



**ENTAC2006**

A CONSTRUÇÃO DO FUTURO | XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído | 23 a 25 de agosto | Florianópolis/SC

## **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AREIA INDUSTRIAL**

Jardel Pereira Gonçalves<sup>1</sup>; Romildo Dias Toledo Filho<sup>2</sup>; Eduardo M. R. Fairbairn<sup>2</sup>; Marcelo M. Tavares<sup>3</sup> e Emerson R. Cunha<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dr. em Engenharia Civil, professor DTEC/UEFS, jardelpg@gmail.com

Depto. Tecnologia – Universidade Estadual de Feira de Santana – BR 116, KM 03 – Campus Universitário – Feira de Santana, BA - CEP 44031 460 – Fone: (75) 224 8117

<sup>2</sup> Dr. em Engenharia Civil, professor PEC/COPPE/UFRJ

<sup>3</sup> Dr. em Engenharia Civil, professor PEMM/COPPE/UFRJ

<sup>4</sup> Dr. em Engenharia Civil, doutorando PEMM/COPPE/UFRJ

### **Resumo**

Neste trabalho, avalia-se a viabilidade técnica da utilização da areia industrial em substituição total do agregado miúdo natural na produção de concreto. Utilizou-se uma areia industrial produzida num britador de impacto de eixo vertical em uma usina piloto. Foram produzidos concretos utilizando a areia industrial, em comparação com concretos produzidos com areia normal do IPT e areia natural. Foram produzidas diferentes classes de resistência de concretos com relação água/cimento variando de 0,38 a 0,62. A trabalhabilidade das misturas foi mantida constante utilizando superplastificante. As propriedades avaliadas foram o comportamento tensão versus deformação (resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico) e a resistência à tração (flexão e diametral). Os resultados demonstram que os concretos produzidos com areia industrial apresentam desempenho compatível ao das misturas contendo areia natural e normal, sendo sua utilização viável tecnicamente.

Palavras chave: areia artificial, concreto, comportamento mecânico, trabalhabilidade

### **Abstract:**

In this paper it is evaluated the viability of the use of industrial sand as a substitute of natural sand in concrete production. In the study it was used an artificial sand produced by autogenous milling, a natural river sand and the reference normal IPT sand. It was produced concretes of different classes of resistance with water/cement ratio ranging from 0.38 to 0.62. The workability of the concretes was kept constant using superplasticizer. The stress-strain curves under compression loads was obtained for all mixtures produced and from these curves it was obtained the elastic modulus, compressive strength and strain at peak stress. The tensile strength was obtained from the bending and indirect tension tests. The obtained results indicate that the properties of the concretes produced using industrial sand are equivalent to those obtained for the mixtures produced using natural river sand and normal IPT sand indicating the technical viability of the use of this type of sand in concrete production.

Key-words: artificial sand, concrete, mechanical behavior, workability

## 1.0 Introdução

A indústria da construção civil é uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais. A utilização desses recursos naturais se dá principalmente na produção de cimento e no beneficiamento de agregados, pedra britada e areia, visando a produção de argamassas e concretos.

A indústria de agregados é responsável por 16,51% da produção mineral brasileira, sendo 5,62% desse total destinado a produção de areia e cascalho e 10,89% para o setor de pedra britada (TOLMASQUIN e SZKLO, 2000). Estima-se que no Brasil, em 2000, a produção de agregados naturais foi de 238 milhões de m<sup>3</sup>, sendo que 141,1 milhões de m<sup>3</sup> de areias e 93,1 milhões de m<sup>3</sup> de pedra britada (VALVERDE, 2003). O processo de beneficiamento de agregados utiliza, principalmente, a força motriz para acionamento de motores elétricos, britadores, esteiras, peneiras vibratórias, caminhões para transporte e iluminação. Este setor consumiu, em 2001, cerca de 365,7 mil tep (tonelada equivalente de petróleo), sendo as principais fontes energéticas o óleo combustível (29,80%) e a eletricidade (25,50%) (MME, 2001). A queima de combustível, utilizada para a produção dos agregados, também é responsável por emissões de gases (CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, etc.).

A escassez dos recursos naturais para produção de agregado miúdo levou o mercado consumidor dos grandes centros urbanos a buscar areias em lavras a grandes distâncias. Como consequência disso, observou-se uma elevação do custo final do produto e a degradação de áreas, como leito de rio. A elevação do custo final se deve em grande parte ao maior consumo de combustível necessário para o transporte dos agregados para os grandes centros.

