

## CONSUMO DE PASTA EM DIFERENTES ESQUELETOS GRANULARES PARA CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Toralles-Carbonari, M. Berenice(1); Moreira, M.S. Elian (2); Carbonari, Gilberto (3); Betioli, M. Andrea

(1) Professora Doutora, Universidade Estadual de Londrina - PR

(2) Bolsista IC-UEL, Universidade Estadual de Londrina - PR

(3) Professor Doutor, Universidade Estadual de Londrina - PR

(4) Engenheira Civil

### RESUMO

O concreto de alto desempenho tem como uma de suas principais características uma menor porosidade e porimetria. Tal característica resulta do maior refinamento da microestrutura obtido através de baixas relações água/materiais cimentícios e uma maior compactidade do esqueleto granular. Sendo assim, foi realizado um estudo, no Laboratório da Itaipu Binacional, da influência da compactidade do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do concreto no estado fresco (consistência) e endurecido (resistência à compressão). Os esqueletos granulares estudados foram combinações binárias de materiais encontrados na região: brita 1 e areia de Foz do Iguaçu e brita 1 e areia de Itaipu Binacional. Os resultados obtidos demonstraram que relação ótima de brita/areia que conduzia a maior compactidade foi de 58% de brita 1 e 42% de areia para as duas combinações. Sendo que a porcentagem de vazios na combinação de Foz de Iguaçu foi de 26% e de Itaipu de 21%. Porém, constatou-se que os dois materiais de Foz do Iguaçu e Itaipu mesmo possuindo a mesma relação ótima brita/areia necessitaram de diferentes porcentagens de pasta para obter o melhor desempenho no estado fresco e no estado endurecido, encontrando o intervalo de 0% a 5% de pasta para os materiais de Foz do Iguaçu e de 10 a 15% de pasta para os materiais de Itaipu. Os estudos foram realizados para diferentes relações água/cimento (0,28; 0,30; 0,32).

### 1. INTRODUÇÃO

O concreto de alto desempenho é um material que apresenta além de desempenho mecânico, um ganho no desempenho da durabilidade, esse concreto constitui um material de construção de crescente utilização para aplicação em obras civis, edificações bem como, pré-fabricação.

A especificação deste tipo de concreto em relação aos concretos convencionais está relacionada ao seu desempenho mecânico e de durabilidade e, a possibilidade de reduzir o peso próprio das estruturas em função da diminuição das seções, principalmente em elementos trabalhando a compressão, TORALLES-CARBONARI (1996).

Do ponto de vista do material, o elevado desempenho deste tipo de concreto é obtido através da matriz e da interface matriz/esqueleto granular que apresentam alta compactidade e resistência. Essa característica é consequência da baixa relação água/cimento, da incorporação de adição mineral e de aditivos superplastificantes. Aditivos esses que auxiliam na colocação em obra do material mesmo com relações água/cimento baixas.

A utilização deste tipo de concreto no âmbito internacional iniciou-se no final da década de 70, atualmente já temos inúmeras obras executadas em concreto de alto desempenho, inclusive, no Brasil.

Sendo assim, o presente trabalho faz um estudo da influência do esqueleto granular no consumo de pasta do concreto de alto desempenho. Para tanto a metodologia utilizada para a produção dos concretos ensaiados é a proposta por TORALLES-CARBONARI (1996) onde a principal hipótese leva a estruturar o processo de dosagem em três etapas; relativa a pasta, ao esqueleto granular, e a combinação pasta-esqueleto granular. Em cada uma das etapas são assumidas hipóteses que fundamentam a avaliação dos parâmetros que determinam: a composição de pasta, o esqueleto granular bem como o consumo de pasta. As hipóteses estão apresentadas na tabela 1.

**Tabela 1:** Hipóteses adotadas em cada etapa do processo de dosagem

<b>Etapas do processo</b>	<b>Hipóteses adotadas</b>
Pasta	A fluidez da pasta é quem governa as propriedades reológicas do concreto. Existe uma % ótima de aditivo superplastificante que é função do ponto de saturação determinado no ensaio do cone de Marsh.
Esqueleto Granular Consumo pasta-esqueleto	Menor índice de vazios Consumo ótimo em função do desempenho desejado.

Desta forma, para alcançar o objetivo do trabalho foi feito um estudo da porcentagem de aditivo superplastificante necessária para atingir o ponto de saturação para cada relação água/cimento estudada e, a partir dos resultados obtidos, estas foram fixadas para os ensaios com diferentes esqueletos granulares. A porcentagem de sílica ativa foi fixada em 10% da massa de cimento.

