

# ISOLAMENTO DE POÇOS – MISTURA ALTERNATIVA SEM AS LIMITAÇÕES DA PASTA COM CIMENTO PURO

Mario A. Valença dos Santos<sup>1</sup>; Waldir D. Costa<sup>2</sup>;

**Resumo** – Ensaios de laboratório realizados no Instituto Tecnológico de Pernambuco permitiram identificar uma mistura de bentonita com cimento que supera todos os inconvenientes da pasta de cimento puro, para obstrução de poços abandonados com risco de contaminação e para isolamento dos novos em fase de conclusão. Os ensaios comprovaram que esta pasta é mais satisfatória, principalmente devido a ausência de retração, ao baixo coeficiente de permeabilidade, ao aumento considerável do tempo de pega e a sensível redução de temperatura proveniente do calor da reação do cimento com a água. O estudo também permitiu definir, para o percentual de 20% da pasta de bentonita na massa final, as proporções para diluição do cimento e da bentonita com a água. É proposta ainda uma metodologia para preparação da mistura no canteiro de obra. Os autores aceitam sugestões para torná-la mais prática.

**Abstract** – Carried through assays of laboratory in the Technological Institute of Pernambuco had allowed to identify a mixture of bentonite with cement that surpasses all the inconveniences of the pure cement paste, for blockage of wells abandoned with contamination risk and for isolation of the news in conclusion phase. The assays had proven that this paste is more satisfactory, mainly because the retraction absence, to the low coefficient of permeability, the considerable increase of the time of hardening and the sensible reduction of temperature proceeding from the heat of the reaction of the cement with the water. The study also it allowed to define, for the percentage of 20% of the paste of bentonite in the final mass, the ratios for dilution of the cement and the bentonite with the water. A methodology for preparation of the mixture in the workmanship seedbed is proposal still. The authors accept suggestions to become it more practical.

**Palavras-Chave** – PASTA DE ISOLAMENTO; MISTURA CIMENTO-BENTONITA; ISOLAMENTO DE POÇO,

---

<sup>1</sup> Geólogo, especialista em águas subterrâneas com mestrado em hidrogeologia. Consultor. Rua Engº Oscar Ferreira, 101, Ap. 1701-Poço-/Recife/PE Cep 52.061-020; Tel: 81 9162-4368  
E-mail: mariovalenca@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Geólogo, especialista em águas subterrâneas, com mestrado e doutorado em hidrogeologia. Diretor-Presidente da COSTA Consult. e Serv. Técn. e Amb. Ltda. Av. Santos Dumont, 320-Recife/PE-E.mail: wdcosta@ibest.com.br

## 1 – INTRODUÇÃO

Esta pesquisa foi desenvolvida com a finalidade de identificar uma mistura de cimento, bentonita e a água com qualidade técnica superior aquela da pasta de cimento de modo a substituí-la nas suas finalidades em condições mais favoráveis.

Foram utilizados no estudo o cimento Portland comum da construção civil (Poty CP II - 2 - 32 RS) e a bentonita de marca EBM, ambos usualmente empregados pelos perfuradores de poços.

As expressões cimentação e isolamento de poços serão aqui empregados como sinônimos.

A identificação das misturas adequadas de cimento, bentonita e água da pesquisa foram realizados no Laboratório de Tecnologia Mineral – LTM, do Departamento de Engenharia de Minas (DMINAS) da UFPE, por atenção especial do Eng<sup>o</sup> de Minas Carlos A. Magalhães Baltar.

A execução integral da pesquisa ocorreu durante os meses de maio e junho de 2007, em quatro laboratórios do Instituto Tecnológico de Pernambuco – ITEP, discriminados a seguir, onde se contou com a boa vontade e o empenho de dirigentes, técnicos e laboratoristas:

- Determinação de densidades aparentes e de viscosidades cinemáticas no Laboratório de Materiais – LMAT, com colaboração prestimosa do laboratorista Rossini Vilaça Neves.
- Coeficiente de permeabilidade a carga variável no Laboratório de Geotecnia Ambiental – LGA, coordenado pela Eng<sup>a</sup> Maria Zélia B. Leite.
- Determinação de tempos de pega no Laboratório de Construção Civil – LCC, por especial atenção do tecnologista Marcos José.
- Estudo da variação da temperatura gerada pelo calor de hidratação na pega do cimento, puro ou em mistura com a bentonita, no Laboratório de Tecnologia do Gesso – LTG, executado de modo pioneiro e com equipamentos de última geração pelo Eng<sup>o</sup> Químico Luciano Peres e sua equipe.

É importante destacar a contribuição pessoal e a coordenação geral do geólogo Osmar S. Baraúna, coordenador do LMAT, a assistência técnica do Químico Industrial Ednaldo Celerino e a dedicação da estagiária e estudante de Química Fundamental Lívia Dias Campelo que, devidamente assistida, participou da execução e registrou os resultados de todos os ensaios.

No texto que se segue, são apresentados quadros e gráficos que retratam os dados e ilustram os resultados dos estudos que permitiram a identificação da mistura mais adequada de cimento, bentonita e água para realizar o isolamento de poços abandonados e a completação dos recém perfurados.

## 2 - DEFINIÇÃO DAS PROPORÇÕES DE CIMENTO, BENTONITA E ÁGUA NA PASTA

Após considerar as experiências de pastas de cimento com bentonita já aplicadas por perfuradores no isolamento de poços e a realização de diversos ensaios em laboratório com misturas destes componentes com a água, concluiu-se por adotar na pesquisa quatro participações da pasta de bentonita na massa final (5, 10, 20 e 28,57 %), cujas proporções são discriminadas no Quadro 1 a seguir.

QUADRO 1 – Proporções de cimento, bentonita e água na mistura.

