CESP

Companhia
Energética de
São Paulo

Influência da Pressão na Calda e Detalhes Construtivos em Injeção de Bainhas de Protensão

Residência Ilha Solteira e Três Irmãos

Influência da Pressão na Calda e Detalhes Construtivos em Injeção de Bainhas de Protensão

APROVEITAMENTO MÚLTIPLO TRÊS IRMÃOS	FOLHA 01
OBRA: USINA HIDROELÉTRICA TRÊS IRMÃOS	
ASSUNTO: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA CALDA E DETALHES CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO	

Este trabalho, intitulado "Influência da Pressão na Calda e Detalhes Construtivos em Injeção de Bainhas de Protensão" foi o vencedor do 3º Concurso de Trabalhos Técnicos realizado pela Associação dos Engenheiros da CESP, em novembro de 1981. São seus autores os engenheiros Maurício Tonzar, Luiz Antonio Cal de Oliveira e Silva e Paulo Cesar Nogueira Borges.

RESIDÊNCIA ILHA SOLTEIRA/TRÊS IRMÃOS
FEVEREIRO/1983

INDICE

	PÁGINA
1 - INTRODUÇÃO	03
2 - TESTES REALIZADOS	03
3 - VALORES OBTIDOS NA EXECUÇÃO DA INJEÇÃO ..	12
3.1 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	13
3.2 - FLUIDEZ	15
3.3 - EXSUDAÇÃO	16
4 - PROCEDIMENTO DA INJEÇÃO	16
4.1 - PREPARO DA CALDA	16
4.2 - ESTANQUEIDADE DA BAINHA	18
4.3 - LIMPEZA DOS CABOS	20
4.4 - PERÍODO DE INJEÇÃO	21
4.5 - RESPIROS	22
5 - OBSERVAÇÕES FINAIS	22

1. INTRODUÇÃO.

Este trabalho tem por objetivo mostrar que a calda de cimento, quando injetada em bainhas de protensão e mantida sob pressão durante todo o período de pega, tem diminuída a sua sedimentação.

Aborda ainda, alguns aspectos construtivos e de controle de qualidade dos materiais. As referidas injeções, objeto desse trabalho, foram realizadas nas bainhas das vigas protendidas da Ponte a jusante da Usina Hidroelétrica Três Irmãos, sendo as conclusões válidas para aplicação em serviços análogos.

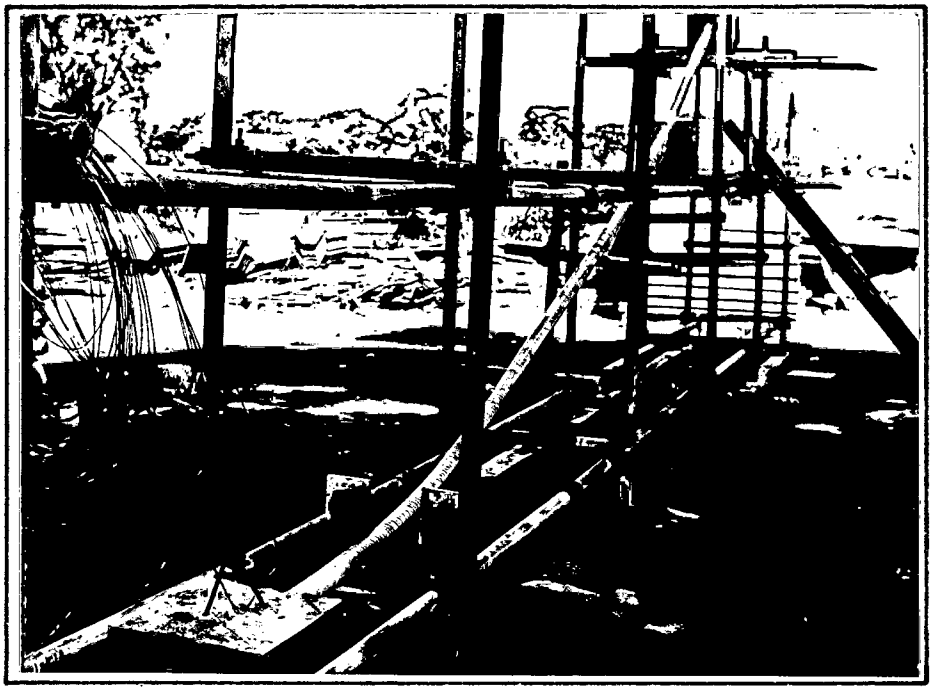
2. TESTES REALIZADOS.

