



INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO

FUNDADO EM 23/06/1972

Capítulo 39

Concreto Massa e Compactado com Rolo

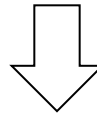
Prof. Dr. José Marques Filho
Universidade Federal do Paraná
Companhia Paranaense de Energia

Livro Concreto: Ciência e Tecnologia

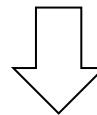
Editor: Geraldo C. Isaia

Concreto Massa

O aumento da população humana e a necessidade de fornecimento de vida digna e empregos de qualidade



Necessidade de Criação de Infraestrutura Civil Adequada



Grandes Empreendimentos de Energia, Água, Estradas e Edificações de Grandes Dimensões

Concreto Massa

Possui volumes e formas que requeiram meios especiais para controle da geração de calor e sua consequente mudança de volume (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Utilizado geralmente em obras com:

- Grandes Volumes Horários de Lançamento
- Estruturas de Grande Dimensões
- Produção Contínua na Obra com Curtos Intervalos de Tempo entre Lançamentos

Demanda cuidado com:

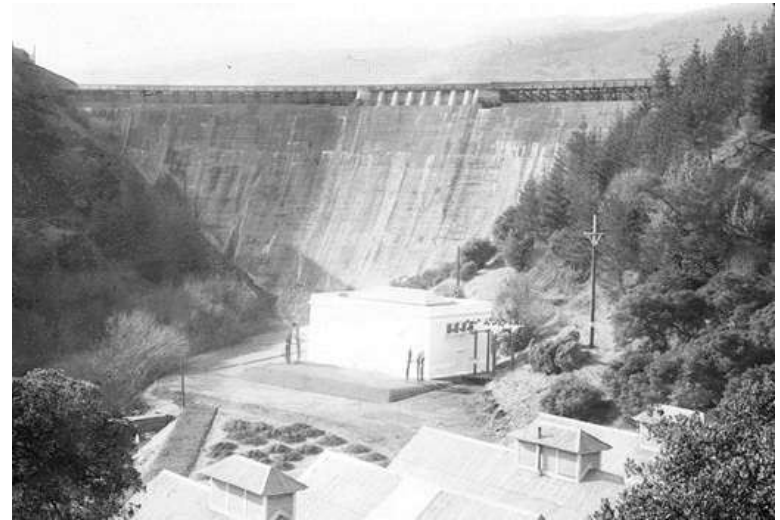
- Efeitos da Variação de Volume
- Sazonalidades importantes

Concreto Massa

- Primeiras aplicações do Concreto Massa foram feitas em Empreendimentos Hidráulicos



A barragem de Crystal Springs, construída em 1888, foi, provavelmente, a primeira com Controle Tecnológico do Concreto