COMPONENTES	PASTA DE CIMENTO		PASTA DE BENTONITA		MASSA PARCIAL (g)	MASSA FINAL (g)	PARTICIPAÇÃO DA PASTA BENTONITA NA MASSA FINAL (%)
	MASSA (g)	PROPORÇÃO (%)	MASSA (g)	PROPORÇÃO (%)			
Água (ml)	323,2	40,5	32	76,2	355,2	840	5,00
Sólido (g)	474,8	59,5	10	23,8	484,8		
Água (ml)	306	40,5	64	76,2	370	840	10,00
Sólido (g)	450	59,5	20	23,8	470		
Água (ml)	272	40,5	128	76,2	400	840	20,00
Sólido (g)	400	59,5	40	23,8	440		
Água (ml)	255	40,5	192	76,2	447	882	28,57
Sólido (g)	375	59,5	60	23,8	435		

## 3 - RESULTADOS FÍSICOS DA MASSA FINAL APÓS A PEGA

Estes resultados foram obtidos com amostras das diferentes porcentagens de pasta de bentonita na massa final colocadas em recipiente de plástico para endurecimento, em presença de excesso de água, para assemelhar às condições de aplicação no poço. Fez-se, também, imersão em cada recipiente de uma fração recortada de tubo de revestimento de poço.

Tais experiências objetivaram essencialmente examinar, após a pega, a condição de aderência a parte externa do revestimento e a identificação de eventual formação de fissuras e, secundariamente os aspectos físicos das mesmas.

QUADRO 2 – Resultados físicos observados na massa final - cimento/bentonita, após a pega, para diferentes participações da pasta de bentonita.

PARTICIPAÇÃO DA PASTA DE BENTONITA NA MASSA FINAL (%)	ADERÊNCIA AO REVESTIMENTO NA FACE ENRUGADA (VISUAL)	FISSURA POR RETRAÇÃO NO CORPO DA MASSA FINAL (VISUAL)	COR DA PASTA CONSOLIDADA
5,00	SATISFATÓRIA	AUSENTE	CINZA CLARO
10,00	SATISFATÓRIA	AUSENTE	CINZA CLARO E MUITO POUCO CREME
20,00	SATISFATÓRIA	AUSENTE	CINZA CLARO E CREME CLARO
28,57	SATISFATÓRIA	AUSENTE	CREME CLARO E MUITO POUCO CINZA

#### Comentários:

1. A retração comum nas pastas de cimento quando puro foi, após a pega, eliminada no corpo da massa final endurecida em todas as proporções de pasta de bentonita utilizadas.
2. A aderência à superfície enrugada do segmento de revestimento foi total mas, na face lisa lateral houve retração. Esta retração é expressiva nas amostras de 5 e 10%, reduzida na de 20% e ausente na de 28,57%. Logo, o teste de aderência foi plenamente satisfatório vez que o importante é o contato da pasta com a superfície externa do revestimento.
3. Registrou-se natural variação da cor da pasta endurecida de cinza claro a creme claro com o aumento da participação de bentonita na massa total.

#### **4 - DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE CINEMÁTICA**

A viscosidade cinemática foi aferida através do Viscosímetro Copo Ford nº. 4 a partir da média de 5 aferições de tempo de escoamento da massa final em cada uma das proporções de pasta de bentonita. Estas médias de tempo foram convertidas em viscosidade cinemática, conforme NBR/ABNT nº. 5849, utilizando a equação (1):

$$P = (3,846 \times T) - 17,30 \text{ (em m}^2\text{/s)} \quad (1)$$

Sendo: T = tempo do escoamento em segundos

QUADRO 3 – Determinação da Viscosidade Cinemática de Massas de Cimento/Bentonita, para diferentes participações de bentonita na massa final.

PARTICIPAÇÃO DA PASTA DE BENTONITA NA MASSA FINAL (%)	AFERIÇÕES DE TEMPO EM SEGUNDOS (Viscosímetro Copo Ford nº 4)						VISCOSIDADE (m <sup>2</sup> /s)
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	MÉDIA	
0,00 (cimento)	11,58	11,51	11,65	11,62	11,65	11,60	27,32
5,00	11,08	11,00	11,07	11,03	11,09	11,05	25,20
10,00	10,74	10,78	10,83	10,73	10,89	10,79	24,20
20,00	10,63	10,69	10,53	10,62	10,60	10,61	23,51
28,57	10,47	10,43	10,49	10,45	10,40	10,45	22,89

Metodologia:

1. Foi mantido constante o percentual de diluição inicial água/cimento (40,5% do peso total) e de água/bentonita (76,2% do peso total) conforme Quadro 1.
2. A pasta final para estes ensaios foi preparada em dispersor onde a mistura de cimento e bentonita (pó) foi transformada em pasta pela adição da soma do total de água definido para cada uma das partes individualmente (Quadro 1).
3. A pasta final foi uniformizada em dispersor durante 5 minutos antes da aferição das 5 medições no Copo Ford, sempre agitando a pasta antes de cada novo ensaio.