A calda usada para o teste foi a seguinte:

- Fator água/cimento 0,38
- Percentagem de Aditivo Plastificante (BV-40 da Sika) 1,00%
- Fluidez no cone Marsh 9,50s

Montou-se sobre andaimes tubulares uma bainha real com a curvatura máxima do projeto de bainhas das vigas, preenchida por cordoalhas não protendidas. Para simular o concreto envoltório e garantir a vedação da bainha, esta foi revestida com um tubo de PVC de 3" de diâmetro e o espaço entre a bainha e o tubo foi preenchido com calda. Nas extremidades foram colocadas mangueiras plásticas de 3/8", ligando-se assim o interior da bainha com o ambiente externo.

APROVEITAMENTO MÚLTIPLO TRÊS IRMÃOS	FOLHA 04
OBRA: USINA HIDROELÉTRICA TRÊS IRMÃOS	
ASSUNTO: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA CALDA E DETALHES CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO	



Bainha-teste antes de ficar embutida no PVC, posicionada no andaime tubular.

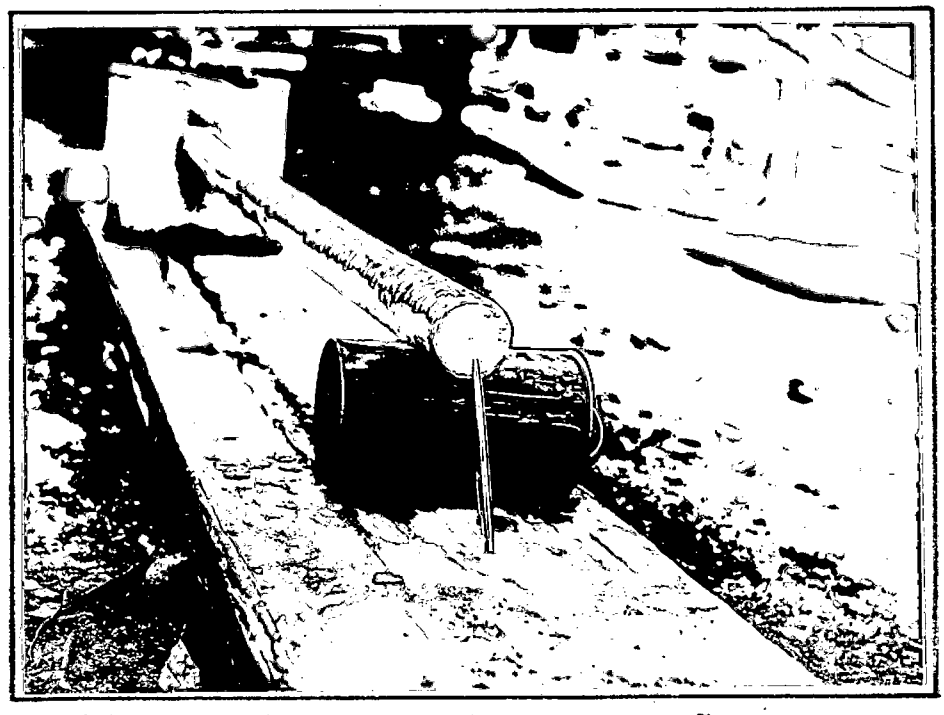
Uma semana após ter sido injetada com uma pressão de 4 a 5kgf/cm^2, e estrangulada com pressão de 8kgf/cm^2, a bainha foi serrada em várias seções para verificar-se o desempenho da injeção quanto aos vazios.

A seqüência das três fotos, na folha seguinte, mostra os resultados obtidos, podendo-se notar a ausência de vazios e de sedimentação, o que atesta a importância da manutenção da pressão até o endurecimento da calda, aumentando conseqüentemente a eficiência da injeção.

APROVEITAMENTO MÚLTIPLO TRÊS IRMÃOS	FOLHA 05
OBRA: USINA HIDROELETRICA TRES IRMÃOS	
ASSUNTO: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA CALDA E DETALHES CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO	

Seções da bainha injetada e estrangulada com 8kgf/cm² de pressão.

Para comparação, foi feita uma outra injeção estrangulando-se agora com pressão zero. A bainha ficou na horizontal e, para vedação, foi usada Fita Crepe e pintura com resina Epoxi. Após a injeção a bainha foi serrada, como mostra a foto abaixo.



Bainha injetada e estrangulada sem pressão.

Nota-se que no topo superior da bainha ficou um vazio; comprovou-se a diferença fundamental entre os dois testes foi devida à pressão de 8kgf/cm² no estrangulamento, efetuada no primeiro teste.

Para confirmação da importância da pressão de estrangulamento foi feito mais um teste em dois tubos verticais de PVC de 3" de diâmetro e 6m de altura. Foram injetados de baixo para cima, sendo que somente um dos tubos foi vedado na extremidade superior com saída de mangueira plástica de 3/8" de diâmetro, ficando o outro tubo com a extremidade aberta. As fotos a seguir mostram os tubos após endurecimento da calda.

Tubo vertical injetado e estrangulado com pressão de 10 kgf/cm².

