

## **Reciclaje de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigón**

Ceccato, D.M.<sup>I</sup>; Masuero, A.B.<sup>I</sup>; Moraes, C.A.M.<sup>II</sup>; Vilela, A.C.F.<sup>I</sup>

<sup>I</sup> Programa de pos-graduación en Ingeniería Civil /NORIE/UFRGS e Programa de Pos- Graduación en Ingeniería de Minas, Metalúrgica y de Materiales/UFRGS - 90035-190, Porto Alegre, RS, Brasil.

e-mail: [dceccatto@terra.com.br](mailto:dceccatto@terra.com.br)

<sup>II</sup> Universidad do Vale do Rio dos Sinos- Unisinos - 93022-000, São Leopoldo, RS, Brasil.

e-mail: [bmasuero@cpgec.ufrgs.br](mailto:bmasuero@cpgec.ufrgs.br), [cmoraes@unisinos.br](mailto:cmoraes@unisinos.br), [vilela@ufrgs.br](mailto:vilela@ufrgs.br)

---

### **RESUMEN**

El reciclaje de residuos sólidos industriales se ha vuelto una práctica indispensable en la preservación de los recursos naturales, en la minimización de los costos y en la reducción del impacto ambiental.

La utilización de materiales alternativos en la industria de la construcción civil es una práctica económicamente atractiva y ambientalmente correcta. Siendo así, el empleo de escorias como materia prima en carreteras, hormigón y cemento ya es una práctica corriente, en la cual, el destino más noble de estos materiales reciclables depende de la existencia de características adecuadas al uso propuesto.

La escoria granulada de fundición (EGF) es un residuo generado en el proceso de fusión de chatarras de hierro fundido en horno cubilote. Estudios anteriores apuntaron que esta escoria, cuando es finamente molida, presenta buenas propiedades piroclásticas (de tipo pozzolana). Además, su estructura amorfa, resultante del proceso de generación a través del enfriamiento brusco y la composición química adecuada, permiten una aplicación más noble de este residuo, como sustituto del cemento.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar el desempeño de hormigones con la utilización de escoria granulada de fundición como sustitución de parte del cemento, a través de la evaluación de sus propiedades mecánicas. Para ello fueron moldeados cuerpos de prueba de hormigón con diferentes combinaciones de tenores de sustitución de cemento por escoria granulada de fundición (10%, 30% y 50%), en volumen, y relaciones agua/aglomerante (0,40; 0,55 0,70), a ser comparadas con el hormigón de referencia (sin EGF). Para cada edad de hormigón (7, 28 y 91 días) se realizaron ensayos mecánicos, tales como la resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tracción por compresión diametral y resistencia a la tracción en la flexión. Resultados muestran que la escoria granulada de fundición presenta adecuado desempeño (propiedades mecánicas) en relación a la aplicación propuesta.

**Palabras claves:** reciclaje, escoria, fundición, hormigón.

---

## **The recycling of Foundry granulated slag (FGS) as a partial substitute of cement in concrete**

### **ABSTRACT**

The recycling of industrial solid wastes has become an indispensable practice to the natural resource preservation, in the cost and environmental impact reduction.

The utilization of alternative materials in the civil construction industry is attractive and correct way in terms of economy and environment. As result of that, the slag recycling as raw material in pavement, concrete and cement are already common practices, where the noblest use of this material depends on the existence of adequate characteristics to the proposed use.

The foundry granulated slag is a waste generated in the process of cast iron production via cupola furnace. Previous studies have shown that this slag, with lower particle size, presents good pozzolanic properties. Also, its amorphous structure resulting from fast cooling linked to an adequate chemical composition may permit a noblest application of this solid waste, such as cement substitute.

This work has the aim of studying the performance of concrete using foundry granulated slag as a partial substitute of cement, evaluating its mechanical properties. Concrete samples were molded with different combinations of slag amounts (10%, 30% and 50%) to partially substitute cement, and

water/agglomerate (0,40; 0,55 0,70) rates. Such combinations were compared with the reference concrete (without slag). For each concrete age (7, 28 and 91 days) mechanical tests were carried out as uniaxial compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength. The results have shown that the granulated slag present an adequate performance (mechanical properties) to the proposed application.

**Keywords:** recycling, slag, foundry, concrete.

## 1 INTRODUCCIÓN

El reciclaje de residuos sólidos industriales ha sido fundamental en la búsqueda por el desenvolvimiento sustentable, posibilitando la preservación de recursos naturales no renovables, a través de la sustitución de estos por materiales alternativos, con propiedades adecuadas al uso. John [1] afirma que el reciclaje de residuos permite ventajas potenciales para la sociedad; entre ellas, economía de energía, reducción del volumen de terraplenes, menor polución, generación de empleos, reducción de costos del control ambiental por las industrias, aumento de la durabilidad, e incluso economía de divisas.

Dentro de este contexto se tiene al reciclaje de escoria como materia prima en la construcción civil, capaz de presentar un excelente desempeño técnico y económico, al que debe sumarse su importancia ambiental, siempre que adecuadamente empleado.

Actualmente, gran parte de la escoria es depositada en terrenos próximos a las fábricas, donde forma montones de residuo. El destino incierto de este material causa diversos problemas ambientales y económicos, entre los que están [2]:

- incremento en los costos de producción;
- gran espacio físico para depósitos de residuos;
- polución ambiental;
- reducción de la calidad de vida en los alrededores de las industrias, tierras próximas a las industrias volviéndose impropias para el cultivo y la habitación, donde los contaminantes, como la emisión de partículas, representan un serio peligro para la vegetación y la vida animal en las redondezas [3].

Con todo, el impacto ambiental puede ser minimizado, agregándose valor económico a las escorias si se las aplica en la construcción civil sobre diferentes formas, como balasto en las vías ferroviarias, material de terraplén, agregados para base y sub-base de pavimentos o revestimiento asfáltico, agregado para hormigón y materia prima en la producción de cemento [2, 4, 5]. El destino más noble de esos materiales reciclables depende de la existencia de características adecuadas al uso propuesto.

