

III SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO

COM ROLO



22 A 25 DE NOVEMBRO DE 1998
FOZ DO IGUAÇU - PR



anais

Ensaio de Cisalhamento "In Situ" em Blocos da Pista Experimental em Concreto Compactado com Rolo (CCR), Da UHE Salto Caxias

FOZ DO IGUAÇU - PR - BRASIL - 1998

ENSAIOS DE CISALHAMENTO “IN SITU” EM BLOCOS DA PISTA EXPERIMENTAL EM CONCRETO COMPACTADO COM ROLO (CCR), DA UHE SALTO CAXIAS

Paulo Roberto Costa Cella

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

Lúcio Flávio Maia Coelho

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

José Marques Filho

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

Paulo Levis

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

Luiz Fernando Prates

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

José Ricardo Gonçalves Nogueira

COPEL – Companhia Paranaense de Energia
LAME – Laboratório de Materiais de Estruturas

Lourenço Babá

Intertechne Consultores Associados

Francisco Gladstone Holanda

Holanda Engenharia

Francisco Rodrigues Andriolo

Andriolo Ito Engenharia

RESUMO

Com a utilização do CCR em barragens, se faz necessário e imprescindível que o mesmo seja um bloco monolítico. Para tanto, as suas juntas tem que ser o mais perfeitas possíveis, mas sem que isto onere a obra de maneira a inviabilizar a solução do projeto.

Para isto elaborou-se um programa de ensaios com o objetivo de verificar a resistência mecânica ao cisalhamento da camada com argamassa frente a sua aderência.

Estes ensaios consistiram na preparação dos corpos-de-prova e determinação da resistência ao cisalhamento direto “in situ” entre superfícies de juntas de CCR, na interface da camadas 9 e 10 da pista experimental da UHE Salto Caxias. Os ensaios foram executados em dois conjuntos de blocos cúbicos. Um de dimensões 30 x 30 x 30 cm e outro com 40 x 40 x 40 cm. Cada um dos conjuntos foi dividido em dois subconjuntos. Um com argamassa de ligação na interface entre camadas (juntas com argamassa) e o outro, apenas, com o tratamento de ar úmido (juntas sem argamassa).

1. METODOLOGIA DE TRABALHO

1.1. Preparação dos corpos-de-prova

Os ensaios foram realizados em blocos entalhados na pista experimental de CCR. Os locais previamente escolhidos, foram adequadamente preparados para facilitar o posterior corte dos blocos, conforme ilustrado na Figura 1.

Na interface das camadas 9 e 10, dos blocos que seriam retirados, foi utilizado emulsão asfáltica e sobre estas uma folha de papel para, diminuindo sua aderência, permitir sua remoção com certa facilidade. Para isto foi utilizada de um dispositivo eletro-mecânico munido de uma serra diamantada, com diâmetro de 1,10 m.

Após a individualização dos blocos cúbicos, foi feita a regularização, com argamassa, no topo dos blocos, para minimizar a introdução de momentos indesejáveis com a aplicação dos esforços normais. Da mesma forma, sempre que possível foi utilizada argamassa regularizadora na face vertical, para melhor distribuir os esforços cisalhantes.

Conforme pode ser observado na Figura 2, o sistema de aplicação de carga inclinada é composto por:

- placas de aço, para uniformizar a distribuição dos esforços cisalhantes;
- cunhas de madeira, para compatibilizar a direção de aplicação dos esforços com a inclinação especificada;
- folha de borracha para a cunha do contato com o piso; e
- rótula e cilindro hidráulico.

O sistema de aplicação da carga normal é composto por:

- viga de reação;
- placa com roletes, para minimizar os esforços cisalhantes no sistema de aplicação vertical;
- rótula e cilindro hidráulico ou macaco tórico; e
- transferidor de carga entre a viga de reação fixa e o sistema de aplicação de carga.

1.2. Medidas de deslocamento

Os deslocamentos foram medidos em seis locais distintos do bloco. No topo, foram instalados 4 relógios comparadores, para medir os deslocamentos verticais e, na face oposta ao carregamento cisalhante, mais dois relógios comparadores para medir os deslocamentos horizontais. Na Figura 3 são vistas em detalhe suas localizações em relação à direção do carregamento da força de cisalhamento.

1.3. Ensaio

Os sistemas de aplicação dos esforços normal e cisalhante, são controlados através de dois conjuntos de bombas hidráulicas e respectivos manômetros. Estes conjuntos são previamente aferidos em laboratórios, antes e ao término dos ensaios.

A inclinação da direção de aplicação dos esforços tangenciais foi mantida em 20°, em relação com a horizontal (sentido horário), tal que a sua linha de ação passasse pelo centro geométrico da área da superfície cisalhante (Figura 2). A inclinação dada a força tem por finalidade evitar que no plano de cisalhamento surjam tensões de tração por flexão importantes no corpo-de-prova.

1.4. Procedimento

Os ensaios foram realizados aplicando-se inicialmente as tensões normais, velocidade média entre 0,4 e 0,6 MPa/hora (4 a 6 kg/cm²/hora), até que fosse atingido o valor preestipulado. A seguir, passava-se então a aplicar tensões cisalhantes, crescentes à mesma velocidade das tensões normais, até que se verificasse a ruptura do corpo-de-prova.

A cada incremento de carga eram realizadas as leituras de deslocamentos horizontais e verticais, nos relógios comparadores, repetindo-se a cada minuto, até que se estabilizassem.

O critério de ruptura adotado foi o da resistência máxima.

Em cada bloco foram realizados três ensaios: um, denominado "in natura", que seria o primeiro deslizamento, obtendo os

pares de pontos (τ, σ) da ruptura da interface ensaiada, e os outros dois, denominados 1° e 2° a.r. (a.r. = "após ruptura"), obtendo dois outros pares de pontos (τ, σ), caracterizando o atrito da superfície rompida. Para o início dos ensaios subsequentes, 1° e 2° a.r., a superfície móvel (topo) do ensaio era deslocada em sentido contrário ao ocorrido na fase anterior. Isto é, reposicionada tão próxima quanto o possível, à sua posição original em relação à superfície fixa (base).

2. INTERPRETAÇÃO DOS ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO "IN SITU"

A interpretação dos ensaios de cisalhamento direto nas juntas de compactação, dos blocos de CCR, é apresentada a seguir, em dois tópicos principais: juntas sem argamassa e juntas com argamassa. A condição intrínseca relativa à diferença na interface das camadas obtida por processos distintos, condiciona o comportamento mecânico diferenciado e justifica plenamente a interpretação separada dos blocos de junta sem e com argamassa.