APROVEITAMENTO MÚLTIPLO TRÊS IRMÃOS	FOLHA 07
OBRA: USINA HIDROELÉTRICA TRÊS IRMÃOS	
ASSUNTO: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA CALDA E DETALHES CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO	

Tubo vertical injetado sem pressão.

O tubo injetado sem pressão teve uma sedimentação de 2cm e o tubo injetado com pressão de 10kgf/cm² ficou cheio de calda inclusive até a mangueira de 3/8" colocada para o estrangulamento.

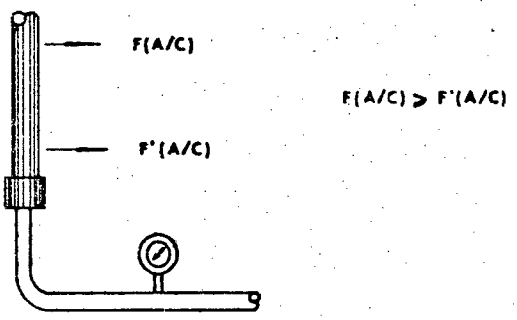
A hipótese que poderia explicar o fenômeno consistiria em dois fatos advindos da introdução de pressão durante a injeção e sua posterior manutenção, conforme segue.

1º fato: Mudanças na relação água/cimento provocadas pelo ato de injetar e conseqüente estrangulamento. Assim, analisando o caso do tubo vertical ocorreria o seguinte:

a) Antes do Estrangulamento.

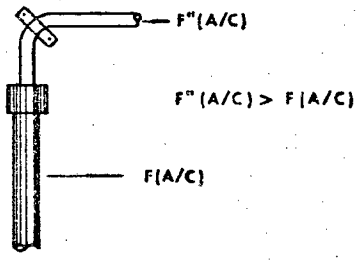
Durante a injeção há uma tendência de "empurrar" mais água livre para cima, já que se injetou de baixo para cima, e assim na parte superior se terá um fator água/cimento maior que o da

parte inferior, tendo portanto, uma calda potencialmente mais disposta a exsudar, fato este comprovado no tubo testado sem pressão (condição análoga à situação antes do estrangulamento).



b) Durante o Estrangulamento.

Como o processo de estrangulamento não é instantâneo, a calda que sai do respiro tem um fator água/cimento mais alto que a calda que está dentro do tubo, também devido a tendência de "empurramento" da água livre.



Resumindo os itens a e b, tem-se que o fator água/cimento da calda no tubo após estrangulado é menor do que o da mistura antes de injetar (f"(c/a) > f'(a/c).

c) Após o Estrangulamento.

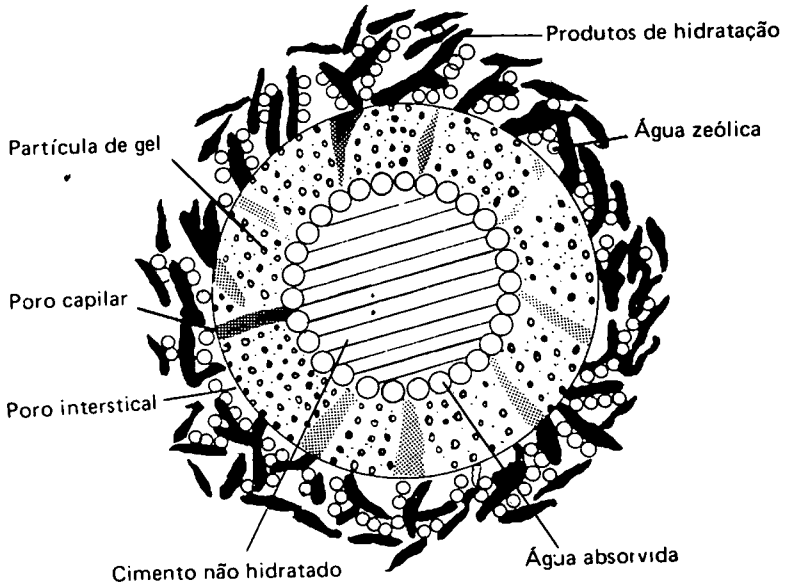
Com a manutenção da pressão, haveria uma tendência de reorganização da mistura para se tornar mais homogênea e igualar o fator água/cimento ao longo do tubo, formando-se assim um fluxo contrário a exsudação, porque havia anteriormente mais água

na parte superior do tubo, a qual tenderia a descer.

2º fato: O aumento da pressão gera um novo equilíbrio na tensão superficial de água livre da pasta, e este novo equilíbrio origina dois fenômenos:

Primeiro: Aumento substancial da água absorvida, ocasionando um pequeno aumento no coloide.