Cabe destacar, que o objetivo principal do estudo é verificar como diferentes esqueletos granulares influenciam no consumo de pasta nas propriedades tanto no estado fresco como endurecido. Os agregados que compõem os esqueletos granulares estudados foram caracterizados como sendo os agregados de Foz do Iguaçu e os de Itaipu. Os concretos foram todos executados no laboratório da Itaipu/Binacional.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização dos materiais

Os materiais que foram utilizados para a produção dos concretos ensaiados são: cimento Portland do tipo II; areia de foz do Iguaçu e de Itaipu; brita de Foz do Iguaçu e de Itaipu, sílica ativa; e aditivo superplastificante. A seguir serão apresentados os resultados de caracterização dos materiais utilizados.

#### 2.1.1 Cimento

O cimento utilizado no trabalho foi CP IIF-32, sendo que as suas características físicas estão apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2:** Características físicas do cimento

Ensaio	Cimento CP IIF-32
Início pega	2h e 45 min
Fim de pega	4h e 5 min
Consistência Normal	22,4%
Massa específica	3,09 kg/dm <sup>3</sup>
Finura peneira 200	5,6%
Finura peneira 325	19,275%
Superfície específica	3560 cm <sup>2</sup> /g

### 2.1.2 Adição Mineral

A adição mineral mais utilizada atualmente para a produção do concreto de alto desempenho é a sílica ativa. A sílica ativa é um subproduto do ferro silício, composto altamente poluente. A sílica utilizada no presente trabalho é a sílica ativa Silmix que apresenta as seguintes características físicas, tabela 3.

Cabe destacar, que para todos os ensaios a sílica foi medida em massa e a porcentagem utilizada foi fixada em 10% relativa a massa de cimento.

**Tabela 3:** Características Físicas da Sílica Ativa

Ensaio	Sílica
Massa Unitária	550 kg/m <sup>3</sup>
Massa Específica	2220 kg/m <sup>3</sup>
Superfície Específica	20.000 m <sup>2</sup> /kg
Formato da Partícula	Esférico
Diâmetro da Partícula	0,20 µm

### 2.1.3 Aditivo Químico

Os aditivos químicos superplastificantes representam um marco na evolução da resistência do concreto, o surgimento do concreto de alto desempenho está vinculado a essa nova geração de aditivos químicos.

Os aditivos químicos redutores de água proporcionam uma redução ainda maior da porosidade e do diâmetro dos poros, o que eleva a durabilidade do concreto e diretamente a elevação da resistência. (ALMEIDA, 1997).

Neste estudo, foi utilizado o aditivo superplastificante de pega normal Sikament 300, as características encontram-se na tabela 4.

**Tabela 4:** Características dos superplastificantes

Características Físicas	Sikament 300
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	1,18 ± 0,02
Sólidos (%)	36

Como no caso da adição mineral, a porcentagem de superplastificante utilizado em todos os ensaios é relativa a massa de cimento, além disto o valor está sempre referido aos sólidos de material especificado para cada tipo de aditivo superplastificante. A dosagem do superplastificante foi fixada em função do ponto de saturação do aditivo. A tabela 5 apresenta os resultados da dosagem de superplastificante a partir do ponto de saturação considerando as diferentes relações água/cimento.

**Tabela 5:** Dosagem do aditivo superplastificante em função do ponto de saturação

Água/cimento	% superplastificante
0,28	1,5
0,30	1,5
0,32	1,5

#### 2.1.4 Agregados

No concreto de alto desempenho a resistência é limitada superiormente pela resistência mecânica do agregado graúdo, desta forma é preferível que a resistência do agregado seja superior a da pasta. No entanto, essa resistência não deve ser tão elevada em virtude do módulo de deformação do agregado poder ser superior ao da pasta, originando concentração de tensões capazes de provocar fissuras e comprometer a ligação pasta-agregado.

