

## CARACTERIZAÇÃO DE ESCÓRIA DE FERRO-CROMO COMO AGREGADO GRAÚDO PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO

Antônio F. da Silva Filho\*

Washington A. Moura\*\*

Rôneison da Silva Leite\*\*\*

**RESUMO** — *A questão ambiental tem sido motivo de ampla discussão em nível nacional e internacional, face à exploração desenfreada dos recursos naturais e à enorme geração de resíduos por parte da indústria. A reciclagem de resíduos sólidos é uma das formas de atenuar o problema, reduzindo, por conseguinte, o impacto ambiental. Esta pesquisa objetivou caracterizar a escória de ferro-cromo como agregado graúdo para a produção de concreto. Os estudos desenvolvidos consistiram na caracterização química, mineralógica, ambiental, física e quanto à reatividade da escória de ferro-cromo. Vale ressaltar que foi efetuada uma criteriosa avaliação do risco ambiental do uso da escória de ferro-cromo, face à presença, em sua constituição química, do cromo e da possibilidade de ocorrência de outros metais pesados. Os resultados dos ensaios demonstram que a escória de ferro-cromo apresenta características compatíveis com as de agregado graúdo convencional para concreto.*

**PALAVRAS-CHAVE:** *Escória de Ferro-cromo; Reciclagem de Resíduo Sólido; Concreto.*

**ABSTRACT** — *Environmental issues have been widely discussed both nationally and internationally, considering the uncontrolled exploitation of natural resources and the consequent generation of waste. Recycling*

---

\*Prof. Assistente, DTEC (UEFS). Engenheiro Civil. Mestre em Engenharia Civil. E-mail: tec@uefs.br

\*\* Prof. Adjunto, DTEC (UEFS). Engenheiro Civil. Doutor em Engenharia Civil (UFRGS). E-mail: wam@uefs.br

\*\*\* Graduando em Engenharia Civil. Bolsista de Iniciação Científica, LABOTEC (UEFS). E-mail: roneisons@hotmail.com  
Universidade Estadual de Feira de Santana – Dep. de Tecnologia.  
Tel./Fax (75) 224-8056 – BR 116 – KM 03, Campus - Feira de Santana/BA – CEP 44031-460.

*solid waste is one of the ways of attenuating this problem, reducing the environmental impact. Our research has evaluated the possibility of the utilization of ferro-chromium slag as a coarse aggregate for concrete production. The studies which have been developed consisted of environmental, physical, chemical and mineralogical risk characterization. It is important to emphasize that in this research an accurate evaluation has been made of the environmental risk in the use of ferro-chromium slag, given the presence, in its chemical constitution, of chromium, and also the possibility of the occurrence of other heavy metals. Considering the results which have been obtained, one may verify that there are similar characteristics between ferro-chromium slag and natural coarse aggregate used for concrete production.*

**KEY WORDS:** *Ferro-chromium Slag; Recycling Solid Waste; Concrete.*

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil o macrossetor da Construção Civil é responsável por 14,8% do PIB - Produto Interno Bruto (CIC, 1999), representando um importante segmento da economia do país. Entretanto, é a indústria da Construção Civil a responsável por 14 a 50% do consumo dos recursos naturais consumidos pela sociedade em todo o planeta (SJOSTROM, apud JOHN, 2000).

Sendo o concreto um dos materiais mais consumidos pelo homem e, considerando que cerca de 70% do mesmo é constituído de agregado, é bastante relevante a preocupação da população com a extração de agregados naturais. Segundo JOHN (2000), cerca de 210 milhões de toneladas desses agregados são consumidos anualmente, no Brasil, somente na produção de concretos e argamassas.

A reciclagem de resíduos é primordial para a preservação do meio ambiente, não só pela redução do risco de contaminação do solo e do lençol freático, mas, sobretudo, pela possibilidade de redução de custo e de consumo de energia na Construção Civil.

A Construção Civil, ao mesmo tempo que é uma grande geradora de resíduos, é também, potencialmente, uma grande recicladora de resíduos originários de indústrias, tais como: siderurgia, química e petroquímica.

