



## CIMENTO ALTERNATIVO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

**Thais Mayra de Oliveira (1); Maria Teresa Gomes Barbosa (2)**

(1)(2) Professoras do Departamento de Construção Civil

(1) Departamento de Construção Civil - Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil – e-mail: thaismayra@ufjf.edu.br

(2) Departamento de Construção Civil - Faculdade de Engenharia – Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil – e-mail: teresa.barbosa@engenharia.ufjf.br

### **RESUMO**

Este trabalho investiga um cimento alternativo para a construção civil. Avaliaram-se três combinações diferentes de cimento + escória de aciaria + escória de alto-forno. Os testes químicos e físicos realizados são os prescritos para cimento de Portland pela normalização brasileira, uma vez que não se obteve referências bibliográficas acerca do emprego das misturas propostas. Realizaram ensaios de consistência normal, tempos de pega, expansibilidade volumétrica, resistência à compressão, à compressão diametral, à tração na flexão, módulo de elasticidade, análise mineralógica por difratometria de raios X, e, também, a resistência à compressão em diferentes temperaturas e/ou umidades relativas do ar. De acordo com os resultados conclui-se que as escórias de aciaria somadas as de alto forno podem ser utilizadas em percentuais 6%, 25% e 34% para concretos, desde que sejam realizados ensaios de caracterização.

Palavras-chave: escória de aciaria, escória de alto-forno, cimento alternativo, desenvolvimento sustentável.

## **1 INTRODUÇÃO**

Devido ao crescimento populacional aliado ao avanço industrial e ao processo acelerado e desorganizado de urbanização nas cidades, o aumento da geração de resíduos tornou-se uma problemática de suma importância. Dentro deste contexto, a questão ambiental está sendo amplamente debatida em discussões relacionadas com desenvolvimento sustentável nas esferas internacional, nacional e local.

Para JOHN (2000) e ÂNGULO *et al* (2001) as empresas buscam se aproximar do conceito de desenvolvimento sustentável que, na maioria das vezes é entendido como um processo que: ocasionam mudanças na exploração de recursos, na direção dos investimentos, na orientação do desenvolvimento tecnológico e nas mudanças institucionais, visando à harmonia e o entrelaçamento nas aspirações e necessidades humanas, presentes e futuras. Este conceito não implica somente multidisciplinariedade, mas também, em mudanças culturais e de educação ambiental.

A reciclagem de resíduos pela indústria da construção civil vem se consolidando como prática importante para a sustentabilidade, seja atenuando o impacto ambiental gerado pelo setor ou reduzindo custos. O processo de reciclagem de materiais deve ser feito de forma cautelosa e criteriosa para garantir o sucesso dos produtos no mercado (ÂNGULO *et al*, 2001).

Para JOHN *et al* (2001) a melhor aplicação escolhida para um resíduo é aquela que emprega suas características e propriedades a fim de se aumentar o desempenho do novo produto e minimizar os riscos ambientais e os de saúde.

A reciclagem de resíduos no Brasil, comparando aos outros países, ainda é tímida, com exceção da intensa reciclagem praticada pelas indústrias de cimento e de aço, sendo a primeira conduzida pela reciclagem de escórias de alto forno e cinzas volantes na fabricação de alguns tipos de cimento (John, 2000).

GEYER (2001) afirma que o volume mundial gerado de escória de aciaria é de 84 milhões de toneladas/ano. Entretanto, o seu estudo é limitado devido à geração de compostos expansivos em presença de umidade. Apesar dessa desvantagem, diversos pesquisadores vêm estudando e viabilizando o seu emprego na construção civil.

O presente trabalho avalia a potencialidade da utilização de percentuais de escória de aciaria e de alto forno no cimento Portland de modo a produzir um material aglomerante para uso em construção civil. Dentro deste contexto, cita-se como o principal objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um cimento alternativo, sendo denominado Cimento com Escória de Aciaria e de Alto forno (CEAAF) para a construção civil com características semelhantes e/ou superiores às do cimento Portland. Adicionou-se escória de aciaria e escória de alto forno ao cimento, sendo a mistura avaliada no que se refere a suas propriedades químicas, físicas e mecânicas.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS EMPREGADOS**

### **2.1 Considerações Iniciais**

O desenvolvimento de uma pesquisa que visa à obtenção de um novo produto por meio do emprego de um resíduo, de maneira segura e sustentável, é uma tarefa complexa que envolve o conhecimento das características de todos os materiais que irão compor o produto final. Assim, o estudo criterioso do resíduo bem como, a escolha e seleção dos materiais tornam-se indispensáveis durante todo o estudo.

### **2.2 Materiais Empregados na Pesquisa**

#### *2.2.1 Cimento*

O cimento utilizado na elaboração dos traços de concreto foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV ARI – NBR 5733/91). A escolha foi baseada na facilidade de aquisição, na inexistência de adições siderúrgicas (cita-se CPII-E e CPIII) e na elevada resistência nas primeiras idades (1 a 3 dias).