Visando minimizar este problema, instituições de pesquisa e o setor mineral vêm buscando alternativas para a produção de areia através de substitutivos naturais ou artificiais. Dentre as alternativas para substituição do agregado natural decorrentes de sua produção, tem-se: (i) a reciclagem através da utilização de materiais alternativos (resíduos sólidos), (ii) a utilização de areia a partir dos finos de britagem e (iii) a utilização da areia artificial, que é produzida a partir do agregado graúdo.

A produção de agregado miúdo a partir do agregado graúdo, ou seja, a produção de areia a partir de pedra britada chamada de areia industrial ou artificial, apresenta-se também como alternativa, pois esta pode ser produzida próximo ao mercado consumidor reduzindo assim seu custo final. A areia artificial pode ser produzida através de equipamentos de britagem, como o impactador de eixo vertical. No impactador de eixo vertical a redução do tamanho do material ocorre por um processo de quebra de rocha contra rocha. O produto final é o material menor que 3 mm.

Nesse contexto, a utilização do agregado miúdo industrial ou artificial em substituição ao agregado natural, para produção de concretos, surge como grande desafio. Assim, este trabalho possui como objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização da areia artificial como agregado miúdo para produção de concretos. Foram produzidos concretos contendo areia artificial em comparação a concretos produzidos com a areia padrão (IPT) e uma areia natural. As propriedades avaliadas foram o comportamento tensão versus deformação (resistência à compressão axial, deformação de pico e módulo de elasticidade) e resistência à tração (por compressão diametral e na flexão).

## 2.0 Materiais e Métodos

### 2.1 Materiais

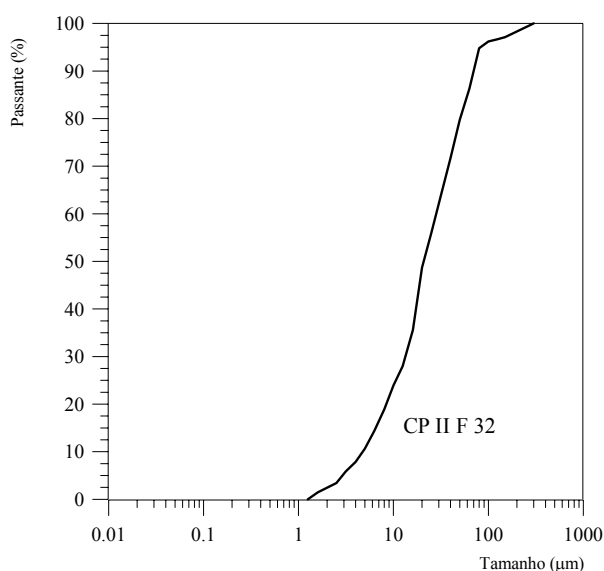
O cimento utilizado foi do tipo CP II F-32. As propriedades do cimento portland utilizado são apresentadas na Tabela 1. A análise granulométrica do cimento foi realizada utilizando-se o equipamento Malvern MasterSizer Micro – MAF 5001. A curva granulométrica é mostrada na Figura 1 (a). O agregado miúdo natural utilizado foi uma areia de rio quartzosa, com módulo de finura 3,02 e massa específica de 2,64 g/cm<sup>3</sup>. Utilizou-se também a areia normal produzida pelo IPT conforme a NBR 7214 (1982) denominada areia normal do IPT. As curvas granulométricas da AN e da areia IPT são apresentadas na Figura 1 (b). A areia industrial foi produzida Pedra Sul Mineração Ltda, que fica

localizada no município de Juiz de Fora, no estado de Minas Gerais. O processo de produção e classificação da areia industrial está descrito em CUNHA et al (2005). A curva granulométrica da areia industrial também é apresentada na Figura 1 (b). Na Tabela 2 apresenta-se o módulo de finura das areias, D90, D50 e D10. A partir do módulo de finura, verifica-se que a areia AI apresenta graduação mais grossa. Foram calculados também o D90 (diâmetro do grão correspondente a 90% de material passante), D50 (diâmetro do grão correspondente a 50% de material passante) e D10 (diâmetro do grão correspondente a 10% de material passante) das areias. Verifica-se que a areia industrial apresenta maiores valores de D90, D50 e D10, confirmando sua graduação mais grossa. As areias AN e IPT apresentam parâmetros muito próximos. Levando em consideração todos os parâmetros, a areia IPT apresenta a graduação mais fina.