2.1. Análise do mecanismo de cisalhamento dos blocos com junta sem argamassa (Blocos 1, 2, 3, 4, 12, 13 e 14)

2.1.1. Superfícies de cisalhamento

As superfícies de deslizamento coincidiram inteiramente com a junta que separa duas camadas de compactação, exceto no bloco 2, no qual, em seu quadrante posterior esquerdo, relativamente ao sentido de aplicação da força tangencial, a ruptura aprofundou-se alguns centímetros no bloco inferior, numa reduzida área, correspondente a cerca de 10% da área total de contato.

2.1.2. Caracterização da ruptura

O ponto de ruptura, denominado simplesmente de ponto de pico do ensaio, corresponde ao par de valores de tensão tangencial (τ) e tensão normal (σ), ou ainda, tensão horizontal e vertical, respectivamente a partir do qual, caracteriza-se o regime de deslizamento sem o aumento significativo da força tangencial, ou o estado de mínima rigidez tangencial, caracterizando pelo regime em que reduzidos incrementos de carga tangencial são suficientes para produzir taxas relativamente estáveis de deslocamentos tangenciais.

Nos blocos de 30x30 cm, o deslocamento de pico ficou entre 0,10 e 0,21 mm, ou seja 0,05% do comprimento da superfície de deslizamento. Tal valor pode ser considerado baixo comparativamente a valores detectados em ensaios de superfícies rochosas (descontinuidades geológicas), que se situam em média entre 0,5 e 1% do comprimento da superfície de deslizamento.

Entretanto, considerando a planicidade da junta de compactação ensaiada, não surpreende do ponto de vista conceitual, a ocorrência de valores de deslocamentos de pico assim reduzidos. Com a ausência de irregularidade ou rugosidade em alguns planos é de se esperar que o deslocamento de pico seja reduzido.

Nos blocos de 40x40 cm, os deslocamentos de pico foram um pouco mais elevados, ficando em torno de 1%, o que sugere a mobilização de alguma rugosidade, nesses casos.

2.1.3. Parâmetros mecânicos característicos

Foram feitas análises em curvas de movimentos combinados, ou seja as componentes verticais e a média das horizontais, a partir do ponto de início da aplicação da carga tangencial, representando mais apropriadamente pelo princípio do deslizamento.

A análise de tais curvas revela algumas características básicas que acompanham o fenômeno do cisalhamento, podem auxiliar a interpretação dos resultados e a

compreender melhor o comportamento do material, ao ser submetido a esforços compatíveis com a condição do ensaio de cisalhamento direto.

Certas características da estrutura do material ensaiado, tais como a porosidade, a rugosidade das superfícies de cisalhamento e preenchimento das juntas, podem afetar os resultados numéricos dos ensaios, o que às vezes, permite explicar as eventuais diferenças relativas a ensaios em materiais semelhantes.

Os gráficos revelam comportamento similar das componentes verticais de deslocamento, à medida em que a superfície do bloco superior desliza sobre outra ao longo da junta sem argamassa.

Ocorre a tendência generalizada do movimento de contração da superfície de deslizamento, provavelmente em virtude da destruição da estrutura porosa de partículas, que se acentua numa faixa associada ao limite inferior do bloco deslizante, uma vez que foram determinadas porosidades aparentes em torno da média de 19%, para a camada de 40 centímetros e de 15,5% para a camada de 30 centímetros. Nota-se elevados valores de porosidade aparentes detectados nos três níveis (superior, intermediário e inferior), que variam entre 15,3% e 19,0%, independente da espessura da camada.

Em função da queda da energia de compactação, e possivelmente, pela existência eventual de uma certa segregação da brita, durante o processo de formação da camada, o material adquire estrutura porosa, que tende a se acentuar em seu nível inferior, o qual é perturbado e destruído no mecanismo de cisalhamento, ao longo de uma faixa delgada, vizinha à junta de compactação.

Nota-se que, na mesma medida em que se mantém o movimento de contração nos dispositivos 1 e 4, a exemplo do restante dos ensaios dos blocos em junta sem argamassa, a tendência reverte-se nos dispositivos 2 e 3, que passam a registrar dilatação.

Dilatação é o fenômeno mecânico pelo qual, ao movimento de deslizamento, tangencial à superfície de cisalhamento, combina-se um movimento de afastamento das paredes opostas da junta ensaiada, em

virtude do galgamento de irregularidade contida no plano de ruptura. É portanto, o fenômeno inverso ao de contração, o qual em geral, está associado à destruição da estrutura de materiais porosos.

Para caracterizar de forma mais apropriada o comportamento mecânico comparado dos diversos blocos, elaborou-se a Tabela 1, na qual pode-se comparar as quantidades acumuladas de contração e dilatação, nos estágios de pré e pós-pico, nos quatro dispositivos de controle de deslocamento vertical, em cada bloco ensaiado.

Com relação à dilatação, indicou-se o valor do deslocamento tangencial no seu ponto de início, que pode ser comparado com o deslocamento tangencial de pico, informando em que fase o fenômeno se instala, durante o deslizamento.

Para melhor compreensão das grandezas incluídas na referida tabela, foi elaborado o Gráfico 3, no qual consta a representação gráfica das diversas quantidades calculadas a partir das medidas de deslocamentos verticais e horizontais efetuadas.

As equações que permitem o cálculo das taxas e dos coeficientes e ângulos médios de dilatação estão, também, indicadas na porção inferior do esquema.

Da análise dos dados da tabela citada observa-se que, as quantidades mais significativas de contração tendem a ocorrer no estágio pré-pico para os blocos 2 e 12 e no pós-pico, para os demais blocos.

De fato, em alguns casos, no estágio pós-pico, ocorre uma discreta reversão do movimento de contração, como se nota nos blocos 2 (dispositivos 1 e 4), bloco 3 (2), bloco 12 (2 e 3) e bloco 13 (3). Particularmente, nos blocos 3 (2) 3 13(3), a reversão ocorre após e coincidentemente com o deslocamento de pico e supera a quantidade total de contração, isto é há uma dilatação muito discreta (0,03 e 0,09 mm) no estágio pós-pico.

No bloco 14, o movimento de contração distribui-se forma mais uniforme entre os estágios pré e pós-pico, com exceção do dispositivo 2, onde 70% desse movimento ocorre após o pico.

