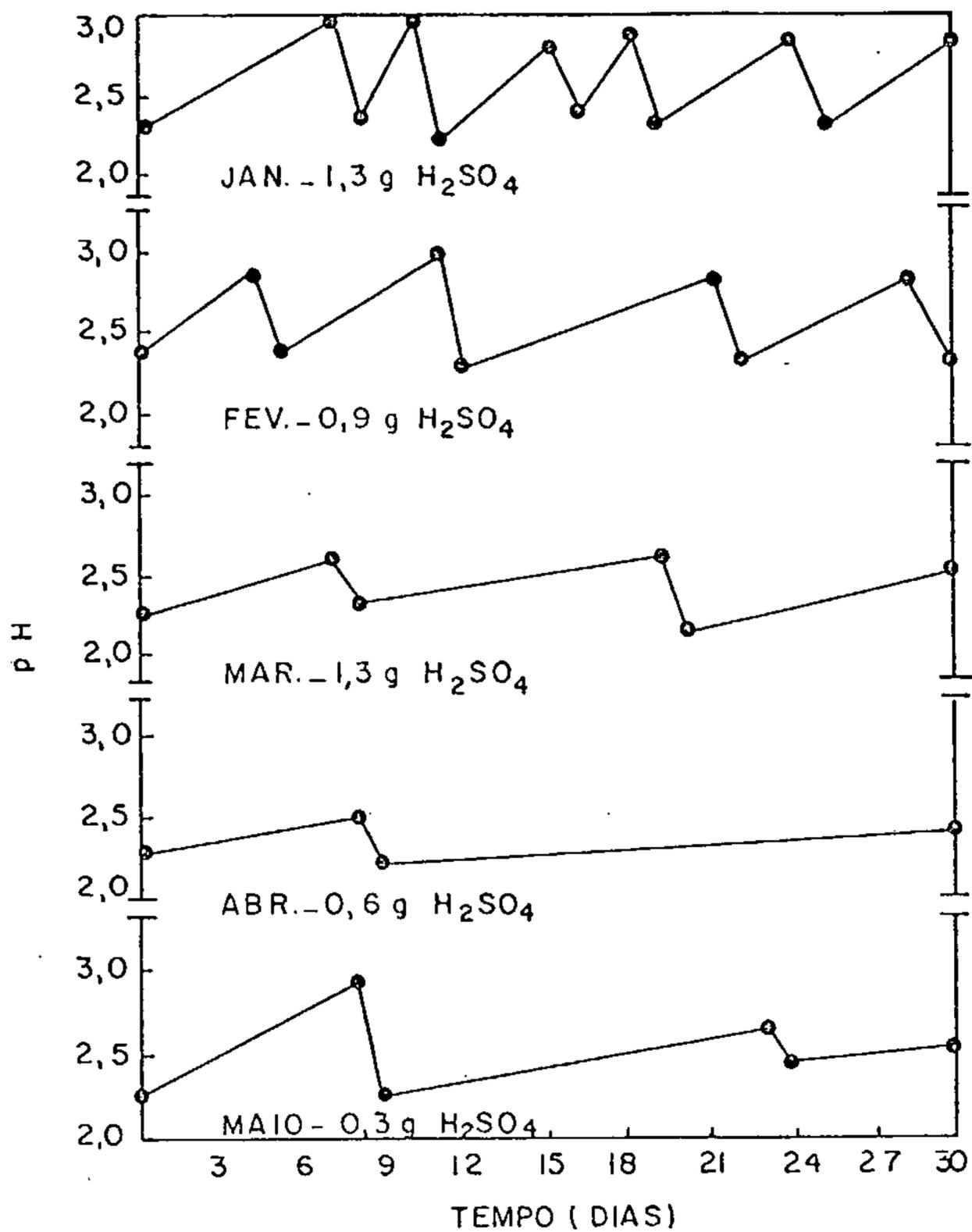


FIG. 6 - VARIAÇÃO DA CONC. DE  $H^+$  COM O TEMPO, NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DO MINÉRIO DE COBRE BRITADO À 1/2".

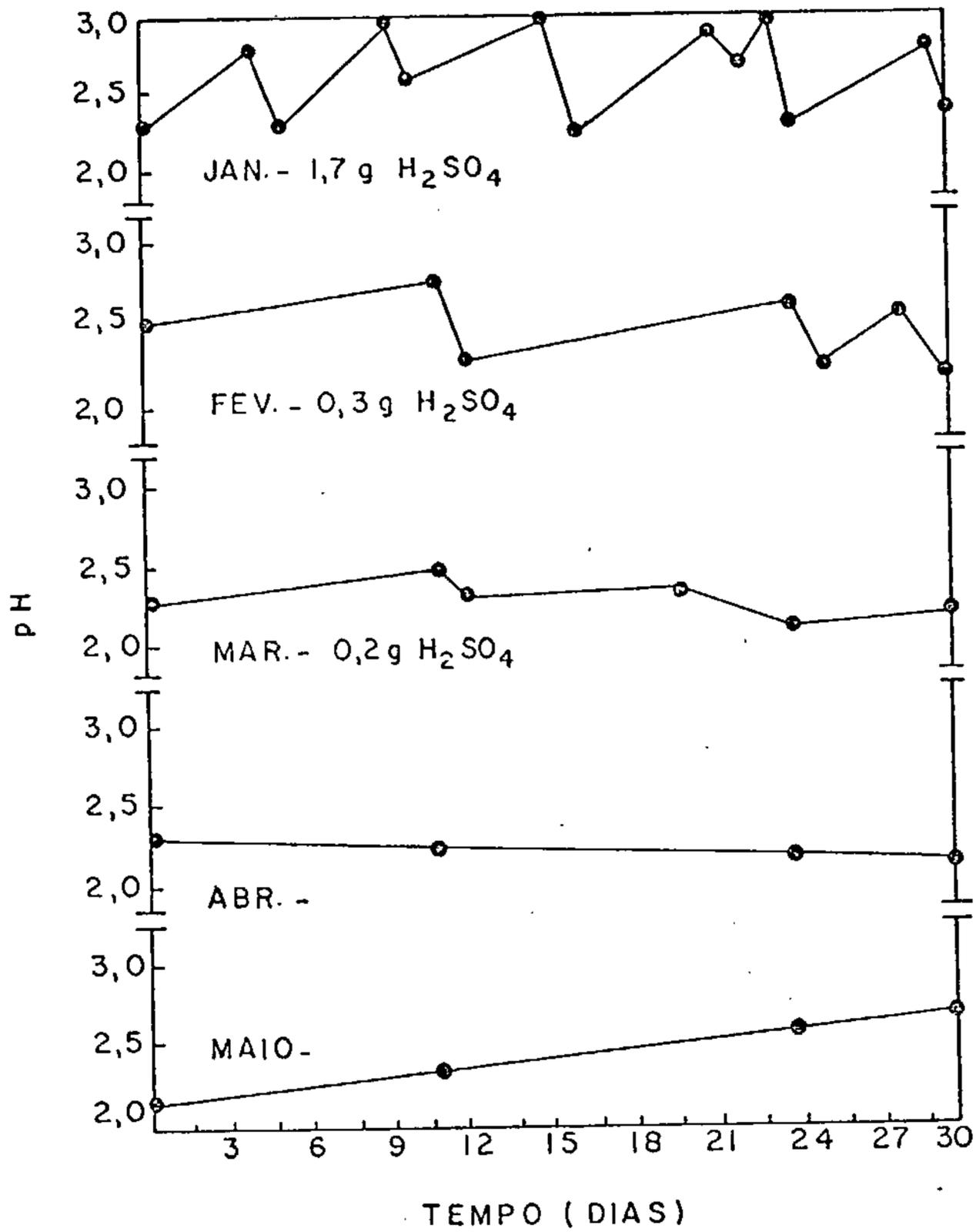


FIG. 7 - VARIAÇÃO DA CONC. DE  $H^+$  COM O TEMPO, NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DO MINÉRIO DE COBRE BRITADO A 1/2" EM PRESENÇA DE PIRITA (10% p/p).

## 5. TESTE EM COLUNAS

### 5.1 - Condições Operacionais

Os estudos foram realizados em colunas de PVC rígido de 150 cm de altura e 8" de diâmetro. Cada uma de las foi carregada com 50 kg de material e para cada granulometria operou-se com uma inoculada e outra estéril que servia de controle. Nesta fase, realizaram-se estudos com partículas de 3/4", 1", 2" e 5-6" visando a obtenção de parâmetros aplicáveis em operação de grande escala.

Para cada coluna trabalhou-se com 25 litros de lixívia que se fazia circular com o auxílio de bombas peristálticas com vazão regulada para 0.3 litro  $\text{min}^{-1}$ . Nos primeiros 30 dias, a lixívia circulava continuamente objetivando com isto a reação com os agentes consumidores do ácido e consequente estabilização do minério. Após esta fase, umas colunas foram inoculadas com 100 ml de cultura contendo *Thiobacillus* e outras esterelizadas com um agente bactericida. Quanto a este, após várias experiências com diversos antibióticos, somente o formaldeído se mostrou eficiente.

O tempo de contato solução/minério era bem pequeno, dando-se maior ênfase ao contato ar/minério quer seja pela injeção de ar, ou deixando-se o minério simplesmente em repouso. Periódicamente, também, fazia-se borbulhamento

de ar nas lixívias e somente uma vez se supriu externamente as soluções com nutrientes inorgânicos.

Não foi feito qualquer controle da temperatura, trabalhando-se portanto à temperatura ambiental (30°C).

O controle do pH-desde o início da operação e do Eh- a partir do 3º mês de trabalho, foram realizados diariamente, utilizando-se um potenciômetro e um multímetro.

A evolução das concentrações de ferro férrico, ferro ferroso e cobre, foram medidas fazendo-se espectrofotometria de absorção atômica para ferro total e cobre, e titulação com dicromato para ferro ferroso. Tomou-se os devidos cuidados com as diluições para evitar erros.

Algumas considerações teóricas não foram devidamente detalhadas devido aos objetivos práticos a que se propunha o trabalho. Os dados obtidos referem-se ao período de 4 meses de lixiviação bacteriana e por ocasião em que se escrevia o presente relatório, alguns dados já haviam sofrido modificações.