#### *2.2.2 Água*

Empregou-se água proveniente da rede de abastecimento de água da cidade da região de Juiz de Fora, MG.

### 2.2.3 Areia

De acordo com a NBR 7211/09, granulometricamente, a areia é classificada segundo o módulo de finura na zona utilizável, com dimensão máxima característica de 4,75 mm, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** – Caracterização física dos agregados miúdo e graúdo.

Abertura peneiras (mm)	% Retida Acumulada (NBR NM 248/2003)	
	Areia	Brita
<b>9,5</b>	0	2
<b>6,3</b>	0	23
<b>4,8</b>	1	76
<b>2,4</b>	8	99
<b>1,2</b>	43	99
<b>0,6</b>	71	99
<b>0,3</b>	89	99
<b>0,15</b>	98	99
<b>Fundo</b>	100	100
 <b>Módulo de finura (NBR 7211/2009)</b>	 3,10	 5,75
 <b>Dimensão máx característica (mm) (NBR 7211/2009)</b>	 4,8	 9,5
 <b>Massa específica (kg/dm<sup>3</sup>) (NBR NM 23/2001)</b>	 2,67	 2,70
 <b>Massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>) (NBR NM 45/2006)</b>	 1,90	 1,38
 <b>Torrões de argila (%) (NBR 7218/1987)</b>	 inexistente	 inexistente
 <b>Material pulverulento (%) (NBR NM 46/2003)</b>	 3	 --
 <b>Impureza orgânica (p.p.m.) (NBR NM 49/2001)</b>	 <300	 --

### 2.2.4 Brita

O agregado graúdo possui dimensão máxima característica de 9,5 mm. conforme NBR 7211/09 (vide Tabela 1).

### 2.2.5 Escórias

Neste trabalho empregou-se *escória de alto-forno*, procedente de Siderúrgica Nacional, oriunda da produção de ferro gusa e *escória de aciaria* de forno-panela, estocada por um período superior a 2 anos. O processo de redução das dimensões granulométricas foi realizado com o auxílio do ensaio de abrasão “Los Angeles”, utilizando-se o material passante na peneira nº 200 (0,075 mm). Tal procedimento foi adotado a fim de se obter a granulometria das escórias o mais próximo possível às do cimento empregado. A Tabela 2 apresenta a caracterização física e química das escórias empregadas.

## 2.3 Programa Experimental

Os ensaios empregados neste estudo seguem as Normas Brasileiras da ABNT (NBR) e as Normas Mercosul (NBR NM). Investigaram-se quatro misturas aglomerantes, sendo uma de referência (100% CPV ARI) denominada MR e, outra três compostas com adição de escória de alto-forno + escória de aciaria, em partes iguais, (totalizando percentuais de 6%, 25% e 34% de adição, em massa, ao cimento) denominadas, respectivamente por M1, M2 e M3. Esses percentuais foram adotados por corresponderem entre o mínimo e o máximo de adição ao cimento tipo CII-E disponível comercialmente, segundo a normalização brasileira. Em resumo, para facilitar ao entendimento dos resultados adotou-se a seguinte denominação:

- **MR** = mistura de referência;
- **M1** = mistura 1, sendo empregado na produção CEAAF 3% de escória de aciaria + 3% de escória de alto forno;
- **M2** = mistura 2, sendo empregado na produção CEAAF 12,5% de escória de aciaria + 12,5% de escória de alto forno;
- **M3** = mistura 3, sendo empregado na produção CEAAF 17% de escória de aciaria + 17% de escória de alto forno.

Inicialmente, efetuou-se alguns dos ensaios prescritos para o cimento Portland, a saber: propriedades químicas e propriedades físicas (consistência normal, tempo de pega, expansibilidade volumétrica) que visam avaliar o comportamento deste novo cimento CEEAF. Em seguida, confeccionaram-se corpos de prova de concreto de cimento Portland a partir de um traço básico (de controle) onde foram realizadas substituições de cimento por escória de aciaria e escória de alto forno.

Salienta-se que no método de dosagem empregou-se um traço, cuja resistência à compressão média de dosagem foi de 27 MPa, a saber: 1 : 2,000 : 2,500 : 0,650 (traço em peso) e um consumo de 378 kg cimento/ m<sup>3</sup> de concreto.

**Tabela 2** – Caracterização Física e química das escórias utilizadas no estudo.

PROPRIEDADES	Escória de Alto-forno	Escória de Aciaria
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	3.21	3.86
Basicidade (CaO/ SiO <sub>2</sub> )	1.32	1.18
CaO, %	41.97	31.80
FeO, %	-	24.72
SiO <sub>2</sub> , %	35.47	24.30
MgO, %	5.69	5.34
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0.84	4.78
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	13.20	4.40
TiO <sub>2</sub> , %	0.53	0.46
SO <sub>3</sub> , %	0.07	0.93
K <sub>2</sub> O, %	0.28	-
Na <sub>2</sub> O, %	0.10	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	0.83	-
S, %	0.87	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	-	0.61
TiO <sub>2</sub> , %	-	0.46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	-	0.43

Fonte: Dados fornecidos pelas empresas geradoras dos resíduos.