Mehta y Monteiro [6] afirman que descartar esos sub-productos reciclables (como las escorias) como agregado para el hormigón y en el sub-lecho de carreteras es un aprovechamiento menos noble, que no utiliza el potencial de esos materiales con propiedades piroclásticas (*pozzolánicas*) y de cementación. De esta forma, sustituir parte del cemento (en la fabricación del cemento o en la producción de hormigones), constituye una aplicación más noble, que resulta atractiva desde el punto de vista económico, desde que el precio de los cementos suplementarios es más bajo que el del cemento [7]. Además, este tipo de empleo permite excelentes ventajas económicas y energéticas, como un menor impacto ambiental en la fabricación de cemento, la disminución de la formación de gases, especialmente el CO<sub>2</sub>, perjudicial a la atmósfera, economía de energía y preservación de recursos naturales, todo lo que la califica como una práctica sustentable [4].

La posibilidad de la utilización de escorias como material con propiedades piroclásticas (de tipo pozzolana) y o de cementación depende fundamentalmente de su composición química (escorias ácidas o básicas), de sus características reactivas (depende del tipo de enfriamiento) y de características ambientales (clasificación del residuo como peligroso, no inerte o inerte).

Experiencias con escorias de alto horno han demostrado que mayor proporción vítrea (estructura amorfa) contribuye decisivamente en la reactividad de estos residuos una vez incorporados al cemento, al igual que una adecuada composición química [8, 9].

Masuro [10] comprobó que a través de la *granulación* (enfriamiento brusco), las escorias de acería eléctrica (escorias de refinado oxidante y reductor) adquieren estructura vítrea (amorfa), estabilizando sus propiedades expansivas, pudiendo ser utilizadas como adición al cemento, además de permitir significativa recuperación de la fase metálica. Reddy et al. [11] también comprobaron lo mismo para la escoria de acería a oxígeno enfriada bruscamente cuanto su estabilización, obtención de estructura vítrea, e la posibilidad de adición en cemento.

Naik [12] observa que la escoria de fundición (cupola) es apropiada para uso como agregado leve en materiales a base de cemento. Él también observa que la escoria tiene sido usada como sustituto de agregado en concreto estructural.

La escoria granulada de fundición (EGF) presenta estructura amorfa, compuesta esencialmente por óxidos de silicio y calcio, de acuerdo con Aderibigbe y Ojobo [13]. De esta forma, este trabajo tiene como

objetivo estudiar el desempeño de los hormigones con la utilización de la escoria granulada de fundición como sustitución de parte del cemento, a través de la evaluación de sus propiedades mecánicas. Para ello se amoldaron cuerpos de prueba de hormigón con diferentes combinaciones de tenores de sustitución de cemento por escoria granulada de fundición (10%, 30% y 50%), en volumen, y relaciones agua/aglomerante (0,40; 0,55 0,70), a ser comparadas con el hormigón de referencia (sin EGF). Para cada edad de hormigón (7, 28 y 91) días se realizaron ensayos mecánicos, tales como la resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tracción por compresión diametral y resistencia a la tracción en la flexión.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Variables Analizadas

El estudio del efecto de la utilización de escoria granulada de fundición (EGF) como sustitución de parte del cemento en hormigones, sobre las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tracción por compresión diametral y resistencia a la tracción en la flexión) de estos hormigones, fue desarrollado a través de la elaboración de una matriz experimental, donde el modelo estadístico adoptado fue un Proyecto Factorial Cruzado Completo y con Repetición. Se definió una secuencia económica y eficiente de ensayos y evaluación estadística de los resultados.

Como parámetro de comparación fueron moldeados hormigones referencia, sin la utilización de EGF como sustitución de parte del cemento.

En este proyecto experimental, los factores controlables (variables independientes) elegidos, o sea, parámetros del proceso de efectos posiblemente significativos sobre las variables de respuesta, fueron:

- o tenor de sustitución de cemento por escoria granulada de fundición (TE), en volumen, donde fueron investigados cuatro niveles, tres tenores de sustitución (10%, 30 % y 50 %) y la referencia (0 %);
- o la relación agua/aglomerante (a/agl.), o sea, agua/(cemento + EGF), donde fueron investigados tres niveles (0,40; 0,55 y 0,70);
- o la edad (grado de hidratación) del hormigón, investigándose tres niveles (7, 28 y 91 días).

Las variables de respuesta (variables dependientes) medidas fueron:

- o Resistencia a la compresión uniaxial ( $f_c$ );
- o Resistencia a la tracción en la flexión ( $f_t^F$ );
- o Resistencia a la tracción por compresión diametral ( $f_t^D$ ).

La matriz experimental formada por la combinación entre los factores controlables (tenor de sustitución de EGF x relación agua/ aglomerante) fue compuesta por 12 combinaciones, o sea, 12 diferentes concreciones, donde para cada concreción fueron moldeados cuerpos de prueba (CP's) para cada una de las edades (7, 28 y 91 días), de cada variable de respuesta investigada. Fueron realizadas tres repeticiones, correspondiendo a un total de 36 tratamientos (concreciones), totalizando 324 CP's prismáticos y cilíndricos moldeados.

Después del ajuste de la curva de dosificación (proporcionamiento de la mezcla), la secuencia de concreción se hizo aleatoria, estableciéndose una consistencia del hormigón constante (*slump*) e igual a  $8 \pm 1$  cm, como factor de control de los hormigones referencia y hormigones con EGF como sustitución de parte del cemento.

Los materiales utilizados en cada concreción (hormigonera) fueron:

- o hormigones referencia: grava, arena, cemento, agua;
- o hormigones con EGF: grava, arena, cemento, escoria granulada de fundición (EGF), agua.

Se utilizó el método IPT/EPUSP para la dosificación de los concretos armados.