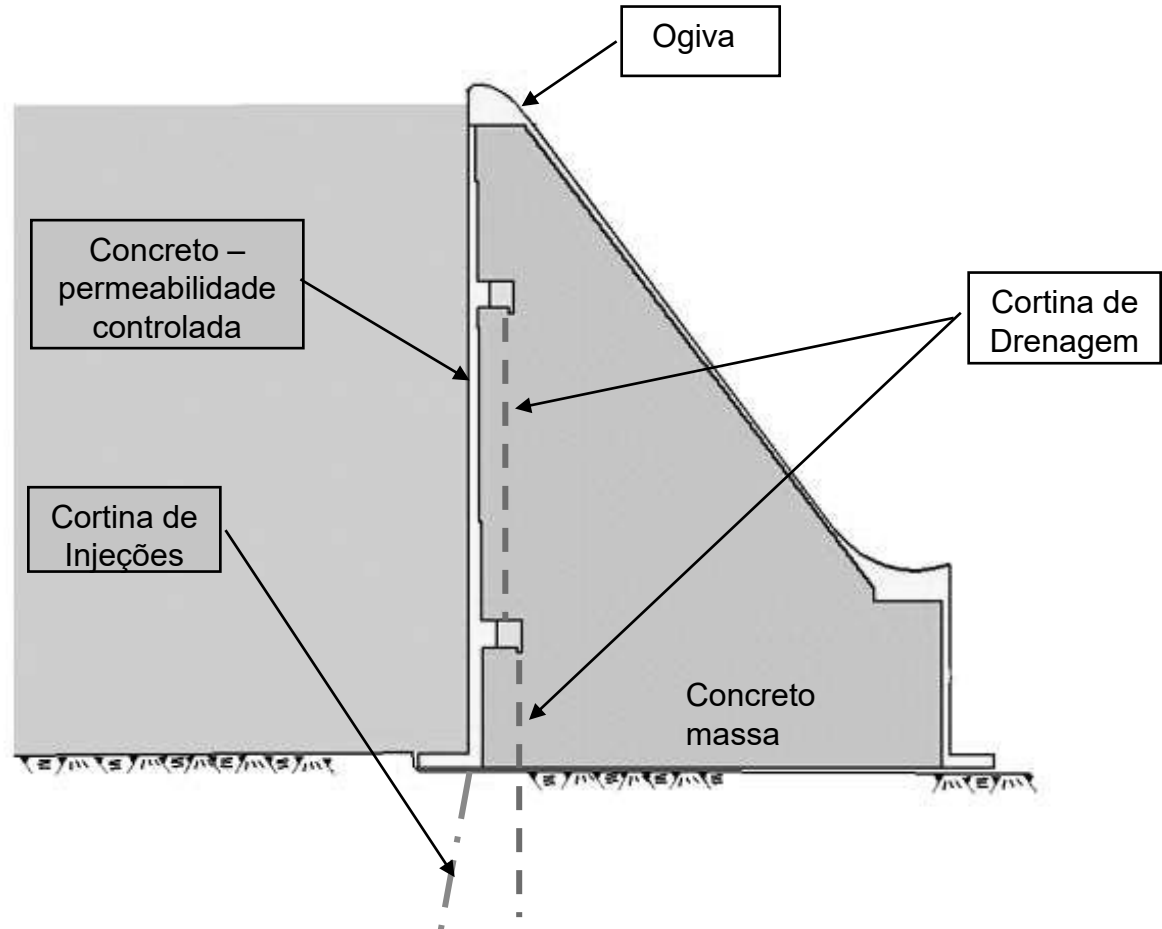


A barragem de San Mateo, na Califórnia, de 52 m de altura, construída entre 1887 e 1889, foi possivelmente a primeira a ser executada unicamente em concreto

Seção Típica de Concreto a Gravidade

Soluções Adotam:

- Concreto com cuidados de temperatura no corpo
- Concreto com controle de permeabilidade na face de montante
- Controle de subpressões por cortinas de injeção e drenagem
- Efeitos da variação de volume controlados por juntas de contração

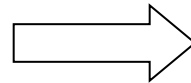


Conceitos de Projeto

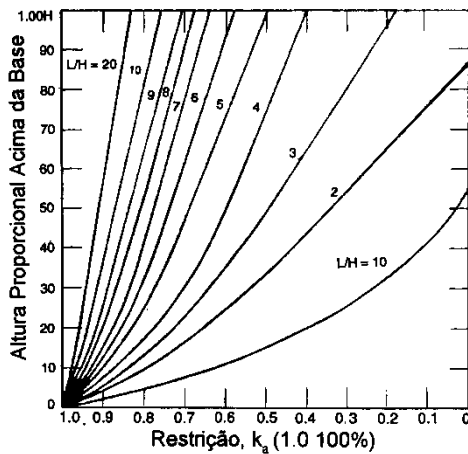
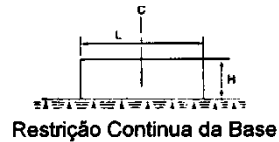
- Consideração da resistência à tração
- Consideração das solicitações geradas pela percolação
- Controle das pressões neutras através de cortinas de injeção a montante e de cortinas de drenagem
- Cuidados especiais com as interfaces entre o concreto e a fundação e entre juntas de construção
- Dimensionamento do paramento de montante para garantir estanqueidade e durabilidade
- Cuidados com a execução e controle das juntas de contração
- Consideração dos efeitos termogênicos gerados pela hidratação do cimento