O comportamento verificado no bloco 2 merece análise mais detalhada, em virtude dos valores de dilatação significativos que podem estar associados à presença da

irregularidade que se desenvolveu na extremidade da superfície de deslizamento. A quantidade média total da dilatação registrada no ensaio, reparte-se percentualmente em 31 e 69%, respectivamente, nas fases pré e pós-pico. Entretanto, o coeficiente médio de dilatação é de 0,81, para o estágio pré-pico e de 0,22, para o pós-pico, que corresponde respectivamente a ângulos médios de dilatação de 39 e 12,5 graus, em cada uma das fases

Considerando-se que o ângulo de atrito máximo, extraído no ponto de pico ($\arctan \tau/\sigma_n$) do ensaio é de aproximadamente 38 graus e considerando o ângulo de 30 graus como o correspondente ao ângulo médio de atrito básico, que foi medido através do deslizamento mútuo entre dois blocos de CCR, com superfícies serradas, planas e livres de irregularidades significativas, constata-se que o ângulo de dilatação mecânica efetiva que contribui no mecanismo de deslizamento deve ser bastante inferior ao medido de 39 graus e algo bem mais próximo do valor de 12,5 graus, registrado no pós-pico.

A conclusão é de que nesse caso a dilatação medida na fase de pré-pico não deve corresponder exclusivamente ao fenômeno do galgamento de irregularidades, na extremidade do plano de deslizamento do bloco 2 e, possivelmente, representa uma "subida" da porção anterior do bloco, em virtude da ocorrência de um entre os dois fenômenos comentados a seguir, ou de uma combinação de ambos.

i) O aprofundamento da superfície de ruptura acentua a destruição da estrutura porosa do material limítrofe à junta, sendo que a porção posterior (dispositivos 1 e 4), adjacente à área de aprofundamento, tende a "rebaixar" mais do que a porção anterior (dispositivos 2 e 3), que registra um movimento de compensação e "sobe".

ii) A diferença da rigidez tangencial – $K_t (\Delta\tau/\Delta d/t)$ – entre a porção plana da junta sem argamassa e a porção irregular na extremidade da superfície de ruptura mobiliza esforços tangenciais comparavelmente distintos nas duas porções da superfície de deslizamento, de modo a preservar a compatibilidade

das componentes de deslocamento horizontal nesses dois segmentos da superfície de deslizamento (movimento de bloco rígido), o que faz com que apareça um momento associado ao ponto de interseção desses dois planos.

Em outras palavras, o par de valores das tensões tangencial e normal correspondentes ao ponto de pico identificado no ensaio pode, em princípio, ser aceito como representativo do deslizamento preferencial na junta sem argamassa (regular), uma vez que o coeficiente de dilatação calculado no pré-pico não é decorrente da mobilização de rugosidades e irregularidades no segmento da superfície de deslizamento que se situou fora do plano da junta de compactação, bloco 2.

Outro fator que pode afetar a numerologia dos ensaios de cisalhamento é representado pela ocorrência verificada o ensaio do bloco 1, no qual houve o desgaste por atrito de pequena porção superior de uma brita de maior dimensão, numa área de cerca de 30 cm², o que provocou um leve afundamento na superfície inferior da junta, pela fragmentação do agregado pétreo.

Esta ocorrência proporcionou a elevação da resistência de pico do ensaio "in natura", com o ângulo de atrito de pico atingindo 51°, o que levou ao descarte desse ponto na elaboração das envoltórias de resistência dos blocos de juntas sem argamassa.

Note-se que, em ensaios de corpos-de-prova de menor dimensão, no laboratório por exemplo, ocorrências desse gênero serão provavelmente mais frequentes em virtude do aumento relativo da proporção *tamanho da brita/área da superfície de cisalhamento*, com a conseqüente elevação da resistência média de cisalhamento.

2.2. Análise do mecanismo de cisalhamento dos blocos com junta sem argamassa (Blocos 6, 7, 8, 9, 10 e 11)

2.2.1. Superfícies de cisalhamento

Os blocos 6, 7 e 8 apresentaram a superfície de ruptura semi-regular, isto é, a porção irregular situa-se na extremidade posterior do bloco, relativamente ao sentido de aplicação da força tangencial.

Já os blocos 9, 10 e 11 apresentaram a superfície de ruptura completamente irregular, indistintamente com relação ao sentido de aplicação da força tangencial, e contida no nível basal do bloco deslizante.

2.2.2. Caracterização da ruptura

Os pontos de ruptura ficaram bem caracterizados nos ensaios dos blocos com juntas com argamassa.

O "patamar" estável de resistência limite foi bem definido em todos os ensaios, os quais os deslocamentos tangenciais de pico variaram entre 0,085 e 0,965 milímetros e correspondem aproximadamente entre 1/2 e 1/8 dos deslocamentos máximos registrados nos ensaios.

Num dos blocos (10), entretanto, ocorreu uma rotação lateral do bloco deslizante, ocasionando valores bastantes diferentes de deslocamento horizontal, medidos nos dispositivos 5 e 6. De qualquer forma, o ponto de inflexão da curva, ou seja a tensão tangencial de pico foi praticamente a mesma nos dois dispositivos, variando somente os deslocamentos nos quais ela foi atingida.

2.2.3. Parâmetros mecânicos característicos

Em geral, registam-se contrações desprezíveis, da ordem de centésimos de milímetros, restritas ao estágio pré-pico, seguidas de dilatâncias que se principiam preferencialmente ainda no estágio pré-pico, no qual atingem valores variáveis entre 0,02 e 1,10 mm, com o valor médio de 0,28 mm, e estendem-se ao estágio pós-

pico, com valores variáveis entre 0,03 e 2,18 mm, com o valor médio de 0,58 mm.

Ao contrário do comportamento, revelado nos blocos de junta sem argamassa, em que à exceção do bloco 2, os demais tiveram as curvas de movimentos combinados apresentando desenvolvimento semelhante, com movimento de contração dominante, os blocos de junta com argamassa evidenciaram algumas diferenças notáveis, que derivam não só da própria condição da ausência de uma junta bem definida, mas também com relação aos diferentes comportamentos observados entre os blocos de 30x30 cm e os de 40x40 cm.

Nos blocos com junta com argamassa, a tendência geral é de dilatação à medida em que o cisalhamento se desenvolve, ou seja o processo de ruptura do material coesivo é acompanhado do deslizamento ao longo de superfícies bem mais irregulares, o que faz com que o galgamento das irregularidades prevaleça sobre a destruição da estrutura porosa.

Portanto, nos blocos de junta com argamassa, o mecanismo de destruição da estrutura porosa é registrado apenas na fase inicial do ensaio, em alguns casos, mantendo-se de forma discreta sobretudo até as proximidades do pico de resistência.