El modelo de comportamiento de las resistencias del concreto para cada una de las tres variables de respuesta estudiadas fue obtenido a través del análisis de regresión lineal múltiple.

### 2.2 Materiales Utilizados

#### 2.2.1 Cemento

Con el objetivo de evaluar la influencia de la sustitución de parte del cemento por escoria granulada de fundición (EGF) sobre la resistencia del hormigón, sin la interferencia de otras adiciones, se optó por la utilización de cemento más puro y económico encontrado comercialmente. De esta forma, el cemento utilizado en la experiencia fue el CP II-F (cemento portland compuesto con *filler*), que presenta un máximo de 10% de adición de *filler*. El cemento CP II-F utilizado presenta masa específica igual a 3,11 g/cm<sup>3</sup> y tamaño medio de los granos igual a 16,67 µm. La tabla 1 muestra la composición química del CP II-F.

**Tabla 1:** Composición química del CP II-F (Cemento Portland Compuesto con *filler*).

Principales compuestos	CP II-F (%)
SiO <sub>2</sub>	19,88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,73
CaO	64,40
MgO	2,01
SO <sub>3</sub>	2,80
Na <sub>2</sub> O	0,01
K <sub>2</sub> O	0,71
CaO Libre	0,92

### 2.2.2 Escoria Granulada de Fundición (EGF)

La escoria granulada de fundición es un residuo generado en el proceso de fusión de chatarras de hierro fundido en horno cubilote. Presenta estructura amorfa, resultante del enfriamiento brusco (también llamado granulación) que sufre durante su vaciamiento a un canal con flujo de agua.

La muestra de EGF fue el resultado de distintas cargas del horno cubilote y realizada en diferentes días, para garantizar la mayor representatividad. Este material, durante la colecta se presenta sobre la forma de pequeñas partículas con dimensiones próximas a las de la arena gruesa. Para adquirir características apropiadas como sustituto de parte del cemento, esta escoria fue beneficiada (molida) en molino de aros cilíndricos, hasta alcanzar un tamaño promedio de los granos de 26,4  $\mu\text{m}$ , cumpliendo así uno de los criterios físicos establecidos por la NBR 12653/1992 [14], que clasifica los materiales con propiedades piroclásticas (de tipo *pozzolana*). Esta norma también exige como índice de actividad *pozzolánica* el valor mínimo de 75%. La escoria granulada de fundición beneficiada presentó un índice de actividad *pozzolánica* igual a 88,5%, alcanzando así las condiciones de la norma [15].

La escoria granulada de fundición (EGF) beneficiada presenta masa específica igual a 2,83 g/cm<sup>3</sup> y grado de vitrificación igual a 97% (determinado por el método *Mac Máster*), con microscopía óptica de luz transmitida. La composición química de la EGF, obtenida vía fluorescencia de Rayos X se encuentra en la Tabla 2.

**Tabla 2:** Composición química de la Escoria Granulada de Fundición (EGF).

Principales Compuestos	Escoria Granulada de Fundición (%)
SiO <sub>2</sub>	49,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,68
FeO	2,97
MnO	2,81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02
S	0,64
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,67
TiO <sub>2</sub>	0,67
CaO	21,78
MgO	11,00
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO (%)	62,85
(%CaO) / (%SiO <sub>2</sub> )	0,4427

### 2.2.3 Agregados

Los hormigones fueron confeccionados utilizando agregados diminutos (arena) y desenvueltos (grava) de la región. La arena media presenta dimensión máxima característica igual a 4,80 mm, módulo de finura 2,69 y masa específica de 2,63 g/cm<sup>3</sup>. El agregado desenvuelto de origen basáltica posee dimensión máxima característica de 19 mm. Módulo de finura de 6,88 e masa específica de 2,80 g/cm<sup>3</sup>. La distribución granulométrica (NBR 7217/1987) [16] de los agregados es presentada en las Tablas 3 y 4.

**Tabla 3:** Composición granulométrica de la arena.

<b>Cedazo (mm)</b>	<b>Retenido (%)</b>	<b>Retenido Acumulado (%)</b>
4,80	0	0
2,40	5	5
1,20	16	21
0,60	31	52
0,30	40	92
0,15	8	100
< 0,15	0	100

**Tabla 4:** Composición granulométrica de la grava.

<b>Cedazo (mm)</b>	<b>Retenido (%)</b>	<b>Retenido Acumulado (%)</b>
19,00	0	0
12,50	61	61
9,50	28	89
6,30	9	98
4,80	1	99
< 4,80	1	100

## 2.3 Métodos de Ensayo

### 2.3.1 Resistencia a la Compresión Uniaxial

El método de ensayo de la resistencia a la compresión del hormigón sigue las determinaciones de la norma NBR 5739/1994 [17], y consiste básicamente en la aplicación controlada de una carga vertical centrada en la faceta del cuerpo de la prueba (CP) cilíndrico de hormigón, de dimensiones 10 cm x 20 cm, siendo este CP dispuesto entre los platos de compresión de la máquina de ensayo (Figura 1 a).

Los cuerpos de prueba fueron mantenidos en proceso de cura húmeda hasta la edad de ensayo. Para cada edad de 7, 28 y 91 días fue ensayado un cuerpo de prueba a la compresión por hormigonera (cubrimiento con azufre), resultando en un total de 3 CP's, por edad, después de cada repetición.

### 2.3.2 Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral

Después del moldeamiento de cuerpos de prueba cilíndricos de 10 cm x 20 cm, respetándose el tiempo de cura húmeda para cada edad (7, 28 o 91 días), se procede a la determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral del hormigón, de acuerdo con la prescripción de la norma NBR 7222/1994 [18].

El contacto entre el cuerpo de prueba (CP) y los platos de la máquina de ensayo debe darse solamente a lo largo de las dos generatrices diametralmente opuestas del cuerpo de prueba, conforme la Figura 1b.