## 5.2 - Resultados e Discussões

### 5.2.1 - Granulometria

O minério conforme recebido, era consti

tuido de partículas grosseiras compreendidas entre 5 e 6". O material foi convenientemente amostrada, retirando-se as quantidades suficientes que foram britadas a 2", 1" e 3/4" respectivamente. As análises granulométricas deste material podem ser vistas nas Tabelas V, VI, VII. Como se observa, a produção de finos é relativamente baixa o que favorece a taxa de percolação e aeração no caso de formação de pilhas.

### 5.2.2 - Cinética de Extração de Cobre

Em geral, um estudo da cinética de extração pode levar a dois tipos de informação. Sob o ponto de vista prático, os estudos realizados em um determinado sistema procuram aproximar-se das condições encontradas comercialmente, obtendo-se valiosos dados de engenharia que passam de uma escala de bancada para testes em escala piloto e finalmente operação em grande escala industrial. O segundo, seria um resultado mais fundamentado de um estudo detalhado da cinética de extração proveniente de uma interpretação bem sucedida da cinética em termos dos mecanismos envolvidos<sup>(6)</sup>.

Os estudos nesta fase, desenvolveram-se sob o ponto de vista da aplicação prática, sem contudo deixar de tecer algumas considerações teóricas que auxiliassem na compreensão dos fenômenos ocorridos.

Malha	Retido	Acumulado
(mm)	%	%
19.05	7.44	7.44
12.50	47.84	55.28
5.66	20.37	75.65
4.76	4.21	79.86
3.36	4.27	84.13
2.38	3.67	87.80
1.68	1.97	89.77
1.19	1.40	91.17
0.84	1.56	92.73
0.59	0.89	93.61
0.42	1.04	94.65
0.297	0.66	95.31
0.210	0.92	96.23
0.149	0.90	97.13
0.105	0.66	97.78
0.074	0.54	98.32
0.074	1.62	99.93

Tabela V.- Análise Granulométrica do Material Britado à 3/4".

Malha	Retido	Acumulado
(mm)	%	%
25.40	5.88	5.88
19.05	42.19	48.07
12.50	14.28	62.35
5.66	22.33	84.68
4.76	3.37	88.05
3.36	2.74	90.79
2.38	2.14	92.93
1.68	1.23	94.16
1.19	0.65	94.81
0.84	0.93	95.74
0.59	0.61	96.35
0.42	0.63	96.98
0.297	0.39	97.37
0.210	0.42	97.79
0.149	0.52	98.31
0.105	0.37	98.68
0.074	0.16	98.84
0.074	1.12	99.96

Tabela VI - Análise Granulométrica do Material Britado à 1".

Malha	Retido	Acumulado
(mm)	%	%
50.8	8.58	5.58
38.1	18.0	26.58
25.40	29.0	55.58
19.05	17.06	72.64
12.50	11.85	84.49
5.66	6.79	91.28
4.76	1.27	92.55
3.36	1.48	94.03
2.38	1.08	95.11
1.68	0.73	95.84
1.19	0.48	96.32
0.84	0.56	96.88
0.59	0.38	97.26
0.42	0.47	97.73
0.297	0.32	98.05
0.210	0.37	98.42
0.149	0.44	98.86
0.105	0.29	99.15
0.074	0.15	99.30
0.074	0.67	99.97

Tabela VII - Análise Granulométrica do Material Britado à 2".

Como se observa nos gráficos das Figuras 8, 9, 10 e 11 ocorreu inicialmente uma dissolução de cobre acarretada principalmente pela lixiviação química das espécies menos resistentes à oxidação. Concomitantemente ocorreu em grande parte a remoção dos constituintes consumidores de ácido.

Com o decorrer do tempo, observa-se que a evolução das concentrações de cobre decresce para todas as granulometrias testadas e este decréscimo é mais acentuado com o aumento do tamanho da partícula. Este fenômeno pode ser explicado por um dos seguintes fatores ou pela combinação destes:

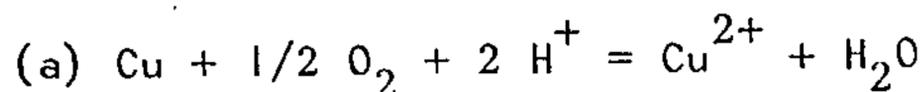
- a extração e função da área exposta.
- pouca porosidade do minério associada ao fato da maioria dos minerais de cobre se encontrarem ilhados ou envolvidos por uma massa compacta com ausência de fraturas ou linhas de clivagem.
- a extração é controlada pelo fenômeno de difusão dos agentes oxidantes no interior das partículas e difusão das espécies solubilizadas para o seio da solução.
- o principal mineral portador de cobre é a calcopirita que é um dos mais resistentes à oxidação.

- ciclos da bactéria, correspondendo a taxa de lixiviação máxima ao período de crescimento ativo (log phase).

De certa forma, cada um destes fatores contribuem para a cinética da extração do cobre, e somente operando-se com quantidades maiores e por maior espaço de tempo se pode fazer uma real avaliação do processo.

### 5.2.3 - pH

A presença de pirita, hidrólise de  $Fe^{3+}$  e a atuação da bactéria, geralmente resulta em um decréscimo do pH da solução pela geração de ácido e normalmente este efeito faz-se notar após um determinado tempo. No início do processo, durante a fase de estabilização do minério, o consumo de ácido é grande, exigindo um ajuste do pH em curtos intervalos de tempo. Devido a presença no minério de carbonato e outros agentes consumidores de ácido, o consumo deste tem-se apresentado um pouco elevado para fins comerciais. Por outro lado, deve-se levar em consideração que este consumo refere-se a 4 meses de operação e que a extração de cobre deve aumentar com o tempo, não ocorrendo um aumento com relação a adição de ácido. Isto sugere que as seguintes reações ocorrem ao mesmo tempo:



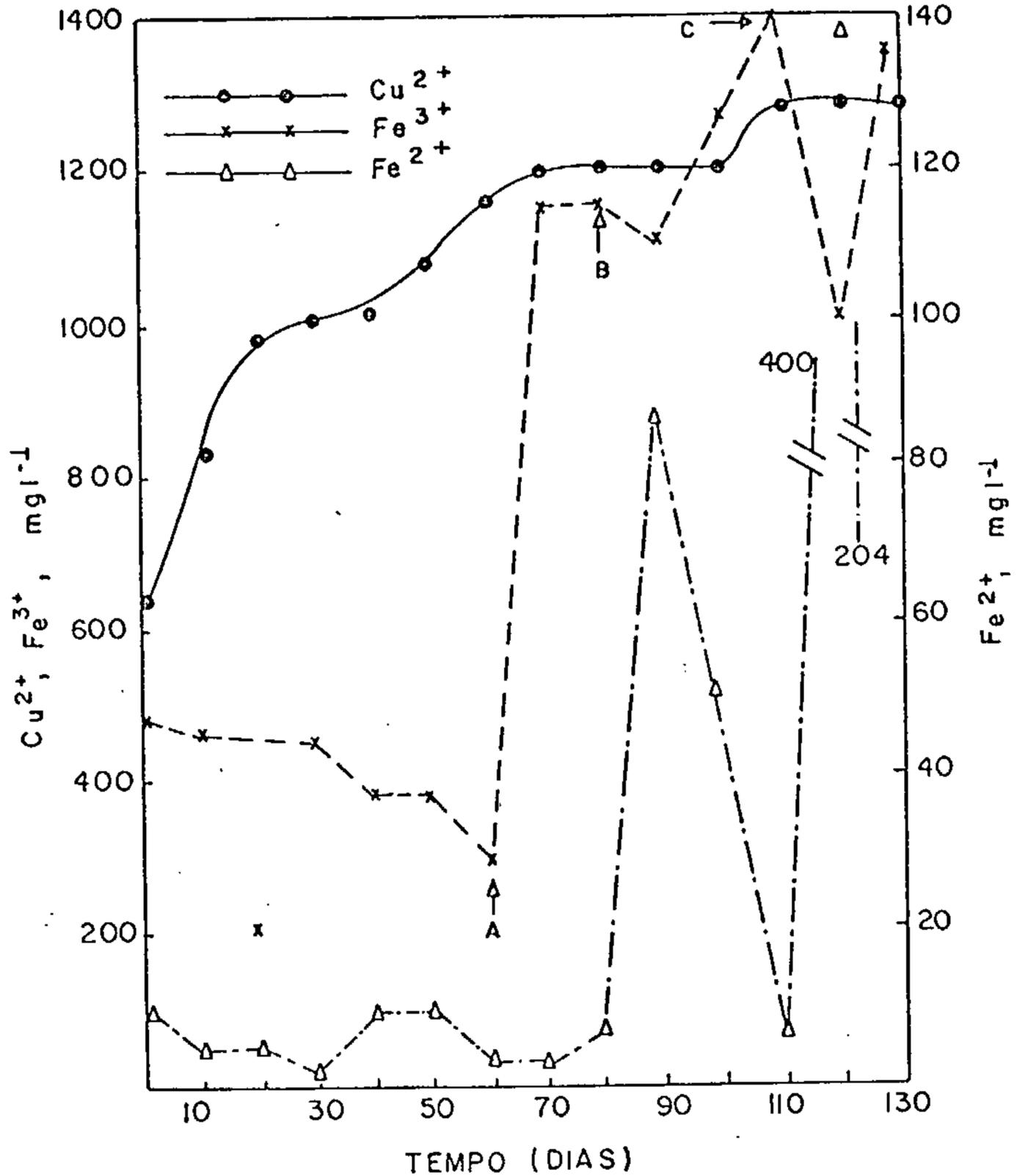


FIG. 8 -EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DE 50 kg DE SULFETO DE COBRE DE BAIXO TEOR. GRANULOMETRIA DE 3/4"

A - SUPRIMENTO EXTERNO DE  $\text{Fe}^{3+}$

B - CEMENTAÇÃO

C - REDUÇÃO DO  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  c/  $\text{SO}_2$