Segundo : Com o aumento da água absorvida ocorre uma redistribuição da água livre na pasta e conseqüente pulverização e/ou estrangulamento dos poros capilares, os quais deixam de ser caminhos preferenciais, facilitando assim a formação de um conjunto coeso e estável, deixando de ocorrer fluxos de água (1)



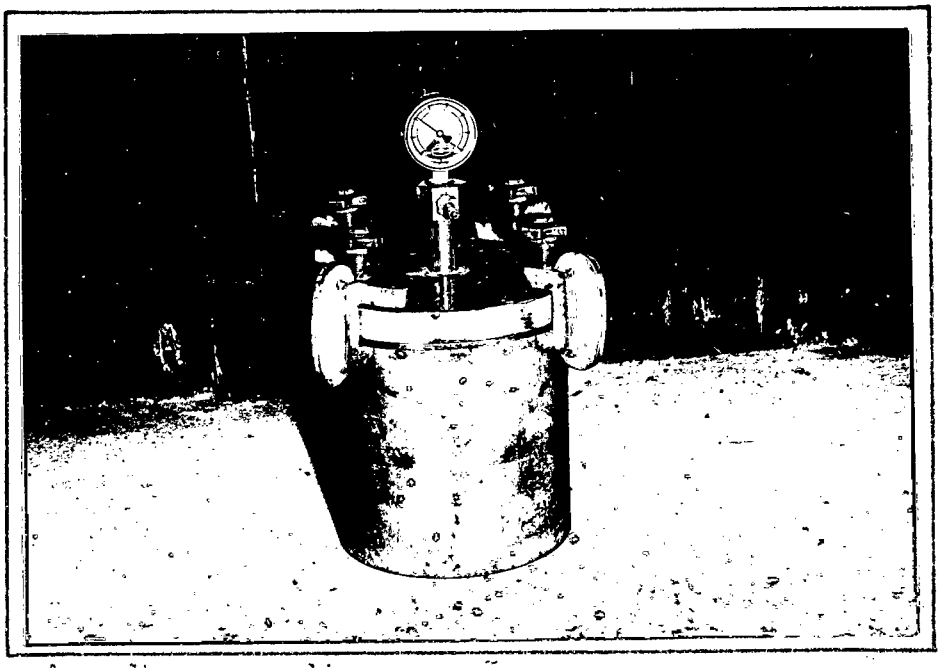
CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO

Com o aumento substancial da água absorvida e a redução dos poros capilares há inibição da sedimentação evitando a retração hidráulica ou por secagem.

① "A água evaporável (água livre) pode apresentar-se absorvida à superfície do cimento devido ao fenômeno explicado pelas forças de Van der Walls. Esta água é reversível e pode retornar, dependendo da tensão superficial. Parte da água absorvida é mantida entre certos planos dos cristais e é chamada água Zeólica" (extraído do artigo "Como se pode fazer o concreto impermeável?", de L.A. Falcão Bauer e M.A. Noronha, da revista Construção Pesada).

Tentando explicar o fenômeno foram feitos testes, que consistiram em moldar séries de três corpos de prova para serem rompidos nas idades de 3 e 7 dias, sendo que uma série foi submetida à pressão de aproximadamente 10kgf/cm² durante 24 horas e outra ficou com a pressão ambiente.

Para se aplicar nos seis corpos de prova (três para três dias e três para sete dias) a pressão de 10kgf/cm², adaptou-se o aparelho de ar incorporado, segundo figura abaixo.



Aparelho para aplicar pressão.

Os corpos de prova foram moldados sem pressão e após moldados foram colocados dentro do aparelho. Neste processo perdeu-se um pouco da eficiência de pressão, pois no período compreendido entre a moldagem até a aplicação de pressão a calda ficou sem pressão, ocorrendo alguma sedimentação. Mais interessante seria injetar um tubo (diâmetro maior que 5cm) sob pressão e, após a cura, extrair os corpos de prova.

Moldagem dos corpos de prova.

Os resultados dos ensaios encontram-se no quadro abaixo:

TESTE 0	IDADE: 3 DIAS		IDADE: 7 DIAS	
	SEM PRESSÃO	COM PRESSÃO	SEM PRESSÃO	COM PRESSÃO
	TENSÃO MÉDIA (kgf/cm^2)	TENSÃO MÉDIA (kgf/cm^2)	TENSÃO MÉDIA (kgf/cm^2)	TENSÃO MÉDIA (kgf/cm^2)
1º	415	397	527	461
2º	345	374	489	474
3º	367	385	469	436
MÉDIA	380	376	495	457

Pelos resultados obtidos verifica-se que houve um decréscimo de resistência quando da aplicação da pressão. O fato se dá, provalvemente, devido à majoração das moléculas, criando uma maior facilidade ao deslizamento relativo (maiores braços de alavanca).

Portanto, tem-se o seguinte, resumindo todo o exposto:

Primeiro: A minoração da resistência é justificada pela majoração da molécula.

Segundo : A majoração da molécula é devida ao aumento da água absorvida.