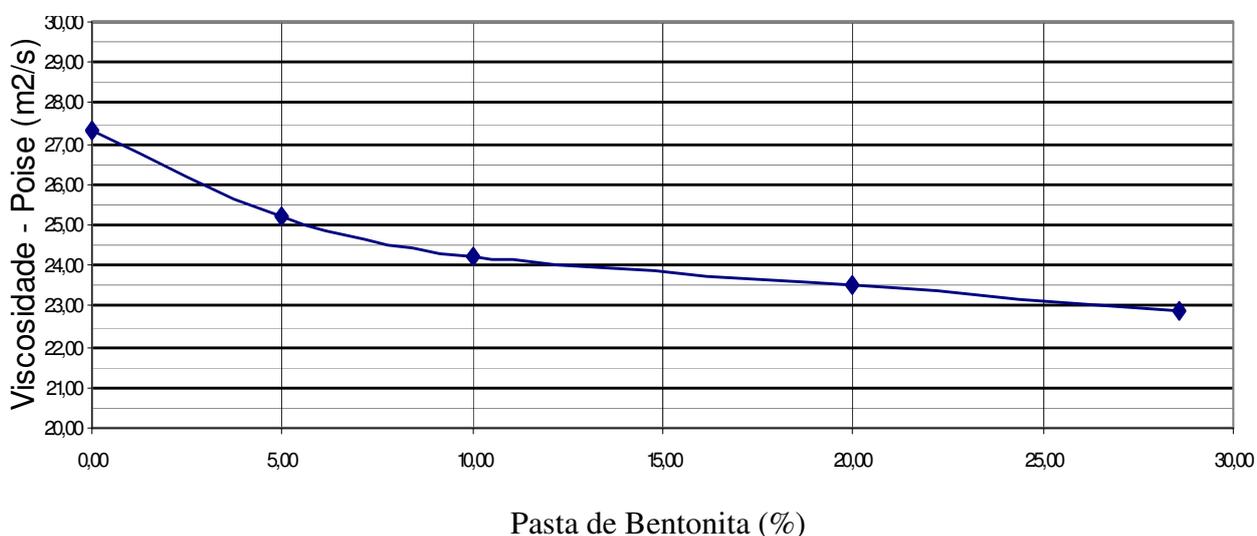


GRÁFICO 1 – Gráfico da Variação da Viscosidade Cinemática da Massa Final em função da Variação do Percentual de Pasta de Bentonita na Massa Final.

Conclui-se que a viscosidade cinemática da massa final é decrescente com o incremento da participação da pasta de bentonita e que se mostra praticamente linear a partir do percentual de 10%.

Tal fato beneficia a pasta em estudo no sentido de ter melhor condição de penetração em poros e fendas do que a pasta de cimento puro.

## 5 - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente constitui parâmetro importante para permitir a conversão de valores de massa em volume e vice-versa.

### 5.1 - De Pastas de Cimento e de Bentonita e de Misturas de Cimento com Bentonita

No Quadro 4, são apresentados os resultados dos ensaios que avaliaram as densidades destas pastas.

QUADRO 4 – Determinação da Densidade Aparente de Pasta de Cimento, de Bentonita e de Cimento/Bentonita para diferentes participações da Pasta de Bentonita na Massa Final.

PARTICIPAÇÃO DA PASTA DE BENTONITA NA MASSA (%)	AFERIÇÕES			DENSIDADE APARENTE (d) (g/ml)	OBSERVAÇÕES
	m <sub>1</sub> (g)	V (ml)	m <sub>2</sub> (g)		
0,00	22,18	17,80	51,48	1,646	Pasta de cimento puro
5,00	22,18	17,80	50,48	1,590	
10,00	22,18	17,80	49,99	1,563	
20,00	22,18	17,80	49,11	1,513	
28,57	22,18	17,80	48,12	1,458	
100,00	22,18	17,80	42,50	1,142	Pasta de bentonita pura

#### Comentários:

1. A densidade aparente (d) foi aferida a partir das medições acima mediante a seguinte equação:  $(m_2 - m_1) / V$ , onde:  $m_1$  = peso do recipiente de vidro,  $V$  = volume de água no recipiente de vidro e  $m_2$  = peso da vidraria com volume de pasta igual ao da água.
2. Após a mistura dos pós de cimento e bentonita durante 5 minutos, foi adicionada água e formada a massa final para cada percentual de pasta de bentonita (5, 10, 20 e 28,57 %).
3. O recipiente foi, em todos os casos, preenchido até a boca eliminando o excedente com bastão para manter volume constante e igual ao da água.

O Gráfico 2, mostrado a seguir, reflete a variação da densidade aparente com o incremento do percentual de bentonita na massa final e revela que a diminuição progressiva da densidade faz a mistura final ser mais leve que a pasta de cimento puro, o que torna mais fácil a sua ascensão

quando aplicada no espaço anular do poço.

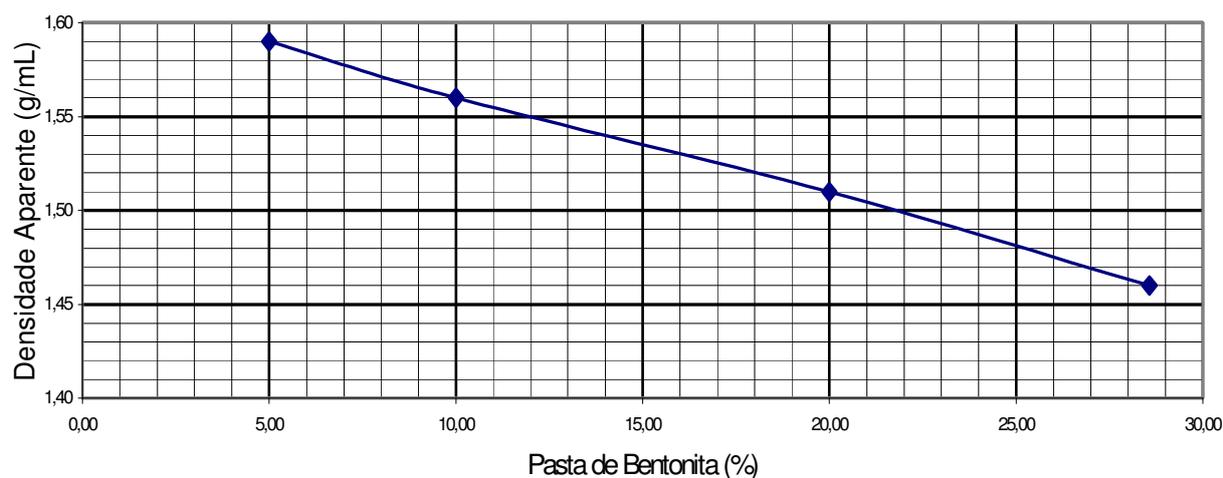


GRÁFICO 2 – Gráfico da Variação da Densidade Aparente em Função da Variação do Percentual de Pasta de Bentonita na Massa Final.