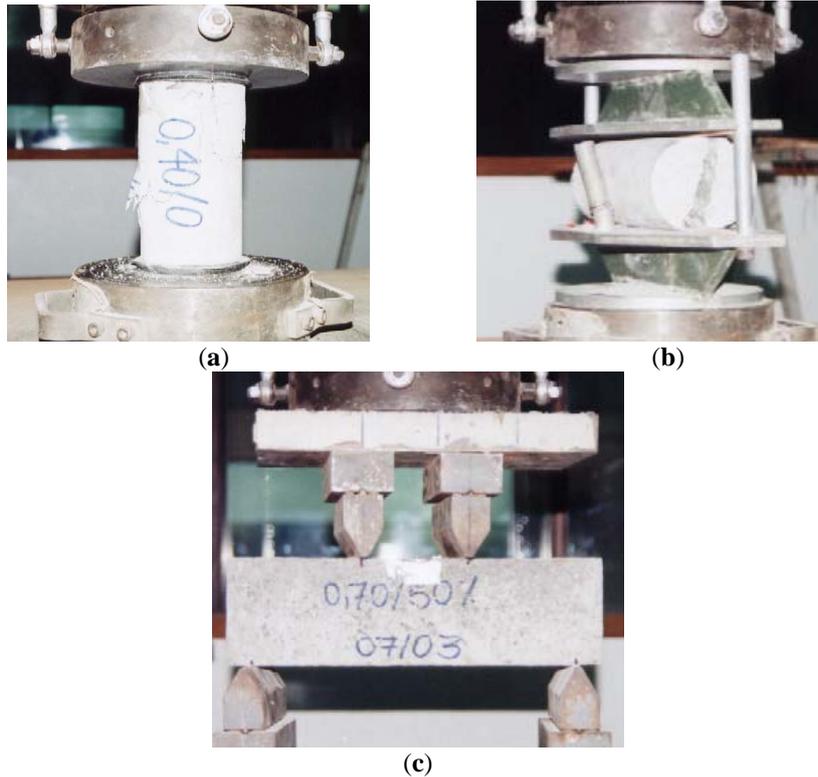
Para cada edad de 7, 28 y 91 días se ensayó un cuerpo de prueba a la Tracción por Compresión Diametral por hormigonera, resultando en un total de 3 CP's, por edad, después de cada repetición.

### 2.3.3 Resistencia a la Tracción en la Flexión

Este ensayo es realizado de acuerdo con la norma NBR 12142/1991 [19]. Según esta norma, la resistencia a la tracción en la flexión debe ser medida en cuerpos de prueba (CP's) prismáticos de hormigón, de dimensiones 10 cm x 20 cm x 35 cm (anchura x altura x largura), siendo la carga aplicada en los tercios medios de cada CP (Figura 1 c).

En este ensayo los cuerpos de prueba también fueron mantenidos en proceso de cura húmeda hasta la edad de ensayo. Para cada edad de 7, 28 y 91 días fueron ensayados un cuerpo de prueba a la Tracción en la Flexión por hormigonera, resultando en un total de 3 CP's, por edad, después de cada repetición.

En el original que acompaña constan tres fotos, respectivamente individualizadas con los literales (a), (b) y (c) y la indicación Figura 1.



**Figura 1:** Ensayos mecánicos en hormigón (a) resistencia a la compresión uniaxial (b) resistencia a la tracción por compresión diametral (c) resistencia a la tracción en la flexión.

### 3 DISCUSION DE LOS RESULTADOS

El análisis y tratamiento de los datos (resultados) fue desarrollado con el auxilio de un programa estadístico (Statgraphics), a través del análisis de regresión lineal múltiple, utilizándose los valores codificados de los factores controlables, con intervalo comprendido entre 0,5 y 1,5. Este análisis permitió obtener el mejor ajuste, o sea, el modelamiento del comportamiento de las resistencias del hormigón para cada una de las tres variables de respuesta (resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la tracción por compresión diametral y resistencia a la tracción en la flexión) de estudio.

El modelo de comportamiento de la resistencia a la compresión uniaxial ( $f_c$ ) del hormigón con sustitución de parte del cemento por escoria granulada de fundición (EGF), así como del hormigón de referencia (sin EGF), obtenido a través del análisis de regresión lineal múltiple, válido para el intervalo de los niveles codificados de los factores controlables que hacen parte de esta investigación, tuvo como resultado la siguiente expresión, representada por la ecuación 1.

$$f_c = -215,576 - 25,3684 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^{1,2}} + 224,691 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,820909 \cdot \frac{1}{(edad)^3} + 30,1479 \cdot \frac{1}{(a/agl. + TE)} + 40,5266 \cdot \frac{(edad)^{0,1}}{(a/agl.)} - 17,615 \cdot \frac{(edad)^{0,1}}{(TE)} \quad [MPa] \quad (1)$$