Terceiro: O aumento da água absorvida também provoca a redução dos poros capilares, inibindo a sedimentação.

3. VALORES OBTIDOS NA EXECUÇÃO DA INJEÇÃO.

Com os conceitos obtidos nos testes, foram definidas as diretrizes da injeção, seguindo-se ainda as

especificações da Projetista e aproveitando-se também a experiência anterior da Fiscalização da CESP, acumulada em Ilha Solteira.

Foram usados na Obra dois tipos de calda, descritas abaixo:

- Calda A.
  - Fator água/cimento 0,38
  - Percentagem de aditivo plastificante (BV-40 da Sika) 1,00 %

- Calda B.
  - Fator água/cimento 0,40
  - Percentagem de aditivo plastificante (BV-40 da Sika) 0,60 %

Durante a execução da injeção dos cabos da Ponte foram feitos vários ensaios levando-se em conta as especificações da Projetista e considerando-se três aspectos: resistência à compressão, fluidez e exsudação das caldas.

3.1. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.

A Projetista previu uma resistência característica (fck) aos vinte e oito dias superior a 300kgf/cm², e os valores obtidos em ensaios de compressão axial em corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10cm de altura estão na tabela da folha seguinte:

CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO

TIPO DE CALDA	PARÂMETROS ESTATISTICOS (kgf/cm²)	NÚMERO DE AMOSTRAS	IDADE EM DIAS		
			3	7	28
A	Resistência Média	40	347	458	603
	Desvio Padrão (Sn)		50,5	63,0	79,7
	Desvio Padrão de Dosagem(Sd)		63,0	78,0	99,6
	Resistência Característica		243	328	438
	Desvio Padrão do Ensaio		5,1	6,3	7,2
B	Resistência Média	18	332	478	650
	Desvio Padrão (Sn)		50,3	61,0	75,3
	Desvio Padrão de Dosagem(Sd)		-	-	-
	Resistência Característica		-	-	-
	Desvio Padrão do Ensaio		10,7	49,0	19,9

Do quadro acima pode-se concluir o seguinte:

a) As duas caldas se comportaram muito além do especificado quanto à resistência característica. Mesmo a Calda B, que não teve número suficiente de amostras para cálculo estatístico, mostrou-se eficiente, tendo em vista o elevado Desvio Padrão de Dosagem obtido a partir da Resistência Média Estimada e da Resistência de Projeto ou seja:

$650 = 300 + 1{,}65sd \Rightarrow sd = 212 kgf/cm^2$

b) Obteve-se altos valores de Desvios Padrões, tanto do ensaio como das amostras. Este fenômeno ocorre em função da heterogeneidade do corpo de prova devido à sedimentação. Existem

artifícios que poderiam minimizar esta ocorrência, mas, como não estão normalizados, sugere-se a conveniência de fazer uma correção no desvio padrão, como se explica a seguir:

Para os conjuntos das duas caldas o desvio padrão foi:

$$Sn = \sqrt{\frac{40 \times 79,7^2 + 18 \times 75,3^2}{58}} = 78,0 kgf/cm^2$$

Em estudo feito para a mesma Ponte, usando-se o mesmo cimento, notou-se que o Desvio Padrão para o concreto foi em torno de 35kgf/cm², e para a pasta obteve-se o valor de 78kgf/cm².

A razão entre os dois desvios padrão foi de 2,2 , o que leva a sugerir que a Resistência de Dosagem para a calda tenha o mesmo tratamento que a do concreto, porém no controle se use metade do valor de Sn obtido nos ensaios, porque a sedimentação que existe no ensaio fica inibida na injeção da bainha devido a pressão aplicada no estrangulamento, sendo então, a variação de resistência no campo menor que nos ensaios.

3.2. FLUIDEZ.

A Projetista especificou o tempo de passagem de um litro de pasta através do funil Marsh entre 13 a 25 segundos.

A Calda A, na entrada do cabo teve, em média, o tempo 9,4 segundos, e a Calda B, 8,7 segundos. A alta fluidez se deu em função da quantidade de plastificante, o que ajuda a viscosidade, sendo um aspecto positivo.

Foi mantida na saída do cabo uma diferença de fluidez de no máximo 10% em relação à entrada e o tempo obtido foi em média de 8,9 segundos para a Calda A e 8,3 segundos para a Calda B.

3.3. EXSUDAÇÃO.

A Projetista especificou que se valor não deveria exceder a 2% do volume após três horas da mistura.

Para a Calda A se teve uma exsudação média de 1,28% tendo em média estabilizado em duas horas. A Calda B teve uma exsudação média de 2,15%, também estabilizando em duas horas. Este fato foi motivo para não se utilizar mais a Calda B.
O ensaio de exsudação foi realizado em paralelo com os trabalhos de injeção.