## 5.2. De Cimento e Bentonita em Pó

O objetivo da obtenção dessa densidade aparente do pó é permitir o cálculo de um volume determinado que corresponda a um peso desejado, para dar praticidade às medições no campo.

No Quadro 5, são apresentados os resultados dos ensaios que avaliaram as densidades do cimento e da bentonita em pó retirados de sacos recém abertos, para garantir a ausência de hidratação.

QUADRO 5 – Determinação da Densidade Aparente dos pós de cimento e bentonita

COMPONENTES	AFERIÇÕES			DENSIDADE APARENTE (d) (g/ml)
	m <sub>1</sub> (g)	V (ml)	m <sub>2</sub> (g)	
Cimento	40,46	945,86	1.003,28	1,018
Bentonita	40,46	945,86	671,28	0,667

### Comentários:

1. Foi utilizado em laboratório um vasilhame de plástico para permitir o nivelamento da massa com um bastão;
2. Esse vasilhame foi preenchido por partes mediante coleta direta do pó através de um pequeno recipiente em forma de concha para assemelhar as condições de medição de volume no campo.

## 6 - COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE A CARGA VARIÁVEL

Este teste, realizado segundo a NBR 14.545, consiste em aferir a vazão constante que começa a fluir, após dias, através de um corpo de prova submetido a coluna de água que não é completada.

O corpo de prova foi confeccionado com massa final contendo a participação de 5% de pasta de bentonita e permitiu a determinação de um coeficiente de permeabilidade  $k = 2,3 \times 10^{-8}$  cm/s.

Este baixo valor do coeficiente, correspondente ao de argilas, atende plenamente ao objetivo do máximo isolamento pretendido e, certamente, menor ainda será para qualquer outra massa final com mais de 5% de pasta de bentonita.

## 7 - DETERMINAÇÃO DO TEMPO INICIAL DE PEGA

A determinação do Tempo de Pega para as diferentes participações da pasta de cimento/bentonita, utilizando-se as normas adotadas para o cimento Portland, foi efetuada com o auxílio da Agulha de Vicar, mediante aferimento da resistência a sua penetração no corpo de prova,

Essa avaliação foi importante para identificar o comportamento do tempo de pega com o incremento da participação da pasta de bentonita e qual sua relação com o tempo de pega do cimento puro.

QUADRO 6 – Determinação do Tempo Inicial de Pega da Massa Final

PARTICIPAÇÃO DA PASTA DE BENTONITA NA MASSA FINAL (%)	TEMPO INICIAL DE PEGA (HORAS)
5,00	07 horas
10,00	07 h 35 min..
20,00	08 h 40 min..
28,57	> 10 horas

Observação: O tempo final de pega não foi aferido por ser desnecessário ao estudo.

### Comentário:

Considerando que o tempo inicial de pega do cimento puro é de cerca de 1h:30min., verifica-se, que quando misturado com diferentes proporções da pasta de bentonita, este tempo é sensivelmente retardado para 7 e até mais de 10 horas com o aumento das proporções testadas.

Elimina-se desse modo o grande risco atual de aprisionamento da tubulação com o reduzido tempo para executar uma cimentação de poço.

## 8 - ESTUDO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO CALOR DE HIDRATAÇÃO

Para permitir a aferição da variação de temperatura gerada pelo calor de hidratação do cimento e das pastas de bentonita nas proporções de 10, 20 e 28,57% na massa final de cimento-

bentonita, foram utilizados um Datataker DT 605 e reatores semi-adiabáticos, especialmente instalados para este estudo, cujo desenho esquemático do dispositivo utilizado na pesquisa é ilustrado na Figura 1.

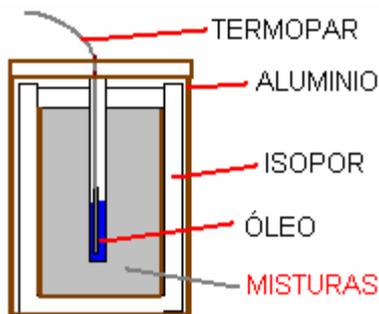


FIGURA 1 – Reator Semi-Adiabático

As misturas foram feitas nas proporções compatíveis com aquelas estabelecidas para a pesquisa conforme Quadro 7 e os resultados obtidos são retratados no Quadro 7. e no Gráfico 3.

QUADRO 7 – Proporções utilizadas nas misturas, temperaturas máximas das reações e redução de temperatura em relação a do cimento puro, para diferentes participações da pasta de bentonita.

PASTA DE BENTONITA NA MASSA FINAL (%)	QUANTIDADES DAS MISTURAS			TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	REDUÇÃO DE TEMPERATURA EM RELAÇÃO A DO CIMENTO (%)	COR REPRESENTATIVA NO GRÁFICO
	CIMENTO (g)	BENTONITA (g)	ÁGUA (ml)			
0,00	250,00	0,00	170,00	42,00	0,00	AZUL
10,00	235,00	10,40	185,00	38,50	8,30	VERMELHO
20,00	200,00	20,00	200,00	36,00	14,30	VERDE
28,57	187,00	29,90	187,00	35,20	16,20	MARGENTA