Em seguida, predomina o mecanismo de cisalhamento através de superfícies irregulares, com a dilatância associada ao plano de deslizamento.

Para demonstrar melhor esse comportamento, elaborou-se a Tabela 2, semelhante à anterior, na qual estão calculadas as quantidades acumuladas de dilatância ou contração, nas fases pré e pós-pico, e indicados os valores de deslocamentos tangencial no início da dilatância, além dos deslocamentos de pico e máximo do ensaio.

Nota-se que, a dilatância começa quase sempre antes do pico e se prolonga até o final do ensaio, enquanto a contração se mantém praticamente vinculada à fase pré-pico.

A partir desta, foi elaborada a Tabela 3, em que se apresenta a distribuição percentual da dilatância entre ambos os estágios do ensaio, além da taxa ou coeficiente médio e os ângulos médios de dilatância, em cada fase.

Observa-se uma grande variação de valores, na comparação entre blocos, mesmo em uma única fase do ensaio.

Nos blocos 9, 10 e 11, as quantidades de dilatação no estágio pré-pico, variaram percentualmente entre 4 e 25% do total, enquanto no pós-pico situam-se entre 75 e 100%, mostrando o comportamento mais uniforme, em que parcela importante da dilatação ocorre após atingir a máxima resistência, ou seja acompanhando o processo de deslizamento franco, o que reforça o fenômeno de galgamento de irregularidades.

Nos blocos 6, 7 e 8, as quantidades de dilatação na fase pré-pico ficam entre 8 e 91% e na pós-pico entre 9 e 92%, com valores médios de 49,5 e 50,5%, respectivamente, o que evidencia comportamento mais complexo e diferenciado dos blocos de 30x30 cm em relação aos de 40x40 cm.

Apesar de que, o valor do deslocamento tangencial máximo no ensaio é estipulado de forma arbitrária, a hipótese de que a distribuição diferenciada das quantidades percentuais de dilatação entre o primeiro e o segundo estágios do ensaio expressam, de fato, comportamentos mecânicos razoavelmente distintos pode ser considerada de algum valor, por duas razões:

- i) A proporção entre os deslocamentos tangenciais máximos e os deslocamentos de pico se mantiveram dentro de limites semelhantes, tanto para os blocos de 30 cm, como para os de 40 cm, e situam-se, respectivamente, entre 2,3 e 6,6 vezes e 1,7 e 8,7 vezes.
- ii) O formato das curvas de tensão versus deslocamentos tangenciais é bastante semelhante, com quantidades de deslocamentos suficientes para definir um "patamar" estável de resistência limite.

Outra diferença marcante entre os conjuntos de blocos de diferentes dimensões refere-se aos ângulos médios de dilatação representativos para o bloco como um todo, que mostraram valores médios de 24 e 20,5 graus, respectivamente para as fases pré e pós-pico, nos blocos de 40 cm, enquanto que para os blocos de 30 cm, os valores médios

são de 47,5 e 16,5 graus, em cada uma daquelas duas fases.

O valor exagerado de 47,5 graus relativo à fase pré-pico, nos blocos talhados na camada com altura de 30 cm, comparativamente ao valor de 24 graus, do estágio correspondente, nos blocos na camada com altura de 40 cm, pode ser explicado, pelo menos em parte, pela resistência mais elevada disponível no nível (terço) inferior da camada de menor espessura em relação à de maior espessura, o que sugere uma distribuição mais estável dos esforços nos blocos de maior dimensão. Em favor desse argumento, nota-se que nos blocos 6 e 7, a dilatação foi registrada praticamente apenas pelos dispositivos 2 e 3, posicionados junto à face de aplicação do carregamento tangencial, enquanto que nos demais blocos, todos os dispositivos registraram esse comportamento.

3. REGRESSÕES E PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Os Gráficos 1 e 2 apresentam as envoltórias de ruptura obtidas para a faixa adotada de tensões normais nominais de 0,3; 0,6 e 1,0 MPa e que resultam em valores de tensões normais efetivas superiores em cerca de 30%.

Tais valores mais elevados ocorrem porque à tensão normal empregada no início do ensaio, deve-se adicionar a componente vertical da tensão inclinada (cisalhante) aplicada.

Na elaboração das regressões lineares foram inicialmente separadas as três fases dos ensaios, ou seja, "in natura", 1° após ruptura e 2° após ruptura. Em seguida, aplicou-se o tratamento às seguintes formas de agrupamento dos dados:

- a) todos os pontos *in natura* e após ruptura, em conjunto;
 - b) somente os pontos após ruptura;
- Dessa forma, foram obtidas cinco envoltórias para cada uma das duas condições identificadas para os tipos de tratamento de juntas.

Os gráficos apresentam a tensão cisalhante (τ), no eixo das ordenadas e a tensão normal (σ) no eixo das abcissas. Estão indicados: a equação linear ajustada, o

coeficiente de correlação (r), referente à qualidade do ajuste e o intervalo gráfico correspondente ao nível de confiança de 95%.

Quanto mais fechado é esse intervalo, delimitado pelas linhas tracejadas, mais elevado será o nível de confiança, ou seja, a validade da equação linear representada, que tem a forma:

$$\tau = \text{coesão} + \text{coeficiente de atrito} \cdot \sigma_n$$

A equação linear representa a envoltória da resistência limite das juntas ensaiadas, para a faixa de tensões normais aplicadas nos ensaios.

3.1. Juntas sem argamassa

A qualidade do ajuste da equação linear de resistência aos pontos experimentais é equivalente a 0,98, tanto para o tratamento separado do pontos "*in natura*", como para os pontos após a ruptura, incluindo a combinação das duas condições mencionadas.

O ângulo de atrito de pico determinado é de aproximadamente 35° e a coesão é reduzida de 0,10 MPa, para os ensaios *in natura*, para 0,04 MPa, para os pontos após a ruptura.

Deve-se ressaltar que os pares dos parâmetros de resistência adotados, coesão e atrito de pico, significam um nível de resistência equivalente, a qual poderá ser representada de outra forma aproximada, caso se queira fazer a coesão nula, com elevação proporcional no valor do ângulo de atrito.

Nesse caso, porém, haverá perda na qualidade do ajuste obtido.

3.2. Juntas com argamassa

As regressões lineares realizadas com os pares de pontos (tensão de cisalhamento, tensão normal), dos ensaios em juntas com argamassa não tiveram a aderência ao modelo linear $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$, com a qualidade excelente dos ensaios em juntas não argamassadas.