Em cidades, como, Feira de Santana e Salvador, no Estado da Bahia, a escassez de agregados graúdos implicará o transporte de britas a distâncias de cerca de 100km, o que tornará o preço desse insumo bem mais elevado.

Na Bahia, a Companhia de Ferro Ligas da Bahia S/A produz ligas de ferro-cromo, de cujo processo produtivo obtém-se como resíduo a escória de ferro-cromo. A referida escória é obtida em forno elétrico de redução e tem uma geração média de 9000t por mês.

Considerando a grande quantidade de escória gerada e a necessidade de tornar a Construção Civil um setor promissor na reciclagem de resíduos e, considerando, ainda, resultados preliminares obtidos por uma empresa privada na Bahia, no ano de 1993 (SILVA FILHO, 2001), os quais apontam para a possibilidade de emprego de tal material, esta pesquisa visou caracterizar a escória de ferro-cromo com vistas a sua utilização como agregado graúdo para concreto, enfocando-se os aspectos químico, mineralógico, ambiental, físico e quanto à reatividade.

## **2 METODOLOGIA DA PESQUISA**

Foi realizada uma série de ensaios em amostras de escórias de ferro-cromo visando proceder-se a sua caracterização química, mineralógica, ambiental, física e quanto à reatividade.

A amostragem da escória foi realizada segundo a NBR 10007 ( 1987)- Amostragem de Resíduos- Procedimento.

### **2.1 Caracterização química**

Para determinação da composição química, foram adotados os seguintes métodos:

- Gravimetria ( perda ao fogo,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{SO}_3$ );
- Fotometria de chama ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ );
- Absorção atômica ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ );
- Titulação por complexometria ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e  $\text{MgO}$ ).

## **2.2 Caracterização mineralógica**

Para a caracterização mineralógica, foram realizados os ensaios de difratometria de raios X, utilizando-se difratômetro modelo Siemens D-500, e de determinação do grau de vitrificação, segundo o método modificado da Universidade Mac Master<sup>1</sup>.

## **2.3 Caracterização ambiental**

A caracterização ambiental foi efetuada realizando-se os ensaios de Lixiviação, segundo a NBR 10005 (1987) e de Solubilização, de acordo com a NBR 10006 (1987).

## **2.4 Caracterização física**

A caracterização física foi realizada através dos seguintes ensaios:

- Análise granulométrica – NBR 7217 (1987);
- Massa específica – NBR 9937 (1987);
- Massa unitária – NBR 7251 (1982);
- Absorção – NBR 9937 (1987);
- Abrasão “Los Angeles” – NBR 6465 (1984);
- Índice de forma – NBR 7809 (1986);
- Materiais pulverulentos – NBR 7219 (1987).

### **2.5. Caracterização quanto à reatividade**

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização da escória quanto à reatividade:

- determinação de pirita reativa -ASTM C 641(1971);
- reatividade potencial- NBR 9774 (1987);
- ensaios de avaliação da estabilidade volumétrica:
  - ensaio de dilatação em água- JIS A 5015 (1992);
  - expansão em autoclave – ASTM C 151 (1977);
  - expansibilidade Le Chatelier – NBR 11582 (1991).

## **3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

A seguir, são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios efetuados visando a caracterização da escória de ferro-cromo.

O agregado graúdo de escória de ferro-cromo é procedente da Companhia de Ferro Ligas da Bahia S.A. - FERBASA, metalúrgica situada a 100km de Feira de Santana.

### **3.1 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA**

Na Tabela 1, são apresentados os resultados da análise química efetuada em amostra de escória de ferro-cromo.

A análise química referida mostra que a escória de ferro-cromo apresenta como principais constituintes a sílica, alumina, óxido de ferro, óxido de magnésio e óxido de cromo.

### **3.2 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA**

#### **3.2.1 Difractometria de raios X**

A Figura 1 apresenta o resultado do difratograma de raios X efetuado em amostra de escória de ferro-cromo.