4. PROCEDIMENTO DA INJEÇÃO.

A execução da injeção foi baseada na especificação da Projetista, e na experiência obtida em Ilha Solteira.

Os procedimentos básicos estão abaixo descritos:

4.1. PREPARO DA CALDA.

Foi usado um misturador cuja rotação era superior a 1500rpm. A ordem de colocação dos materiais e tempos de mistura são descritos a seguir:

a) Colocação total da água no agitador;

b) Com o motor em movimento era colocado o cimento no período de um minuto, e após a colocação deixado em movimento durante mais dois minutos (total de três minutos);

c) Sem desligar o motor, adicionava-se o aditivo e deixava-se em movimento mais dois minutos. O total da operação era de cinco minutos, portanto;

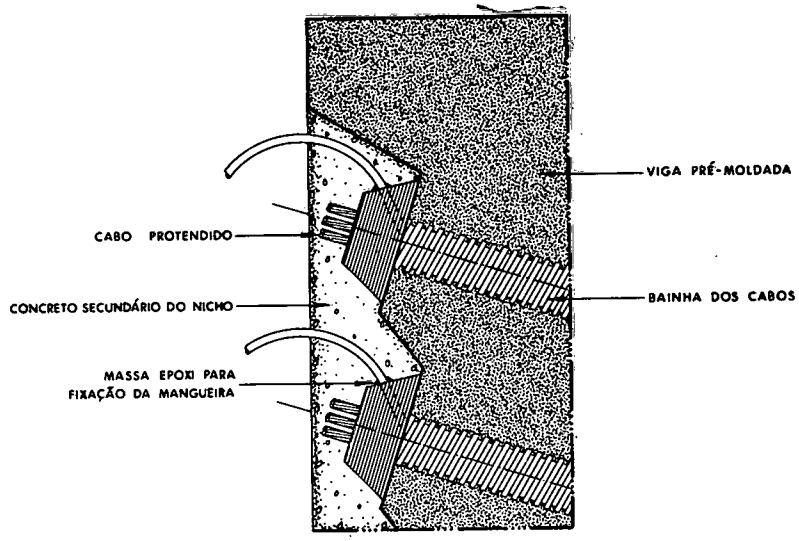
d) Após a mistura, a pasta era coada e despejada concomitantemente em um recipiente onde era depositada, pronta para ser injetada.

Agitador e depósito da pasta.

e) Como não havia agitação mecânica no depósito, houve necessidade de se agitar manualmente a pasta, e o período máximo que esta ficou no depósito foi de quinze minutos.

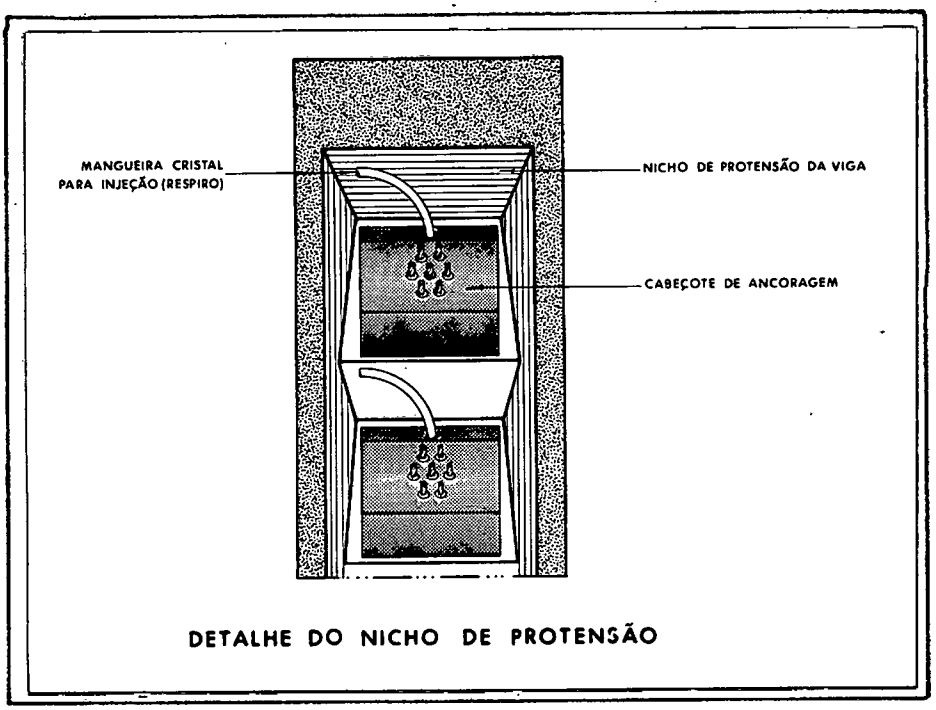
4.2. ESTANQUEIDADE DA BAINHA.