$R^2 = 93,053\%$

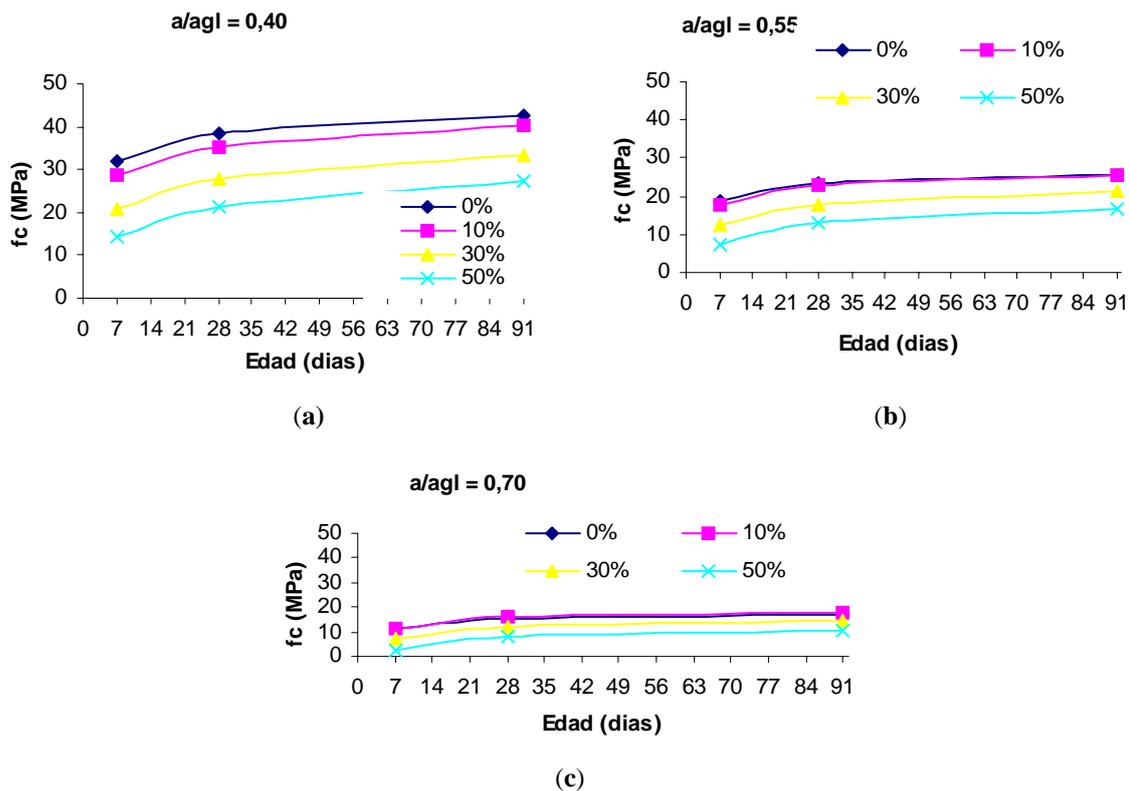
En el caso de la resistencia a la tracción por compresión diametral ( $f_t D$ ), el modelo del comportamiento de  $f_t D$  del hormigón con sustitución de parte del cemento por EGF, así como el del hormigón de referencia, obtenido a través del análisis de regresión lineal múltiple es válido para el intervalo de los niveles codificados de los factores controlables que hacen parte de este proyecto experimental, y aparece presentado en la ecuación 2.

$$\begin{aligned}
 Ft'D = & - 34,506 + 0,01612 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^5} + 10,4931 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} + 23,7707 \cdot (edad)^{0,1} \\
 & + 9,54919 \cdot \frac{1}{(a/agl. + TE)^{0,3}} - 5,63454 \cdot \frac{(edad)^{0,3}}{(TE)^{0,2}} - 0,0172324 \cdot \frac{(edad)^{0,1}}{(a/agl. \times TE)^3} \quad [MPa] \\
 R^2 = & 84,0904\%
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

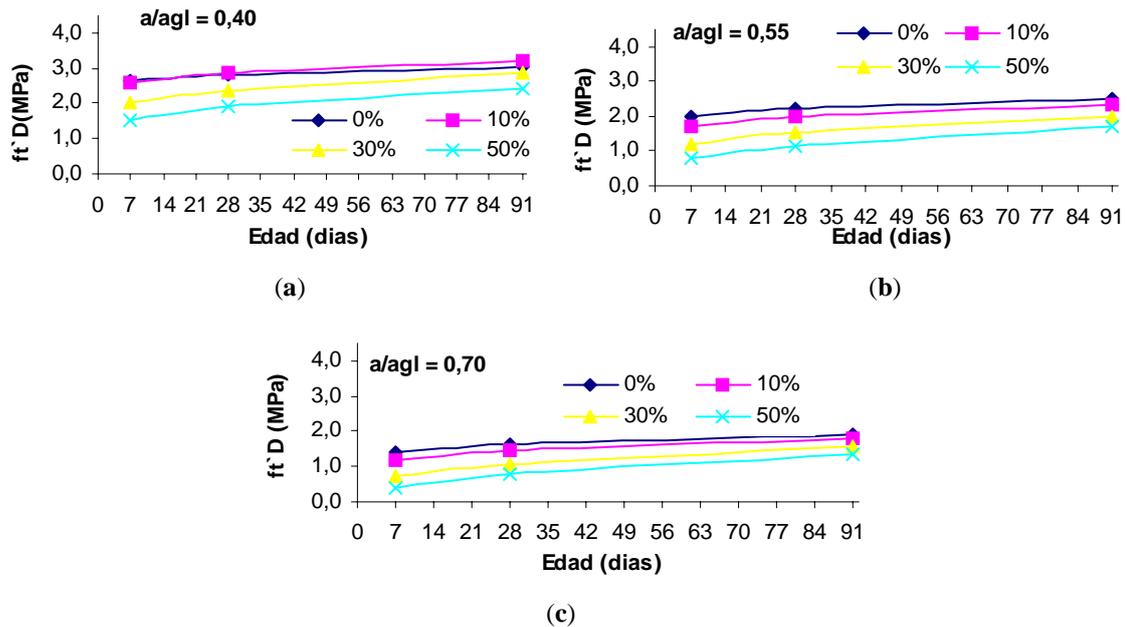
El modelo de comportamiento de resistencia a la tracción en la flexión ( $f_t'F$ ) del hormigón con sustitución de parte del cemento por EGF, así como del hormigón de referencia, obtenido a través del análisis de regresión lineal múltiple, siendo válido para el intervalo de los niveles codificados de los factores controlables de este estudio experimental, está representado por la ecuación 3.

$$\begin{aligned}
 Ft'F = & + 85,751 + 21,6992 \cdot \frac{1}{(a/agl.)^{0,1}} - 49,4963 \cdot \frac{1}{(TE)^{0,1}} - 0,997984 \cdot (edad)^3 \\
 & - 0,0713845 \cdot \frac{(TE)}{(a/agl.)^{0,4}} + 0,216881 \cdot \frac{(a/agl.)^{0,2}}{(edad)^3} - 53,0664 \cdot \frac{(TE)^{0,1}}{(edad)} \quad [MPa] \\
 R^2 = & 90,3052\%
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