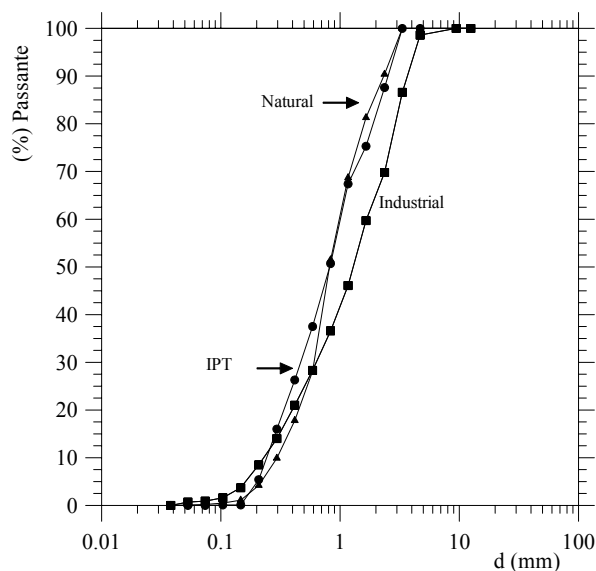
A água utilizada para a produção das argamassas foi proveniente da concessionária de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro/RJ. O superplastificante (SP) utilizado foi da Master Builders Technologies do Brasil, a base de naftaleno sulfonado, disponível comercialmente.

Tabela 1. Propriedades físicas e químicas do cimento CP II F 32

Prop. físicas e químicas	CP II F 32
SiO <sub>2</sub> (%)	19.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.70
CaO (%)	62.80
MgO (%)	3.10
Na <sub>2</sub> O (%)	0.07
K <sub>2</sub> O (%)	0.80
TiO <sub>2</sub> (%)	-
Resíduo insolúvel (%)	1.50
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	3,10
P.F. (%) – TG (%)	5.42



(a)



(b)

Figura 1. (a) Curva granulométrica do cimento - CP II F 32 e (b) Curva granulométrica do agregado miúdo natural, areia normal IPT e areia industrial

Tabela 2. Teor de finos, módulo de finura, D90, D50 e D10 das areia industrial, IPT e AN

		Módulo de finura	D90	D50	D10	Dmax
Areia	Teor de Finos (%)					
AI	1,60	3,40	3,50	1,30	0,22	3,327
IPT	0,10	2,91	2,50	0,70	0,25	2,362
AN	0,50	3,02	2,50	0,80	0,30	2,362

## 2.2 Métodos

Foram produzidos concretos contendo areia natural (CAN), areia normal do IPT (CIPT) e contendo areia industrial (CAI). Neste trabalho, os parâmetros de dosagem dos concretos foram definidos de acordo com os métodos de METHA e AITCIN (1990) e De LARRARD (1999), visando obter concretos de maior compacidade granular. A proporção e consumo dos materiais dos concretos são apresentados na Tabela 3. Para cálculo do consumo por m<sup>3</sup> dos materiais considerou-se 2% de ar aprisionado. A trabalhabilidade dos concretos foi avaliada através do abatimento de tronco de cone (NBR 7223, 1992). O abatimento de 130 ± 10mm foi fixado como o índice de trabalhabilidade para todos os concretos. Os concretos com relação água/cimento 0,50 e 0,38, tanto para os produzidos com areia normal IPT quanto para os produzidos com areia natural e industrial, necessitaram da utilização de superplastificante para atingir a trabalhabilidade fixada.

Tabela 3. Programa experimental desenvolvido e consumo dos materiais por m<sup>3</sup>

Mistura	Proporção dos materiais (em massa)				Consumos (kg/dm <sup>3</sup> )				
	C	Areia	Brita	a/c	C	Areia	Brita	Água	SP
CIPT01	1	2,00	2,53	0,62	375,6	751,1	950,2	232,9	-
CIPT02	1	1,65	2,09	0,50	445,7	735,5	931,6	222,9	0,9
CIPT03	1	1,41	1,78	0,38	522,3	736,4	929,7	198,5	2,1
CAN01	1	2,00	2,53	0,62	375,2	750,3	949,2	232,6	-
CAN02	1	1,65	2,09	0,50	445,3	734,7	930,6	222,6	0,9
CAN03	1	1,41	1,78	0,38	521,7	735,6	928,7	198,3	2,1
CAI01	1	2,00	2,53	0,62	380,5	761,0	962,6	235,9	-
CAI02	1	1,65	2,09	0,50	451,4	744,9	943,5	225,7	0,9
CAI03	1	1,41	1,78	0,38	529,0	745,9	941,6	201,0	2,1

Os concretos foram produzidos em um misturador planetário de eixo vertical com capacidade de 180 litros (ver Figura 2) e o processo de mistura obedeceu a seguinte sequência (i) colocação e homogeneização do agregado graúdo e cimento no misturador; (ii) colocação de 70% da água mais SP (quando havia); (iii) colocação do agregado miúdo; (iv) colocação do resto da água mais SP. O tempo de mistura foi de cinco minutos após a colocação da água.