Visando a perfeita vedação na bainhas para garantia da manutenção da pressão no seu interior, rejuntou-se com Durepoxi a saída da mangueira no cabeçote de ancoragem, após o que concretou-se o nicho, conforme indicado no desenho e fotos a seguir.

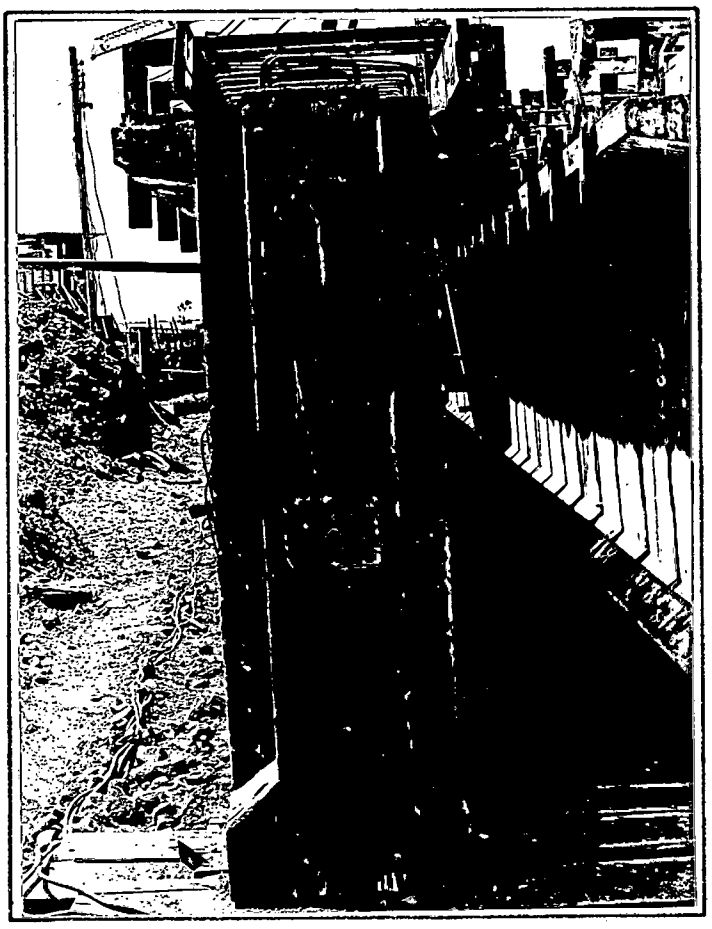


DETALHE DO CONCRETO SECUNDÁRIO E ANCORAGEM

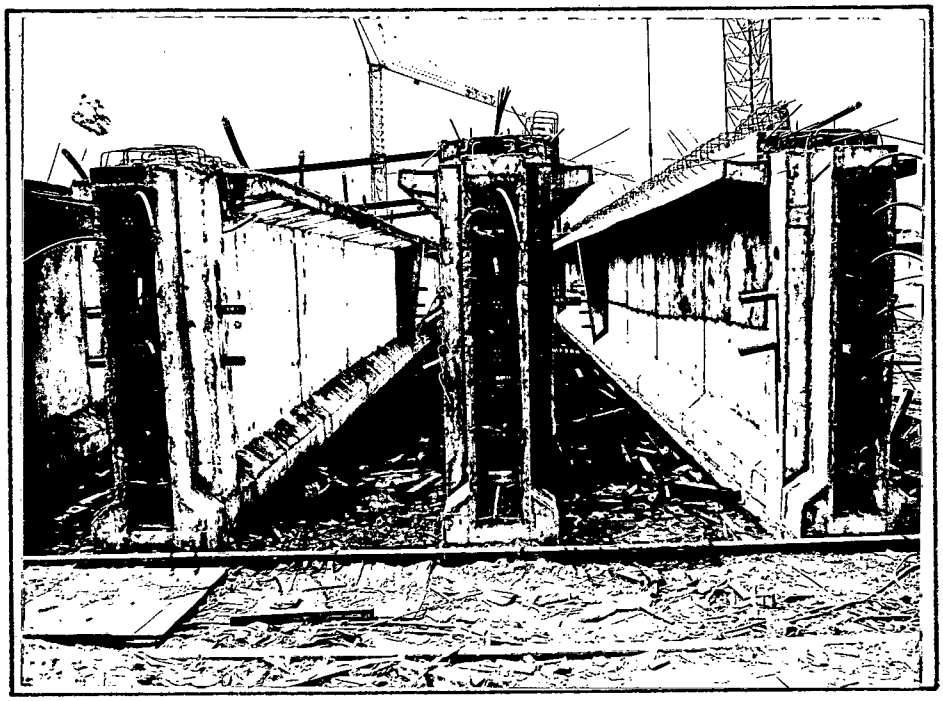
APROVEITAMENTO MÚLTIPLO TRÊS IRMÃOS	FOLHA 19
OBRA: USINA HIDROELÉTRICA TRÊS IRMÃOS	
ASSUNTO: INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA CALDA E DETALHES CONSTRUTIVOS EM INJEÇÃO DE BAINHAS DE PROTENSÃO	



DETALHE DO NICHO DE PROTENSÃO



Nicho já com o concreto secundário e injetado.