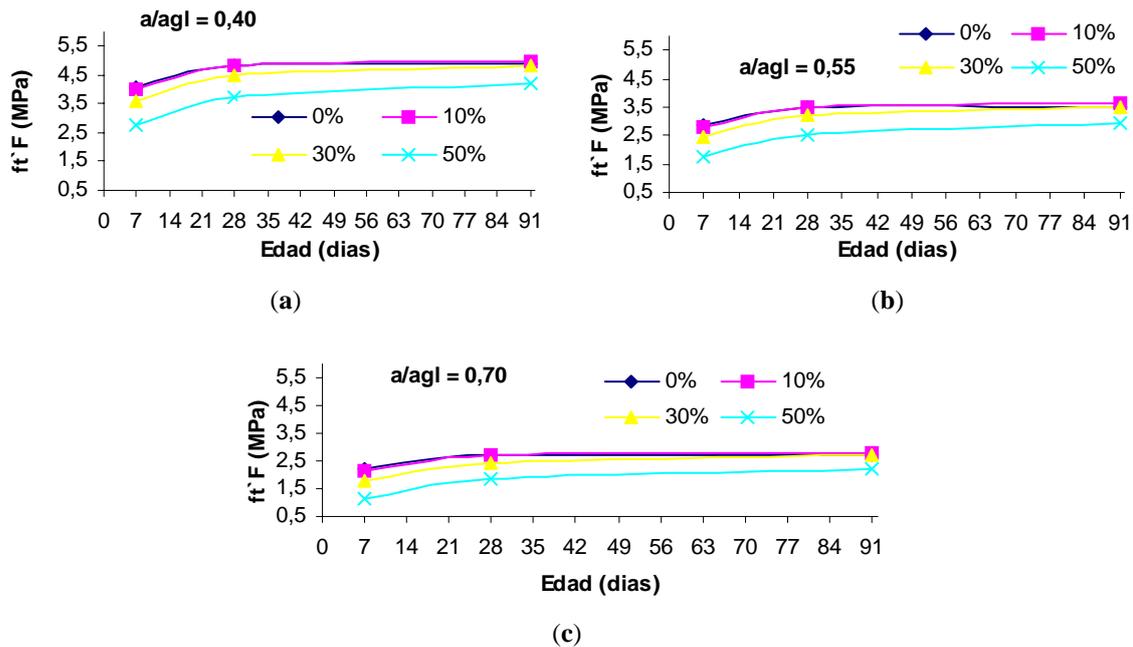
Utilizándose los modelos descritos por las ecuaciones 1,2 y 3, fue posible obtener para cada uno de los efectos principales e interacciones significativas, gráficas mostrando el comportamiento del los hormigones desenvueltos. Algunos de estos análisis son presentados a continuación.



**Figura 2:** Efecto de la interacción del tenor de sustitución de cemento por EGF y de la edad sobre la resistencia a la compresión uniaxial del hormigón (a) relación agua/aglomerante=0,40 (b) relación agua/aglomerante=0,55 (c) relación agua/aglomerante=0,70.



**Figura 3:** Efecto de la interacción del tenor de sustitución de cemento por EGF y de la edad sobre la resistencia a la tracción por compresión diametral del hormigón (a) relación agua/aglomerante = 0,40 (b) relación agua/aglomerante = 0,55 (c) relación agua/aglomerante = 0,70.



**Figura 4:** Efecto del tenor de sustitución de cemento por EGF y de la edad sobre la resistencia a la tracción en la flexión del hormigón (a) relación agua/aglomerante = 0,40 (b) relación agua/aglomerante = 0,55 (c) relación agua/aglomerante = 0,70.

La Figura 2 muestra el efecto de la interacción del tenor de sustitución de cemento por EGF y de la edad (grado de hidratación) sobre la resistencia a la compresión uniaxial del hormigón. Para esta interacción, se construyó una gráfica para cada relación agua/aglomerante (0,40; 0,55 y 0,70). Observándose las tres Figuras (Figura 2a, Figura 2b, Figura 2c), queda evidente que los valores de las resistencias a la compresión uniaxial del tenor 10% de sustitución de cemento por EGF se aproximan de los valores de referencia (0%) a medida que la relación agua/aglomerante aumenta (de 0,40 para 0,70), quedando prácticamente iguales para la relación agua/aglomerante (a/agl.) de 0,70. También, como era esperado, se verifica en la Figura 2, que la resistencia a la compresión es directamente proporcional al grado de hidratación (edad) del hormigón.

En las Figuras 3 y 4, pueden ser observados los efectos de la interacción del tenor de sustitución de cemento por EGF y de la edad (grado de hidratación) sobre las resistencias a la tracción por compresión diametral y a la tracción en la flexión, respectivamente, del hormigón. En estas interacciones, también fueron construidas gráficas para cada relación agua/aglomerante (0,40; 0,55 y 0,70). Se observó más una vez el buen desempeño de la resistencia, en este caso para las resistencias a la tracción por compresión diametral y a la tracción en la flexión, ante la utilización del tenor de 10% de sustitución de cemento por EGF (Figura 3a, Figura 3b, Figura 3c; Figura 4a, Figura 4b, Figura 4c), obtienen doce valores similares al de referencia (0%).