Foram moldados, para cada mistura, 09 corpos-de-prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200mm de altura e 5 corpos-de-prova prismáticos de 100x100x400 mm. O processo de adensamento foi realizado através de mesa vibratória (ver Figura 2). Os corpos-de-prova foram desmoldados após 24 horas e curados em câmara úmida (100% de umidade relativa) a uma temperatura de 23°C ± 2°C até a idade do ensaio. Do total de 09 corpos-de-prova 10x20 cm, 06 foram utilizados para os ensaios de resistência à compressão axial e 03 para os ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

Os 05 corpos-de-prova prismáticos 100x100x400 mm foram utilizados para avaliação da resistência à tração na flexão dos concretos.



Figura 2. Misturador planetário e mesa vibratória utilizados no estudo

Para a verificação do efeito da substituição da areia IPT e da areia natural por areia industrial no comportamento tensão *versus* deformação foram ensaiados, aos 28 dias de idade, seis corpos-de-prova cilíndricos de 100mm de diâmetro e 200 mm de altura. A resistência à compressão axial foi avaliada de acordo com a NBR 5739 (1994). Os ensaios foram executados numa prensa SHIMADZU de 1000kN, com controle de deslocamentos, a uma velocidade de 0,01 mm/min (ver Figura 3 (a)). A aquisição dos sinais correspondentes à carga e ao deslocamento foi realizada usando-se um sistema composto pelo condicionador Shimadzu e um microcomputador com capacidade de aquisição de cinco leituras por milissegundo. Os deslocamentos longitudinais foram medidos através de dois transdutores elétricos (LVDT's A e B) montados na zona central da amostra, conforme mostra a Figura 3 (a). O deslocamento longitudinal final é considerado como sendo a média dos deslocamentos dos LVDT's A e B. A partir da curva tensão versus deformação e de acordo com as recomendações da NBR 8522 (1985), foi calculado o módulo de elasticidade (módulo de Young) secante das misturas avaliadas.

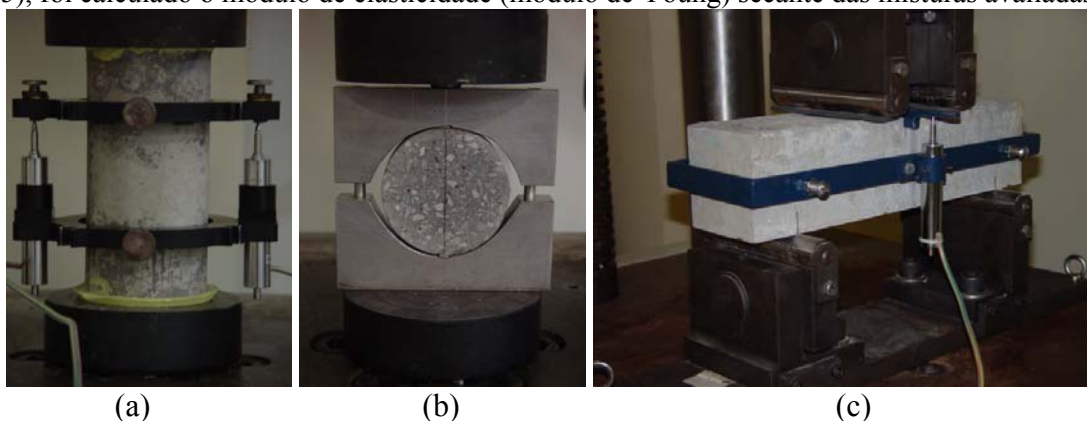


Figura 3. Esquema de ensaios para avaliação das propriedades dos concretos: (a) resistência à compressão axial ; (b) resistência à tração por compressão diametral em discos e (c) resistência à de tração na flexão

Para se determinar a resistência à tração por compressão diametral dos concretos, foram ensaiados, aos 28 dias de idade, doze discos de 100 mm de diâmetro e 25,5 mm de espessura (em média), através de uma adaptação do Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials (1977) da International Society for Rock Mechanics - SRM. Foram retirados quatro discos da parte central dos corpos-de-prova cilíndricos de 100x200mm, desprezando-se o topo e a base. A adaptação consistiu em colocar uma talisca de madeira de espessura de 10% do diâmetro, na parte superior e diametralmente oposto, conforme a NBR 7222 (1994). A Figura 3 (b) mostra o esquema do ensaio. Os ensaios foram executados numa prensa SHIMADZU de 1000kN, a uma velocidade de travessão de 0,1 mm/min. A partir da determinação da carga de ruptura foi calculada a resistência à tração por compressão diametral, conforme a Equação 1.

$$f_t = \frac{2.P}{\pi.D.L} \quad \text{Equação 1}$$

onde:  $f_t$  é a resistência à tração por compressão diametral (MPa);  $P$  é a carga de ruptura;  $D$  o diâmetro, e  $L$  a espessura do corpo-de-prova. A espessura ( $L$ ) de cada corpo-de-prova foi aferida utilizando-se um paquímetro.