Com base no difratograma de raios X, foram caracterizados os compostos mineralógicos cristalizados ferro metálico ( $\text{Fe}^0$ ), carbeta de cálcio ( $\text{C}_2\text{Ca}$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), forsterita ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ), alumina cromita ( $\text{Fe}(\text{Al},\text{Cr})_2\text{O}_4$ ), esfarelita (b-ZnS), cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ) e espinélio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ).

A maioria dos componentes observados na amostra é inerte; apenas aqueles que se encontram sob a forma reduzida (esfarelita e ferro metálico) podem ser considerados potencialmente deletérios para o uso como agregado em concreto, tendo em vista que podem sofrer expansão causada pela oxidação dos mesmos.

#### **3.2.2 Grau de vitrificação**

O grau de vitrificação obtido foi de 6,21%. O baixo valor do grau de vitrificação do material mostra que a escória é de baixa reatividade.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL**

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização, respectivamente, efetuados em amostra de escória de ferro-cromo.

A análise dos resultados demonstrou que a escória de ferro-cromo atende aos requisitos da NBR 10004 (1987) para resíduos inertes, quanto ao ensaio de lixiviação. Por outro lado, no ensaio de solubilização, apresenta um teor de cromo total acima do limite prescrito, o que o classifica como não-inerte. Entretanto, verificou-se a ausência de cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{6+}$ ) no extrato solubilizado, caracterizando-o como não-perigoso. Logo, a escória de ferro-cromo equivale um resíduo classe II.

### **3.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

Na Tabela 4, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo de escória de ferro-cromo.

Os resultados atendem aos requisitos da NBR 7211/1983. O agregado em exame pode ser classificado como, praticamente, de graduação 1.

### **3.5 CARACTERIZAÇÃO QUANTO À REATIVIDADE**

#### **3.5.1 Determinação de pirita reativa**

De acordo com o método visual de classificação, segundo a ASTM C 641, o agregado se encontra com intensidade de mancha “muito leve”, correspondendo ao índice 20 (20% de manchamento). Tal índice indica a pouca reatividade da escória.

Em função do resultado obtido, pode-se deduzir que, provavelmente, os compostos ferrosos presentes na escória em estudo não são passíveis de provocar manchas de ferrugem nem variações volumétricas.

### **3.5.2 Reatividade potencial (método químico)**

Na Tabela 5, são apresentados os resultados dos ensaios de reatividade potencial – método químico.

A Figura 2 apresenta o gráfico de redução de alcalinidade (Rd), em função da quantidade de sílica dissolvida (Sd), com as três regiões demarcadas com base em dados experimentais, obtidos em ensaios realizados através do método de expansão de barras de argamassa, exames petrográficos e desempenho de agregados em estruturas de concreto.

Pelos resultados observados, verifica-se que o agregado em exame é considerado inócuo, quanto à reação álcali-sílica. Deste modo, pode-se concluir que, certamente, não houve ataque dos hidróxidos alcalinos aos minerais silicosos, quartzo e cristobalita, do agregado de escória. O fato de um dos resultados situar-se próximo à linha divisória entre as regiões referentes aos agregados considerados inócuos e os deletérios justifica a necessidade, em futuras pesquisas, da realização de ensaio de reatividade potencial pelo método físico (método das barras), uma vez que esse método permite a exposição do material por períodos mais longos.

### **3.5.3 Ensaio de avaliação da estabilidade volumétrica**

#### **3.5.3.1 Ensaio de dilatação em água**

Para a realização do ensaio de dilatação em água foi empregada uma amostra de escória com a granulometria apresentada na Tabela 6.

Tendo em vista a elevada dimensão máxima característica da escória em exame, não foi possível a determinação do teor de umidade ótimo da amostra pelo ensaio de compactação, segundo a NBR 7182/1986. Para resolver tal problema, foi considerada uma nova amostra com a granulometria descrita na Tabela 7, amostra essa correspondente ao material passante na peneira 4,8mm.

A Figura 3 apresenta um esquema do ensaio de dilatação em água e a Figura 4, as curvas de dilatação em função do

tempo, correspondentes aos 03 (três) corpos-de-prova ensaiados.