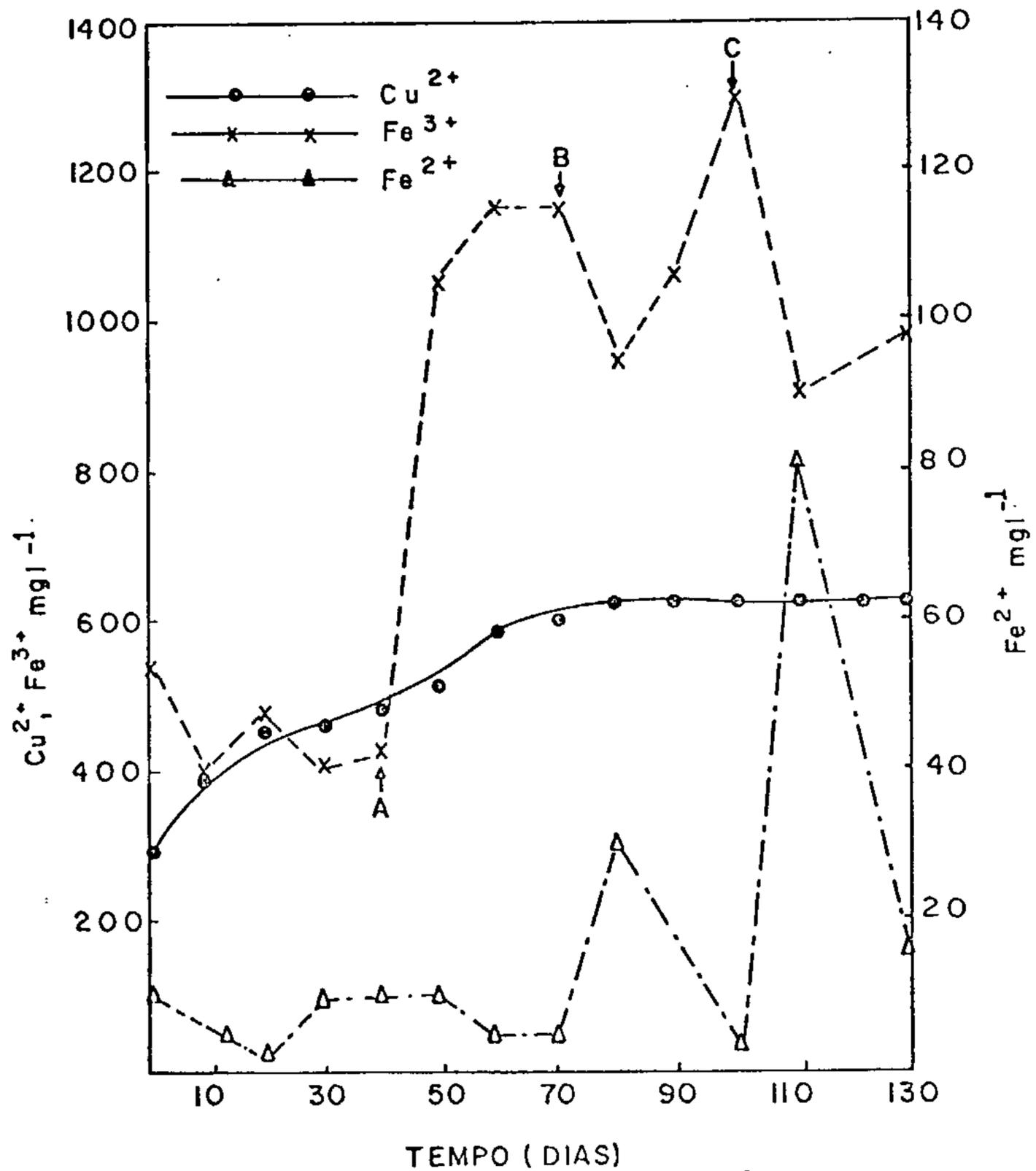


FIG. 9 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DA  
 $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA  
 DE 50 kg DE SULFETO DE COBRE DE  
 BAIXO TEOR DE GRANULOMETRIA 1"

- A - SUPRIMENTO EXTERNO DE  $\text{Fe}^{3+}$   
 B - CEMENTAÇÃO  
 C - REDUÇÃO DO  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  c/  $\text{SO}_2$

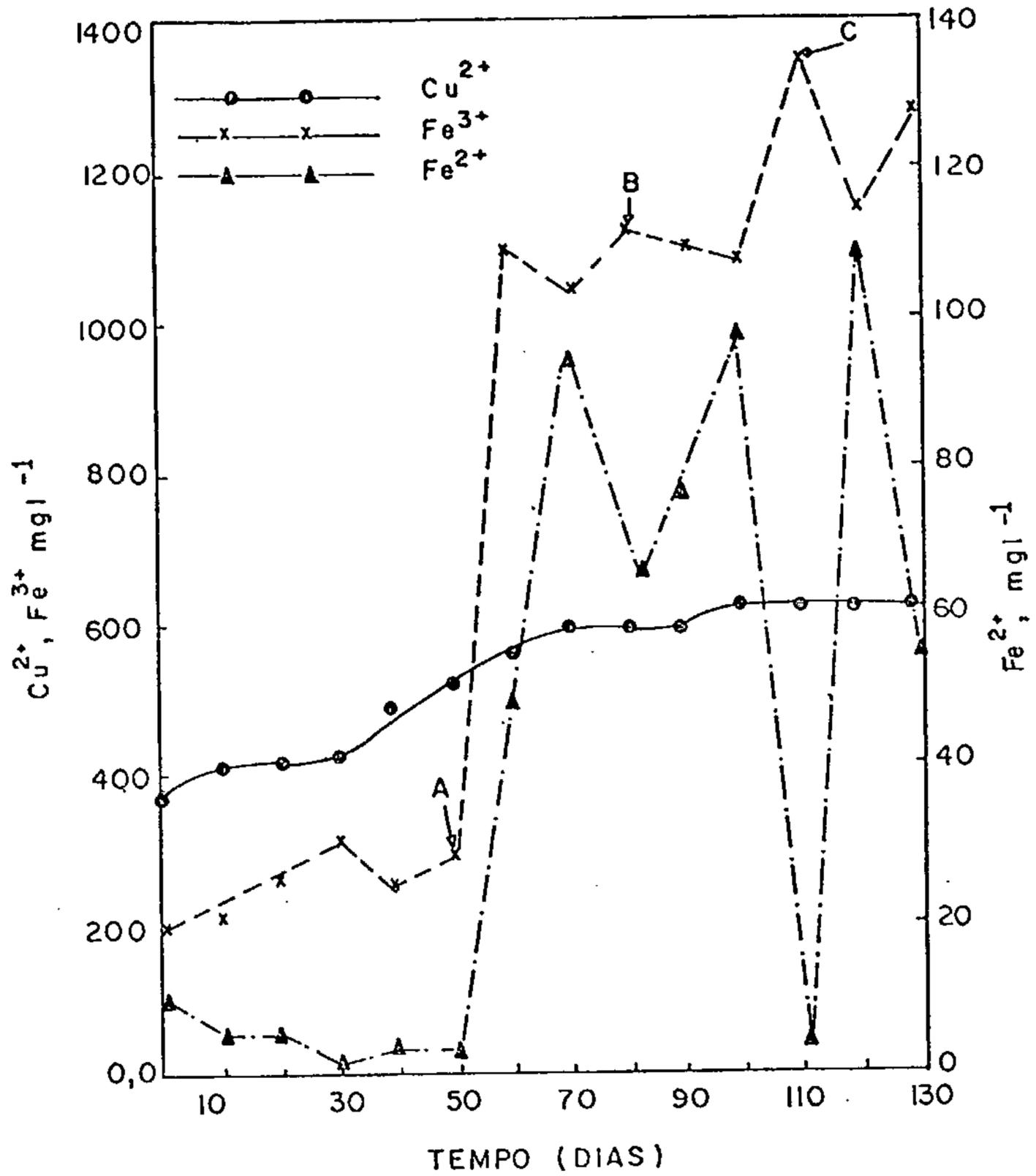


FIG. 10 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DE 50 kg DE SULFETO DE COBRE DE BAIXO TEOR. GRANULOMETRIA 2"

- A - SUPRIMENTO EXTERNO DE  $\text{Fe}^{3+}$   
 B - CEMENTAÇÃO  
 C - REDUÇÃO DO  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  c/  $\text{SO}_2$

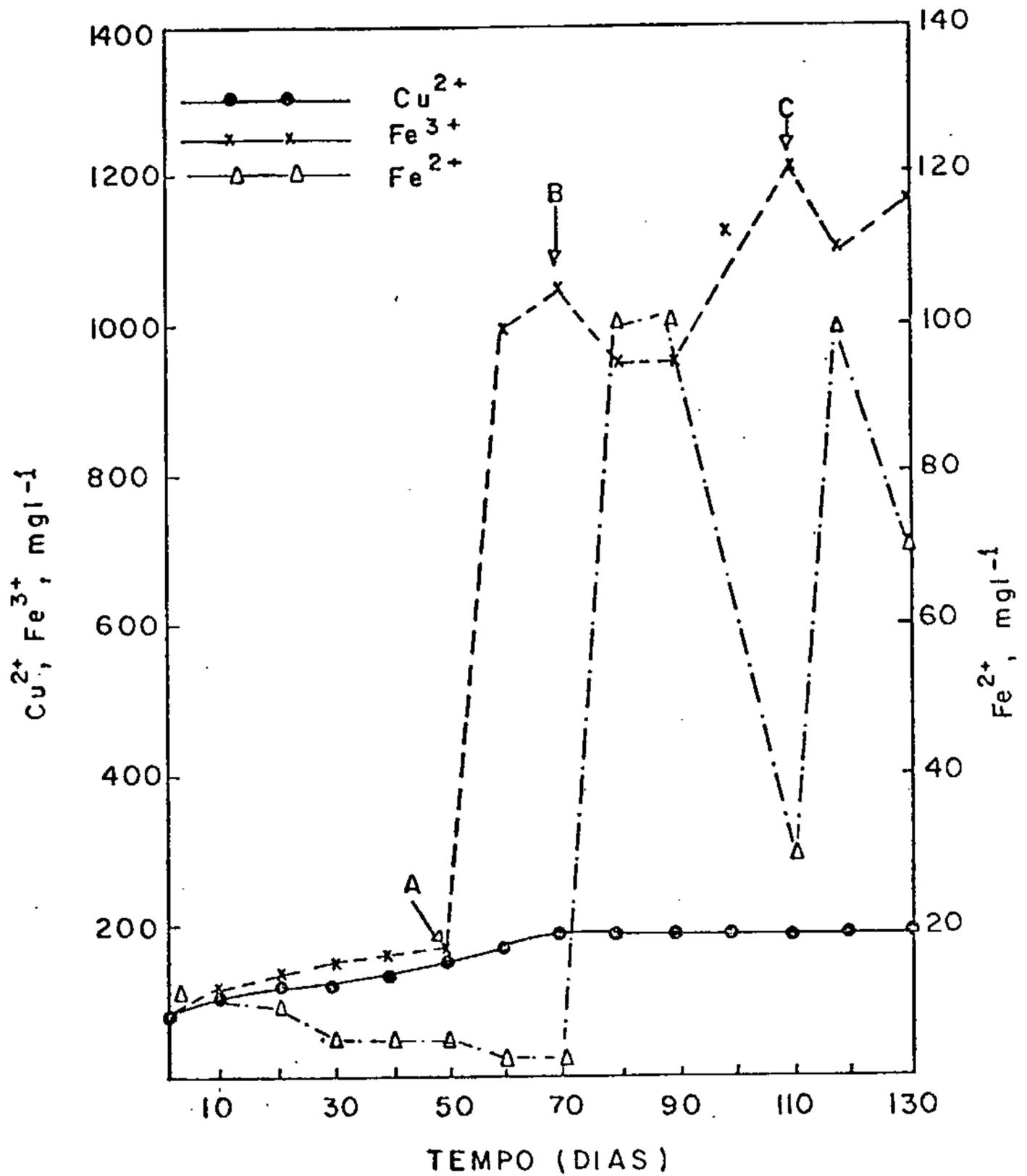


FIG. 11 - EVOLUÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DE 50 kg DE SULFETO DE COBRE DE BAIXO TEOR. GRANULOMETRIA 5" - 6"