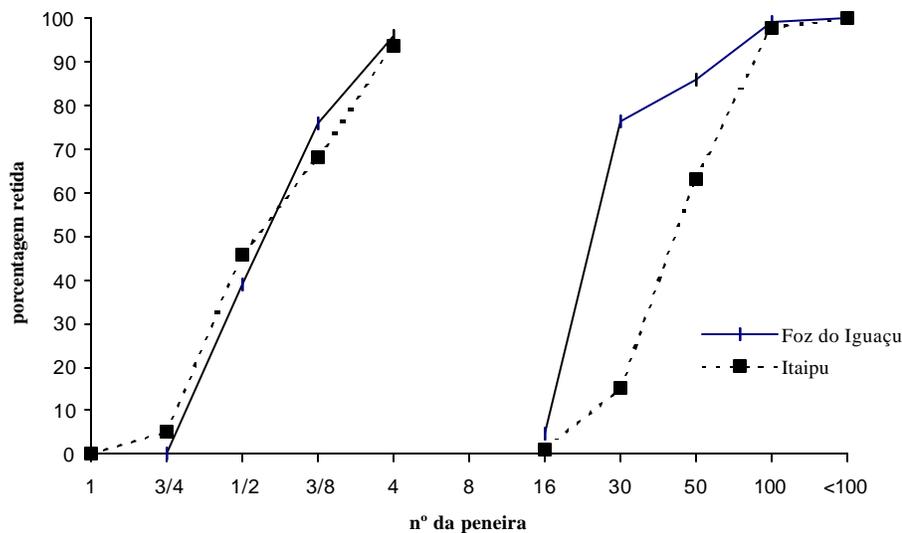
A dimensão máxima do agregado graúdo deve ser reduzida para evitar concentrações de tensões. Sendo assim, é recomendada pela maioria dos autores que a dimensão máxima seja a menor possível, entre 12,5 e 9,5 mm, e que não deva superar os 19 mm. Nestes sentido destacam-se as recomendações do ACI Committee 363 (1984), De Larrard y Malier (1992), e Aïtcin e Neville (1993). Também é recomendado que o agregado graúdo tenha forma angular e superfície áspera proporcionando maior aderência entre pasta e agregado.

Quanto ao agregado miúdo, a granulometria tem influência direta na demanda de água. Para reduzir o efeito dos materiais finos é conveniente diminuir as quantidades que passam nas peneira de 0,3 e 0,15 mm. Esta recomendação deve-se ao fato dos concretos de alto desempenho apresentarem uma maior quantidade de finos que os concretos convencionais, sendo assim, o ACI Committee 363 (1984) recomenda a utilização de areias com módulo de finura de aproximadamente 3.

No presente trabalho os agregados miúdos utilizados foram dragados de duas regiões do rio Paraná, uma próxima a Guaíra definido como material de Foz do Iguaçu, acessível na região, o outro agregado foi dragado na região em que se encontra a hidroelétrica de Itaipu, definido como material de Itaipu. Os dois agregados graúdos são de origem basáltica coletados da bacia do rio Paraná. As características dos agregados estão na tabela 6 e as curvas granulométricas são apresentadas na figura 1.

**Tabela 6:** Características dos agregados

Ensaio		Foz do Iguaçu		Itaipu	
		Areia	Brita	Areia	Brita
Granulometria	D <sub>máx</sub> (mm)	2,38	19	2,38	19
	MF	2,69	6,72	1,77	6,67
Massa Específica Saturada Superfície Seca (kg/dm <sup>3</sup> )		2,65	2,94	2,63	2,93
Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )		2,62	2,91	2,61	2,89
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )		1,51	1,46	1,54	1,6
% Absorção		0,8	1,28	0,4	1,35



**Figura 1** – Curvas Granulométricas

**2.2 Métodos**

Para atingir o objetivo proposto, verificar a influência do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do concreto de alto desempenho, a metodologia adotada foi a que segue:

- Primeiro foi feito o estudo da dosagem através da metodologia desenvolvida por Toralles-Carbonari (1996) onde a partir do estudo das três etapas: da pasta, do esqueleto granular e da combinação pasta-esqueleto granular define-se a dosagem ótima. Cabe destacar que foram feitas pastas com diferentes relações água/cimento (0,28; 0,30; 0,32) e que a dosagem do aditivo foi determinada através do ponto de saturação obtido para cada pasta.
- Fixada a dosagem ótima partiu-se para a verificação do consumo de pasta necessário para a obtenção de um concreto que apresentasse abatimento maior que 150mm, medido através do ensaio realizado com o cone de Abrams. Além dessa característica a resistência à compressão dos concretos deveria ser máxima.