Fissuração

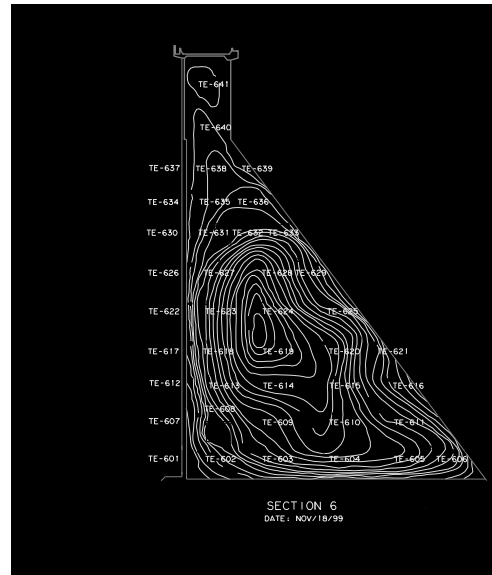
Restrições às Mudanças de Volume



Campo de Tensões que pode gerar fissuração



$$\sigma = K_r \cdot k \cdot \Delta t \cdot \alpha \cdot \frac{E_c}{1 + \Psi}$$





Bases Tecnológicas para Abordagem do Concreto Massa

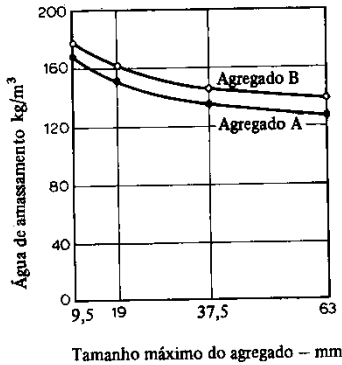
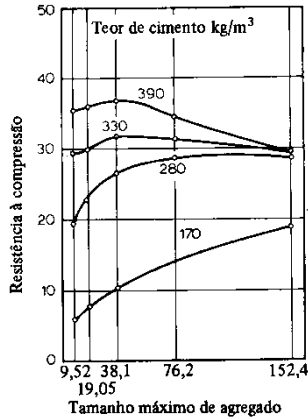
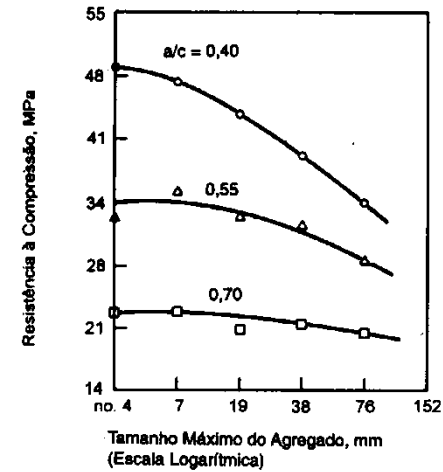


Fig. 3.15: Influência do tamanho máximo do agregado na demanda de água para obtenção de um mesmo abatimento³⁻¹⁶



Mehta-Monteiro

Aumento nos Vazios do Concreto	Redução da Resistência à Compressão
5%	30%
2%	10%

Neville

Desafio

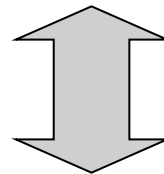
- Usar o Maior Diâmetro Possível
- Minimizar Vazios do Esqueleto do Agregado
- Minimizar Consumo de Cimento para Diminuir Efeitos da Variação Volumétrica decorrente das Reações Termogênicas da Hidratação
- Evitar Segregação com $D_{máx}$ Elevados
- Evitar Reações Deletérias
- Controle da Permeabilidade

Dosagem Concreto- Massa

- Consumo de cimento deve ser minimizado
- Caso possível, utilizar cimentos que possuam menor geração de calor, sendo desejáveis cimentos com baixa relação C3A/SO3 e baixos teores de cal livre e MgO, e limitar as parcelas de aluminato tricálcico (C_3A) e de silicato tricálcico (C_3S).
- Utilização de material pozolânico adequado, como substituição de parte do cimento, pode levar a diminuição de aproximadamente 50% do calor de hidratação (PAULON, 1987);
- Controle da temperatura de lançamento
- Utilização de pré-refrigeração através dão esfriamento do agregado graúdo, resfriamento da água de amassamento e/ou substituição de parte da água de amassamento por gelo
- Processos de pós-refrigeração

Desafios - Durabilidade

Altas a/c
Presença de Água
Possibilidade de Segregação



Utilização obrigatória de Pozolanas
Otimização do teor de Argamassa
Fechamento da Mistura

Dosagem Concreto- Massa

DADOS FUNDAMENTAIS

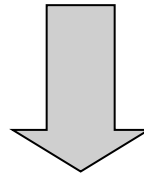
- Igual demais métodos
- Atingir Especificações
 - Especificações de Resistência e Durabilidade
 - Trabalhabilidade
 - Economia
 - Minimização dos Efeitos de Variação Volumétrica
 - Consistente quanto as variações de campo

DIFICULDADES

- Lida com dimensões máxima muito diferentes (até 152 mm)
- Variação na graduação do agregado miúdo
- Utiliza combinação de várias dimensões de agregado
- Volumes expressivos

Concreto Massa

Evolução Natural das Técnicas do Concreto
Convencional



Dmáx do Agregado Graúdo
Minimização da Quantidade de Cimento
Manutenção da Integridade da Massa

Desenvolvimento de Bases

Segregação

Graduação

Continuidade de Grãos para Criar Estrutura Granular que mantenha a Integridade

Acertar o Teor de Argamassa para dar trabalhabilidade e evitar segregação

↳ Módulo de Finura



Desenvolvimento de Bases

- Abordagem do Agregado Graúdo
 - Aumentar a Compacidade / minimizar índice de vazios
 - Ter o Maior Diâmetro Possível
- Abordagem do Agregado Miúdo
 - Aumentar a Compacidade
 - Dar a Trabalhabilidade com o menor consumo possível de água
- Procurar-se-á definir granulometrias contínuas que minimizem vazios
- As misturas de agregados terão como tentativa inicial ajuste às curvas ideais
- Adaptações as condições locais são feitas após as misturas

Granulometria

- Talbot-Richard

$$p = \frac{d^x - 0,075^x}{Dmáx^x - 0,075^x}$$

P = porcentagem acumulada que passa na malha d.

d = abertura da malha,.

x = expoente - (para agregado britado, x = 0,5 e agregado natural, x = 0,8).

- ACI Committee 207

$$P = \left(\frac{d}{D}\right)^n \times 100$$

P = porcentagem acumulada passando na peneira de malha d.

d = abertura da malha.