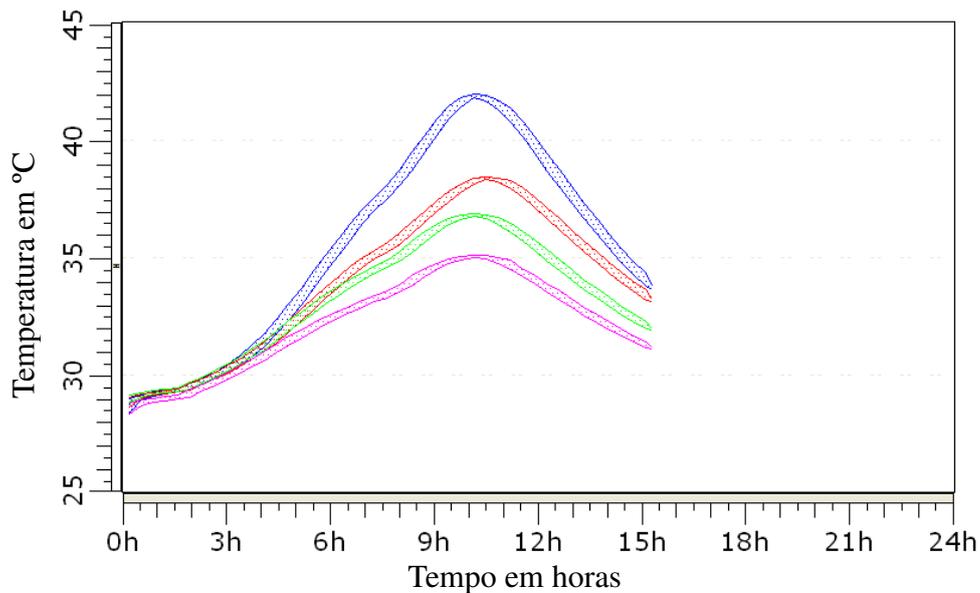


GRÁFICO 3 – Gráfico da Variação de Temperatura do Calor de Hidratação do Cimento Puro e em Misturas com Bentonita (as cores representam as distintas proporções da pasta de bentonita na massa final, conforme apresentado na última coluna do Quadro 7).

Observações:

1. A temperatura do ambiente externo foi mantida constante da ordem de  $26 \pm 1$  °C.
2. A evolução da temperatura das quatro pastas foi aferida simultaneamente para uniformizar as condições de contorno, com registro contínuo e, visualizadas *on line* em computador.
3. Através destas curvas, retrata-se e comprova-se, provavelmente pela primeira vez, como a participação de bentonita adicionada ao cimento reduz a temperatura do calor de hidratação e mostra sua evolução no tempo.
4. Não houve no estudo a preocupação em estabelecer a relação entre o tempo inicial de pega do cimento puro e em misturas com a evolução da temperatura do calor de hidratação.

Comentários:

Este conjunto de curvas, que retrata a evolução da temperatura durante a pega do cimento puro e em mistura com bentonita, permite os comentários principais a seguir:

1. É confirmada e quantificada por estes resultados a redução da geração do calor da hidratação, e da correspondente temperatura, tanto ao longo de todo o tempo para cada um dos percentuais de bentonita, como com o aumento da participação da pasta de bentonita na massa final.
2. Entretanto, a temperatura máxima do processo, tanto para o cimento puro como em misturas, ocorre em estreito intervalo de tempo, entre 10h20min e 10h30min, indicando, no caso, interferência praticamente nula da bentonita.

3. Estas temperaturas aferidas em laboratório são certamente superiores àquelas que efetivamente ocorrerão no poço tendo em vista haver uma melhor condição de dissipação de calor que no experimento.
4. Embora o tempo inicial de pega para as misturas testadas de cimento e bentonita, seja sempre superior a 7 horas, é prudente e em favor da segurança, que se utilize um tempo médio de 3 horas para realizar a operação de isolamento dos poços.

### 8.1 - DETERMINAÇÃO DO PORCENTUAL DE PASTA DE BENTONITA NA MASSA FINAL QUE PERMITE A MAIOR REDUÇÃO DE TEMPERATURA MÁXIMA DO CALOR DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO

O Gráfico 4, a seguir, foi elaborado a partir do percentual de redução de temperatura em relação a do cimento para as diferentes participações da pasta de bentonita na massa final, conforme discriminado na quinta coluna do Quadro 7.

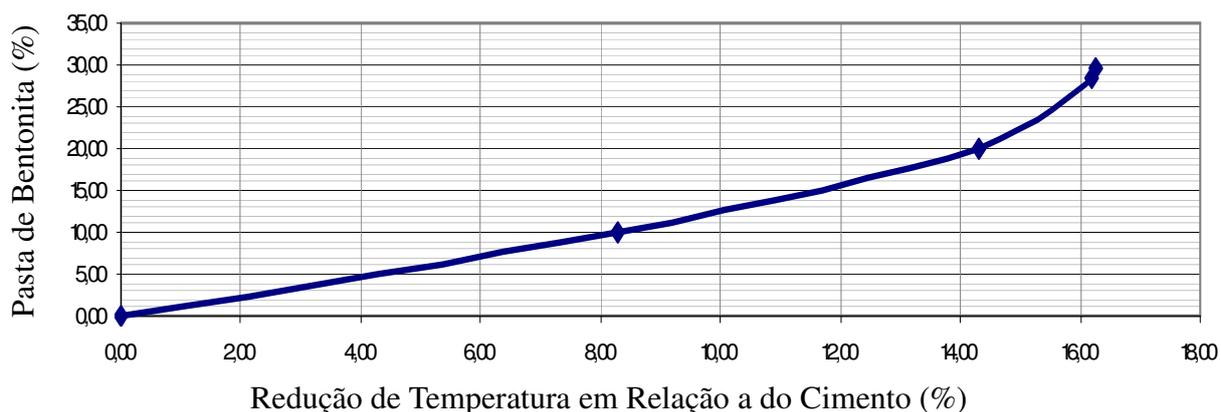


GRÁFICO 4 – Evolução da Redução de Temperatura Máxima com o Incremento da Participação de Pasta de Bentonita na Massa Final (vide dados no Quadro 7).