Pelos resultados alcançados, verifica-se que o índice de dilatação médio em água foi de 0,5%, valor inferior ao que preconiza a norma para escórias siderúrgicas para emprego em rodovias JIS A 5015/1992, Anexo 2 (limite máximo de 1,5%).

### **3.5.3.2 Expansão em autoclave**

A Tabela 8 apresenta o resultado do ensaio de expansão em autoclave.

Pelo resultado obtido, verifica-se que os corpos-de-prova submetidos às condições de autoclave não apresentaram expansão apreciável.

Esse mesmo ensaio realizado por BATTAGIN e SCANDIUZZI (1991) em amostra de escória siderúrgica apresentou valor igual a 0,01%.

### **3.5.3.3 Expansibilidade Le Chatelier**

Para a avaliação da expansão pela agulhas de Le Chatelier da escória de ferro-cromo, substituíram-se 70% de cimento CP-I por escória moída passante na peneira 0,075mm. A expansão foi avaliada a frio e a quente, e os resultados demonstraram que não houve abertura das agulhas .

## **4 CONCLUSÕES**

Com base nos resultados dos ensaios de caracterização efetuados, pode-se afirmar que a escória de ferro-cromo apresenta características compatíveis para ser utilizada como agregado graúdo para concreto.

É importante salientar que as conclusões apresentadas devem ser consideradas dentro de certos limites, tendo em vista que as características do resíduo estudado podem ser altera-

das em função da qualidade da matéria-prima e de possíveis modificações nas operações pirometalúrgicas de fabricação da ferro-liga de origem. Futuras pesquisas deverão confirmar as conclusões neste trabalho apresentadas.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 151. Standard test method for autoclave expansion of portland cement. Philadelphia, 1977.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 641. Standard test method for staining materials in lightweight concrete aggregates. Philadelphia, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6465**: Agregados – Determinação da abrasão “los Angeles”. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregado para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219**: Agregados – Determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251**: Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9774**: Agregados – Verificação da reatividade potencial pelo método químico. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9937**: Agregados – Determinação da absorção e da massa específica de agregado graúdo. Rio de Janeiro, 1987

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005**: lixiviação de resíduos– procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006**: solubilização de resíduos– procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007**: amostragem de resíduos– procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11582**: Cimento Portland; determinação da expansibilidade de Le Chatelier. Rio de Janeiro, 1991.

BATTAGIN, A.F.; SCANDIUZZI, L. Aspectos de la durabilidad de argamasas que contienen escoria siderúrgica granulada como arido fino. **Cemento-Hormigón**, 1991. p.625-644

COMISSÃO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. CONSTRUBUSINESS 1999. Habitação, Infra-estrutura e Emprego. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO, 3., 1999, São Paulo.

JAPAN INSTITUTE STANDARD. JIS A 5015. Escória Siderúrgica para construção de estradas, 1992.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113f. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

SILVA FILHO, A.F.da. **Contribuição ao estudo do desempenho de concreto produzido com agregado graúdo de escória de ferro-cromo**. 2001. 126f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

## ANEXOS

**Tabela 1-** Resultado da análise química do agregado de escória de ferro-cromo

<b>Componente Químico</b>	<b>Teor (%)</b>
Perda ao fogo	0,41
Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )	29,88
Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	18,92
Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,37
Óxido de cálcio (CaO)	3,77
Óxido de magnésio (MgO)	25,90
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	0,22
Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)	0,11
Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O)	0,28
Óxido de cromo (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	14,00

**Tabela 2 -** Resultados do ensaio de lixiviação (NBR 10005/1987)

<b>Poluente</b>	<b>Valor encontrado no lixiviado (mg/l)</b>	<b>Limite máximo no lixiviado (mg/l): NBR 10004/1987</b>
Arsênio	N.D.	5,0
Bário	N.D.	100,0
Cádmio	0,03	0,5
Chumbo	N.D.	5,0
Cromo total	1,56	5,0
Fluoreto	2,910	150,0
Mercúrio	0,00063	0,1
Prata	0,00103	5,0
Selênio	N.D.	1,0