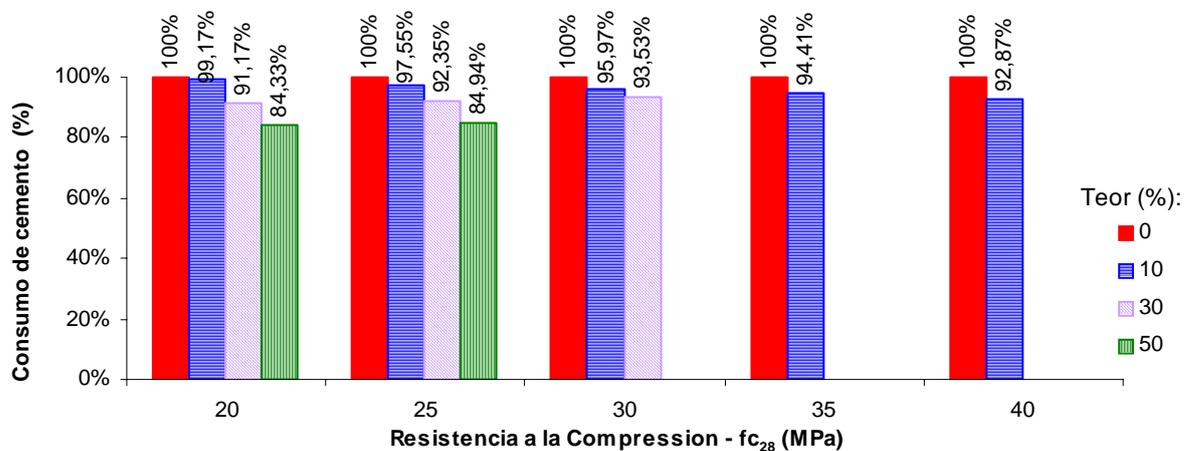
Además, también en el caso de las Figuras 3 y 4, como se esperaba, las resistencias a la tracción, son directamente proporcionales al grado de hidratación (edad) del hormigón.

Las Figuras 5 y 6 muestran el consumo de cemento en función de la resistencia a la compresión uniaxial, respectivamente para las edades de 28 y 91 días del hormigón. Esas gráficas fueron obtenidas a través del ajuste de las curvas de dosificación para cada tenor de sustitución de cemento por EGF. Se percibe que el consumo de cemento disminuye a medida que se aumenta el tenor de sustitución de cemento por EGF, lo que además de representar una ganancia significativa con la economía de cemento, también representa una ganancia técnica, ya que se minimizan los perjuicios de durabilidad causados al hormigón durante la hidratación del cemento, cuando el consumo de cemento se vuelve muy elevado.

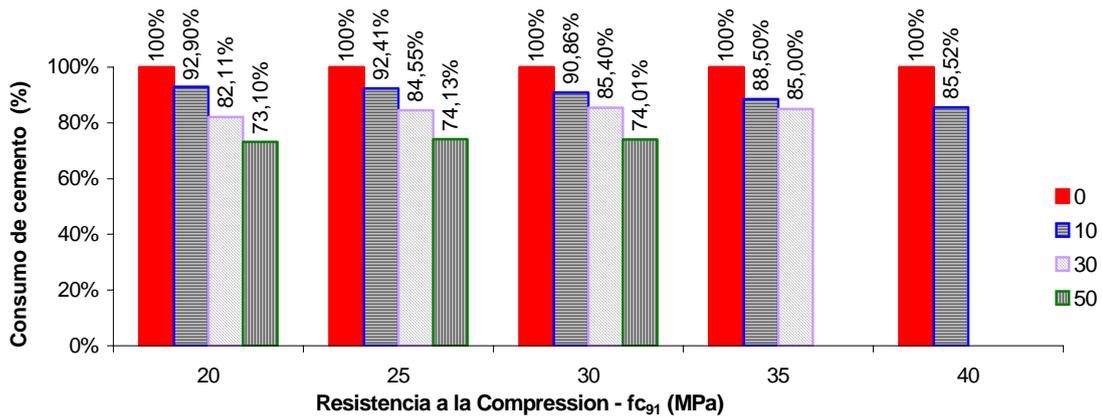
Esto ocurre debido al hecho de que las relaciones de hidratación de los compuestos de cemento Portland son exotérmicas. Así, hormigones con elevados consumos de cemento presentan mayor velocidad de desprendimiento de calor en las primeras edades y consecuentemente, poseen mayor tendencia a la fisura, mayores retracciones química y térmica [20].

También puede ser observado en las Figuras 5 y 6, al analizarse el consumo de cemento para el mismo nivel de resistencia a la compresión, en edades diferentes (28 y 91 días), que la ventaja económica y técnica representada por el menor consumo de cemento es más pronunciada para la edad de 91 días pues es justamente en esta edad que la contribución de la EGF fue mayor en términos de resistencia a la compresión, probablemente resultante de las reacciones *pozzolánicas* (las resistencias a la compresión de los hormigones con EGF presentaron mayor crecimiento para las edades más avanzadas, de 91 días). Esto puede ser explicado por el hecho de que la cantidad de cemento en la mezcla influye en el desprendimiento total de calor. Así, con la sustitución de parte del cemento en hormigones por materiales alternativos, las reacciones *pozzolánicas* se desenvuelven con más lentitud, alcanzándose mayores resistencias en edades más avanzadas.

En el caso de hormigones armados, este hecho es ventajoso, ya que se reducen las chances de fisuras térmicas.



**Figura 5:** Consumo de cemento en función de la resistencia a la compresión uniaxial, para la edad del hormigón de 28 días. En esta gráfica aparece en la vertical el consumo de cemento en porcentaje, y en el horizontal la resistencia a la compresión uniaxial, asignándose un color a cada tenor de sustitución.



**Figura 6:** Consumo de cemento en función de la resistencia a la compresión uniaxial, para la edad del hormigón de 91 días; correspondiendo la misma descripción hecha para la gráfica anterior.

#### 4 CONSIDERACIONES FINALES

Los modelos obtenidos a través de las ecuaciones 1, 2 y 3, representan respectivamente el comportamiento de las variables de respuesta, resistencia a la compresión uniaxial ( $f_c$ ), resistencia a la tracción por compresión diametral ( $f_t^D$ ) y resistencia a la tracción en la flexión ( $f_t^F$ ), de hormigones con sustitución de parte del cemento por escoria granulada de fundición (EGF), así como del hormigón de referencia.