#### Comentários:

1. De acordo com o gráfico, conclui-se, com base no ponto de maior convexidade da curva, que o incremento do percentual de pasta de bentonita na massa final que proporciona o maior incremento de redução de temperatura máxima na pega corresponde a cerca de 22%.
2. Diante deste resultado constata-se haver espaço para o detalhamento do exato percentual de pasta de bentonita na massa final que proporciona o máximo de redução de temperatura de pega. Propõe-se detalhar no intervalo de 15 e 25%.
3. Conclui-se também, que dentre os percentuais testados de pasta de bentonita, o que mais se aproxima deste resultado é o de 20 %.

## 9 - DEFINIÇÃO DA PARTICIPAÇÃO PORCENTUAL MAIS ADEQUADA DA PASTA DE BENTONITA

Dentre as quatro proporções ensaiadas da pasta de bentonita na massa final (5, 10, 20 e 28,57%) a definição do percentual mais adequado é feita adiante após as considerações a seguir e que são fundamentadas nos comentários dos resultados dos estudos antes explicitados:

1. Até posterior maior detalhamento, fica determinado que para a **preparação da massa final**, as pastas de água e cimento devem ser produzidas com 40,5% de massa de água (ml) e 59,5% de massa de cimento e a pasta de bentonita com respectivamente, 76,2% de água (em ml) e 23,8% de bentonita, conforme definido no Quadro 1. Tais proporções já estão consideradas de maneira operacional no Quadro 8, no final do documento, para o percentual de 20% pasta de bentonita.
2. A **ausência de fissuras** no corpo da massa final, após a pega, em todas as misturas testadas (vide Quadro 2), revela o efeito benéfico da participação da bentonita para eliminar o grande problema de retração do cimento quando utilizado puro.
3. Foi comprovada a perfeita **aderência** da massa final na parte enrugada externa do revestimento para todas as misturas testadas, o que garante a satisfatória vedação desse tipo de contato (conforme Quadro 2).
4. Na condição de que a melhor penetração da pasta nos vazios estreitos e fissuras guarda relação direta com a menor **viscosidade** e que esta decresce com pequeno incremento com o aumento da participação da pasta de bentonita, tem-se a liberdade de optar por aquelas de percentual mais elevado (vide Quadro 3 e Gráfico 1).
5. **O coeficiente de permeabilidade**  $k = .2,3 \times 10^{-8}$  cm/s, obtido para a massa final com o menor percentual de pasta de bentonita (5%), revelou valor bastante baixo e equivalente ao das argilas que variam de  $10^{-6}$  a  $10^{-9}$  cm/s. Este resultado será naturalmente satisfatório também para percentuais superiores, o que garante a impermeabilidade da pasta que venha a ser adotada.
6. O retardamento do **tempo inicial de pega** das misturas testadas, através do método da Agulha de Vicar, em relação aquele do cimento puro, foi expressivamente elevado o que permite, para qualquer uma das misturas, um período de trabalho confortável para injeção da pasta (conforme Quadro 6).
7. O estudo realizado no LTG / ITEP (conforme Quadro 7 e Figura 1), demonstrou a expressiva **redução da temperatura proveniente do calor de hidratação do cimento**, com o incremento da participação da pasta de bentonita (10, 20 e 28,57%) na massa final. Tal comprovação garante a aplicabilidade do fluido isolante estudado pelo fato de reduzir de modo considerável a

probabilidade do aquecimento da reação danificar o revestimento. Tal fato viabiliza que o isolamento do poço possa ser executado de modo contínuo e completo ao longo de todo o espaço anular.

8. O Gráfico 3, que exprime a evolução da redução da temperatura máxima com o incremento da participação de pasta de bentonita na massa final indica, pelo ponto de máxima convexidade da curva, que dentre os estudados, 20% é o porcentual que mais se aproxima daquele que oferece o maior incremento de redução de temperatura, ou seja, 22%.

**Assim, considerando os resultados obtidos e tendo em conta o objetivo e o tempo disponível para realização deste estudo, fica proposto que dentre os porcentuais de pasta de bentonita ensaiados, seja adotado como o mais adequado o de 20%.**

A pequena variação decrescente da densidade aparente, com o incremento do porcentual de pasta de bentonita na massa final, praticamente nada interfere na escolha da pasta mais adequada para o isolamento. Entretanto estes valores são importantes para permitir a conversão de massa em volume e vice-versa, tendo em vista a relação – Volume = Massa x Densidade (vide Quadro 4 e Gráfico 2).

É, entretanto, de todo desejável que seja feito o aprofundamento desta pesquisa, em nível científico, no intervalo entre 15 e 25% de pastas de bentonita na massa final, assim como o melhor refinamento do porcentual de água para compor as pastas de cimento e de bentonita separadamente.

## **10 - DEFINIÇÃO DAS QUANTIDADES DE CIMENTO, BENTONITA E ÁGUA PARA ISOLAMENTO DE UM POÇO COM A PARTICIPAÇÃO DE 20 % DA PASTA DE BENTONITA**

Utilizando a massa final com a participação de 20% da pasta de bentonita, já definida como a mais adequada, foram elaboradas tabelas contendo valores e parâmetros físicos que são apresentados no final do documento, para facilitar o manuseio, e identificados como Quadros 8 e 9.

Por mera coincidência, a massa de bentonita corresponde, no caso, a 50% daquela do cimento, o que certamente facilita o trabalho no canteiro de obra.

No decorrer deste trabalho serão considerados como sinônimos a expressão massa final com 20% de pasta de bentonita e pasta de isolamento.

Para isolamento de um poço, o primeiro passo é o cálculo do volume estimado de pasta a ser aplicado e, uma vez conhecido este volume, o Quadro 8, no final, permite determinar de modo prático as correspondentes quantidades de cimento, bentonita e água necessárias.

Em virtude da limitação imposta pela capacidade da(s) betoneira(s) ou do dispositivo de mistura que venha a ser utilizado, na prática, este volume total de pasta deverá ser produzido em

parcelas.