D = dimensão máxima característica do agregado

n = 0,4 - agregado artificial.

n = 0,5 - agregado natural.

Granulometria

- Graduações Geométricas
 - Curva Granulométrica contínua
 - Porcentagem retida nas peneiras da série normal sucessivas mantém uma relação geométrica entre si
- Graduação 70%
 - Peso segunda peneira = 70% peso primeira
 - Peso Terceira = 70% peso da segunda
 - E assim, sucessivamente

$$\beta = 100 \frac{(1 - \alpha)}{1 - \alpha^n}$$

β = porcentagem retida na primeira peneira, imediatamente inferior àquela correspondente à dimensão máxima.

α = porcentagem equivalente à graduação geométrica.

n = número de peneiras que entram na série normal, cuja primeira peneira seja a $D_{m\acute{a}x}$ do agregado

Graduações Geométricas

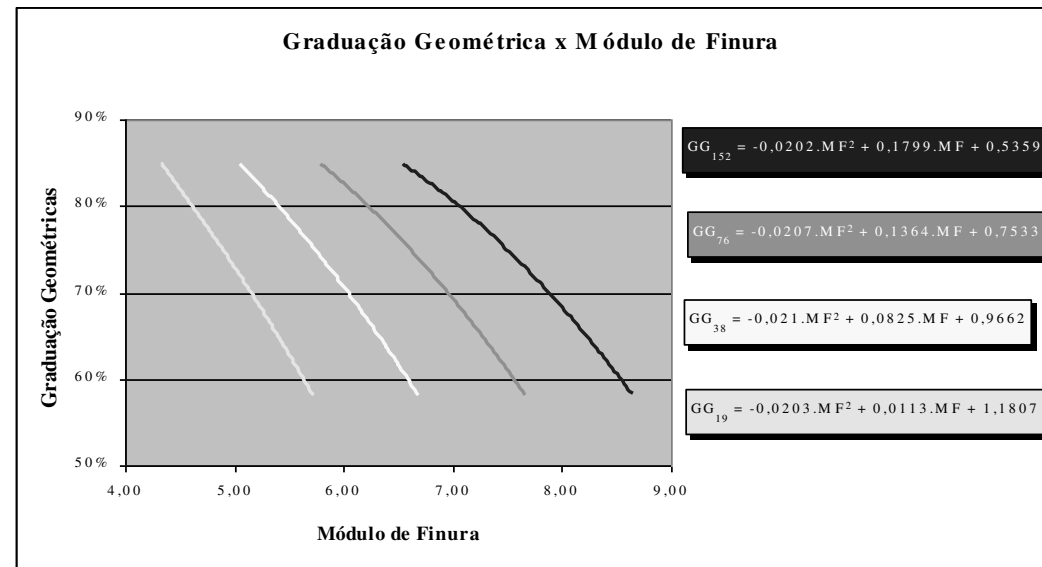
Vantagem

{ É uma PG
 Fica simples lidar com os Módulos de Finura

$$MF = \frac{\beta}{1-\alpha} \left[(n-1) - \left(\alpha \frac{1-\alpha^{n-1}}{1-\alpha} \right) \right]$$