Observando a los resultados obtenidos, queda evidente que los valores de las resistencias a la compresión uniaxial con el grado de 10% de sustitución de cemento por EGF se aproximan de los valores de referencia (con 0% de sustitución) a medida que la relación agua/aglomerante aumenta (de 0,40 para 0,70), quedando prácticamente iguales para la relación agua/aglomerante ( $a/agl.$ ) de 0,70. Como era esperado, se verifica que la resistencia a la compresión es directamente proporcional al grado de hidratación (y proporcional a la edad) del hormigón.

Pueden ser percibidos los efectos de la interacción del grado de sustitución de cemento por EGF y de la edad (grado de hidratación) sobre las resistencias a la tracción por compresión diametral y a la tracción en la flexión, respectivamente, del hormigón. Se observó más una vez el buen desempeño de la resistencia, en este caso para las resistencias a la tracción por compresión diametral y a la tracción en la flexión, ante la utilización del grado de 10% de sustitución de cemento por EGF, obtienen doce valores similares al de referencia (0%).

Se verifica que el consumo de cemento disminuye a medida que se aumenta el grado de sustitución de cemento por EGF, lo que además de representar una ganancia significativa con la economía de cemento, también representa una ganancia técnica, ya que se minimizan los perjuicios de durabilidad causados al hormigón durante la hidratación del cemento, cuando el consumo de cemento se vuelve muy elevado.

Se percibe que el consumo de cemento disminuye a medida que se aumenta el grado de sustitución de cemento por EGF, lo que además de representar una ganancia significativa con la economía de cemento, también representa una ganancia técnica, ya que se minimizan los perjuicios de durabilidad causados al hormigón durante la hidratación del cemento, cuando el consumo de cemento se vuelve muy elevado.

Los resultados presentados demuestran la viabilidad del reciclaje de EGF como sustitución de parte del cemento en hormigones, en relación a las propiedades mecánicas investigadas. El grado de 10% de sustitución de cemento por EGF presentó resultados de resistencia del hormigón similares a los del hormigón de referencia. Además, independientemente del grado de sustitución de cemento por EGF utilizado, se obtuvo significativa economía en el consumo de cemento, habida cuenta de que para todos los grados este consumo disminuyó.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Fundación Becker Ltda. Para el apoyo técnico y al CAPES por la beca de master de Diana Ceccato.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] JOHN, V.M., *Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento*, Tese (Livre docência) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2000.
- [2] GARCÍA, C., SAN JOSÉ, J.T., URRETA, J.I., “Reuse valorization in civil works of electric arc furnace (EAF) slag produced in C.A.P.V”, In: *Proceedings of Global Symposium and Recycling: Waste Treatment and Clean Technology*, pp. 417-424, Espanha, 1999.
- [3] HABASHI, F., “Environmental issues in the metallurgical industry progress and problems”, In: *Proceedings of Global Symposium and Recycling: Waste Treatment and Clean Technology*, pp. 721-734, Espanha, 1999.
- [4] MURPHY, J.N., MAADOWCROFT, T.R., BARR, P.V., “Enhancement of the cementitious properties of steelmaking slag”, *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 36, n. 5, pp. 315-331, 1997.
- [5] VIKLUND-WHITE, C., YE, G., “Utilization and treatment of steelmaking slags”, In: *Proceedings of Global Symposium and Recycling: Waste Treatment and Clean Technology*, pp. 337-345, Espanha, 1999.
- [6] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M., *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*, n. 1, São Paulo, Editora Pini, 1994.
- [7] AÏTCIN, P., *Concreto de alto desempenho*, n. 1, São Paulo, Editora Pini, 2000.
- [8] XINGHUA FU, HOU, W.; YANG, C., LI, D., WU, X., “Studies on Portland cement with large amount of slag”, *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 4, pp. 645-649, April, 2000.
- [9] MURGIER, S., ZANNI, H., GOUVENOT, D., Blast furnace slag cement: a Si and Al NMR study, *Comptes Rendus Chimie*, v. 7, n. 3-4, pp. 389-394, March/April 2004.
- [10] MASUERO, A.B., *Estabilização das escória de aciaria elétrica com vistas a sua utilização como substituição ao cimento*, Tese D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2001.
- [11] REDDY, A.S., PRADHAN, R.K., CHANDRA, S., “Utilization of basic oxygen furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 79, pp. 98-105, May 2006.
- [12] NAIK, T.R., *Environmental-friendly concrete with industrial and post-consumer by-products*, In: Report No. CBU-2004-21 – University of Milwaukee, USA, Published at the National Seminar on Building Materials and Technology for Sustainable Development, Milwaukee, USA, 2005.
- [13] ADERIBIGBE, D.A., OJOBBO, A.E., “Properties of cupola slag as a pozzolana and its effects on partial replacement of cement in a mortar”, *Conservation & Recycling*, v. 5, n. 4, pp. 203-208, April, 1982.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -, *NBR 12653/1992: Materiais Pozzolânicos*, Rio de Janeiro, RJ, 1992.
- [15] CECCATO, D.M., RESCHKE, J.S., GRAFITTI, D.F., MORAES, C.A.M., MASUERO, A.B., VILELA, A.C.F., “Caracterização da escória granulada de fundição visando sua utilização como material cimentante”, In: *Proceedings of Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul – SULMAT*, CD-ROM, pp. 633-643, Joinville, SC, Brasil, Setembro 2002.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -, *NBR 7217/1987: Agregados: determinação da composição granulométrica*, Rio de Janeiro, 1987.

- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -, *NBR 5739/1994: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, 1994.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -, *NBR 7222/1994: Argamassa e concreto: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos*, Rio de Janeiro, 1994.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT -, *NBR 12142/1991: Concreto: determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos*, Rio de Janeiro, 1991.
- [20] NEVILLE, A.M., *Propriedades do concreto*, 2ed, São Paulo, SP, PINI, 1997.