Em apoio a praticidade propõe-se que a menor parcela do componente cimento seja de meio saco, ou seja, 25 kg, para eliminar a necessidade da medição de pesos inferiores no campo.

Assim, como a massa de bentonita necessária para qualquer mistura equivale a 10% do peso do cimento, a menor quantidade utilizável da mesma será 2,5 kg.

Desse modo, como o cimento já é vendido em sacos de 25 e 50 kg, propõe-se que para a bentonita seja adotado, como critério prático de medição, um recipiente com volume correspondente a 2,5 kg.

Assim, de posse de um recipiente cujo volume corresponda a 2,50 kg de bentonita, medições repetidas permitirão obter os pesos de 5, 10 e 15 kg que correspondem, respectivamente, a 1, 2 ou até 3 sacos de cimento de 50 kg.

Sugere-se, por exemplo, um recipiente como o que a seguir se calcula:

Sendo a densidade aparente do pó de bentonita determinado em laboratório igual  $0,667 \text{ g/cm}^3$  (vide Quadro 5), e tendo o vasilhame utilizado sido preenchido por partes, o volume necessário para atender ao peso de 2,5 kg corresponde a segundo fórmula (2) a:

$$\text{Densidade aparente (d)} = 0,667 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Peso de bentonita (m)} = 2500 \text{ g}$$

$$V = \frac{m}{d} = \frac{2500 \text{ g}}{0,667 \text{ g/cm}^3} = 3.748,126 \text{ cm}^3 \quad (2)$$

Para um recipiente cilíndrico confeccionado em alumínio com diâmetro de 15,20 cm, a altura (h) necessária para atender este volume será, conforme fórmula (3):

$$V = (\pi D^2 / 4) \times h \quad \text{ou,} \quad h = \frac{4 \times V}{\pi \times D^2} = \frac{4 \times 3.748,126}{\pi \times 15,20^2} = 20,65 \text{ cm} \quad (3)$$

Na prática, um outro recipiente de capacidade menor deverá ser utilizado para completá-lo por partes, dada a dificuldade de preenchê-lo diretamente no saco de bentonita em virtude de suas dimensões (20,65 cm de diâmetro e 15,20 cm de altura).

## 10.1 - Descrição e manuseio do Quadro 8

O Quadro 8, no final, que é dividido em duas partes, apresenta as características a seguir e pode ser utilizado da seguinte maneira:

A **parte superior** tem por finalidade calcular os pesos de cimento e bentonita e o volume total de água necessários para atender ao volume de pasta estimado para o isolamento do poço programado.

- Na primeira coluna (A), as unidades de volume de massa final foram estabelecidas de modo a, mediante combinação da soma de parcelas, compor qualquer valor do volume total de pasta estimado para o poço;
- A massa final equivalente em peso, na segunda coluna (B), foi determinada a partir do volume dessa massa final, com base na sua densidade aparente ( $B = A \times 1,513$ );
- Nas colunas  $C_1$ ,  $D_1$  e  $E_1$  são apresentados os cálculos das massas de cimento, bentonita e água, onde os fatores  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  representam o percentual de cada um desses componentes em relação ao somatório do peso conjunto dos três, conforme fórmulas a seguir (os pesos desses componentes para a pasta de bentonita de 20%, estão contidos no Quadro 1):

$$K_1 = \frac{\text{Massa cimento}}{\text{Massa(Cim.+Bent.)}+\text{Água (Cim.+Bent.)}} = \frac{400}{(400+40)+(272+128)} = 0,476$$

$$K_2 = \frac{\text{Massa bentonita}}{\text{Massa(Cim.+Bent.)}+\text{Água (Cim.+Bent.)}} = \frac{40}{(400+40)+(272+128)} = 0,0476$$

$$K_3 = \frac{\text{Água para (cimento + bentonita)}}{\text{Massa(Cim.+Bent.)}+\text{Água (Cim.+Bent.)}} = \frac{400}{(400+40)+(272+128)} = 0,476$$

Massa do cimento =	400,00g	Dados provenientes do Quadro 1 com a pasta de bentonita de 20%.
Água utilizada na mistura de cimento =	272,00g	
Massa de bentonita =	40,00g	
Água utilizada na mistura de bentonita =	128,00g	

- As colunas  $C_2$  e  $D_2$  indicam, respectivamente, os volumes sólidos (isentos de água) das massas de cimento e bentonita após os seus pesos serem divididos pelas correspondentes densidades específicas.

*(Dado o desconhecimento de fontes oficiais de informação, adotou-se para o cimento a densidade específica  $d_{ec} = 3,0$  g/ml, conforme indicação verbal de*

*técnicos do ITEP e da fábrica de Cimento Poty e, para a bentonita,  $d_{eb} = 4,0$  g/ml, conforme indicação verbal de técnico da fábrica de bentonita NERCON, de Campina Grande, PB).*

- E, por fim, a coluna  $E_2$  define o volume total de água necessário para a mistura após deduzir do volume da pasta de isolamento (coluna A), aqueles das massas de cimento e de bentonita totalmente secas, indicados nas colunas  $C_2$  e  $D_2$ , respectivamente.

A **parte inferior** permite, após conhecidas as quantidades totais de cimento, bentonita e água necessários para a operação, definir as quantidades em peso de cimento e de bentonita e o volume total de água necessários, para atender a parcela de pasta a ser produzida, em função da capacidade da(s) betoneira(s) ou do dispositivo de mistura que venha a ser utilizado para a sua preparação.

- Partindo-se do volume da parcela de pasta de isolamento que se pode produzir, usa-se a coluna (A) inferior para identificar as partes que somam o valor mais próximo deste volume, e daí chega-se a quantidade de cimento correspondente na coluna  $C_1$ , em unidades de saco de 25 ou de 50 kg; na coluna  $D_1$  ao peso de bentonita (valor este múltiplo de 2,50kg) e, na coluna  $E_2$  ao volume total de água.