### 3. RESULTADOS E ANÁLISE

#### 3.1 Esqueleto Granular

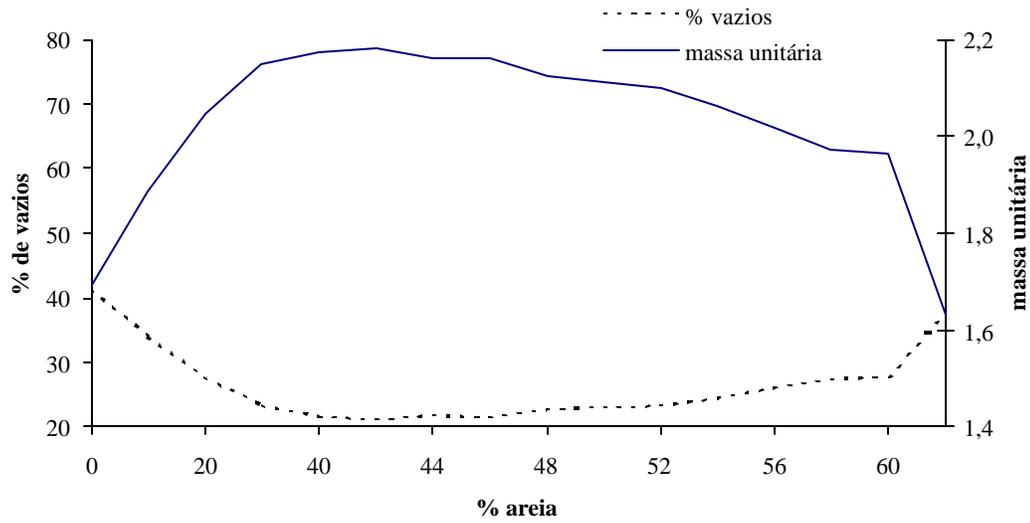
A partir dos agregados de Foz do Iguaçu e de Itaipu foram feitas combinações binárias para verificação da compactidade, Betioli 2000. Os resultados obtidos são os apresentados nas tabelas 7 e 8 e representados nas figuras 2 e 3.

**Tabela 7:** Compactidade brita x areia - Itaipu

Brita / areia	Massa 1 (kg)	Massa 2 (kg)	Massa 3 (kg)	Massa média (kg)	Massa unitária média (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Vazios (%)
100/0	8,544	8,44	8,44	8,475	1,695	2,89	41,352
90/10	9,594	9,3	9,39	9,428	1,886	2,859	34,047
80/20	9,994	10,29	10,39	10,225	2,045	2,829	27,715
70/30	10,79	10,64	10,79	10,740	2,148	2,8	23,286
60/40	10,99	10,7	10,9	10,863	2,173	2,77	21,564
<b>58/42</b>	<b>10,84</b>	<b>10,9</b>	<b>10,99</b>	<b>10,910</b>	<b>2,182</b>	<b>2,765</b>	<b>21,085</b>
56/44	10,8	10,8	10,8	10,800	2,160	2,7597	21,731
54/46	10,7	10,89	10,84	10,810	2,162	2,754	21,496
52/48	10,69	10,59	10,59	10,623	2,125	2,748	22,683
50/50	10,59	10,54	10,54	10,557	2,111	2,743	23,028
48/52	10,54	10,39	10,59	10,507	2,101	2,737	23,225
46/54	10,39	10,29	10,29	10,323	2,065	2,732	24,427
44/56	10,09	10,09	10,09	10,090	2,018	2,726	25,972
42/58	10,09	10,09	9,44	9,873	1,975	2,72	27,402
40/60	9,79	9,79	9,89	9,823	1,965	2,715	27,637
0/100	8,194	8,09	8,194	8,159	1,632	2,61	37,476

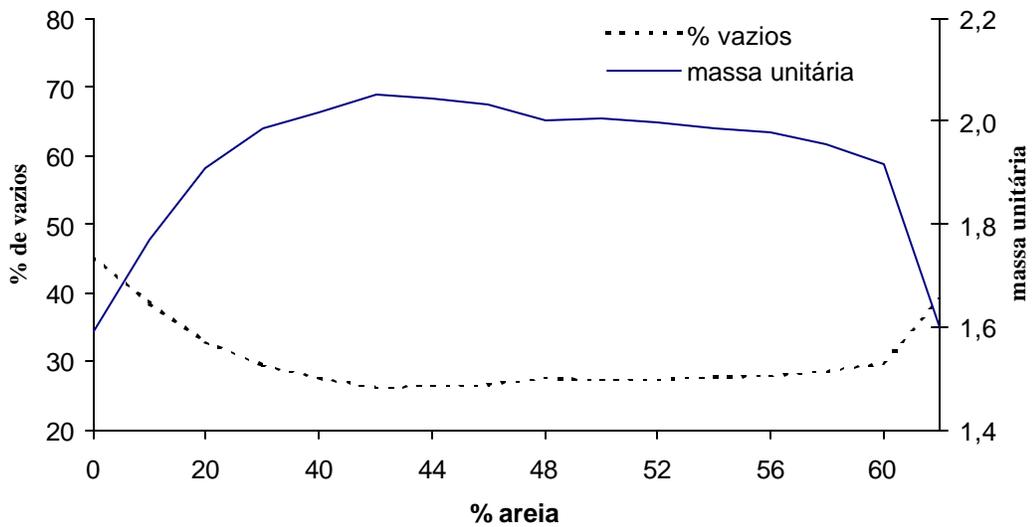
**Tabela 8:** Compactidade brita x areia – Foz do Iguaçu

