

3

Materiais e Métodos

3.1. Materiais

Avaliaram-se cinco marcas de cimento ósseo comum (sem adição de antibióticos), de viscosidade normal, comercializadas no mercado brasileiro, sendo três de fabricação nacional e duas importadas, respectivamente, ilustradas na Figura 6:

- (A) Cimento Ósseo Baumer Osteo-Class, Baumer;
- (B) Cimento Ortopédico, Biomecânica;
- (C) Cimento Cirúrgico Ortopédico, CMM;
- (D) Surgical Simplex P, Stryker Howmedica (Irlanda);
- (E) Biomet Bone Cement R, Biomet (Suíça).



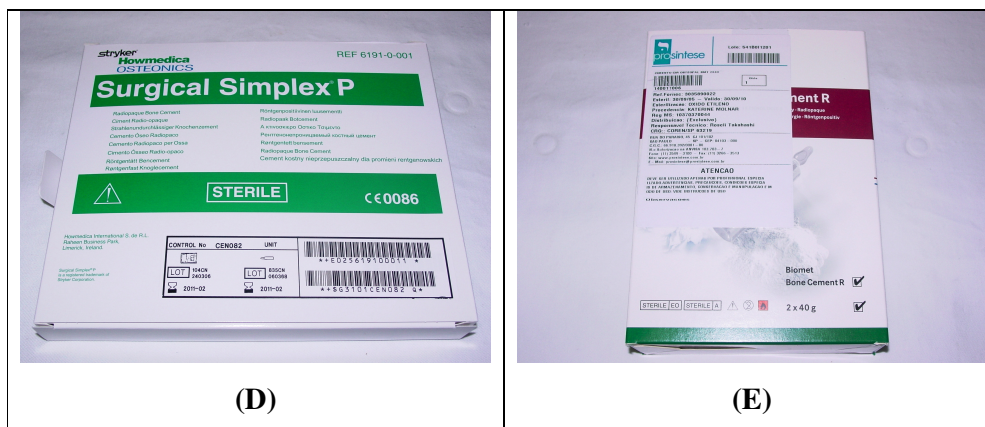


Figura 6: Identificação das marcas de cimento utilizadas.

Foram obtidas 10 unidades de cimento de cada marca, de maneira a satisfazer o número máximo solicitado pela norma ABNT NBR ISO 5833, que indica 7 amostras iniciais e, no máximo, 3 adicionais, em caso de reprovação e repetição dos testes, conforme a Tabela 3, sendo que as unidades utilizadas nos ensaios de Tempo de Formação de Massa podem ser utilizadas subsequentemente para outros ensaios.

Tabela 3: Quantidade de amostras necessárias para realização dos ensaios.

Ensaio	Quantidade mínima de amostras para realização dos ensaios (aprovação plena)	Quantidade de amostras adicionais em caso de reprovação e repetição dos ensaios
Estabilidade do Líquido	2	-
Tempo de Formação de Massa	2*	+2*
Temperatura Máxima e Tempo de Colocação	2	+2
Intrusão	1	+1
Resistência à Compressão	1	-
Resistência e Módulo de Flexão	1	-

*Unidades de cimento utilizadas em ensaios subsequentes.

3.2. Métodos

Seguindo os parâmetros da norma ABNT NBR ISO 5833, realizou-se no Laboratório de Biomecânica (LIM-41) do Instituto de Ortopedia e Traumatologia do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo (IOT-HC-FMUSP), a inspeção visual dos componentes e ensaios para obtenção das propriedades físicas e mecânicas do material, através da sequência apresentada no fluxograma a seguir (Figura 7).