Para avaliação da resistência à tração na flexão dos concretos foram ensaiados, aos 28 dias de idade, cinco corpos-de-prova prismáticos de 100x100x400mm. A resistência à tração na flexão foi avaliada de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 1991). Os ensaios foram executados numa prensa SHIMADZU de 1000kN, com controle de deslocamento do travessão da prensa, a uma velocidade de 0,05 mm/min (Ver Figura 3 (c)). A partir do valor da carga de ruptura, calculou-se a resistência à tração na flexão, conforme a Equação 2.

$$f_{tf} = \frac{P.L}{b.d^2} \quad \text{Equação 2}$$

onde:  $f_{tf}$  é a resistência à tração na flexão (MPa);  $P$  é a carga de ruptura,  $L$  é o comprimento do vão (300 mm);  $b$  é a largura do corpo-de-prova (100 mm) e  $d$  é a altura do corpo-de-prova (100mm).

A influência da substituição da areia natural e areia normal IPT por areia industrial foi avaliada utilizando a análise de variância (ANOVA).

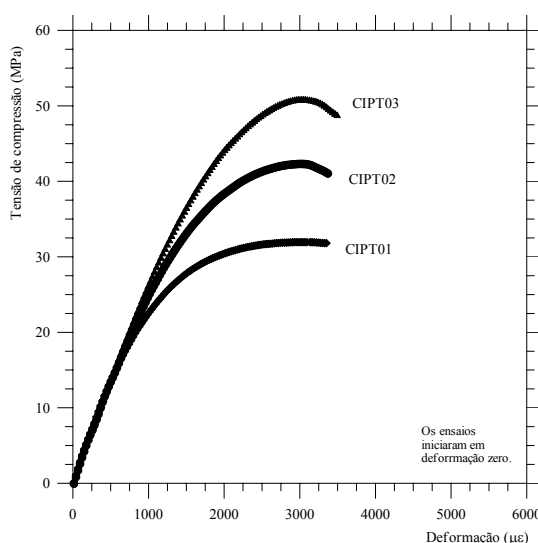
### 3.0 Resultados e Discussão

#### 3.1 Consistência dos concretos

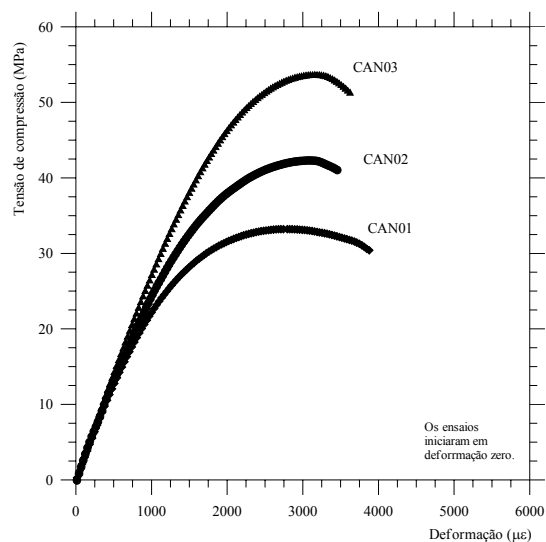
Para evitar a influência da redução da trabalhabilidade no desempenho dos concretos devido ao incremento na concentração de sólidos (redução da relação a/c e aumento da concentração de cimento), as consistências dessas misturas foram corrigidas com superplastificante, até atingir a trabalhabilidade da mistura de referência (CIPT01). Todas as misturas apresentaram valores de abatimento variando entre 130 e 145 mm, não apresentando dificuldade de lançamento e moldagem.