## 2.4 Ensaios Realizados

A fim de se obter um cimento alternativo para a construção civil, conforme mencionado anteriormente efetuou-se os ensaios normatizados para cimento Portland prescritos na ABNT.

Em seguida, para cada mistura investigada confeccionaram-se: 6 (seis) corpos de prova cilíndricos de concreto com dimensão 150 mm x 300 mm (altura x diâmetro) para os ensaios de módulo de elasticidade (NBR 8522,2003); 4 (quatro) corpos de prova de concreto para idade de ensaio, com dimensão de 100 mm x 200 mm, para avaliação da resistência à compressão (NBR NM 45, 2006), aos 3, 7, 14, 28, 90 e 120 dias; 4 (quatro) corpos de prova de 100 mm x 200 mm para avaliação da porosidade aos 28 dias de idade; 4 (quatro) vigas de 100 mm x 100 mm x 600 mm para avaliação da resistência à flexão (NBR 12142, 1991). Salienta-se que a moldagem e a cura procederam-se segundo as recomendações prescritas pela ABNT.

Cumpre esclarecer que no ensaio de resistência à compressão, aos 28 dias de idade, buscou-se avaliar, também, o comportamento dos corpos de prova em diferentes situações de exposição, a saber: *temperaturas* de 27°C (temperatura média no dia da realização dos ensaios) e 100°C e, *umidade relativa do ar* (URA) de 82% (umidade média no dia da realização dos ensaios) e 100%.

### **3 RESULTADOS E ANÁLISES**

#### **3.1 Propriedades Químicas**

De acordo com a composição química apresentada na Tabela 2 observa-se:

- As escórias de alto forno e de acaria empregadas no estudo são consideradas básicas, visto apresentar um índice de basicidade acima de 1,0 e pH em torno de 12,0;
- Em se tratando da norma para o CII-E (NBR 11578, 1991), no que se refere ao composto de óxido de magnésio ( $MgO$ ), as escórias estudadas atendem as exigências químicas ( $\leq 6,5\%$ ) e, também, apresentam valores próximos aos obtidos na bibliografia;
- A NBR 5735 (1991) especifica que um cimento Portland de alto-forno deve apresentar trióxido de enxofre ( $SO_3$ )  $\leq 4,0\%$ ; perda ao fogo  $\leq 4,5\%$ , sendo estes atendidos pela escória de acaria e de alto forno. Porém, GEYER *apud* Santos (2001) menciona que apesar das amostras apresentarem índices de atividade pozolânica, nem sempre se observa características pozolânicas compatíveis com as do cimento composto do tipo CII-E;
- Os teores de cal livre obtido na escória de acaria (0,32%) demonstra a potencialidade de utilização na construção de estradas, uma vez que o DNIT aponta teores na faixa de 0 a 8%.

#### **3.2 Propriedades Físicas do CEAAF**

##### **3.2.1 Tempos de pega da pasta**

Os tempos de início e fim de pega (NBR NM 65, 2003) foram determinados para a mistura de referência e para as misturas com M1, M2 e M3. A Tabela 4 demonstra que o aumento do percentual de escória contribui para um aumento no tempo de início de pega (TIP) e uma redução no tempo de fim de pega (TFP). As composições das argamassas foram às mesmas adotadas no ensaio de consistência normal. Constatou-se, portanto, que este aumento, na produção do CEAAF, retarda as reações de hidratação proporcionando uma melhoria da trabalhabilidade e do tempo de transporte e lançamento do concreto. Para o TFP ocorre um decréscimo significativo logo, o incremento de adição de escória ao CEAAF e, consequentemente, a redução na quantidade de cimento, reduzem nas reações de hidratação.

**Tabela 4** – Resultados dos tempos de início e fim de pega

MISTURA	TEMPOS DE PEGA (horas: minutos)	
	TIP	TFP
MR	02:37	08:22
M1	03:18	06:03
M2	03:30	05:30
M3	03:00	05:30

##### **3.2.2 Expansibilidade da pasta**

No estudo da adição de rejeitos ao cimento, deve-se avaliar e quantificar as reações expansivas (NBR 11582, 1991). A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de expansibilidade volumétrica a frio e a quente para as misturas MR, M1, M2 e M3. Verifica-se que com o acréscimo de percentuais de escória as expansibilidades a frio e a quente permaneceram inalteradas, sendo atribuído à estocagem da escória de acaria, superior a um ano. Salienta-se que como à expansibilidade a frio apresenta valores superiores, há uma maior influência do óxido de magnésio do que do óxido de cálcio.