- A - SUPRIMENTO EXTERNO DE  $\text{Fe}^{3+}$
- B - CEMENTAÇÃO
- C - REDUÇÃO DO  $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$  c/  $\text{SO}_2$

(b)  $S + 1 \frac{1}{2} O_2 + H_2O = 2 H^+ + SO_4^{2-}$  sen  
do que a reação (b) é catalisada pela bactéria.

Nos gráficos representados nas Figuras 12, 13, 14 e 15 pode-se observar a variação da concentração de  $H^+$  em função do tempo, para as granulometrias testadas.

#### 5.2.4 - Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup>

A presença de ions  $Fe^{2+}$  em solução, é fundamental para a subsistência da bactéria por se tratar de sua fonte de energia. Por outro lado, também é importante que se tenha ions  $Fe^{3+}$  pois o mesmo atua como agente oxidante possibilitando a dissolução dos sulfetos.

Para que isto ocorra, é necessário que exista um equilíbrio entre as concentrações de  $Fe^{3+}$  e  $Fe^{2+}$  a fim de que se possa operar dentro da faixa ótima de crescimento das bactérias como se pode observar pelo gráfico representado na Figura 16.

O aumento da concentração de ions  $Fe^{3+}$  ocasionado por suprimento externo, não provocou alterações sensíveis na extração de cobre, chegando mesmo a permanecer estacionária para as granulometrias superiores a 3/4". Por outro lado, ainda observa-se pelos gráficos 12, 13, 14 e 15 que o ion ferroso é rapidamente oxidado pela bactéria para ion férrico, propiciando com isto um alto potencial de oxidação (750-850 mV), o que teóricamente deveria favorecer a oxidação dos

sulfetos e conseqüente dissolução do metal. Contudo, este fenômeno não foi verificado na prática, embora se tenha bactéria e ions férricos em solução. Diante deste fato, depreende-se que a velocidade de reação de solubilização do cobre pelo  $Fe^{3+}$  é muito lenta em relação à oxidação de  $Fe^{2+}$  pela bactéria, fazendo com que as condições de operação não correspondam às condições ótimas representadas na Figura 16.

- A bactéria e o ar, ao que tudo indica, tem atuação mais eficaz como agentes oxidantes do que ions férricos.

#### 5.2.5 - Potencial Redox

A atividade máxima e conseqüentemente a lixiviação, ocorrerá quando as micro e macro condições ambientais forem convenientemente ajustadas.

A lixiviação bacteriológica do enxofre e ferro pode ser considerada como um processo de transferência de energia onde a energia obtida do meio ambiente como elétrons, passa através do sistema da bactéria e retorna ao meio ambiente sob uma outra forma de potencial. O sistema metabólico da bactéria é tal que esta transferência de energia para a fonte orgânica, em última instância, deve ser na forma de elétrons e ions hidrogênios. Em um meio inorgânico a disponibilidade e nível de energia destas partículas são descritos pelos valores de Eh e pH. (7).

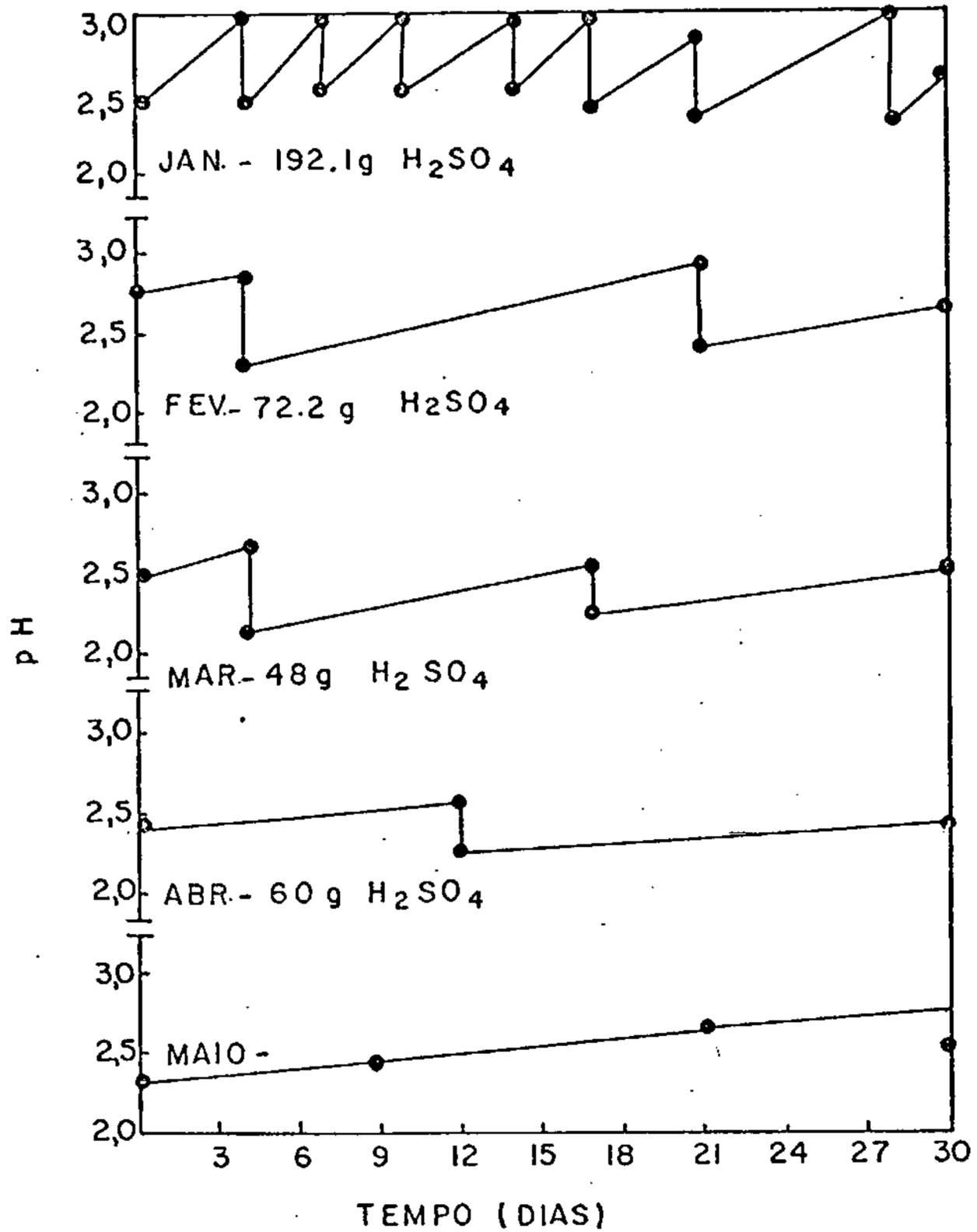


FIG. 12 VARIAÇÃO DA CONC. DE H<sup>+</sup> COM O TEMPO NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DO MATERIAL BRITADO À 3/4".