Brita / Areia	Massa 1 (kg)	Massa 2 (kg)	Massa 3 (kg)	Massa média (kg)	Massa unitária média (kg/dm <sup>3</sup> )	Massa específica (kg/dm <sup>3</sup> )	Vazios (%)
100/0	7,89	7,99	7,99	7,957	1,591	2,91	45,315
90/10	8,84	8,79	8,94	8,857	1,771	2,878	38,453
80/20	9,59	9,39	9,69	9,557	1,911	2,847	32,685
70/30	9,94	9,94	9,94	9,940	1,988	2,816	29,403
60/40	10,09	10,14	10,04	10,090	2,018	2,787	28,592
<b>58/42</b>	<b>10,19</b>	<b>10,29</b>	<b>10,29</b>	<b>10,257</b>	<b>2,051</b>	<b>2,781</b>	<b>26,238</b>
56/44	10,29	10,09	10,29	10,223	2,045	2,775	26,318
54/46	10,14	10,09	10,24	10,157	2,031	2,769	26,640
52/48	10,14	9,99	9,89	10,007	2,001	2,763	27,567
50/50	10,09	9,99	9,99	10,023	2,005	2,757	27,288
48/52	9,89	9,99	10,09	9,990	1,998	2,752	27,398
46/54	9,89	9,94	9,94	9,923	1,985	2,746	27,725
44/56	9,89	9,89	9,89	9,890	1,978	2,74	27,810
42/58	9,79	9,64	9,89	9,773	1,855	2,735	28,531



**Figura 2:** Ensaio de compactação - Itaipu

40/60	9,49	9,69	9,59	9,590	1,918	2,729	29,718
0/100	7,99	7,99	7,99	7,990	1,598	2,62	39,008



**Figura 3:** Ensaio de compactação - Foz do Iguaçu

Da análise dos resultados de compactação, constatou-se que para os dois agregados a relação ótima, ou seja, aquela que apresentou o menor índice de vazios ocorreu com 58% de brita e 42% de areia. Cabe destacar, que as duas areias apresentaram módulos de finura bem diferentes,  $MF_{Itaipu} = 1,77$  (areia fina) e  $MF_{Foz\ do\ Iguaçu} = 2,67$  (areia média). A relação brita/areia igual se justifica em fun-

ção da composição granulométrica do conjunto brita x areia. Porém, como pode ser observado nas tabelas 7 e 8 apesar da proporção brita/areia que gerou o menor índice de vazios ser a mesma, o índice variou de 26,238% para os agregados de Foz do Iguaçu e de 21,085% para os agregados de Itaipu, o que representa uma diminuição de 20% dos vazios da composição binária de Itaipu com relação à composição de Foz do Iguaçu.