**Tabela 5** – Resultados de expansibilidades a frio e a quente.

MISTURA	EXPANSIBILIDADE (mm)	
	à frio	à quente
MR	0,25	0,00
M1	0,25	0,00
M2	0,25	0,00
M3	0,25	0,00

### 3.3 Propriedades Mecânicas do Concreto

#### 3.3.1 Resistência à compressão

Avaliou-se o comportamento da resistência à compressão nas idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 120 dias. Para a idade de 28 dias procurou-se verificar, também, o comportamento da resistência à compressão no que diz respeito à “durabilidade” em diferentes situações de exposição, a saber: *umidade relativa do ar* (URA) 82% (ambiente na data do ensaio) e 100%, e *temperaturas* 27°C (ambiente, na data do ensaio) e 100°C. Dentro deste contexto, na verificação da durabilidade das misturas de CEAAF e de referência os corpos-de-prova foram divididos em grupos para as diferentes exposições, a saber:

- *URA (82%) e temperatura ambiente (27°C)* - o ensaio (ruptura dos corpos de prova) foi realizado após 24 horas de exposição;
- *URA (82%) e temperatura de 100°C* - os corpos-de-prova foram levados a estufa cobertos por papel plástico e após 24 horas, nessas condições, realizou-se o ensaio (ruptura);
- *URA (100%) e temperatura ambiente (27°C)* – os corpos de prova foram rompidos após a retirada do tanque de cura.
- *URA (100%) e temperatura de 100°C* - para manter umidade de 100% os corpos de prova foram colocados em água à temperatura de 98°C por aproximadamente uma hora e, levados à ruptura.

A Tabela 6 e a Figura 1 apresentam os resultados das resistências à compressão média para as idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 120 dias para as 04 misturas apresentadas no estudo, bem como a análise estatística dos dados obtidos. Enquanto que a Tabela 7 apresenta resultados de resistência à compressão aos 28 dias de idade considerando as variações de umidade e de temperatura.

Salienta-se que CV trata-se do coeficiente de variação da amostra, trata-se de uma análise estatística preliminar; se o seu valor é igual ou inferior a 25 % a amostra é aceita.

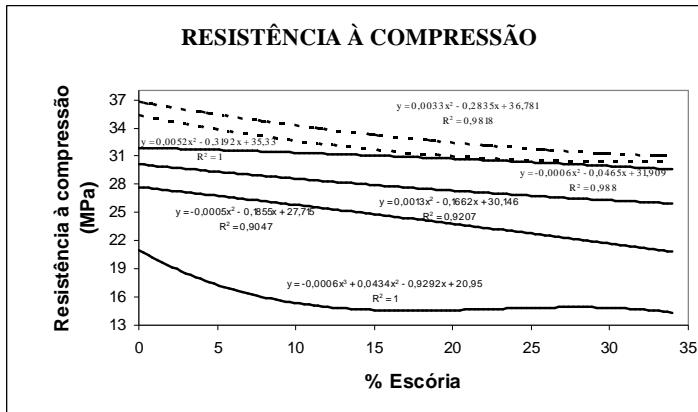
De acordo com a Tabela 6 e a Figura 1 observa-se que a resistência à compressão diminui com o aumento do percentual de escória. tal fato é decorrente das adições ao cimento que tendem a desenvolver de maneira mais lenta as reações de hidratação, assim como no CPIII. Observa-se, também, que em idades superiores a diferença das resistências à compressão não se apresentou significativa na relação entre MR e M1 e M2 e M3. Verifica-se também, na figura 1, o coeficiente de determinação  $r^2$  das amostras estudadas. Ele representa a medida de como os dados se ajustam à reta de regressão. Assim, quanto mais próximo  $r^2$  for igual a 1, mais representativo será o comportamento dos resultados avaliado através do modelo matemático obtido.

Considerando os resultados da Tabela 7 tem-se:

- De maneira geral, a resistência à compressão tende a diminuir à medida que se varia a temperatura e/ou umidade e o teor de adição de escórias na mistura;
- Na temperatura de 100°C e umidade de 100%, o mesmo não se verifica, pois com o incremento de escórias houve um aumento de resistência; cimentos com adições comportam-se melhor altas temperaturas.
- Na temperatura de 100°C e umidade de 100% a resistência à compressão sofre uma redução significativa em relação às outras condições de exposição. De acordo com Neville (1997) a perda de resistência devido ao “encharcamento” é oriunda da expansão do gel de cimento devido à absorção de água, reduzindo as forças de coesão das partículas sólidas.

**Tabela 6** – Resistências à compressão para as idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 120 dias (temperatura (27°C) e umidade(82%)).

MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)					
	03 dias	07 dias	14 dias	28 dias	90 dias	120 dias
<b>MR</b>	25,95 (CV = 13,5%)	28,50 (CV = 17,0 %)	30,58 (CV = 10,5%)	31,82 (CV = 9,2%)	35,33 (CV = 3,5%)	36,50 (CV = 3,0%)
<b>M1</b>	16,80 (CV = 15,5%)	25,70 (CV = 18,5%)	28,50 (CV = 11,0%)	31,75 (CV = 10,8%)	33,60 (CV = 6,8%)	35,65 (CV = 7,3%)
<b>M2</b>	14,85 (CV = 19,1%)	24,34 (CV = 15,5%)	27,30 (CV = 12,4%)	30,25 (CV = 11,6%)	30,58 (CV = 7,5%)	31,44 (CV = 2,9%)
<b>M3</b>	14,37 (CV = 21,0%)	20,36 (CV = 19,6%)	25,70 (CV = 17,7%)	29,66 (CV = 10,5%)	30,45 (CV = 9,8%)	31,16 (CV = 8,8%)



**Figura 1** – Resistência à Compressão x Percentual de Escória por Idade

**Tabela 7** – Resistência à compressão, média, aos 28 dias de idade para variação de umidade e temperatura.

MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)			
	URA = 82%		URA = 100%	
	T = 27°C	T = 100°C	T = 27°C	T = 100°C
<b>MR</b>	36,20 (CV = 9,8%)	35,32 (CV = 10,5%)	30,47 (CV = 17,3%)	27,12 (CV = 18,1%)
<b>M1</b>	32,62 (CV = 11,6%)	30,56 (CV = 16,7%)	29,31 (CV = 16,5%)	20,47 (CV = 14,6%)
<b>M2</b>	32,37 (CV = 13,6%)	30,30 (CV = 9,9%)	27,26 (CV = 18,9%)	19,40 (CV = 14,4%)
<b>M3</b>	29,23 (CV = 15,7%)	30,03 (CV = 16,8%)	26,52 (CV = 6,5%)	22,91 (CV = 7,4%)

Para a análise mais consistente desta pesquisa efetuou-se uma estatística dos resultados buscando-se obter o menor erro padrão com o maior nível de confiança. Sendo assim, determinou-se um nível de confiança igual ou maior que 95% para avaliar os fatores controláveis e suas interações sobre as propriedades mecânicas do concreto. As figuras 2 e 3, ilustram o estudo efetuado através de planilha EXCEL. Analisando as figuras 2 e 3, observa-se um valor ótimo de percentual de escórias em torno dos 34%, devido a apresentar menor variabilidade de resistência à compressão independente do tipo de exposição.

### 3.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

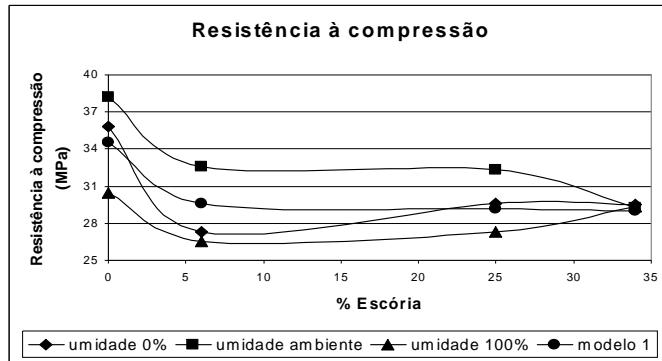
O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado em corpos de prova com idade de 28 dias. A Tabela 8 apresenta os resultados para as diferentes misturas, onde se constata que ela tende a diminuir com o acréscimo do percentual de escória.

### 3.3.3 Resistência à Tração na Flexão

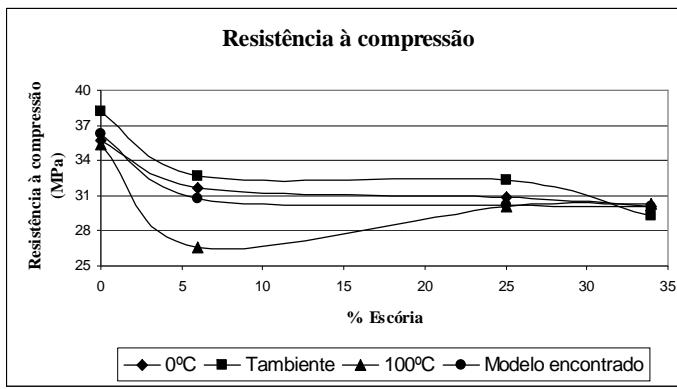
Para esta propriedade foram realizados ensaios na idade de 28 dias. De acordo com a Tabela 9 verifica-se que a resistência à tração diminui com o acréscimo do percentual de escória. NEVILLE (1982) afirma que com o aumento da resistência à compressão,  $f_c$ , a resistência à tração na flexão aumenta,  $f_{ct}$ .

**Tabela 8** – Resistência à tração dos concretos, valor médio.

MISTURA	Resistência à Compressão diametral (MPa)
<b>MR</b>	4,88 (CV = 9,8%)
<b>M1</b>	4,04 (CV = 16,3%)
<b>M2</b>	2,74 (CV = 14,2%)
<b>M3</b>	2,42 (CV = 11,8%)



**Figura 2** – Resistência à compressão por diferentes variações de umidade e modelo encontrado no estudo.



**Figura 3** – Resistência à compressão por diferentes variações de temperatura e modelo encontrado no estudo.

**Tabela 9** – Relação entre a resistência a tração na flexão e resistência a compressão

MISTURA	Resistência à tração na flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Relação ( $f_c / f_{ct}$ )
<b>MR</b>	4,53 (CV = 12,4%)	31,82	7,14
<b>M1</b>	4,26 (CV = 11,2%)	31,75	7,45
<b>M2</b>	3,78 (CV = 18,8%)	30,25	8,00
<b>M3</b>	3,46 (CV = 21,8%)	29,66	8,57