REL. gH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / g Cu = 11.45

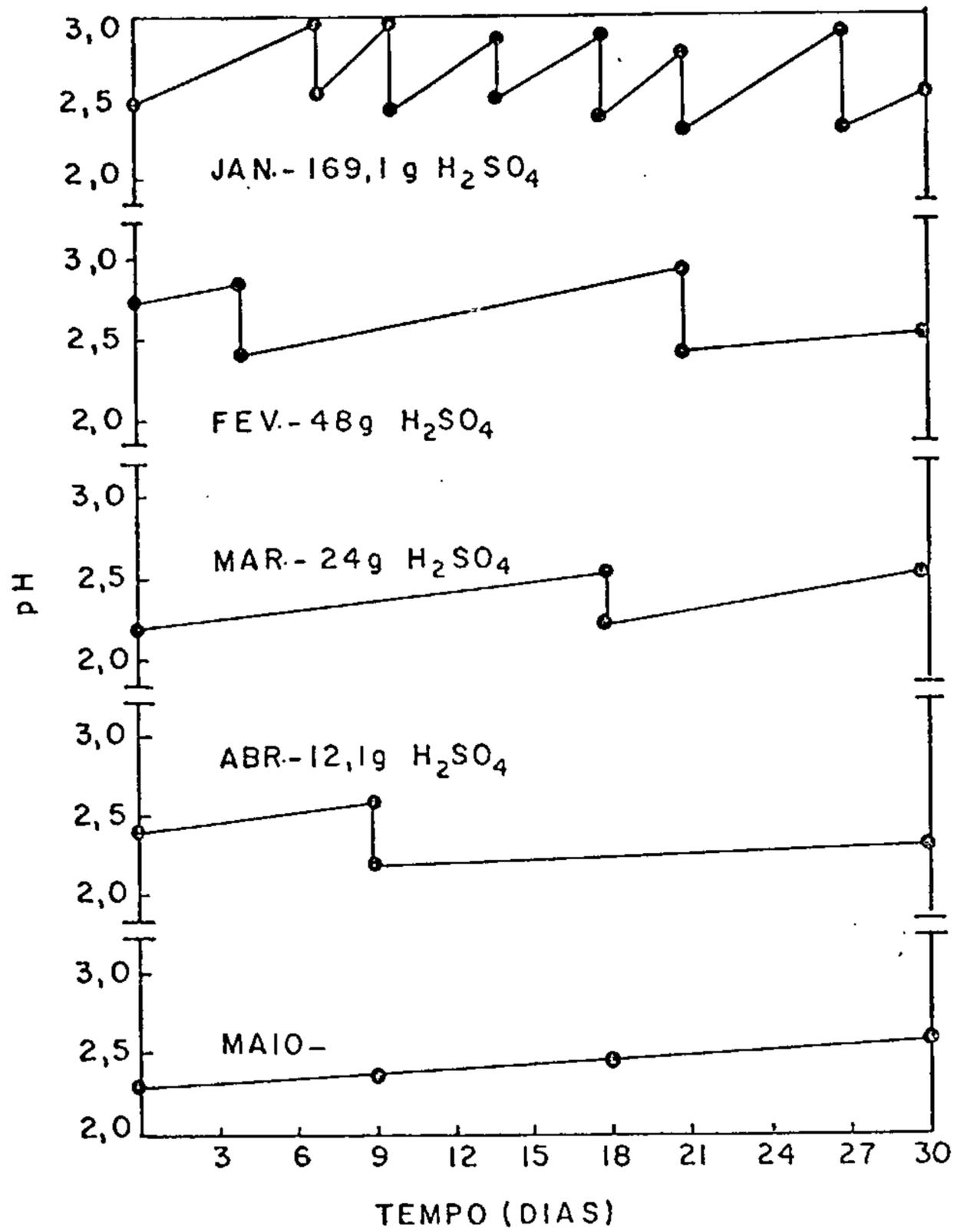


FIG. 13 - VARIACÃO DA CONC. DE H<sup>+</sup> COM O TEMPO NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DO MATERIAL BRITADO À 1"

REL. g H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / g Cu = 16,3

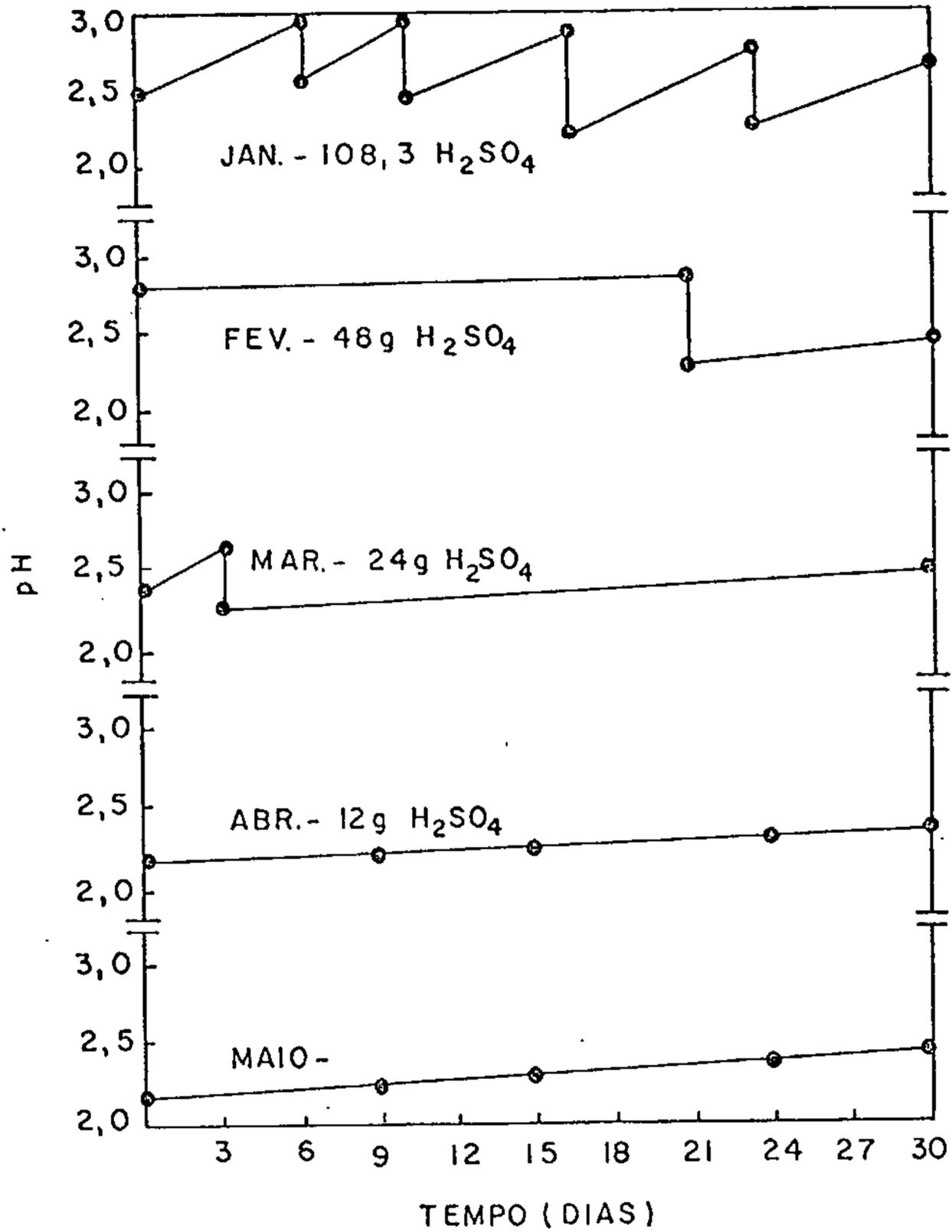


FIG. 14 - VARIAÇÃO DA CONC. DE  $H^+$  COM O TEMPO, NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DO MATERIAL BRITADO À 2"

REL.  $g H_2SO_4 / g Cu = 12,4$

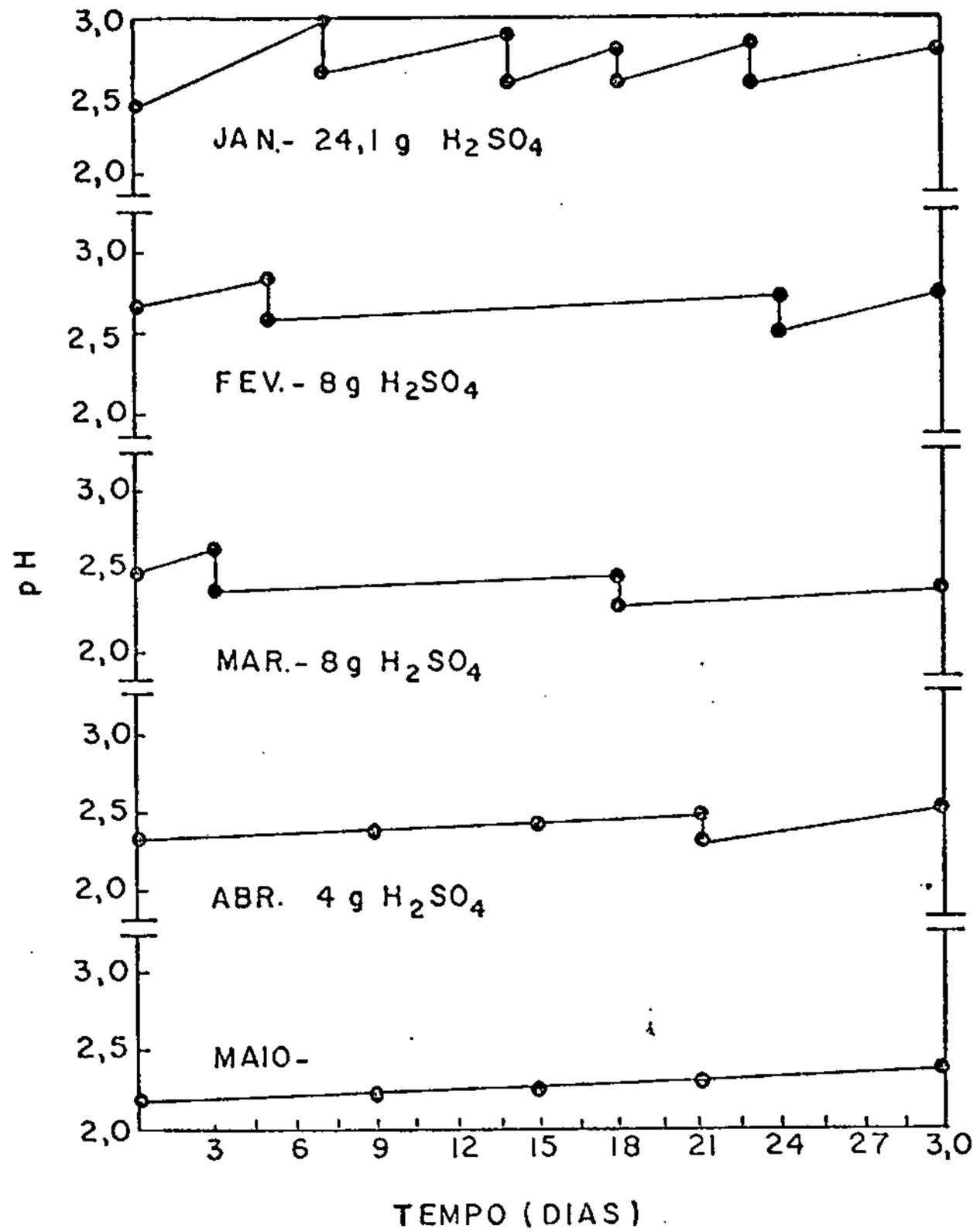


FIG.15 - VARIACÃO DA CONC. DE  $H^+$  COM O TEMPO NA LIXIVIAÇÃO BACTERIANA DO MATERIAL À 5 - 6"