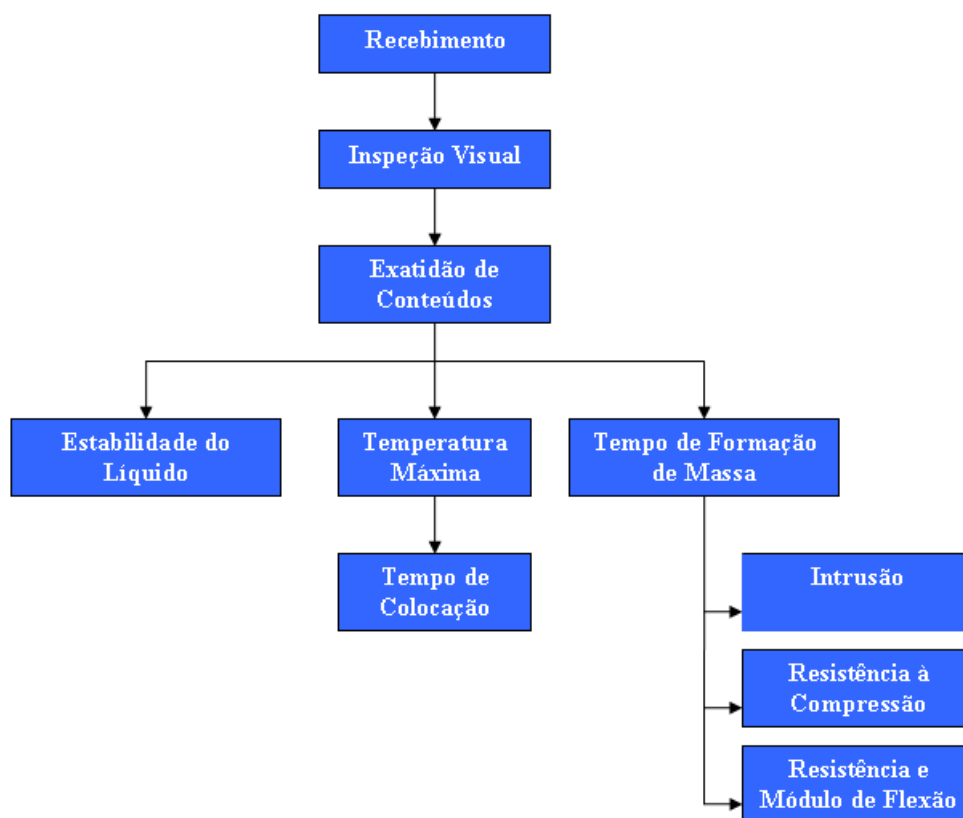


Figura 7: Fluxograma de realização dos ensaios.

Os equipamentos, superfícies de mistura e materiais, foram mantidos à temperatura de $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa (UR) de no mínimo 40%, por pelo menos 2 horas antes da realização dos ensaios, à exceção de outra especificação. Todos os cimentos foram misturados utilizando-se o método manual de mistura

dos componentes, seguindo as recomendações dos fabricantes, em recipiente e com espátula específicos utilizados em cirurgias no IOT-HC-FMUSP (Figura 8).



Figura 8: Recipiente e espátula utilizados para a mistura dos componentes.

3.2.1. Inspeção visual

A norma ABNT NBR ISO 5833 determina que seja realizada inspeção visual para averiguação da aparência dos componentes de unidade de cimento (pó e líquido), embalagem e rotulagem do produto, de acordo com os seguintes itens:

3.2.1.1. Aparência

Quando inspecionado a olho nu, o componente líquido deverá estar livre de partículas e outros contaminantes (item 3.1). O mesmo vale para o conteúdo do componente em pó, devendo este estar livre de aglomerados e materiais estranhos (item 4.2).

3.2.1.2. Embalagem

Cada componente do cimento deve ser esterilizado e embalado em um ambiente selado de dupla camada e posteriormente empacotado em um recipiente externo contendo a documentação de acompanhamento (item 8.1).

O item 8.3 determina que os materiais de embalagem não contaminem ou permitam contaminações dos conteúdos. Recomenda-se ainda que a embalagem previna danos ou vazamento dos conteúdos durante transporte e armazenamento, que seja projetada de modo a ser fácil de abrir e que favoreça uma apresentação asséptica dos conteúdos.

3.2.1.3. Rotulagem

Pelo menos as seguintes informações devem constar na **embalagem unitária** de cada unidade de cimento (item 9.1):

- a) Referência à norma ABNT NBR ISO 5833;
- b) Descrição do seu conteúdo, incluindo a massa do componente pó e a massa ou volume do componente líquido, e os nomes genéricos dos constituintes;
- c) Nome e endereço do fabricante e do fornecedor, caso diferente do fabricante;
- d) Advertência de que a embalagem contém líquido inflamável;
- e) Declaração de que os conteúdos são estéreis e uma advertência contra o uso de uma embalagem aberta ou danificada;
- f) Instrução para armazenar a embalagem a uma temperatura inferior a 25° C e distante de luz forte;
- g) Números de lote ou de partida dos componentes em pó e líquido e a data de validade do material.