### **3.2 Combinação: pasta / esqueleto granular**

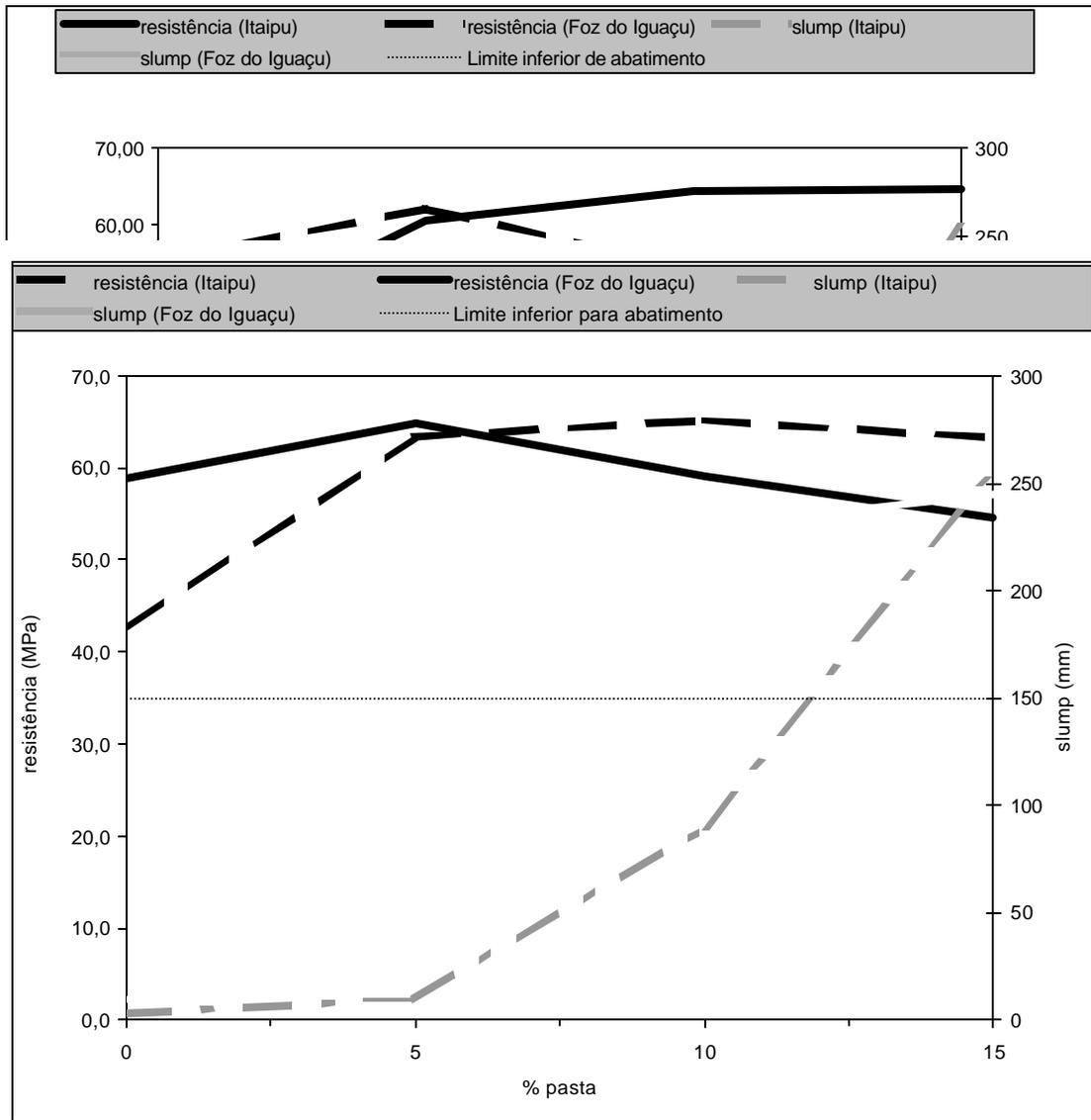
Nesta etapa obtêm-se o consumo ótimo de pasta capaz de satisfazer os desempenhos desejados. Como resultado desta combinação otimizada resultará o concreto de alto desempenho. Foram realizadas combinações com 0, 5, 10 e 15% de pasta, como mostrará os gráficos.

No presente trabalho foi fixado que o concreto deveria apresentar no estado fresco um abatimento maior que 15cm, medido no cone de Abrams, esse valor justifica-se pela alta viscosidade apresentada pelo concreto de alto desempenho. Essa alta viscosidade deve-se a incorporação da adição mineral e do aditivo químico, sendo que para colocar em obra este tipo de concreto há necessidade de abatimentos maiores que 15cm.

Além do desempenho no estado fresco buscou-se que o concreto a ser produzido deveria apresentar à compressão a máxima resistência para cada relação água/cimento.

Para a obtenção do consumo ótimo de pasta, que corresponde ao concreto que satisfaz os desempenhos desejados, parte-se do valor de vazios mínimo obtido no ensaio de compactação, e a partir desse obtêm-se o excesso de pasta (overfill) necessário para alcançar os desempenhos desejados.