REL. g  $H_2SO_4$  / g Cu = 9,3

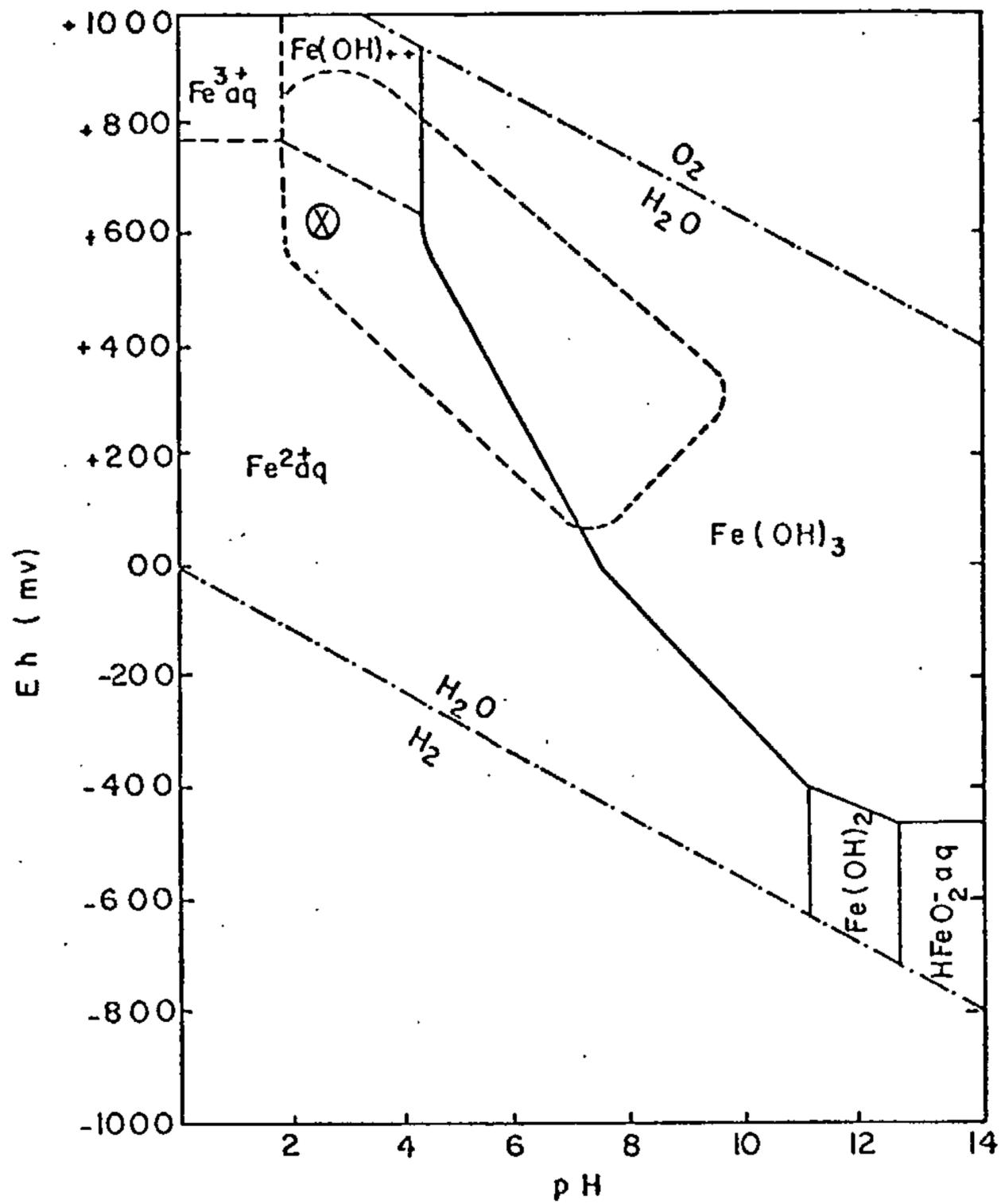


FIG. 16 - RELAÇÃO DO SISTEMA FERRO PARA O LIMITE DE CRESCIMENTO DA BACTERIA E CONDIÇÕES OTIMAS DE OPERAÇÃO A 25 °C.

----- LIMITE DO CRESCIMENTO DA BACTERIA.

Embora as melhores condições de operação sejam ditadas pelas características do minério, o valor do Eh deve ser mantido dentro da faixa 550 - 650 mv e o pH entre 2.3-3.0.

Pela equação de Nernst,

$$E = E^{\circ} + 0.0591 \cdot \log \frac{Fe^{3+}}{Fe^{2+}}$$

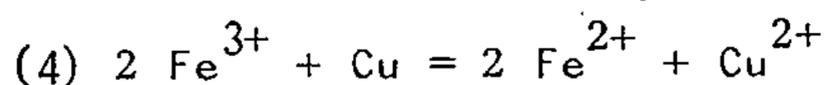
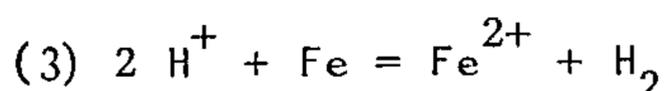
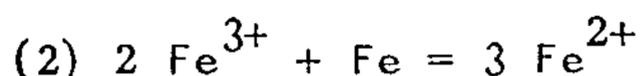
Observa-se que o valor do potencial de oxi-redução é função exclusiva das concentrações dos íons férrico e ferroso em solução. Nos testes que vêm sendo realizados em colunas, o valor do Eh tem-se mantido na faixa de 750-850, devido a maior concentração de  $Fe^{3+}$  em solução.

As condições atuais de operação podem ser vistas no gráfico da Figura 17.

A maneira menos dispendiosa de se introduzir ion ferroso em solução é operando-se em circuito com a cementação. Desta forma, a solução é esgotada em seus teores de cobre e ferro férrico, aumentando os teores de ferro ferroso e o pH. Este último é ajustado e a solução retorna ao circuito de lixiviação. Alguns exemplos de plantas industriais podem ser vistos na Tabela VIII.

### 5.2.6 - Redução com SO<sub>2</sub>

Algumas plantas, como é o caso de Rio Tin<sub>to</sub> e outras, utilizaram-se do SO<sub>2</sub> para reduzir o Fe<sup>3+</sup> para Fe<sup>2+</sup> na solução matriz, antes de se processar à cementação. Este procedimento tem por objetivo evitar um maior consumo de ferro metálico como se observa nas equações abaixo:



As reações (2) e (3) consomem ferro, resultando em um alto consumo.

Termodinamicamente demonstra-se que a reação (3) ocorre quando a concentração de Cu<sup>2+</sup> é muito baixa e as reações (2) e (4) são relativamente rápidas.

Com o intuito de se diminuir a concentração de ferro férrico nas lixívias e aumentar o teor de ions Fe<sup>2+</sup>, procedeu-se à redução com SO<sub>2</sub>. Os resultados podem ser melhor analisados na Tabela IX e Figura 18. Observa-se que em um tempo relativamente curto, todo o Fe<sup>2+</sup> foi oxidado pela bactéria e o Eh e pH voltaram às condições iniciais.

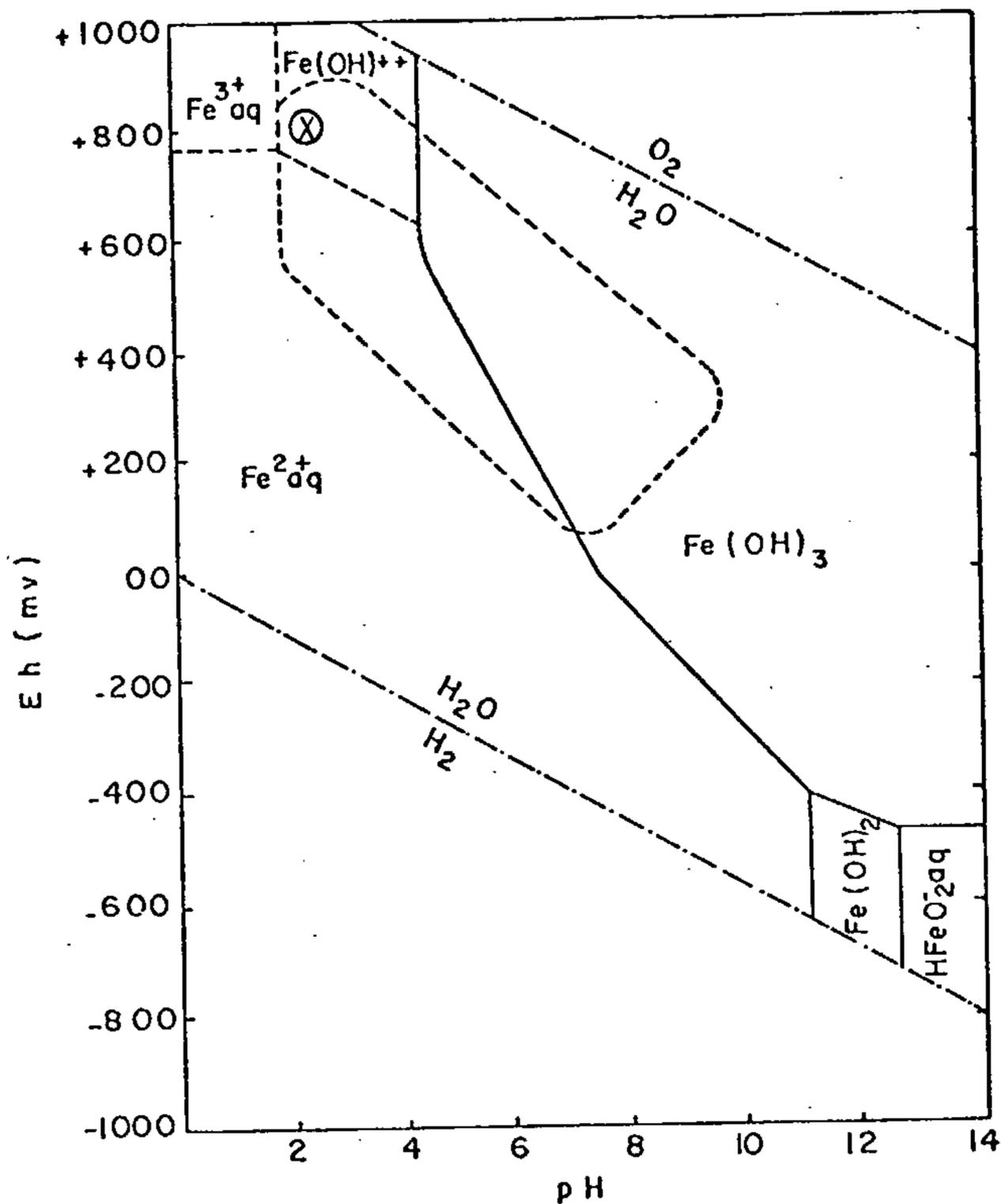


FIG. 17 -RELAÇÃO DO SISTEMA FERRO PARA O LIMITE DE CRESCIMENTO DA BACTERIA E CONDIÇÕES ATUAIS DE OPERAÇÃO A 25 °C.