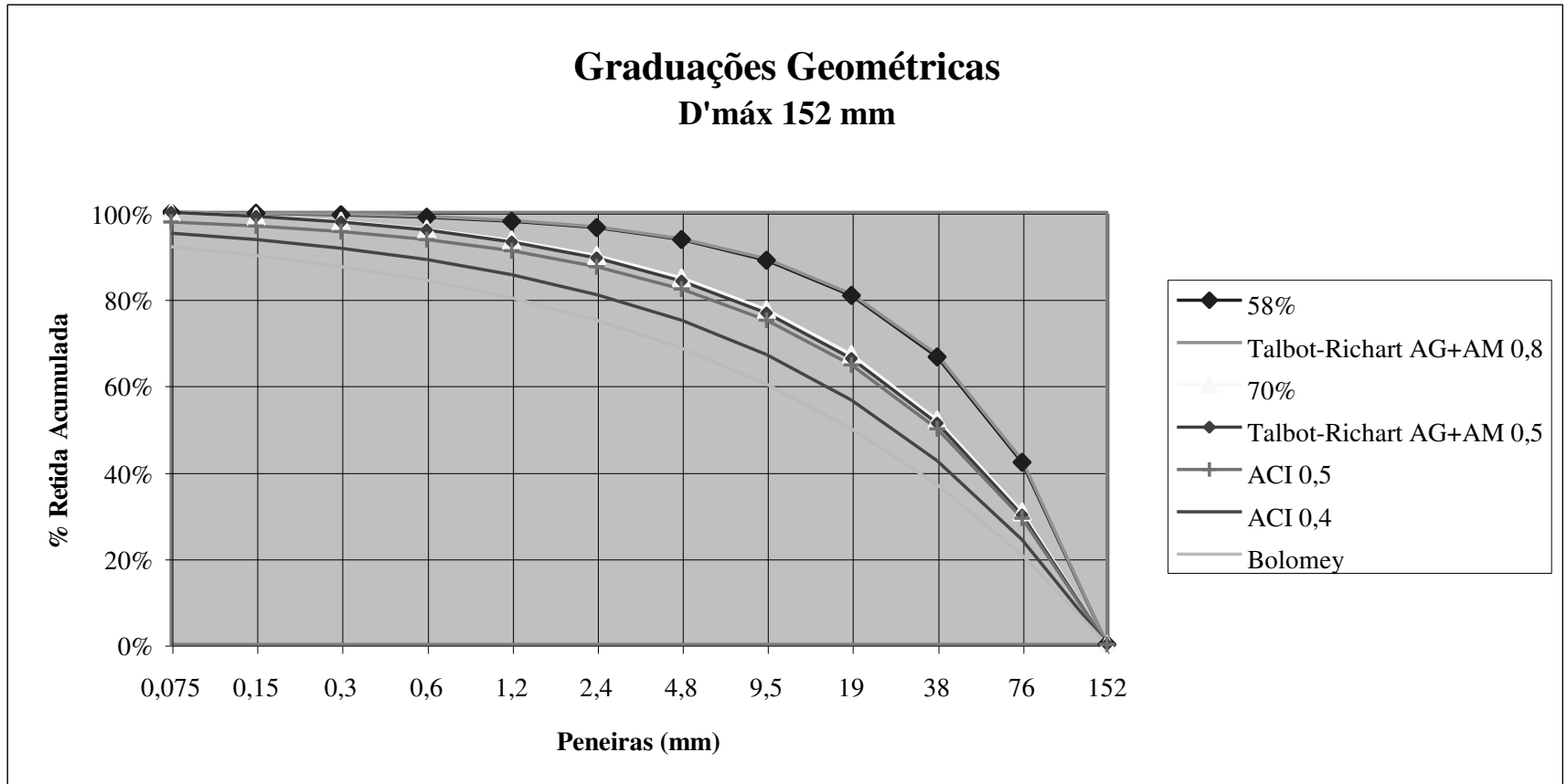
a, b e n = os mesmos símbolos definidos na expressão anterior

MF = módulo de finura da mistura dos agregados .





Comparação das Curvas de Referência





Método do Módulo de Finura

- **Trabalhabilidade**
 - Admite-se a validade da Relação de Slater-Lyse
$$C_a \cong \text{função do MF}$$
Onde C_a = Consumo de água para dada trabalhabilidade
MF = Módulo de Finura (para diferentes granul.)
- **Abatimento**
 - Se situam na faixa 20 a 75 mm
 - Usual 45 ± 5 mm
- **Uso de Ar Incorporado**
 - Usual 4,5 % (trabalhabilidade)



Processo Dosagem

- Traços Iniciais

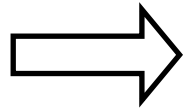
Para cada $D_{m\acute{a}x}$ executa-se um conjunto de dosagens com:

- Fixa-se um abatimento (trabalhabilidade)
- Varia-se a relação 1:m
- Para cada m, varia-se a porcentagem de areia e por conseguinte o MF
- Obtem-se o MF Ideal

Processo Dosagem

- Módulos de Finura Ideal
 - % Areia baixa produz concretos ásperos
 - % areia altas gera excesso de argamassa

IDEAL



Menor a/c (Maior Resistência)
Aspecto Adequado

- Há variações inerentes ao processo
- Pode haver segregação com pequenas variações

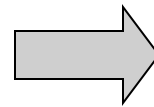
$$\text{MF ótimo} = \text{MF ideal} + 0,2$$

% Areia Ótima

Concreto Compactado com Rolo



Idéia: Usar Equipamento de Compactação



Equipamentos de Obra de Terra:
Espalhamento e Compactação



- Material Seco
- Espessura de camada que permita compactação

Desenvolvimento Conceitual

- O Concreto Compactado com Rolo é uma técnica construtiva que busca obter:
 - Baixa incidência de mão de obra por volume unitário
 - Maior desempenho na velocidade de lançamento;
 - Baixos teores de cimento;
 - Baixos custos;
 - Viabilização de grandes projetos com concreto massivo que normalmente exigem cronogramas reduzidos.