Os coeficientes de correlação foram de 0,90 para os pontos "*in natura*"; 0,53 para os

pontos 1° após ruptura e 0,86 para os 2° após ruptura.

Apesar dos valores razoáveis de r obtidos para as regressões após ruptura, os valores de ângulo de atrito obtidos foram coerentes entre si e compatíveis com os da juntas sem argamassa. O ângulo de atrito e a coesão obtidos para os ensaios "*in natura*" ($\phi = 0,41^\circ$ e $c = 0,45$ MPa) são praticamente os mais elevados de todas as regressões, demonstrando que a argamassa contribui para melhorar as características de resistência ao cisalhamento das juntas, conferindo-lhe coesão.

Por outro lado, após a sua ruptura, a ausência de brita no plano de argamassa proporciona relativa diminuição dos ângulos de atrito, que passaram a valores inferiores ($\phi = 31^\circ$ para os ensaios 1 a.r. e $\phi = 38^\circ$ para os ensaios 2 a.r.).

O parâmetro de coesão da regressão linear dos ensaios sofre gradativa diminuição com a realização dos ensaios após ruptura ($c = 0,45$ MPa para os ensaios *in natura*, 0,31 MPa para os 1 após ruptura e 0,11 MPa para os 2 após ruptura).

4. CONCLUSÕES

Os ensaios de cisalhamento direto "*in situ*" realizados nas superfícies das juntas de construção, através de blocos de concreto compactado com rolo (CCR), revelaram comportamentos mecânicos diferenciados das juntas que separam duas camadas consecutivas de compactação, nas condições com e sem a aplicação da camada intermediária de argamassa.

As juntas sem argamassa apresentam superfícies de rupturas geralmente regulares, sofrem mecanismo predominante de contração simultâneo ao deslizamento, provavelmente em virtude da destruição da estrutura porosa do material junto ao plano de deslizamento e apresentam resistência ao cisalhamento mais reduzida.

A envoltória linear de resistência "*in natura*" é:

$$\tau = 0,10 + 0,70\sigma_n \quad (\phi = 35^\circ) \text{ em MPa}$$

As juntas com argamassa mostram superfícies de ruptura geralmente

irregulares, desenvolvidas preferencialmente no interior da camada basal do bloco deslizante, sofrem mecanismo predominante de dilatação e apresentam resistência ao cisalhamento comparativamente mais elevada, com significativa de coesão, na condição *in natura*.

A envoltória linear de resistência "*in natura*" é:

$$\tau = 0,45 + 0,87\sigma_n (\phi = 41^\circ) \text{ em MPa}$$

Nesta última condição, ocorre, também, uma diferenciação no comportamento dos blocos de 30x30 cm em relação aos de 40x40 cm. Nos últimos, os ângulos médios de dilatação de bloco como um todo são compatíveis com os valores do ângulo de atrito de pico obtidos no ensaio e, portanto, as quantidades de dilatação detectadas podem ser consideradas de origem puramente mecânica.

Nos blocos de 30x30 cm, as quantidades de dilatação parecem receber a contribuição de uma parcela rotacional, provavelmente decorrente de uma distribuição de esforços menos estável comparativamente aos blocos de maior dimensão. Todavia, os resultados mostraram-se bastante compatíveis e podem ser considerados representativos da condição testada, como ser atestado pela boa qualidade geral do ajuste dos pontos experimentais à envoltória linear de resistência de Mohr.

É bastante provável, que a parcela rotacional esteja, ainda mais, vinculada à condição de resistência mais reduzida do nível inferior da camada de 40x40 cm, que revelou valores de porosidade aparentes maiores do que os detectados no mesmo nível dos blocos de 30x30 cm, em virtude da queda mais acentuada da energia de compactação na camada mais espessa.

5. ANEXOS

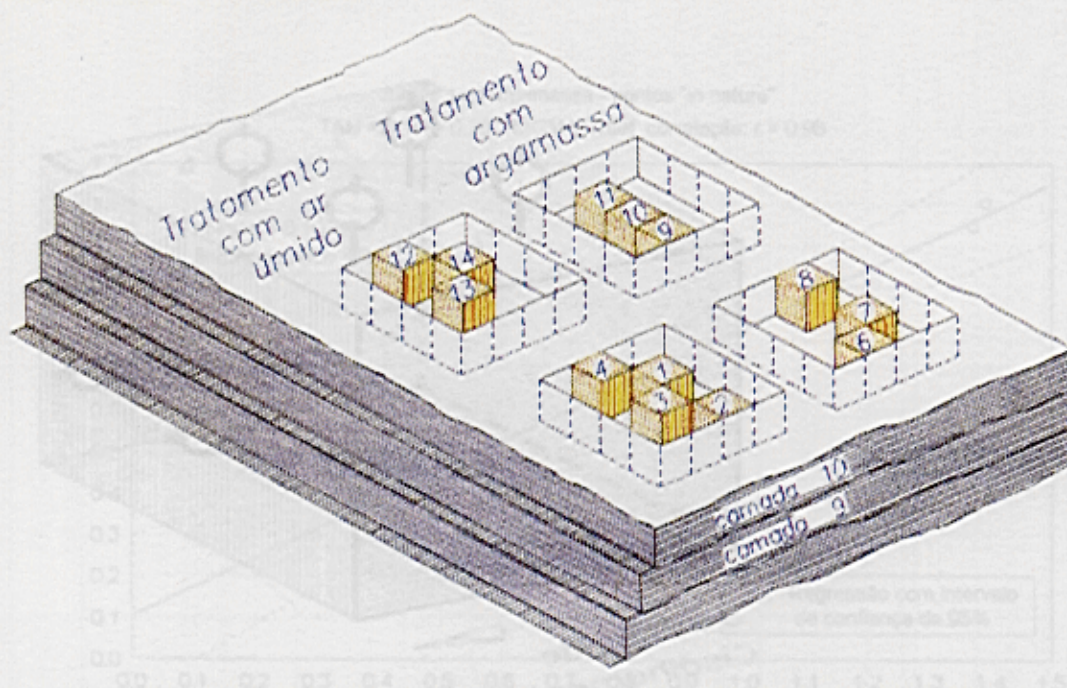


Figura 1 – Localização relativa dos ensaios na pista experimental de CCR.