----- LIMITE DO CRESCIMENTO DA BACTERIA.

Planta	Efluente do Monte					Solução Após Cementação				
	pH	Cu gl <sup>-1</sup>	Fe <sup>2+</sup> gl <sup>-1</sup>	Fe <sup>3+</sup> gl <sup>-1</sup>	Perda %	pH	Cu gl <sup>-1</sup>	Fe <sup>2+</sup> gl <sup>-1</sup>	Fe <sup>3+</sup> gl <sup>-1</sup>	gal min <sup>-1</sup>
Bagdad	2.5	1.1	0.03	2.0	7	2.0	0.02	4.0	0.2	3.500
Cananea	2.0	1.5	6.0	12.0	5	2.75	0.75	20.0	2.2	1.200
Chino	2.5	2.0	0.9	0.8	6	3.5	0.2	3.5	0.1	11.000
Copper Queen	2.0	1.4	3.5	3.0	1	3.5	-	10	-	2.100
Esperanza	2.6	1.1	0.01	0.1	5	3.5	TR	1.3	0.1	1.000
Inspiration	1.9	1.9	3.3	2.7	7	2.65	0.24	5.0	0.5	
Ray	2.4	1.0	0.7	1.3	10	3.4	0.08	2.4	0.06	5.000
Silver Bell	2.4	1.1	0.01	0.6	5	3.3	0.01	1.7	0.04	900
Utah	2.5	1.2	1.0	1.0		2.4	01.	2.5	0.02	2.000

Tabela VIII - Detalhe de Lixiviação em Montes

Fonte: Proc. Aust. Inst. Min. Met., nº 224, Dec. 1967.

### 5.2.7 - Molhabilidade e Oxigenação

No processo de lixiviação bacteriológica, o ar exerce grande influência na atuação da bactéria. Ao contrário da lixiviação de oxidados, o tempo de contato líquido/sólido é bem pouco, suficiente apenas para molhar as partículas. Após esta etapa, faz-se a aeração por um período de 120 min. com o ar à 30-35°C e vazão de 20 l min<sup>-1</sup>.

A solubilidade do oxigênio na água é de somente 8 ppm à temperatura ambiente, daí a necessidade de se trabalhar alternadamente permitindo maior contato do minério com o ar.

Granulometria	Eh	pH	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	t	SO <sub>2</sub>	Eh	pH	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>
	(mv)		mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>			(mv)		mg l <sup>-1</sup>	mg l <sup>-1</sup>
3/4"	753	2.50	12	1508	3	345	643	2.35	321	1173
1"	830	2.55	-	950	4	460	644	2.30	272	726
2"	835	2.48	-	1117	3	345	657	2.29	216	894
5.6"	834	2.39	-	1005	4	460	674	2.20	228	782

Tabela IX - Condições das Lixívias Antes e Após Redução com SO<sub>2</sub>.

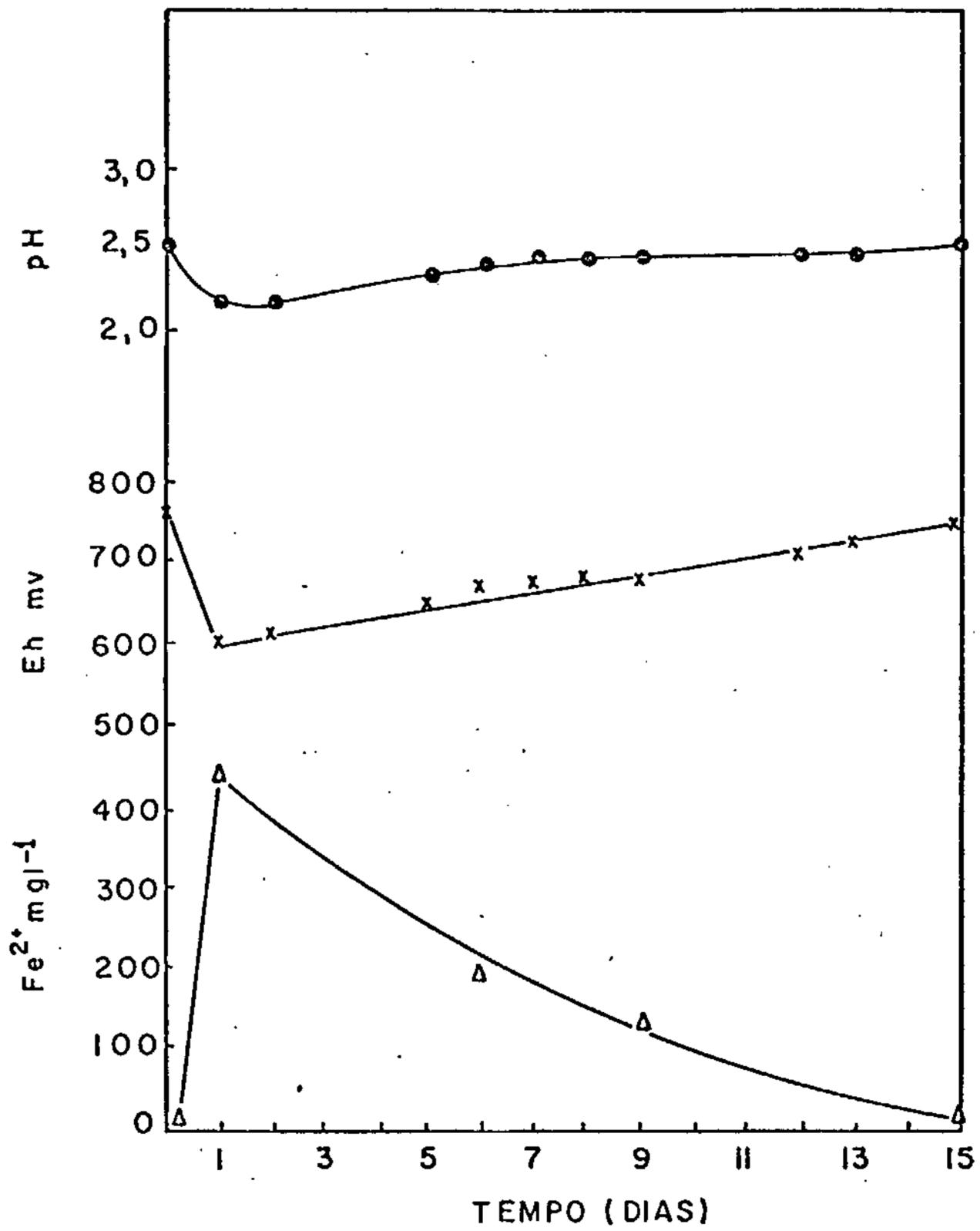


FIG.18 - VARIACÃO DO Eh, pH e Fe<sup>2+</sup> APÓS REDUÇÃO DO Fe<sup>3+</sup> COM SO<sub>2</sub>.

Granulometria	Condições de Lixiviação	Tempo	Cu Contido	Cu Extraído	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Adicionado	Consumo	Extração
		dias	(g)	(g)	(g)	g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /g Cu	(%)
0,105 mm	ideais	30	2.0	1.02	14.7	14.4	51.00
1/2"	Percolação	130	2.0	0.72	4.4	6.1	36.00
3/4"	Percolação	130	200.0	32	372.0	11.60	16.00
1"	Percolação	130	200.0	15.5	253.0	16.30	7.75
2"	Percolação	130	200.0	15.5	192.0	12.40	7.75
5.6"	Percolação	130	200.0	4.75	44.0	9.3	2.40

Tabela X - Dados Comparativos dos Resultados Obtidos

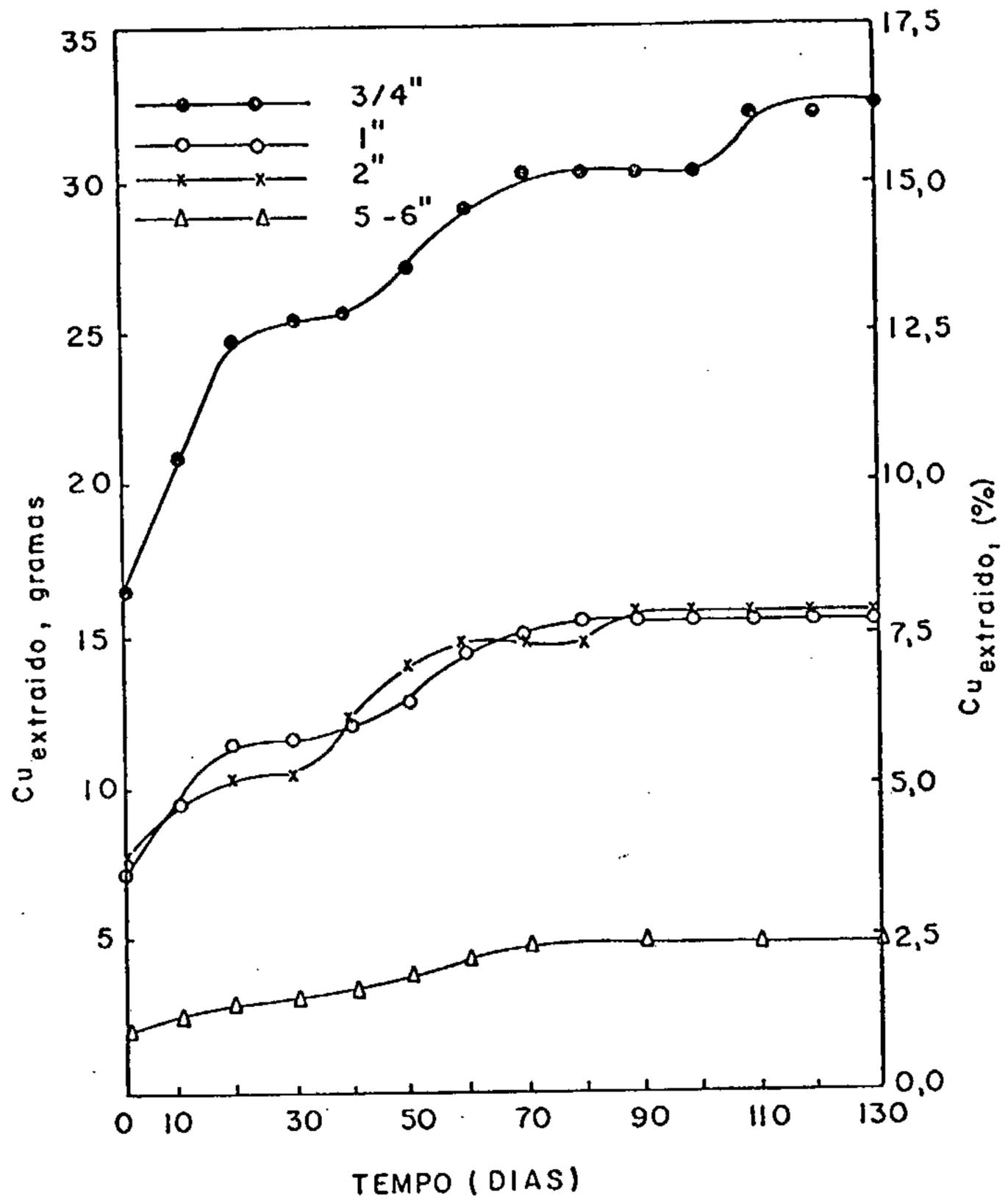


FIG.19 - EXTRAÇÃO DE COBRE (g, %) EM RE-  
LAÇÃO AO TEMPO (DIAS), PARA AS  
DIVERSAS GRANULOMETRIAS.