É UM CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO
COM RELAÇÃO À VELOCIDADE DE
PRODUÇÃO

Abordagens Utilizadas

ABORDAGEM GEOTÉCNICA

- Maior Densidade Possível
- Teor de umidade ótima

TECNOLOGIA CONCRETO

- Trabalhabilidade
- Parâmetros de Projeto
- Controle de Qualidade
- Monitoramento
- Análise de Disponibilidade e Custo

Soluções Utilizadas

- CCR Pobre (Lean RCC)
- RCD Roller Compacted Dam
- CCR Alto Teor de Pasta
- CCR Medio Teor de Pasta
- CCR com Alto Teor de Finos - Método Brasileiro
 - Fechar Mistura
 - Finos para trabalhabilidade
 - Agregado Moido - Ossipov-Paulon



Parâmetros de Importância

- Resistência Mecânica
- Ligação entre Camadas
- Capacidade de suportar compactação
- Variação de Volume e Temperatura
- Caracterização e ensaios são distintos do concreto convencional
- Necessidade da presença de finos para fechamento da mistura e garantia da compacidade adequada



Processo usual de abordagem do problema no Brasil

- Dosagens experimentais em laboratório com conceitos semelhantes àqueles do concreto massa.
- No Brasil por limitações na disponibilidade de cinzas, usa-se agregado pulverizado. CCR Alto Teor de Finos
- Execução de maciços experimentais na obra
- Início da execução
- Otimização baseada no maciço experimental
- Otimizações baseadas no C.Q. da obra
- Plano de extração de testemunhos para verificação de resultados

Ensaio de Trabalhabilidade

- Consistência impede a eficiência de ensaios convencionais como o de Abatimento do tronco de cone
- Usa-se o ensaio de determinação do Cannon Time



Densímetro Nuclear

- O densímetro nuclear permite a verificação da compactação





Dosagem de CCR - ATF

- A Resistência não é função única da relação a/c
- Necessidade de sustentação do Rolo Compactador
- Fechamento Granulométrico para garantir a compactabilidade
- A perda de água durante a execução é fundamental
- Necessário disponibilidade mínima de material fino, dentre eles pó de pedra

Dosagem

- Resultados com petrografia não podem ser extrapolados
- O dimensionamento da central de britagem é fundamental na determinação das frações granulométricas
- Diferentes tipos de britadores fornecem resultados diferentes pelas alterações de forma do agregado e de pela quantidade de pó produzido
- Toda a dosagem deve utilizar granulometria real da obra

Seqüência de Dosagem

- Determinação das % de cada fração granulométrica
 - Utilização de curvas ideais como Talbot-Richard
 - Obtenção da maior massa unitária aparente
 - Utilizar experiência para evitar segregação
 - Dimensão máxima característica do agregado graúdo tende hoje a 50 mm

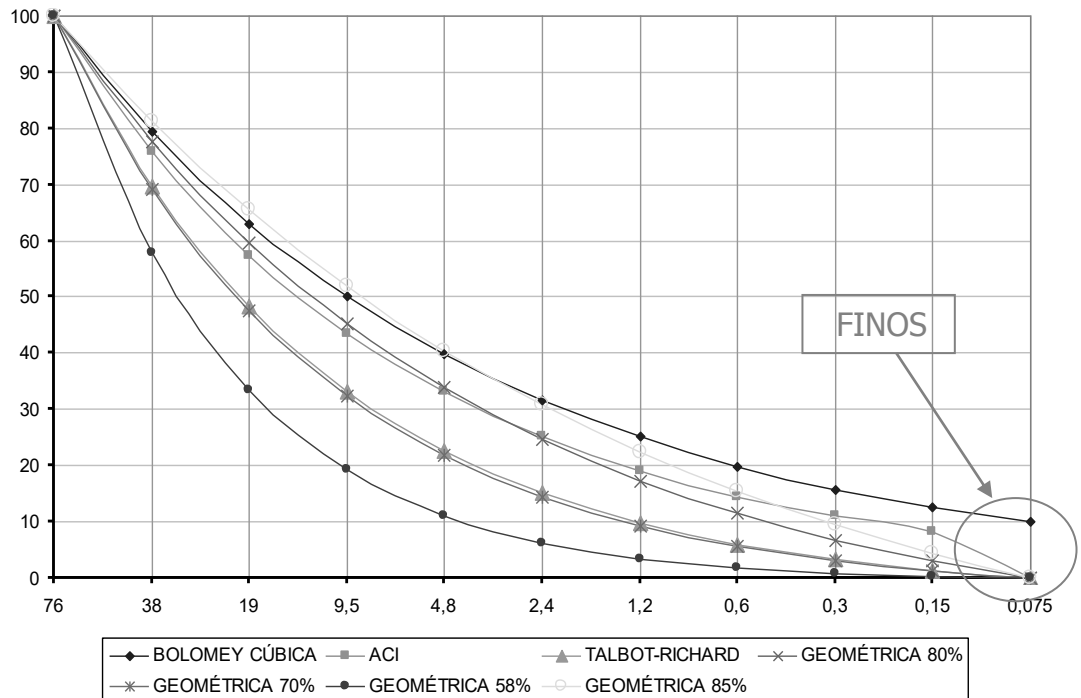
Seqüência de Dosagem

- Admite-se um consumo de cimento para concreto de Referência
 - Entre 70 e 100 kg/m³
 - A utilização de aditivos diminui os consumos. (1% de substituição pode diminuir 10 kg/m³)
 - Utilizar cimentos que inibam reações deletérias
- Agregado Pulverizado
 - variando de 120 kg/m³ a 160 kg/m³
- Conteúdo de Água - depende da trabalhabilidade, Hoje 8 e 15 segundos de “Cannon time”.