A **documentação de acompanhamento** é descrita no item 9.2, onde devem constar, pelo menos, as seguintes informações:

- a) Instruções para manuseio dos componentes e para preparação do cimento para uso, incluindo detalhes do equipamento necessário e uma instrução para misturar todo o conteúdo dos componentes de cimento embalados. As instruções devem enfatizar a importância de se minimizar o aprasamento de ar;

- b) Instruções e recomendações para o uso do cimento, incluindo as precauções necessárias, chamando atenção para a data de vencimento marcada na embalagem;
- c) Advertência sobre as propriedades tóxicas, perigosas e irritantes associadas ao uso e manuseio dos componentes e do cimento;
- d) Declaração de que altas temperaturas do ambiente ou dos componentes diminuem, bem como baixas temperaturas do ambiente ou componentes aumentam os tempos de preparação, de colocação e de endurecimento do cimento;
- e) Se o cimento é destinado para o uso com injetor ou no estado de massa;
- f) Proporções relativas dos componentes em pó e líquido, expressas como percentagem de massa ou fração volumétrica;
- g) Advertência contra a reesterilização do componente em pó ou líquido;
- h) Declaração de que, uma vez aberta, qualquer embalagem deve ser completamente usada ou descartada e não retida para uso em ocasião posterior.

*NOTA: Em alguns países podem se aplicar requisitos legais próprios para rotulagem.

3.2.2. Exatidão de conteúdos

Segundo a norma ABNT NBR ISO 5833, em seu item 3.3, quando medido com uma exatidão de $\pm 0,1$ ml, o volume do componente líquido de cada uma de cinco unidades deve estar dentro de 5% do especificado na embalagem (neste caso a variação não pode ser superior à 1ml) .

Por sua vez, a massa do componente em pó de cada uma de cinco unidades deve estar dentro de 5% do especificado na embalagem (neste caso a variação não deve ser superior a 2 g), quando pesada com uma exatidão de $\pm 0,1$ g (item 4.3 da norma).

Utilizou-se uma balança digital Acculab modelo V-1200, com divisão de 0,1g e pipeta graduada de 10 ml, com divisão de 0,1ml da marca Pyrex (Figura 9), para aferições de conformidade de massa e volume, respectivamente.



Figura 9: Balança digital e pipeta graduada para a verificação da conformidade de conteúdos de massa e volume.

3.2.3.

Estabilidade do componente líquido

De acordo com o Anexo A da norma ABNT NBR ISO 5833, o tempo de escoamento (viscosidade) do componente líquido é determinado antes e depois do envelhecimento acelerado por aquecimento, sendo calculado o aumento no tempo de escoamento após o aquecimento.

A finalidade deste ensaio consiste em verificar a eficiência dos estabilizadores contidos no líquido (hidroquinona e ácido ascórbico). Estes compostos estão presentes na composição química para evitar a polimerização prematura do monômero metacrilato de metila dentro da ampola, garantindo as propriedades de mistura do pó com o líquido.

Foram ensaiadas duas unidades do componente líquido de cada marca de cimento ósseo. Primeiramente transferiu-se todo o conteúdo de cada ampola para frascos Erlenmeyer com rolhas de poliuretano a fim de facilitar seu manuseio e armazenamento durante o ensaio. Com uma pipeta de 10 ml, graduada em 0,1 ml, da marca Vidrolabor, coletou-se uma alíquota (10 ml) de cada unidade por vez e

preencheu-se o viscosímetro de tubo em U, de vidro transparente, de 50 ml da marca Vidrolabor, medindo-se o tempo de escoamento do líquido entre os dois níveis da coluna do viscosímetro (t_a), com exatidão de 0,1s, a uma temperatura ambiente de $23 \pm 1^\circ \text{C}$, de acordo com a Figura 10.



Figura 10: Escoamento do líquido através do viscosímetro tipo “U” para medição dos tempos t_a (antes do aquecimento) e t_b (depois do aquecimento).

Posteriormente, as amostras foram levadas ao Banho Maria, de marca Novatécnica, onde permaneceram por 48 ± 2 horas a uma temperatura de $60 \pm 2^\circ \text{C}$ em ambiente fechado e escuro (Figura 11).



(A)



(B)

Figura 11: Frascos com amostras de líquido imersos em água (A) e aparelho de Banho Maria fechado com temperatura constante (B).

Após este período, as amostras foram retiradas, deixando-se resfriar até $23 \pm 1^\circ\text{C}$, permanecendo a esta temperatura por pelo menos 1 hora. Em seguida, repetiu-se o procedimento anterior para a obtenção do tempo de escoamento após o envelhecimento (t_b).

A variação percentual foi então calculada, para cada amostra, utilizando-se a seguinte equação:

$$\Delta t = \frac{t_b - t_a}{t_a} \times 100\% \quad (3.1)$$

Onde:

Δt : variação percentual no tempo de escoamento.

t_a : tempo de escoamento do líquido antes do aquecimento;

t_b : tempo de escoamento do líquido depois do aquecimento.