Veja-se um caso prático de uso do Quadro 8 quando o volume total estimado de pasta de isolamento for, por exemplo, igual a 1.577 L que corresponde na parte superior da coluna (A), ao somatório de  $1.000 + 500 + 50 + 20 + 5 + 2$ . A necessidade de cimento em quilos para este volume, usando as mesmas linhas do somatório acima, será (vide coluna  $C_1$  superior):  $720,48 + 360,24 + 36,02 + 14,41 + 3,60 + 1,44 = 1.136,19$  kg e de bentonita (coluna  $D_1$  superior):  $72,05 + 36,02 + 3,60 + 1,44 + 0,36 + 0,14 = 113,61$  (este, como já é sabido, igual a 10% do peso do cimento) e, por fim, o volume de água (coluna  $E_2$  superior):  $741,83 + 370,91 + 37,09 + 14,84 + 7,42 + 3,71 + 1,48 = 1.177,28$  L.

Supondo que a capacidade máxima dos equipamentos para a produção de parcelas da pasta seja, por exemplo, de 180 L e, como este valor equivale na parte inferior da coluna (A) a  $2 \times 69,40 + 34,70 = 173,50$  L, conclui-se, usando as mesmas linhas das colunas  $C_1$ ,  $D_1$  e  $E_2$ , que cada parcela será composta por dois sacos de **cimento** de 50 kg e um de 25 kg, ou seja, 125 kg, por  $2 \times 5\text{kg} + 2,50\text{kg} = 12,50$  kg de **bentonita** e por  $2 \times 51,48 + 25,74 = 128,70$  L de **água**.

Desse modo, pode-se prever que esta operação será repetida  $1.136,19 / 125 = 9,09$  (ou o que é a mesma coisa,  $113,61 / 12,50 = 9,09$ ), ou seja, 9 vezes.

## **10.2 - Recomendações Operacionais Importantes**

- a) Para a produção da pasta isolante, os pós de cimento e de bentonita devem provir de sacos recém fabricados e abertos na hora, para evitar que sofram qualquer hidratação prévia;
- b) Após produzidas, as misturas devem ser aplicadas no poço no menor espaço de tempo possível para que o processo de hidratação subsequente ocorra com a pasta já instalada no poço;
- c) Em favor da segurança é conveniente, para o êxito da operação, que todo o processo de isolamento do poço ocorra em tempo médio de 3 horas;
- d) A execução do isolamento através de parcelas da pasta total trás a grande conveniência de evitar desperdício de cimento e bentonita caso o volume total necessário seja inferior ao estimado.

QUADRO 8 – Base para cálculo das quantidades de cimento, bentonita e água, para diferentes volumes de massa final, com 20% de pasta de bentonita.

MASSA FINAL		CIMENTO		BENTONITA		ÁGUA	
(A)	(B)	(C)		(D)		(E)	
	$B = A \times d_{mf}$	$C_1 = B \times K_1$	$C_2 = C_1/d_{ec}$	$D_1 = B \times K_2$	$D_2 = D_1/d_{eb}$	$E_1 = B \times K_3$	$E_2 = ((C_1+D_1+E_1)/d_{mf}) - (C_2+D_2)$
(L)	(kg)	(kg)	(L)	(kg)	(L)	(kg)	(L)
1,00	1,51	0,72	0,24	0,07	0,02	0,72	0,74
2,00	3,03	1,44	0,48	0,14	0,04	1,44	1,48
5,00	7,57	3,60	1,20	0,36	0,09	3,60	3,71
10,00	15,13	7,20	2,40	0,72	0,18	7,20	7,42
20,00	30,26	14,41	4,80	1,44	0,36	14,41	14,84
50,00	75,65	36,02	12,01	3,60	0,90	36,02	37,09
100,00	151,30	72,05	24,02	7,20	1,80	72,05	74,18
200,00	302,60	144,10	48,03	14,41	3,60	144,10	148,37
500,00	756,50	360,24	120,08	36,02	9,01	360,24	370,91
1.000,00	1.513,00	720,48	240,16	72,05	18,01	720,48	741,83
1,39	2,10	1,00	0,33	0,10	0,03	1,00	1,03
2,78	4,20	2,00	0,67	0,20	0,05	2,00	2,06
6,94	10,50	5,00	1,67	0,50	0,13	5,00	5,15
13,88	21,00	10,00	3,33	1,00	0,25	10,00	10,30
27,76	42,00	20,00	6,67	2,00	0,50	20,00	20,59
34,70	52,50	25,00	8,33	2,50	0,63	25,00	25,74
69,40	105,00	50,00	16,67	5,00	1,25	50,00	51,48

QUADRO 9 – Parâmetros considerados para montagem do Quadro 8

PASTAS	DENSIDADE APARENTE	DENSIDADE ESPECÍFICA - $d_e$ -	VISCOSIDADE	TEMPERATURA MÁXIMA DE PEGA	RELAÇÃO VOLUME (L) x PESO (kg)
	(g/ml)	(g/ml)	Poise ( $m^2/s$ )	(°C)	
Cimento	1,646	3,0 <sup>(1)</sup>	27,32	42	1 L = 1,65 kg
Bentonita	1,142	4,0 <sup>(2)</sup>	-	-	1 L = 1,14 kg
Massa Final	1,513	-	23,51	36	1L = 1,51 kg
<b>Equivalências:</b>		1dm <sup>3</sup> = 1 L	1cm <sup>3</sup> = 1ml	1.000cm <sup>3</sup> = 1dm <sup>3</sup> = 1L = 1.000ml	

<sup>(1)</sup>  $d_{ec} = 3,0$  g/ml, conforme informação verbal de técnicos do ITEP e da fábrica de Cimento Poty

<sup>(2)</sup>  $d_{eb} = 4,0$  g/ml, conforme indicação verbal de técnico da fábrica de bentonita NERCON, de Campina Grande, PB.