Seqüência de Dosagem

- Determina-se o Teor Inicial de Areia utilizando a distribuição de Bolomey

$$p = 1 - \left(\frac{d}{D'_{m\acute{a}x}} \right)^{\frac{1}{3}} \pm 5 \%$$





Seqüência de Dosagem

- Dentre os limites da curva, faz-se várias dosagens com diferentes teores de areia
- Mantendo-se o Canon Time, determina-se o teor de água, verificando a tendência de segregação da mistura. Esta pode ser observada na betoneira e no tombamento da mistura para realização de ensaios.
- Para cada teor de areia moldam-se cp,s para verificar a resistência e o rendimento da mistura.
 - Os teores de areia em geral ficam entre 48 e 58%
 - Pó: Mínimo entre 12 a 14% do peso da areia
 - Material cimentício desejável $> 10\%$
 - Pozolana indispensável



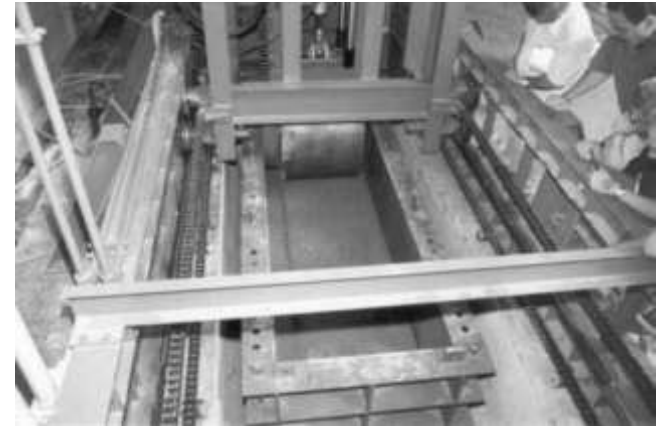
Seqüência de Dosagem

- Realizam-se aterros experimentais com condição de campo para certificar os resultados obtidos com os equipamentos e mão-de-obra reais
- Adapta-se, caso necessário a dosagem
- Utilizam-se os dados de campo para evoluir a dosagem

Pistas Experimentais



Pista Experimental no Campo



Pista Experimental no Laboratório

Testemunhos

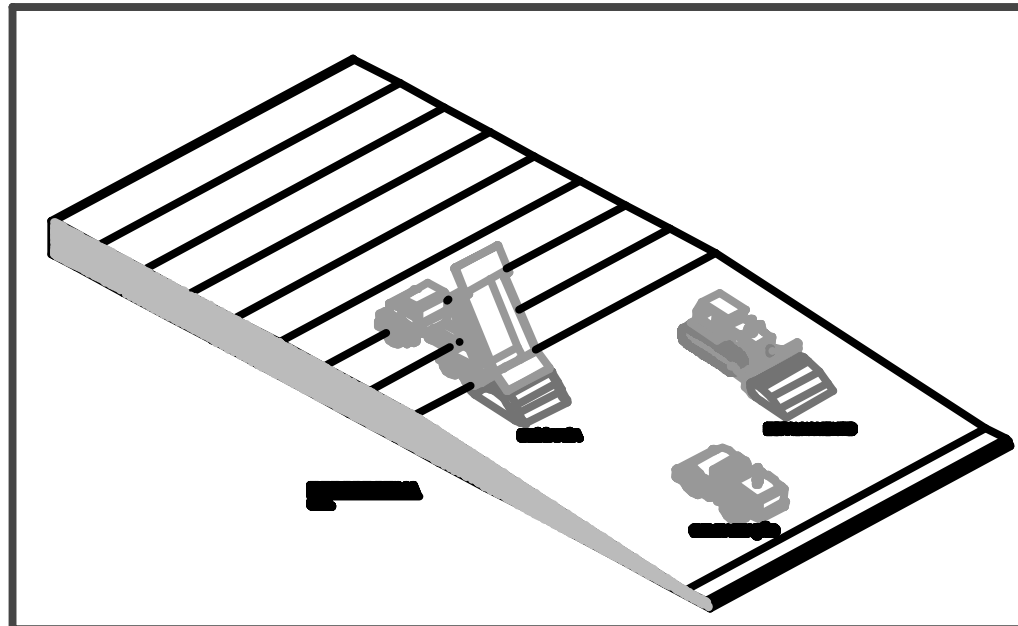
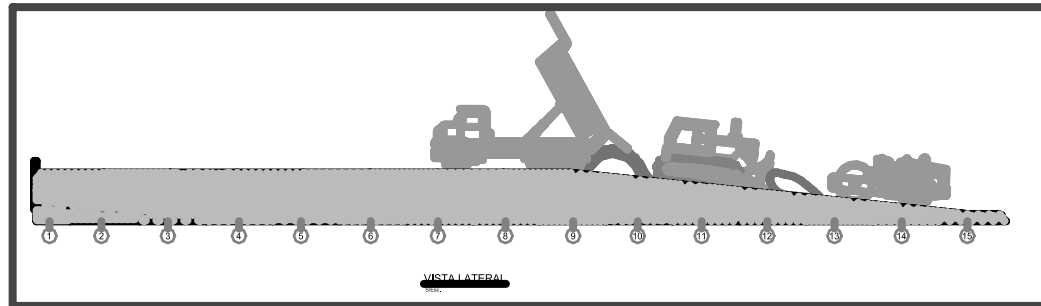
A extração é uma ferramenta importante para o controle de qualidade, pesquisa e para o monitoramento durante a vida útil do empreendimento.