N.D. = não detectado

**Tabela 3** - Resultados do ensaio de solubilização (NBR 10006/1987)

<b>Poluente</b>	<b>Valor encontrado no extrato (mg/l)</b>	<b>Limite máximo no extrato (mg/l): NBR 10004/1987</b>
Arsênio	N.D.	0,05
Bário	N.D.	1,0
Cádmio	N.D.	0,005
Chumbo	N.D.	0,05
Cianeto	N.D.	0,1
Cromo total	0,58	0,05
Fenol	N.D.	0,001
Fluoreto	0,36	1,5
Mercúrio	N.D.	0,001
Nitrato	N.D.	10,0
Prata	N.D.	0,05
Selênio	N.D.	0,01
Alumínio	N.D.	0,2
Cloreto	3,72	250,0
Cobre	0,0024	1,0
Ferro	0,089	0,3
Manganês	N.D.	0,1
Sódio	0,7	200,0
Sulfato	4,11	400,0
Zinco	N.D.	5,0

N.D. = não detectado

**Tabela 4** - Resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo de escória de ferro-cromo

<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Limite da NBR 7211/1983</b>
Módulo de finura	6,60	-
Dimensão máxima característica (mm)	19	-
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	3,04	-
Massa unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	1,69	-
Absorção (%)	1,1	-
Abrasão "Los Angeles" (%)	15	50
Índice de forma	2,5	3
Materiais pulverulentos (%)	0,5	1,0

**Tabela 5** - Resultados dos ensaios de reatividade potencial – método químico

<b>Determinação</b>	<b>Resultado</b>	
	<b>Laboratório (1)</b>	<b>Laboratório (2)</b>
Redução da Alcalinidade – Rd (milimoles de NaOH/l)	129,5	44,23
Sílica dissolvida – Sd (milimoles de SiO <sub>2</sub> /l)	29,42	42,62

**Tabela 6** - Granulometria da amostra de escória utilizada no ensaio de dilatação em água

<b>Abertura da malha (mm)</b>	<b>12,7</b>	<b>4,75</b>	<b>2,36</b>	<b>0,425</b>	<b>0,075</b>
% retida	31,8	24,1	13,1	16	15

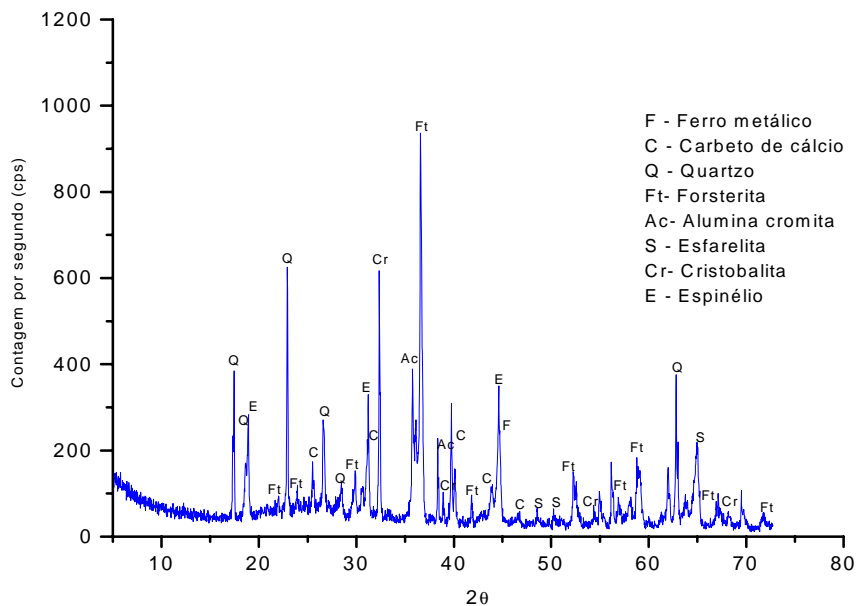
**Tabela 7**- Granulometria da amostra de escória (material passante na peneira