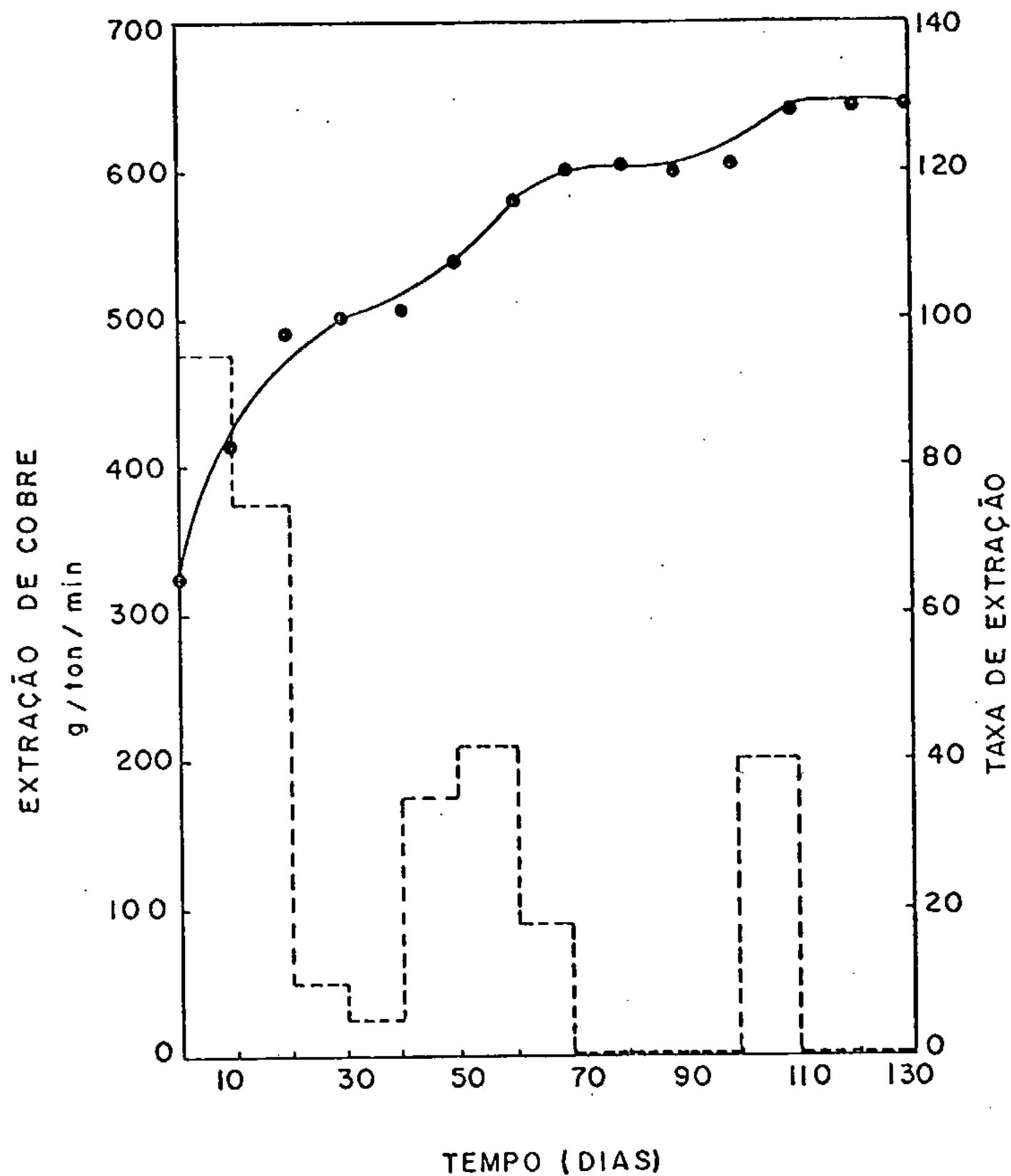


FIG. 20 -EXTRAÇÃO E TAXA DE EXTRAÇÃO DE COBRE PARA 1 ton. DE MINÉRIO. GRA NULOMETRIA 3/4".

## 6. CONCLUSÕES

Analisando-se a Tabela X e o gráfico representado na Figura 19, conclui-se que o minério conforme recebido, na granulometria entre 5-6", tem que sofrer uma redução de tamanho para 3/4" para que os resultados apresentem alguma significância. Embora a granulometria de 1/2" tenha apresentado melhores resultados, também apresentou 48% de material abaixo de 1/4" o que é considerado muito alto, pois dificultaria sobremaneira a percolação da lixívia e passagem de ar.

Quanto ao consumo de ácido, este pode ser reduzido com a presença de pirita além da contida no próprio minério. Por outro lado, acredita-se que com o decorrer do tempo a extração de cobre vai aumentando sem haver necessidade de de adição de ácido, uma vez que o tempo de trabalho foi relativamente curto para este tipo de processo.

Quando se operou com alto potencial de oxidação (750-850 mm), as bactérias cessaram sua atividade, indicando que para o minério em questão o controle do Eh é importante.

A presença de ions  $Fe^{2+}$  na lixívia pode ser assegurada, trabalhando-se em circuito com a cementação ou mesmo reduzindo-se o  $Fe^{3+}$  com  $SO_2$ . A presença do ion ferroso em solução é importante para que se mantenha o Eh na faixa

ótima de atuação da bactéria.

A presença do ar é de grande importância no processo pois este juntamente com a bactéria mostraram grande eficiência na oxidação dos sulfetos.

Para a granulometria de 3/4" o minério a apresentou um valor médio de 5 g/ton/dia de taxa de extração para um período de 130 dias (Fig. 20).

No período dos testes, a concentração da solução efluente atingiu concentração de cobre entre 1 - 2  $gl^{-1}$  que é a usualmente utilizada nas plantas industriais para alimentação da cementação..

Em escala de laboratório o processo de bio-lixiviação apresentou-se viável, contudo, somente operando-se com quantidades maiores (pilhas) e no próprio local da mina e por um período maior, se poderá avaliar técnica e economicamente a viabilidade do processo.

## BIBLIOGRAFIA

- 1 . LEATHEN, W., KINSEL, N. and BRALEY S. - *Ferrobacillus*.  
Ferrooxidans, a Chemmosynthetic Autotrophic Bacterium.  
*Journal of Bacteriology*, 72, 700 (1956).
- 2 . COSENDEY, S. - RC nº 03/80. Centro de Tecnologia Mineral-  
CETEM.
- 3 . DAVID J. FISCHER et AL.- Midwest Research Inst. Kansas  
City, Missouri; Electrochemical Observations in Micro-  
biological Process - Growth of *Thiobacillus Thiooxidans*;  
*Biotechnology and Bioengineering*, Vol. VII pages 471 -  
490 (1965).
- 4 . M.S. MCDONALD, M.P. CROWLEY and P.E.M. Clinch Botany De-  
partment, University College, Dublin Micro-Kjeldahl Ap-  
paratus and Digestion Procedure. LABP 20-32. Apparatus  
and Devices pp. 239-240.
- 5 . A. BRUYNESTEYN; D. W. DUNCAN - The Practical Aspects of  
Biological Leaching Dumps.  
XII<sup>th</sup> International Mineral Processing Congress Meeting  
9, paper 3.  
São Paulo - Brasil, 1977.
- 6 . HYDROMETALLURGY, A SHORT COURSE SPONSERED BY THE TMS CON-  
TINUING EDUCATION COMMITTEE.  
*Principles of Hydrometallurgy*; M. E. WADSOWRTH.

- 7 . F. J. MOSS and J. E. ANDERSEN - Bacterial Leaching, The Effects of Environment on Leaching Rates. The Australian Inst. of Min. Met. Proceedings. March 1968 nº 225.
- 8 . J. T. WOODCOCK = Copper Waste Dump Leaching Proc. Aust. Inst. Min. Met. Nº 224, Dec. 1967.
- 9 . J. F. OLIVEIRA - Thiobacillus Ferrooxidans na Lixiviação do Minério de Cobre, IIIº Encontro Nacional de Tratamento de Minérios - 22-24 maio 1975 BH, Brasil.
10. SÍLVIA VAISBICH, MARIA LUIZA MORAES PINTO e WALTER BORZANI - Lixiviação Bacteriana de Rejeito de Minério de Cobre de Camaquã Pela Ação de Bactéria Isolada do Próprio Rejeito. Revista Brasileira de Tecnologia. Volume 10 , 1979.
11. N. W. LE ROUX, A.A. NORTH, J. C. WILSON - Bacterial Oxidation of Pyrite - Warren Spring Laboratory, Department of Trade and Industry, Stevenage, Hertfordshire England.
12. SME - Short Course Bio Extractive Mining, Denver, Colorado, February, 1970.

Relatório Elaborado por:

- Vicente Paulo de Souza

Trabalho Experimental por:

- Vicente Paulo de Souza

- Sidney Frankel

Supervisão de:

- Juliano Peres Barbosa

Período:

- Janeiro a Maio de 1980

Superintendente do CETEM

Roberto C. Villas Bôas

Departamento de Processos

- José Farias de Oliveira

Divisão de Metalurgia Extrativa

- Juliano Peres Barbosa