#### 3.2 Comportamento tensão *versus* deformação

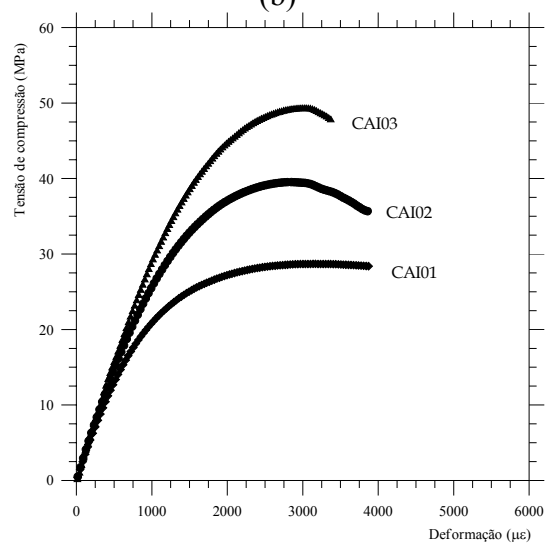
Na Figura 4 (a), (b) e (c) estão apresentadas as curvas tensão versus deformação típicas das misturas avaliadas. Os resultados de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e deformação de pico estão apresentados na Tabela .4. A seguir discute-se a influência da substituição da areia IPT e areia natural por AI, na resistência à compressão axial, deformação correspondente à tensão de pico e módulo de elasticidade



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Curvas tensão versus deformação típicas dos concretos: (a) contendo areia IPT; (b) contendo areia natural e (c) contendo areia industrial

Tabela .4. Resistência à compressão, módulo de elasticidade e deformação de pico dos concretos avaliados

Mistura	$f_c$ (MPa) - C.V. (%)	E (GPa) – C.V. (%)	$\epsilon$ pico ( $\mu\epsilon$ )– C.V. (%)
CIPT01	31,48 (2,69)	27,38 (3,85)	2882,50 (9,65)
CIPT02	41,27 (3,40)	27,43 (5,31)	3136,67 (5,03)
CIPT03	51,30 (1,50)	27,66 (3,10)	3216,00 (4,92)
CAN01	33,74 (3,13)	26,33 (5,28)	2698,00 (7,20)
CAN02	42,47 (2,39)	27,32 (4,21)	3163,33 (9,16)
CAN03	53,45 (2,65)	27,86 (1,46)	3124,00 (5,04)
CAI01	27,78 (2,66)	27,16 (3,29)	3002,00 (7,90)
CAI02	38,84 (2,52)	28,06 (3,89)	3100,00 (8,18)
CAI03	47,54 (2,30)	28,94 (1,84)	3058,00 (8,10)

### *3.2.1. Resistência à compressão axial*

Como esperado a redução da relação água/cimento de 0,62 para 0,50 e 0,38 aumentou a resistência à compressão das misturas estudadas. O aumento na resistência à compressão foi de 31% e 63% para os concretos CIPT02 e CIPT03, respectivamente, em relação ao CIPT01. Para os concretos contendo areia natural, este incremento foi de 26% e 58% para os concretos CAN02 e CAN03, respectivamente, em relação ao CAN01. Com relação aos concretos contendo areia artificial este aumento foi de 40% e 71% para os concretos CAI02 e CAI03, respectivamente, em relação ao concreto CAI01.

Como todas as misturas possuem o mesmo volume de pasta, a redução da relação água/cimento provoca um aumento na concentração de cimento, o que provoca um incremento no empacotamento granular e no volume de hidratos, desta forma, promovendo uma maior densificação da matriz e da interface pasta-agregado, promovendo um incremento da resistência à compressão axial.

Verifica-se que para a mesma relação água/cimento, os concretos contendo areia natural apresentam maiores valores de resistência à compressão. O incremento da resistência à compressão foi de 7%, 3% e 4% para os concretos CAN01, CAN02 e CAN03 em relação aos respectivos concretos produzidos com areia IPT. Isto acontece porque a areia natural possui uma granulometria mais fina, conduzindo a um incremento no empacotamento granular e possibilitando a formação de uma zona de interface pasta-agregado mais densa. Como consequência há um incremento da aderência pasta-agregado e resistência à compressão.

A substituição de areia IPT por areia industrial, conduziu a concretos com menores valores de resistência à compressão, independente da relação a/c. A redução da resistência à compressão foi de 12%, 6% e 7% para os concretos CAI01, CAI02 e CAI03 em relação aos respectivos concretos produzidos com areia IPT. Isto ocorre devido a formação de uma zona de interface pasta-agregado mais fraca foi preponderante, promovendo uma redução da resistência à compressão.

Através da análise de variância verificou-se que a relação a/c, bem como o tipo de areia influenciaram significativamente na resistência à compressão dos concretos. Porém, não houve interação entre essas duas variáveis. Ou seja, para qualquer relação a/c, o tipo de areia possui a mesma influência na resistência à compressão axial da mistura.

### *3.2.2. Deformação de pico*

Para as misturas contendo areia IPT e areia natural verifica-se um aumento na deformação de pico com o incremento da relação a/c. Este aumento foi de 9% e 11% para os concretos CIPT02 e CIPT03, respectivamente, em relação ao concreto CIPT01. Para os concretos contendo areia natural, este aumento foi de 17% e 16% para os concretos CAN02 e CAN03, respectivamente, em relação ao concreto CAN01. Para os concretos contendo areia artificial praticamente não houve variação na deformação de pico com a redução da relação a/c.