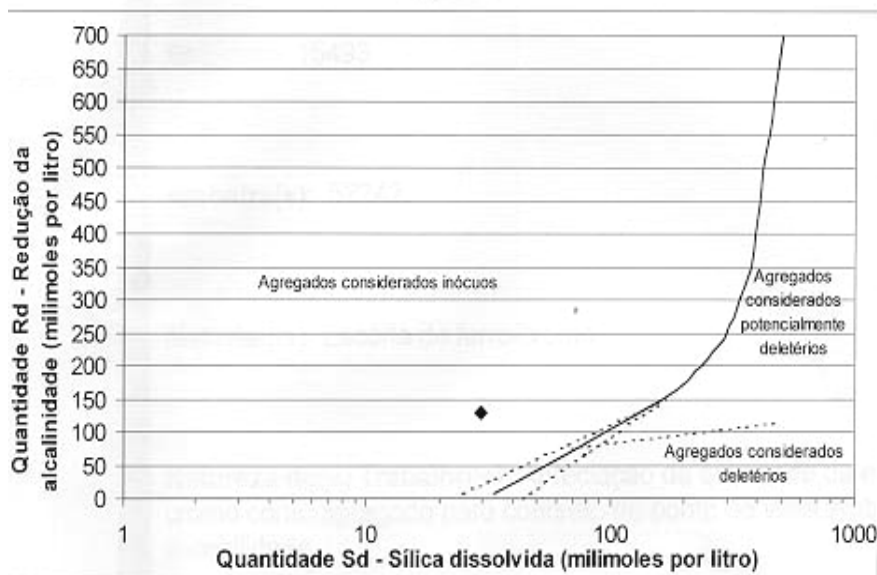
<b>Abertura da malha (mm)</b>	<b>2,36</b>	<b>0,425</b>	<b>0,075</b>
% retida	29,7	36,3	34,0

**Tabela 8** - Resultado do ensaio de expansão em autoclave

Massa de cimento (g)	Massa de agregado (g)	Massa de água (g)*	Expansão (%)
300,0	675,0	141,0	0,015

\* Quantidade de água necessária para obter espalhamento igual a  $(112,5 \pm 7,5)$ mm

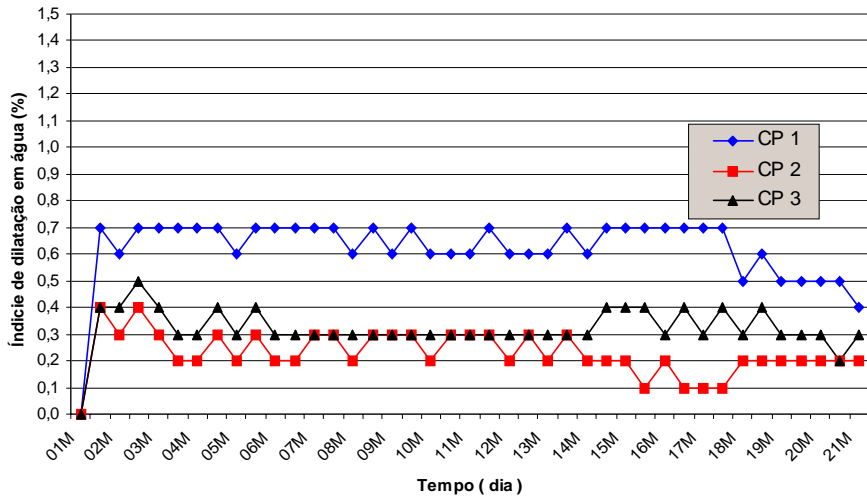
**Figura 1** - Difratograma da escória de ferro-cromo



**Figura 2** - Gráfico de redução da alcalinidade (Rd) em função da quantidade de sílica dissolvida (Sd)



**Figura 3** - Ensaio de dilatação em água. Leitura de relógio comparador



**Figura 4** - Comportamento das amostras quanto ao ensaio de dilatação em água