### 3.3.4 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade é uma medida de resistência à deformação elástica do material. O módulo dos concretos é afetado, a princípio, pelos mesmos fatores da resistência à compressão. Porém a porosidade e o tipo dos agregados têm maior influência sobre esta característica (Mehta *et al*, 1994). O módulo foi obtido carregando-se corpos de prova e observando-se a deformação elástica correspondente a cada incremento de carga. A Tabela 10 apresenta os valores do módulo de elasticidade do concreto e da porosidade, verificada por meio da massa específica e absorção, das misturas estudadas para a idade de 28 dias de idade, segundo a NBR 8522 (2003).

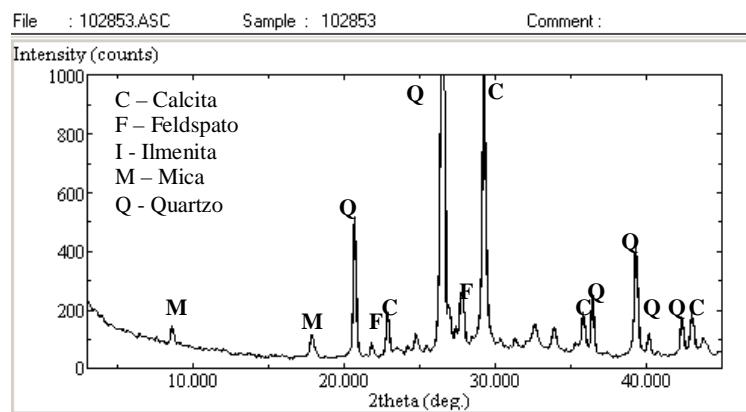
De acordo com a Tabela 10 houve um decréscimo no módulo de elasticidade com a adição 6% das escórias a mistura, porém, com o acréscimo do percentual de adição das escórias o comportamento é inverso. A redução da porosidade leva a um decréscimo da permeabilidade e assim um aumento da durabilidade ao ataque químico. Acredita-se que as escórias estão funcionando como filer, ou seja, fechando os poros do concreto.

**Tabela 10** – Módulo de elasticidade e porosidade.

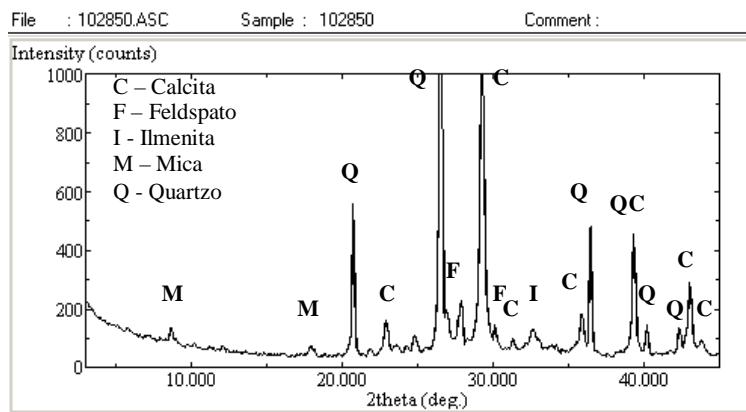
MISTURA	Módulo de elasticidade (GPa)	Porosidade (%)
<b>MR</b>	24,77 (CV = 17,9%)	4,28 (CV = 15,8%)
<b>M1</b>	21,65 (CV = 22,2%)	3,95 (CV = 18,9%)
<b>M2</b>	22,10 (CV = 11,8%)	3,02 (CV = 19,9%)
<b>M3</b>	25,86 (CV = 13,8%)	2,88 (CV = 12,5%)

### 3.3.5 Análise mineralógica por difratometria de raios-X (DRX)

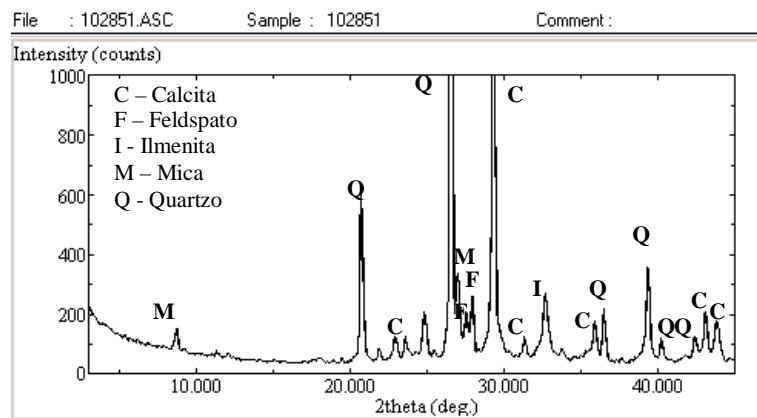
As figuras 4, 5, 6 e 7 apresentam os difratogramas das amostras e, a Tabela 11 a caracterização dos compostos mineralógicos cristalizados. As análises foram feitas ABCP.