Considerando os concretos com relação a/c-0,38 e a/c-0,50, os concretos contendo areia IPT, areia natural e areia industrial, apresentaram praticamente a mesma deformação de pico. Para a relação a/c – 0,62, os concretos contendo areia industrial apresentaram valores superiores de deformação de pico.

Através da análise de variância verificou-se que apenas a relação a/c influencia significativamente na deformação de pico dos concretos. Nota-se que a deformação de pico não apresenta variação significativa, independente do tipo de areia. Verifica-se também que não há interação entre essas duas variáveis.

### *3.2.3. Módulo de elasticidade*

Para todas as misturas, a redução da relação a/c promoveu um pequeno incremento no módulo de elasticidade. Este incremento foi mais significativo para os concretos contendo areia natural e areia industrial. A redução de a/c-0,62 para a/c-0,50 e a/c-0,38 provocam incrementos no módulo de elasticidade de cerca de, respectivamente, 3% e 6% para os concretos contendo areia natural e areia artificial. Para os concretos contendo areia IPT, praticamente não houve variação no módulo de elasticidade com a redução da relação a/c.

Considerando concretos com relação a/c - 0,50 e 0,38, os concretos contendo areia industrial apresentam valores de módulo de elasticidade um pouco superiores aos dos concretos contendo areia IPT e areia natural.



Através da análise de variância verificou-se que apenas a relação a/c influencia significativamente no módulo de elasticidade dos concretos. Nota-se que independentemente do tipo de areia, o módulo de elasticidade não apresenta variação significativa. Verifica-se também que não há interação entre essas duas variáveis.

### 3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos contendo areia IPT, natural e industrial são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão dos concretos avaliados

Mistura	$f_{td}$ (MPa) - C.V. (%)	$f_{tf}$ (MPa) - C.V. (%)
CIPT01	3,93 (3,36)	5,27 (4,75)
CIPT02	4,77 (3,92)	5,89 (1,91)
CIPT03	5,80 (2,24)	7,15 (3,31)
CAN01	4,01 (2,28)	5,43 (4,77)
CAN02	4,90 (4,83)	6,20 (3,91)
CAN03	5,85 (3,74)	7,23 (3,41)
CAI01	3,64 (3,29)	5,09 (9,93)
CAI02	4,59 (4,76)	5,61 (6,84)
CAI03	5,28 (4,75)	6,85 (3,87)

A redução da relação a/c para os concretos, independentemente do tipo de areia, promoveu um incremento na resistência à tração por compressão diametral ( $f_{td}$ ). Este aumento foi de 31% e 63% para os concretos CPIT02 e CIPT03, respectivamente, em relação ao concreto CIPT01. Para os concretos com areia natural, foi de 26% e 58% para os concretos CAN02 e CAN03, respectivamente, em relação ao concreto CAN01. Em relação aos concretos contendo areia industrial, este incremento foi de 40% e 71%, para os concretos CAI02 e CAI03, respectivamente, em relação ao concreto CAI01. Este incremento ocorre devido ao aumento da quantidade de produtos hidratados derivados do aumento da concentração de cimento nas misturas.

Para a mesma relação a/c os concretos contendo areia natural e os concretos contendo areia IPT apresentaram praticamente a mesma resistência à tração por compressão diametral. A substituição da areia IPT por areia industrial promoveu uma redução dos valores de  $f_{td}$ , para todas as relações a/c. Esta redução foi de 7%, 4% e 9% para os concretos CAI01, CAI02 e CAI03, em relação aos respectivos concretos contendo areia IPT. A redução de  $f_{td}$  nos concretos contendo areia industrial ocorreu devido às mesmas causas que promoveram redução na resistência à compressão. Isto porque, a formação de uma zona de interface pasta-agregado mais fraca foi preponderante devido a sua granulometria mais grossa, promovendo uma redução da resistência  $f_{td}$ .

A partir dos resultados da análise de variância verificou-se que tanto o tipo de areia quanto a relação a/c influenciam significativamente na resistência à tração por compressão diametral das misturas. Verifica-se que não há interação entre essas duas variáveis, mostrando que o tipo de areia provoca a mesma influencia na resistência à tração por compressão diametral das misturas, independentemente da relação a/c.