Aspecto do nicho do concreto secundário, já com a mangueira fixada com Durepoxi.

4.3. LIMPEZA DOS CABOS.

Antes de se iniciar a injeção nos cabos protendidos, com os nichos de protensão já concretados, executava-se uma limpeza com água no interior das bainhas.

Esta lavagem era necessária para retirada do óleo solúvel colocado no aço para protegê-lo de corrosão, além de eliminar eventuais materiais estranhos depositados no interior da bainha.

Quando a água de lavagem saía limpa, era indício de que a bainha estava em condição de receber a pasta. Em seguida era retirada toda a água de lavagem por meio de ar comprimido e injetada a calda, sem interrupção de trabalho.

Em princípio a Projetista não concordou que se tirasse a água de lavagem com ar comprimido, alegando que o ar poderia introduzir óleo do compressor nas bainhas, além de que as cordoalhas ficariam com as superfícies úmidas e poderiam sofrer corrosão.
Essas restrições foram superadas com uma verificação apurada dos filtros de óleo do compressor e impondo-se a execução da injeção logo após a limpeza com ar.

Enquanto a calda não saísse da peça com sua fluidez normal, era rejeitada e lançada fora, pois vinha misturada com água de lavagem. Em injeções sem o uso de ar comprimido houve um aumento em torno de 12% tanto no tempo de operação como também no consumo de calda, o que comprova a utilidade de seu uso, desde que a injeção seja feita logo após.

Aproveitou-se a passagem do ar para verificação de eventuais vazamentos. Estrangulava-se os respiros de saída e aplicava-se pressão no manômetro até 8kgf/cm^2. Caso a pressão baixasse, era sinal de vazamentos. Tentava-se primeiramente localizar o vazamento com ar e, caso nada se detectasse, era injetada água sob pressão para nova verificação. Os vazamentos eram submetidos a reparos no sentido de vedá-los totalmente, após o que se reiniciavam os serviços normais.

4.4. PERÍODO DE INJEÇÃO.

No período compreendido entre dez e quinze horas foi evitado que se injetasse, devido a mudança de fluidez da calda com o aumento de temperatura.

4.5. RESPIROS.

O espaçamento dos respiros foi de no máximo 14m. Quando existia mais que um respiro, o estrangulamento era processado no sentido do mais próximo para o mais distante da extremidade onde se injetava. A mangueira de respiro ficava sempre vertical após estrangulada, propiciando a verificação de sedimentação no próprio respiro, servindo assim como indicativo da qualidade da calda e da eficiência da expulsão da água de limpeza. Na obra em questão 99,7% dos respiros, após o corte, estavam totalmente cheios de pasta já endurecida.

Cumpre salientar a importância da qualidade da mangueira de respiro. A que teve comportamento mais adequado foi a mangueira "Cristal" de Ø 3/8", de parede de 2mm. Foi utilizada inicialmente a mangueira de Polietileno preta de Ø 3/8" e 1mm de espessura com menor sucesso, tendo a Fiscalização vetado seu uso por se tornar quebradiça ao tempo e não suportar as pressões de injeção.

5. OBSERVAÇÕES FINAIS.

Embora possam parecer excessivos os cuidados aqui narrados, julgamos os mesmos necessários, principalmente em cabos de protensão de barragens sujeitos a contacto com água. Nesse sentido, lembramos o ocorrido com os cabos de protensão com elevada sedimentação na Tomada D'Água da Usina Ilha Solteira, que tiveram que sofrer posteriormente uma reinjeção bastante dificultosa.

Outrossim, tendo em vista a simplicidade e baixo custo dos serviços adicionais requeridos, além do

incontestável aumento da eficiência da peça protendida no tocante à possibilidade de corrosão dos cabos, e consequente garantia das cargas de ruptura, conclui-se pela validade desse procedimento.

B I B L I O G R A F I A

- Reinjeção dos Cabos de Protensão da Tomada D'Água de Ilha Solteira - Engº Maurício Tonzar.
- Artigo "Como se pode fazer o concreto impermeável?" de L.A. Falcão Bauer e M.A. Noronha, publicado na revista Construção Pesada.
- Artigo "Normas de Injeção e Reinjeção para Concreto Protendido" de L.A. Falcão Bauer e M.A. Noronha, da Revista Construção Pesada.
- Catálogo Rudloff.
- Especificações da Projetista de Roberto Rossi Zucollo - Engenharia Civil e Estrutural Ltda.