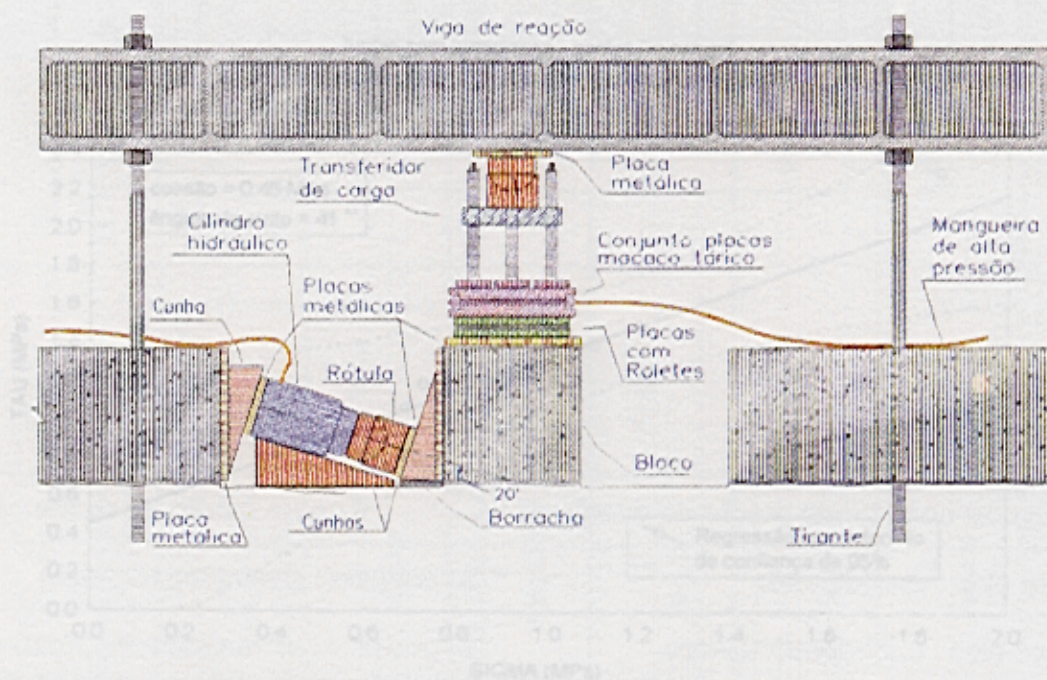


Figura 2 – Esquema de montagem dos ensaios

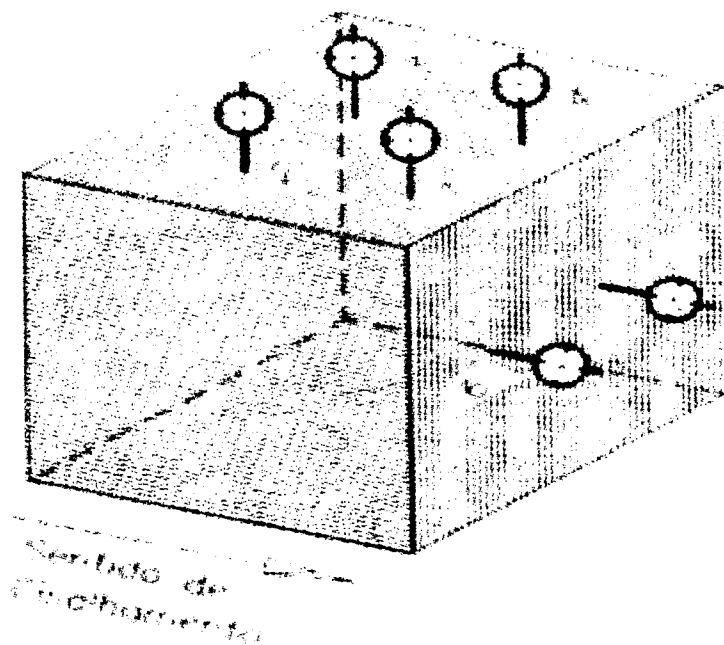


Figura 3 – Localização relativa dos relógios comparadores no bloco.

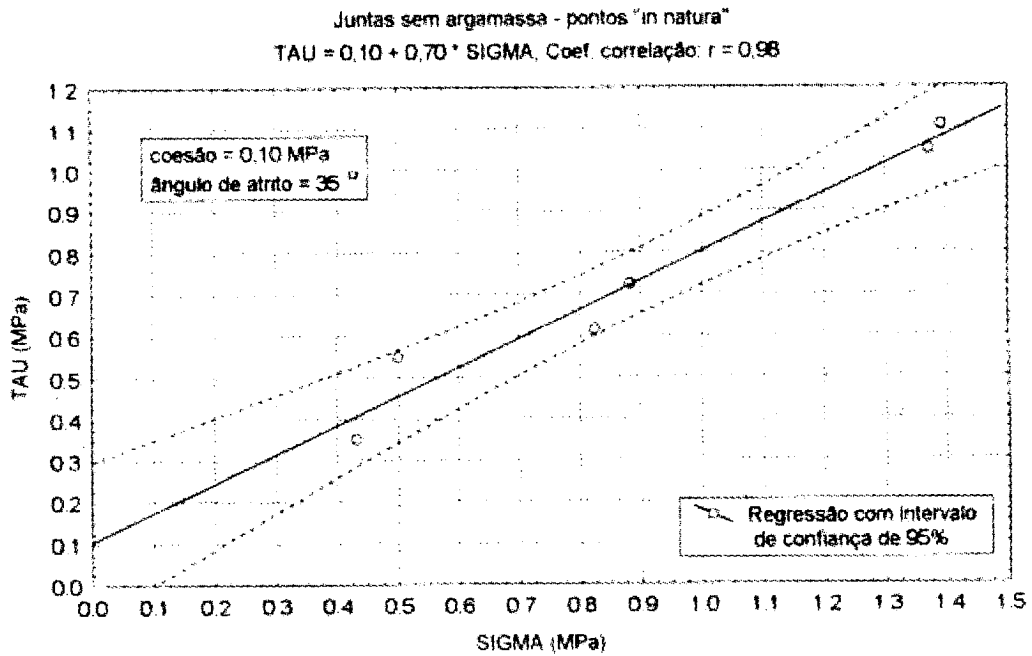


Gráfico 1 – Envoltória de ruptura de Mohr – Juntas sem argamassa "in natura"