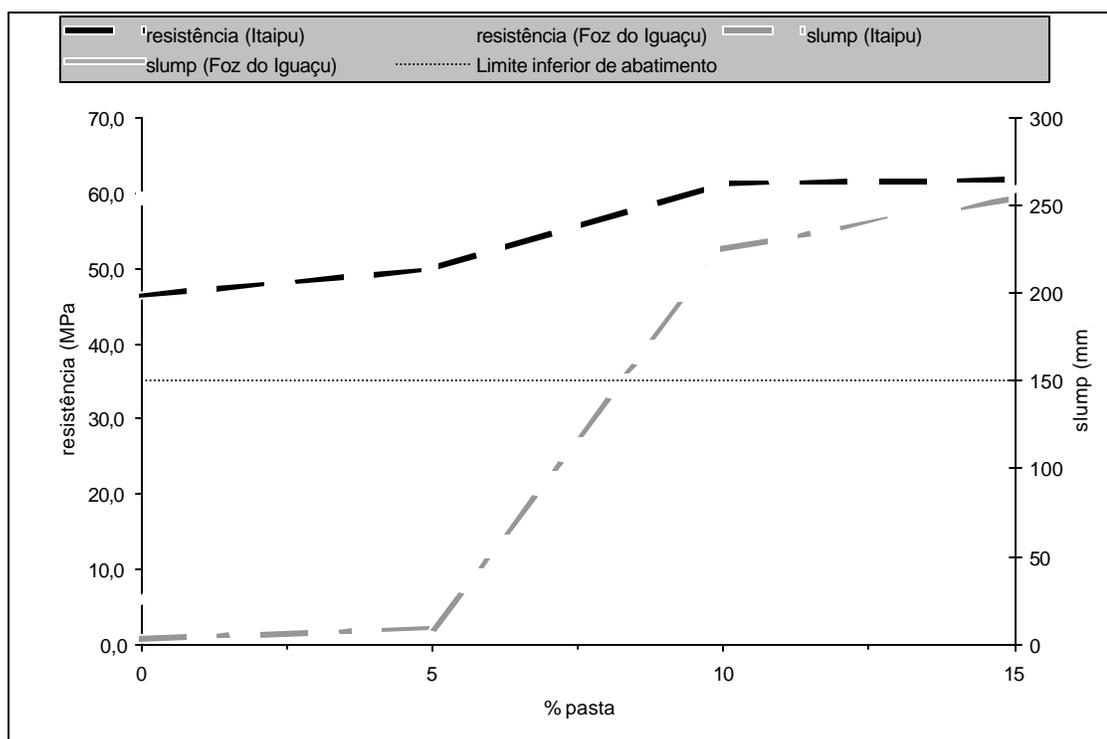
Nas figuras 4, 5 e 6 estão apresentados os resultados obtidos para cada combinação de esqueleto granular e para as relações água/cimento de 0,28; 0,30; 0,32.



**Figura 5:** Influência do consumo de pasta na resistência à compressão e na consistência -  $a/c = 0,30$

Na figura 4, observa-se que para a relação água/cimento de 0,28, o limite pré-estabelecido de abatimento, maior ou igual que 15cm e resistência máxima os consumos de pasta variaram para os dois agregados. Sendo que para os agregados de Foz do Iguaçu esse valor foi de 5% de excesso pasta em relação à porcentagem mínima de vazios (26,238%), enquanto que para os agregados de Itaipu o excesso de pasta necessário encontra-se no intervalo entre 10 e 15% em relação à porcentagem mínima de vazios (21,085%).

Da análise da figura 5 observa-se que para os desempenhos desejados, os agregados de Foz do Iguaçu necessitaram de um excesso de pasta de 5% enquanto que os agregados de Itaipu o excesso ficou entre os limites de 10 e 15, ou seja, por volta de 12%.



**Figura 6:** Influência do consumo de pasta na resistência à compressão e na consistência –  $a/c = 0,32$

Observa-se, na figura 6, que para os desempenhos desejados, tanto no estado fresco como endurecido, os agregados de Foz do Iguaçu necessitaram de um excesso de pasta na faixa de 0% a 5% e os agregados de Itaipu o excesso foi da ordem de 10% de pasta.