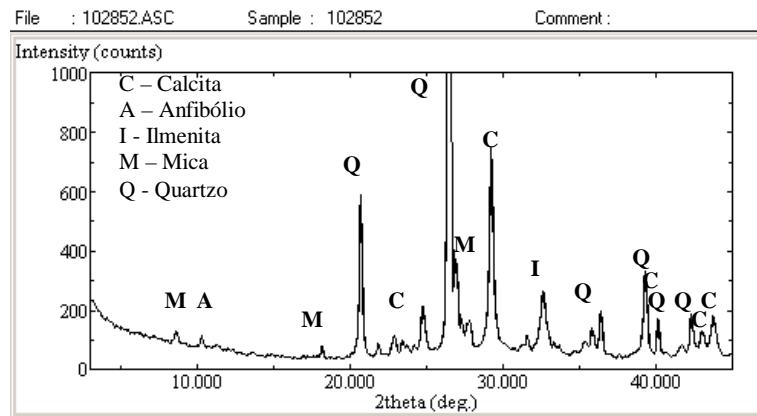
**Figura 4** – Difratometria de raios-X para a mistura MR.



**Figura 5** – Difratometria de raios-X para a mistura M1.



**Figura 6** – Difratometria de raios-X para a mistura M2.



**Figura 7** – Difratometria de raios-X para a mistura M3.

Observa-se de acordo com os resultados que as amostras são constituídas principalmente por quartzo e calcita. Com conteúdos secundários de mica, feldspato e ilmenita. De modo mais restrito existe a ocorrência de anfibólio, apresentado na mistura M3, que é um grupo de minerais silicáticos hidratados, e está na dependência do ferro, quanto maior a quantidade desse elemento mais acentuada será a cor verde, chegando ao preto.

A ilmenita trata-se de um material residual decorrente do processo de fabricação, mais especificamente, desoxidação da liga ferro-carbono, como já previsto, apresentado nas misturas com escórias. Permite, também, a elevação da temperabilidade, que é a capacidade do material endurecer até certa profundidade a partir da superfície do corpo-de-prova quando submetido ao tratamento térmico da têmpera (BRESCIANI FILHO (1991)). O mineral calcita está provavelmente relacionado a processos de carbonatação da portlandita e de outros hidratados do concreto. Os minerais: quartzo, mica, feldspato e outro de ocorrência secundária são minerais relacionados principalmente ao agregado graúdo e miúdo (brita e areia) utilizados na elaboração dos concretos.

**Tabela 11** - Compostos mineralógicos cristalizados com base nos difratogramas apresentados acima.

Minerais	Químismo Aproximado	Distância interplanar principal (Å)	Frequência relativa			
			M1	M2	M3	MR
<b>Anfibólio</b>	$\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	8,97	—	—	*	—
<b>Calcita</b>	$\text{CaCO}_3$	3,03	***	***	***	***
<b>Feldspato</b>	$(\text{K},\text{Na})[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{CaAlSi}_2\text{O}_8$	3,25	*	*	—	*
<b>Ilmenita</b>	$\text{FeTiO}_2$	2,74	*	*	*	—
<b>Mica</b>	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$	9,98	*	**	**	**
<b>Quartzo</b>	$\text{SiO}_2$	3,35	***	***	***	***

Simbologia: - = não detectado      \*\* = pouco freqüente

tr = traços      \*\*\* = freqüente

\* = presente      \*\*\*\* = muito freqüente

NOTA: A avaliação semiquantitativa (expressa em número de asteriscos) das fases está fundamentada na altura dos picos de difração, cuja intensidade é função do teor, da simetria e do grau de cristalinidade do constituinte.

#### 4 CONCLUSÕES

O desenvolvimento de novos materiais deve estar aliado ao desenvolvimento de novas tecnologias e a projetos ambientais.

Como conclusão tem-se que as escórias de aciaria e de alto forno podem ser consideradas como básicas uma vez que ambas apresentam índice de basicidade acima de 1,0 (valor de 1,61 e 1,18 respectivamente);

Observa-se também que para o composto de óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), as escórias estudadas atendem as exigências químicas ( $\leq 6,5\%$  - NBR 11578, 1991) e, também apresentam valores próximos da obtida na bibliografia pesquisada;

Um cimento Portland alto-forno (NBR 5735, 1991) deve apresentar trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ )  $\leq 4,0\%$  e perda ao fogo  $\leq 4,5\%$ , valores estes atendidos pela escória de aciaria e de alto forno estudadas. A escória de aciaria utilizada teve um resfriamento lento ao ar, tornando o material mais cristalino. Acredita-se que se a mesma fosse obtida na forma granulada (resfriamento brusco), suas propriedades hidráulicas seriam melhoradas;