### 3.4 Resistência à tração na flexão

Como ocorrido com a resistência à tração por compressão diametral, a redução da relação a/c provocou um incremento na  $f_{tf}$ . Este incremento foi de 12% e 36% para os concretos CPIT02 e CIPT03, respectivamente, em relação ao concreto CIPT01. Para os concretos com areia natural, foi de 14% e 33% para os concretos CAN02 e CAN03, respectivamente, em relação ao concreto CAN01. Para os concretos contendo areia industrial, este incremento foi de 10% e 22%, para os concretos

CAI02 e CAI03, respectivamente, em relação ao concreto CAI01. Este incremento também ocorre devido ao aumento da quantidade de produtos hidratados derivados do aumento da concentração de cimento nas misturas.

Da mesma forma como ocorrido com a resistência à tração por compressão diametral, os concretos contendo areia natural apresentaram maiores valores de  $f_{tf}$ , independente da relação  $a/c$ .

Para a mesma relação  $a/c$ , a substituição da areia IPT por areia natural promoveu um ligeiro incremento na  $f_{tf}$ . Este incremento foi de 3% e 5% para os concretos CAN01 e CAN02, em relação aos concretos contendo areia IPT. A substituição da areia IPT por areia industrial promoveu uma redução em  $f_{tf}$  para todas as relações  $a/c$ . Esta redução foi de cerca de 5% para todas as relações  $a/c$ , em relação aos respectivos concretos contendo areia IPT. Esta redução ocorreu devido aos mesmos mecanismos que promoveram a redução da resistência à tração por compressão diametral, conforme descrito no item anterior.

A partir dos resultados da análise de variância pode-se afirmar que tanto o tipo de areia quanto a relação  $a/c$  influenciam significativamente na resistência à tração por compressão diametral das misturas. Verifica-se que não há interação entre essas duas variáveis, mostrando que o tipo de areia provoca a mesma influência na resistência à tração na flexão das misturas, independente da relação  $a/c$ .

Os resultados de resistência à tração na flexão, apresentam valores maiores que os resultados de resistência à tração por compressão diametral. Este fato ocorre porque são ensaios executados de forma diferente e possuem processo de ruptura diferentes. No ensaio de flexão assume-se uma relação linear tensão-deformação em toda seção da viga, que não ocorre, e apenas uma parte da seção abaixo da linha neutra é submetida a tensão de tração. Para o ensaio de tração por compressão diametral a ruptura ocorre devido a uma tensão transversal ao longo do diâmetro vertical derivada da tensão de compressão (METHA e MONTEIRO, 1994; e NEVILLE, 1997).

#### **4.0 Conclusões**

- a) A substituição de areia IPT ou natural por areia industrial, conduziu a concretos com menores valores de resistência à compressão, independente da relação  $a/c$ .
- b) Para concretos com relação  $a/c$ -0,38 e  $a/c$ -0,50, os concretos contendo areia IPT, areia natural e areia industrial, apresentaram praticamente a mesma deformação de pico. Para a relação  $a/c$  – 0,62, os concretos contendo areia industrial apresentaram valores superiores de deformação de pico, em relação aos concretos contendo areia natural e areia IPT.
- c) A substituição da areia IPT ou natural por areia industrial não provocou influência significativa no módulo de elasticidade dos concretos.
- d) A substituição da areia IPT ou natural por areia industrial promoveu uma redução de até 9% na resistência à tração por compressão diametral e de até 5% na resistência à tração na flexão.

#### **5.0 Referências bibliográficas**

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 8522. Concreto – Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão –deformação, Rio de Janeiro. 1985.
- ABNT. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos-de-prova de concreto cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ABNT. NBR 7223 - Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1992.
- ABNT. NBR12142 - Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos. Rio de Janeiro, 1991
- ABNT. NBR 7222 - Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos, , Rio de Janeiro,1994.
- CUNHA, E. R., TAVARES, L. M. M., GONÇALVES, J. P., TOLEDO FILHO, R. D., ALMEIDA, S. L. M. Produção de areia manufaturada em usina piloto. In: Seminário: O uso da fração fina da britagem – II SUFFIB, Anais II SUFFIB, São Paulo, SP, 2005.
- De LARRARD, F., Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, vol. 9, E&FN SPON, London, 1999.

METHA, P.K., AITCIN, P.C., Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high strength concrete. In: HSC International Symposium on Utilization on High Strength Concrete, vol. 2. Berkeley, CA, 1990

MME - Ministério das Minas e Energia. Balanço energético nacional - 2002, Brasília, Brasil, 2002.

Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials da International Society for Rock Mechanics. March, 1977.

TOLMASQUIM, M. T., SZKLO, A. S. A matriz energética brasileira na virada do milênio. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ; ENERGE, 2000.

VALVERDE, F. M., Agregados para construção civil. ANEPAC. [www.dnppm.gov.br](http://www.dnppm.gov.br). Acesso em: janeiro/2003.