Da análise das três figuras, que representam a influência do consumo de pasta nas propriedades no estado fresco e endurecido para os agregados de Foz do Iguaçu e de Itaipu verifica-se que:

- Os desempenhos desejados foram obtidos com porcentagens menores de pasta, nas diferentes relações água/cimento, para os agregados de Foz do Iguaçu. Esse valor ficou no intervalo 0% a 5% de excesso de pasta em relação aos vazios obtidos no ensaio de compacidade. Esse valor variou, conforme se pode observar nas figuras 4, 5 e 6, em função da rela-

ção água/cimento sendo que, para 0,28 necessitou-se mais pasta que para 0,30 e esse mais que 0,32. Para os agregados de Itaipu o excesso de pasta ficou na faixa de 10 a 15%. O comportamento em função das diferentes relações água/cimento foi o mesmo encontrado para os agregados de Foz do Iguaçu. Os resultados obtidos demonstram que agregados mais finos, com maior superfície específica, necessitam de maior consumo de pasta para satisfazer os desempenhos desejados independente da relação brita/areia ser a mesma;

- Outro fator que foi possível observar da análise dos gráficos 4, 5 e 6 é que para cada combinação de agregados existe um consumo de pasta ótimo e que a partir deste há um decréscimo na resistência à compressão, apesar do abatimento continuar crescendo.

#### 4. CONCLUSÕES FINAIS

- O procedimento adotado para determinar o esqueleto granular ótimo, o ensaio de compactação, leva em consideração o tipo de agregado, a granulometria, a forma e a textura. Sendo assim, o ensaio de compactação se aplica tanto para agregados de origem mineralógica como procedências diferentes, conforme foi possível observar para os agregados de Foz do Iguaçu e Itaipu.
- O esqueleto granular ótimo é definido como aquele que resulta no menor índice de vazios, obtido mediante o ensaio de compactação. A relação brita/areia que resulta na maior compactação define um valor de referência que pode ser ajustado dependendo do desempenho desejado. Para os agregados estudados verificou-se que a relação brita/areia foi a mesma 58% de brita e 42% de areia apesar do índice de vazio variar de 26,238% para os agregados de Foz do Iguaçu e 21,085% para os de Itaipu. O resultado deve-se a finura da areia e a composição granulométrica do conjunto agregado miúdo/agregado graúdo.
- O consumo de pasta varia, consideravelmente, em relação ao tipo de esqueleto granular. Para o esqueleto granular obtido com os agregados de Foz do Iguaçu o consumo de pasta ficou no intervalo de 0% a 5% de pasta em relação aos vazios, enquanto que para os agregados de Itaipu esse intervalo ficou entre 10% a 15%.
- A relação água/cimento também influenciou no consumo de pasta, como foi possível observar, em ambos os agregados (Foz do Iguaçu e Itaipu) à medida que a relação água/cimento diminuía o consumo de pasta aumentava para os desempenhos desejados, principalmente, no que se refere à consistência desejada.
- Existe um consumo ótimo de pasta a partir do qual a um decréscimo da resistência à compressão, conforme pode ser verificado nos ensaios.
- A partir dos resultados obtidos constata-se a importância do estudo da dosagem levando em consideração os materiais a serem utilizados.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e a UEL pela concessão das bolsas de iniciação científica aos alunos participantes da pesquisa. Aos técnicos Itaipu Binacional pelo auxílio na execução dos ensaios. A Camargo Corrêa pela doação do cimento e da sílica ativa utilizada na pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TORALLES-CARBONARI, B. M.. **Estudio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación y producción de hormigones de altas prestaciones.** Tese de Doutorado. ETSECCPB - Universitat Politècnica de Catalunya. Departament D'Enginyeria de la Construcció. Barcelona. Espanha. Outubro. pp.179. 1996.

ALMEIDA, I. R.. **Concretos de alto desempenho. A evolução tecnológica dos concretos tracionais.** CD-ROM, São Paulo, 1997.

ACI Committee 363. **State of the art report high strength concrete.** ACI Journal 81 81(4), 364-411.

De LARRARD, F.; MALIER, Y.. **Engineering properties of very high performance concrete,** High Performance Concrete: From Material to Structure, Book edited by Yves Malier, 1992.

ALÍ TCIN, P. C.; NEVILLE, A.. **High-Performance Concrete Demystified.** Concrete International, Janeiro, 1993.

BETIOLI, A. M.. **Concreto de Alto Desempenho: Laboratório x Estrutura Real.** Trabalho de Conclusão de Curso. Uel – Universidade Estadual de Londrina. Londrina. Paraná. pp.89. 2000

### Contatos:

(1) e-mail: [toralles@uel.br](mailto:toralles@uel.br)

(2) e-mail: [elianmoreira@yahoo.com.br](mailto:elianmoreira@yahoo.com.br)

(3) e-mail: [carbonar@uel.br](mailto:carbonar@uel.br)

*Endereço para correspondência*  
*Rua Rangel Pestana, 510, apto 004, Jardim Bancários, Londrina - PR*  
*CEP 86062- 020*