Salienta-se que os teores de cal livre obtidos na escória de aciaria (0,32%) mostram a potencialidade de utilização na construção de estradas, uma vez que o DNIT aponta teores em uma faixa de 0 a 8%; No que se refere aos tempos de pega o aumento do percentual de escória contribuiu para um aumento no tempo de início de pega, contribuindo, de certa forma, para o tempo de transporte e de lançamento do concreto. Em contrapartida, reduz o tempo de fim de pega, acredita-se que o acréscimo de escória ao CEAAC e a redução na quantidade de cimento, proporcionaram uma redução das reações de hidratação;

Os resultados de DRX, em corpos-de-prova de concreto fabricados com CEAAC, mostraram que as amostras são constituídas principalmente por quartzo e calcita. Com conteúdos secundários de mica, feldspato e ilmenita e de modo mais restrito existe a ocorrência de anfibólio, que está ligado ao percentual de ferro na mistura.

Verifica-se que para todas as misturas com escórias às reações de expansibilidade permaneceram inalteradas. Porém, os resultados apontaram uma maior influência do óxido de magnésio do que do óxido de cálcio, devido à expansibilidade ser maior no ensaio a frio;

No que se refere aos ensaios de resistência à compressão para as idades de 3, 7, 14, 28, 90 e 120 dias, em condições ambientais, com o aumento do percentual de escórias na produção do CEAAC há uma redução desta propriedade. Isto ocorre devido às adições ao cimento tenderem ao desenvolvimento mais lento das reações de hidratação como no caso do CP III;

Observa-se também que para maiores idades (90 e 120 dias) a diferença na resistência à compressão entre a mistura de referência MR e M1 (6% de escórias) não são significativas, sendo o mesmo observado quando comparadas com a relação entre as misturas M2 e M3 (25% e 34% de escórias respectivamente).

Com relação à resistência à compressão variando-se a temperatura (ambiente (27°C) e 100°C) e/ ou umidade (ambiente (82%) e 100%) conclui-se que: de maneira geral, a resistência à compressão tende a diminuir à medida que se varia a temperatura e/ou umidade e o teor de adição de escórias na mistura; na temperatura de 100°C e umidade de 100%, o mesmo não se verifica, pois com o incremento de escórias houve um aumento de resistência, a resistência à compressão sofre uma redução significativa em relação às outras condições de exposição.

Os resultados do módulo de elasticidade apresentaram um decréscimo com a adição de 6% da escória na produção do CEAAC e, um comportamento inverso com o acréscimo do percentual de adição de 25% e 34%;

Conclui-se, finalmente, que escórias de aciaria somadas as de alto forno podem ser utilizados na obtenção de cimentos alternativos para a confecção de concretos *desde que ensaios de caracterização sejam sempre realizados*.

## 5 REFERÊNCIAS

- ÂNGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M.. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil – Materiais Reciclados e suas Aplicações, IV Seminário. IBRACON – Comitê Técnico 206 Meio Ambiente. São Paulo, *Anais....*, São Paulo, 2001. p.43-56.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, **NBR 12142**, Concreto – Determinação da resistência à tração em corpos de prova prismáticos - método de ensaio, Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_, **NBR 11582**, Cimento Portland - Determinação da expansibilidade de Le Chatelier - método de ensaio, Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_, **NBR 5735**, Cimento Portland de alto-forno: classificação, Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_, **NBR NM 45**, Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão: método de ensaio, Rio de Janeiro, 2006.
- \_\_\_\_\_, **NBR 5738**, Moldagem e cura de corpos de prova de concreto cilíndricos ou prismáticos - procedimento, Rio de Janeiro, 2008.
- \_\_\_\_\_, **NBR NM 248**, Agregados – Determinação da composição granulométrica, método de ensaio, Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_, **NBR NM 65**, Cimento Portland - Determinação do tempo de pega: método de ensaio, Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_, **NBR 8522**, Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação: método de ensaio, Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_, **NBR 7211**, Agregado para concreto - Especificação, Rio de Janeiro, 2009.
- BRESCIANI FILHO, E.. (1991). **Seleção de materiais metálicos**. 3.ed. São Paulo: Editora Unicamp.
- GEYER, R. M. T.. **Estudo sobre a potencialidade de uso das escórias de aciaria como adição ao concreto**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais. Porto Alegre, 2001. 170p.
- JOHN, V. M.. **Cimento de escória ativada com silicatos de sódio**. Tese (Livre docência). Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000. 102p.
- JOHN, V. M.; ZORDAN, S. E.. **Research & development methodology for recycling residues as building materials**. Waste Management 21, 2001. p.213-219.

- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. (1994). **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais.**  
ISBN 85-7266-040-2, PINI.
- NEVILLE, A. M. (1997) - **Propriedades do Concreto**, 2.ed. São Paulo: Pini.
- OLIVEIRA, T.M.. **Potencialidade da Utilização de Misturas de Escórias como Material Cimentício.** 2007. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. 2007. 109p
- SOUZA, C. M.. **Estudo do efeito das variações ambientais sobre o cimento Portland.** 2007. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ. 2007.