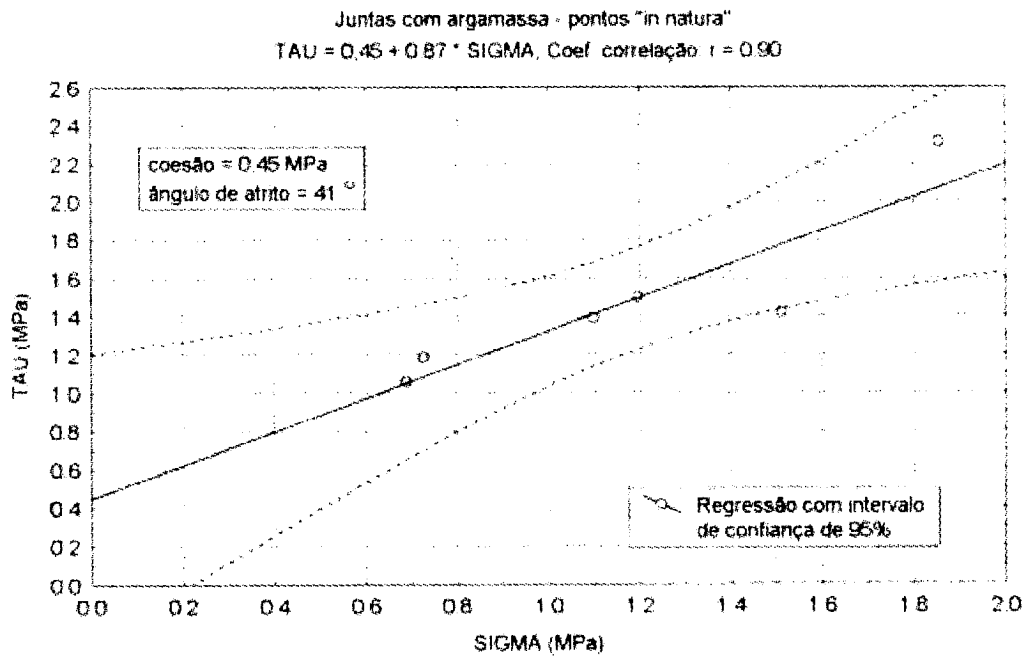
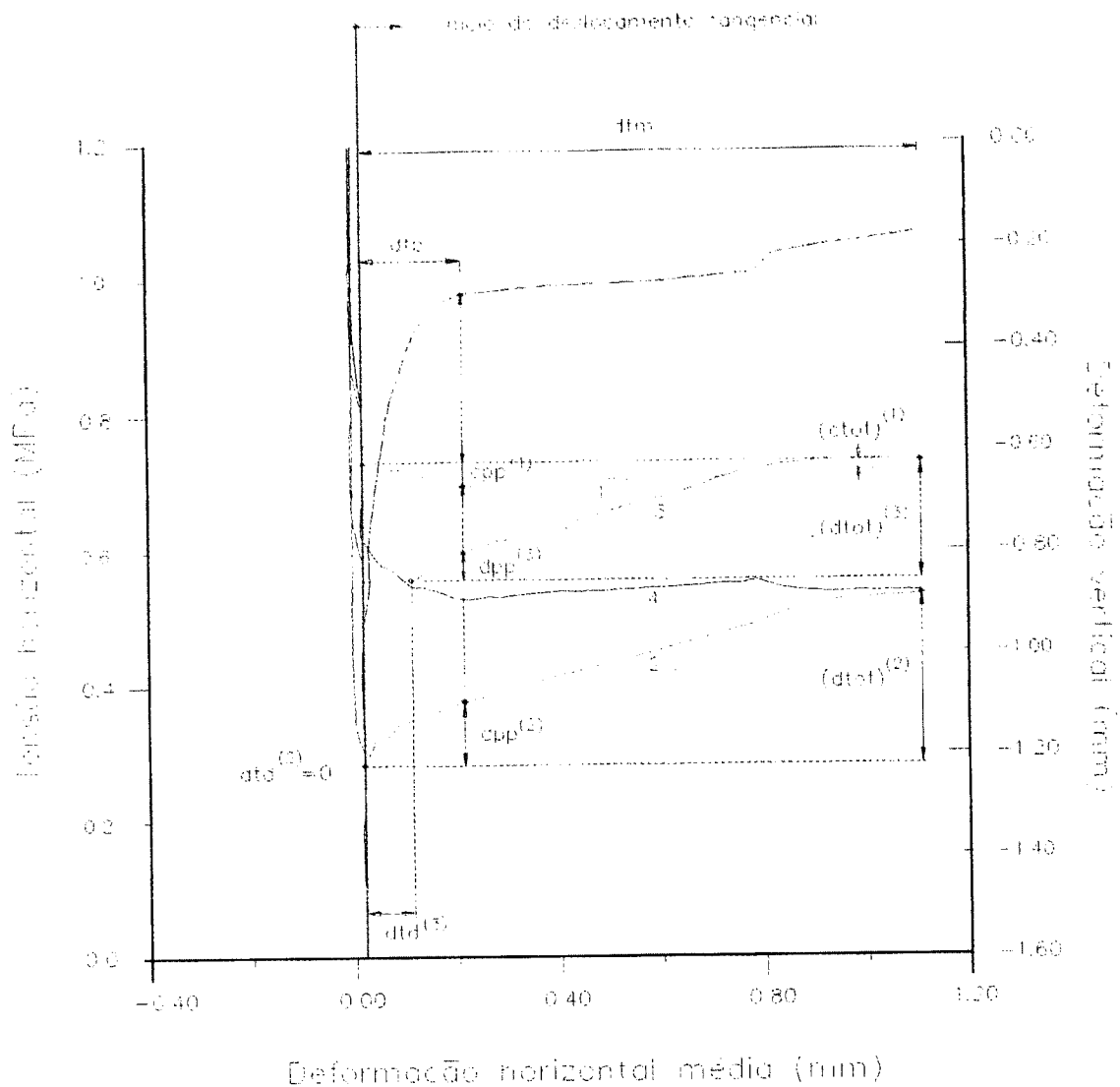


Gráfico 2 – Envoltória de ruptura de Mohr – Juntas com argamassa "in natura"



Taxa ou coeficiente médio de dilatação	Ângulo médio de dilatação
a) pré-pico : $d_{pp}/(d_{tp}-d_{td})$	a) pré-pico : $\arctan[d_{pp}/(d_{tp}-d_{td})]$
b) pós-pico : $(d_{tot}-d_{pp})/(d_{tm}-d_{tp})$	b) pós-pico : $\arctan[(d_{tot}-d_{pp})/(d_{tm}-d_{tp})]$