Constatações

- Processo executivo interfere nos parâmetros
- Os ensaios convencionais podem não ser adequados à caracterização
- Treinamento da mão-de-obra interfere no processo
- A qualidade da obra aumenta significativamente com o tempo
- Devido a variabilidade inerente dos materiais no processo, não há banco de dados confiável

Concreto Rampado





Método Rampado - Conceituação

- Há grande quantidade de juntas, onde os parâmetros são menores.
- No método contínuo, há tempo considerável entre camadas sucessivas
- Utiliza-se argamassa de ligação para garantir parâmetros necessários
- Em intervalos de tempo curtos, as reações de hidratação garantem juntas adequadas
- O método rampado coloca menores quantidades de CCR, diminuindo o intervalo entre camadas
- Como pode ser observado, seria necessária argamassa apenas no topo das diversas camadas inclinadas



Método Rampado – Conceituação

- Há dificuldade de compactação da ponta da camada, podendo segregar pelo tamanho do agregado graúdo
- O processo foi proposto inicialmente na China com dosagens com quantidade elevada de cinza volante
- No Brasil adota-se o método de dosagem com alto teor de finos, pobre de aglomerantes (70 a 90 kg/m³)
- Necessário calibrar o método, através de pesquisas de parâmetros das interfaces entre camadas sucessivas (juntas entre camadas de concretagem)



Método Rampado – Conceituação

- Hoje no método CCR ATF, as juntas tendem à espessura de 30 cm
- As especificações indicam intervalos entre 2 a 4 horas para o dia, e de 3 a 5 horas na noite
- Estudos indicam ser o intervalo de 4h entre camadas confortável para cura em condições de laboratório, podendo chegar a 8 h
- O intervalo sofre influencia da insolação, temperatura e umidades ambientes, da velocidade do vento e da eficiência da cura



CCR Enriquecido com Calda

- Consiste na aplicação de calda de cimento no CCR, com vibração posterior com vibradores de imersão
- Objetiva substituir o concreto convencional de face, usado para controlar a percolação
- Técnica desenvolvida na China, na barragem de Jiangya em 1996. Usado com sucesso em várias barragens, com sucesso.
- Procura simplificar o processo construtivo e a interferência na praça
- Procedimento desenvolvido inicialmente em CCR com alto consumo de cinzas volantes



CCR Enriquecido com Calda

- O controle da quantidade de calda é importante e deve ser evitado seu espalhamento sem controle
- Devido a consistência do CCR de base, a energia necessária a mistura e posterior adensamento é significativa
- A homogeneidade necessária do processo demanda equipamentos adequados
- Pela responsabilidade destas estruturas é aconselhável passagem do rolo na interface CCR / enriquecimento

CCRATF Enriquecido com Calda

- O fechamento do esqueleto granular dificulta a penetração de calda no CCR ATF
- CCR enriquecido deve ter as propriedades necessárias similares ao do CCV
- Aplicações:
 - Faces de Montante e Jusante
 - Concreto de envolvimento de vedajuntas
 - Concreto de interface com a rocha de fundação
 - Envolvimento de embutidos
 - Concreto de face e acabamento das paredes das galerias de drenagem



CCR Enriquecido com Calda

- A junta entre camadas de CCR enriquecido deve ser bem estudada, de preferencia sendo costurada pelo vibrador
- A utilização de aditivos na calda é fundamental no processo
- Como o processo de enriquecimento é simples, não cria muita interferência no processo industrial
- Os resultados de obras chinesas mostram coeficientes de variação de resistência à compressão de testemunhos entre 10-12%.
- Testemunhos da interface CCR – enriquecimento mostram-se homogêneos e sem vazios





CCR Enriquecido com Calda

Cuidados:

- O processo depende dos processos e do treinamento da mão-de-obra. Os processos de verificação de qualidade dependem da extração de testemunhos.
- O acabamento requer maior esforço devido a consistência e rigidez.
- A interface entre camadas sucessivas de CCR enriquecido é um ponto fraco e pode gerar caminhos preferenciais de percolação

Barragens de CCR em Arco

Há um notável desenvolvimento das técnicas executivas de barragens de CCR em arco, com a necessária injeção das juntas de contração



Construção da Barragem de Shapai, China com 132m, onde se observa as tubulações de resfriamento e de injeção