Gráfico 3 – Representação gráfica – Deslocamentos verticais e horizontais

DIMENSÕES (cm)	BLOCO SUPERFÍCIE DE RUPTURA	DESLOCAMENTO TANGENCIAL DE PICO - dtp (mm)	DESLOCAMENTO TANGENCIAL MÁXIMO NO ESTÁGIO - dtm - (mm)	DESLOCAMENTO TANGENCIAL NO PUNTO DE DI- LATÂNCIA - dtd - (mm)	DISPOSITIVO DE MEDIDA DE DESLOCAMENTO VERTICAL (relogio comparador)	DILATÂNCIA ACUMULADA		CONTRAÇÃO ACUMULADA	
						Pre pico - dpp - (mm)	Total - d tot - (mm)	Pre pico - cpp - (mm)	Total - c tot - (mm)
30 x 30	2 parcialmente irregular	0,21	1,115	0	2	0,13	0,34	**	**
				0,15	3	0,06	0,24	**	**
				*	1	*	*	0,05	0,02
				*	4	*	*	0,10	0,08
	3 regular	0,10	0,455	0,195	2	*	0,03	0,01	**
				*	3	*	*	0,00	0,07
				*	1	*	*	estável	estável
				*	4	*	*	0,01	0,07
40 x 40	4 regular	0,155	1,615	*	2	*	*	estável	estável
				*	3	*	*	estável	estável
				*	1	*	*	0,04	0,05
				*	4	*	*	estável	estável
	12 regular	0,61	1,68	*	2	*	*	0,12	0,11
				*	3	*	*	0,16	0,12
				*	1	*	*	0,16	0,22
				*	4	*	*	0,20	0,24
13 regular	0,40	2,825	0,4	2	*	*	0,03	0,9	
			*	3	*	0,09	0,02	**	
			*	1	*	*	0,15	0,32	
			*	4	*	*	0,1	0,9	
14 regular	0,42	1,875	*	2	*	*	0,07	0,23	
			*	3	*	*	0,18	0,32	
			*	1	*	*	0,11	0,28	
			*	4	*	*	0,17	0,34	

* - não dilata . ** - não contrai

Tabela 1 – Parâmetros mecânicos característicos – Juntas sem argamassa

DIMENSÕES [cm]	ELOCO SUPERFÍCIE DE RUPTURA	DESLOCAMENTO TANGENCIAL DE PICO [mm]	DESLOCAMENTO TANGENCIAL NO MÁXIMO DO ESTAGIO [mm]	DESLOCAMENTO TANGENCIAL NO PUNTO DE DE LÂTANCIA [mm]	DISPOSITIVO DE MEDIDA DE DEFORMAÇÃO VERTICAL (relogio comparador)	DILATÂNCIA ACUMULADA		CONTRAÇÃO ACUMULADA	
						Pre pico - dpp - (mm)	Total - d tot - (mm)	Pre pico - cpp - (mm)	Total - c tot - (mm)
30 x 30	6 pouco irregular	0,085	0,195	0,055	2	0,03	0,10	**	**
		0,040	*	0,040	3	0,04	0,13	**	**
	7 parcialmente irregular	0,49	3,005	0,40	2	0,41	0,57	**	**
		0,30	*	0,30	3	0,42	0,81	**	**
		*	*	*	1	*	*	0,05	0,09
		0,275	4	0,02	4	0,02	0,24	0,03	0,03
40 x 40	8 pouco irregular	0,565	3,75	0,005	2	1,10	1,49	**	**
		0,005	3	1,05	3	1,05	1,59	**	**
	9 irregular	0,710	6,225	0,005	1	0,31	0,34	**	**
		0,005	4	0,22	4	0,22	1,00	**	**
		0,060	2	0,30	2	0,30	2,48	**	**
		0,060	3	0,42	3	0,42	2,49	**	**
10 irregular	0,965	1,670	0,295	1	0,06	1,52	0,03	0,03	
	0,205	4	0,07	4	0,07	1,29	0,02	0,02	
	0,820	2	0,03	2	0,03	0,18	**	**	
	1,145	3	*	3	0,09	0,09	0,03	0,03	
	0,490	1	0,20	1	0,20	0,65	**	**	
11 irregular	0,225	1,195	0,635	4	0,15	0,75	**	**	
	0,060	2	0,11	2	0,11	0,58	0,01	0,01	
	0,105	3	0,07	3	0,07	0,70	0,01	0,01	
	0,320	1	*	1	*	0,17	0,03	0,03	
			0,320	4	*	0,10	0,01	0,01	

* - não data - ** - não contar

Tabela 2 – Parâmetros mecânicos característicos – Juntas com argamassa

DIMENSÃO (cm)	BLOCO	dt pico / dt máx (mm)	DISPOSITIVO DE MEDIDA <small>(relogio comparador)</small>	QUANTIDADE PERCENTUAL DE DILATÂNCIA		TAXA OU COEFICIENTE MÉDIO DE DILATÂNCIA		ÂNGULO MÉDIO DE DILATÂNCIA (graus)		ÂNGULO MÉDIO DE DILATÂNCIA DO BLOCO (graus)	
				Pré	Pós	Pré	Pós	Pré	Pós	Pré	Pós
30 x 30	6	0,085 / 0,195 (43,5%)	2	30	70	1,0	0,636	45	32,5	43	36
			3	30	70	0,888	0,818	41,5	39		
			1	estável	estável	-	-	-	-		
			4	*	*	-	-	-	-		
30 x 30	7	0,49 / 3,005 (16%)	2	72	28	4,5	0,0636	77,5	4		
			3	52	48	2,21	0,155	65,5	9	49,5	6
			1	*	*	-	-	-	-		
			4	8	92	0,093	0,087	5,5	5		
30 x 30	8	0,565 / 3,75 (15%)	2	74	26	1,96	0,122	63	7		
			3	66	34	1,88	0,169	62	10	50	8
			1	91	9	0,55	0,010	29	0,6		
			4	22	78	0,39	0,25	21,5	14		
40 x 40	9	0,710 / 6,225 (11%)	2	12	88	0,461	0,395	25	21,5		
			3	17	83	0,646	0,375	39	20,5	20	17,5
			1	4	96	0,145	0,265	8,5	15		
			4	5	95	0,139	0,221	8	12,5		
40 x 40	10	0,965 / 1,670 (58%)	2	17	83	0,207	0,213	12	12		
			3	*	100	-	0,172	-	10	20	25
			1	25	75	0,421	0,638	23	32,5		
			4	20	80	0,455	0,851	24,5	40,5		
40 x 40	11	0,225 / 1,195 (19%)	2	19	81	0,666	0,485	33,5	26		
			3	10	90	0,583	0,650	30	33	32	19,5
			1	*	100	-	0,194	-	11		
			4	*	100	-	0,115	-	7		

* - não dilata

Tabela 3 – Resumo dos parâmetros mecânicos característicos – Taxas e ângulos médios de dilatação – Juntas com argamassa.