Para aceitação do produto, a variação percentual não poderia ultrapassar o valor de 10%. Em caso de reprovação, duas novas unidades deveriam ser ensaiadas.

3.2.4.

Tempo de formação de massa

O cimento é misturado e registrado o tempo a partir do início da mistura até que esta seja capaz de separar-se de maneira limpa da luva. Foram ensaiadas duas unidades de cimento de acordo com o Anexo B da norma ABNT NBR ISO 5833:

Os equipamentos de mistura e os conteúdos das unidades de cimento (Figura 12) foram condicionados a uma temperatura ambiente de $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa (UR) de no mínimo 40% por pelo menos duas horas antes do início do ensaio e durante o mesmo.



Figura 12: Equipamentos (vasilha de aço inoxidável e espátula de poliestireno) para realização da mistura do componente pó com o líquido (ampola).

Seguindo as instruções dos fabricantes, o componente em pó foi colocado em um recipiente de aço inoxidável e em seguida despejou-se o componente líquido sobre o pó, iniciando-se a mistura com espátula de poliestireno. Simultaneamente ao início da mistura iniciou-se a contagem do tempo, e todos os tempos subsequentes foram lidos a partir deste instante.

Aproximadamente após 1 minuto do início, a mistura foi verificada cuidadosamente com os dedos com luvas cirúrgicas isentas de pó, observando-se a formação de fibras entre o cimento e a luva cirúrgica (Figura 13).

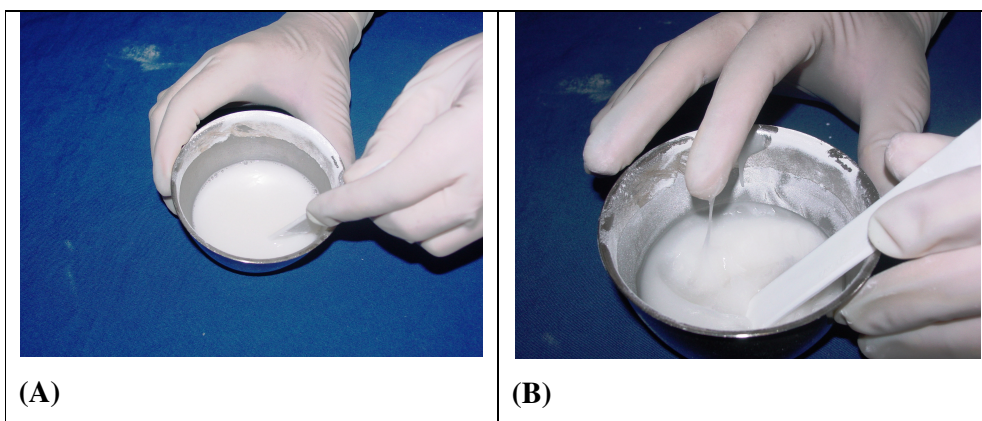


Figura 13: Início da mistura do pó com o líquido (A); e formação de fibras entre o cimento e a luva cirúrgica (B).

Repetia-se o procedimento, em intervalos de 15 segundos, expondo uma superfície fresca para cada exame, e uma região dos dedos não ensaiada anteriormente. O momento no qual, pela primeira vez, o dedo se separava de forma limpa, não havendo aderência entre a luva e o cimento, era então registrado como o tempo de formação de massa da mistura (Figura 14). O tempo médio entre as duas misturas foi então calculado, arredondando-se o resultado para o múltiplo de 15 segundos mais próximo.



Figura 14: Cimento acrílico ósseo no estado de massa.

Caso os dois tempos de formação de massa de uma mesma marca diferissem em mais de 30 segundos, o teste era então repetido em duas unidades adicionais. Valores máximos e mínimos de tempos de formação de massa após 4 determinações com diferenças maiores que 1,5 minutos do tempo médio foram considerados reprovados.

3.2.5. Temperatura máxima e Tempo de colocação

A reação exotérmica que ocorre quando os componentes em pó e líquido são misturados é monitorada e registrada a temperatura máxima atingida pela mistura. O tempo de colocação (ou tempo de endurecimento) é definido como o tempo decorrido para se atingir a temperatura média entre a ambiente e a máxima. Foram

ensaiadas duas unidades de cimento de acordo com as especificações do Anexo C da norma ABNT NBR ISO 5833.

O molde para a realização dos ensaios foi confeccionado nas dimensões estabelecidas pela norma (Anexo 1), em poli(tetrafluoretileno) (PTFE), sendo composto por um conjunto de dois anéis, um interno e outro externo, de forma a produzir um corpo de prova cilíndrico de dimensões 6 x 60 mm, conforme a Figura 15.

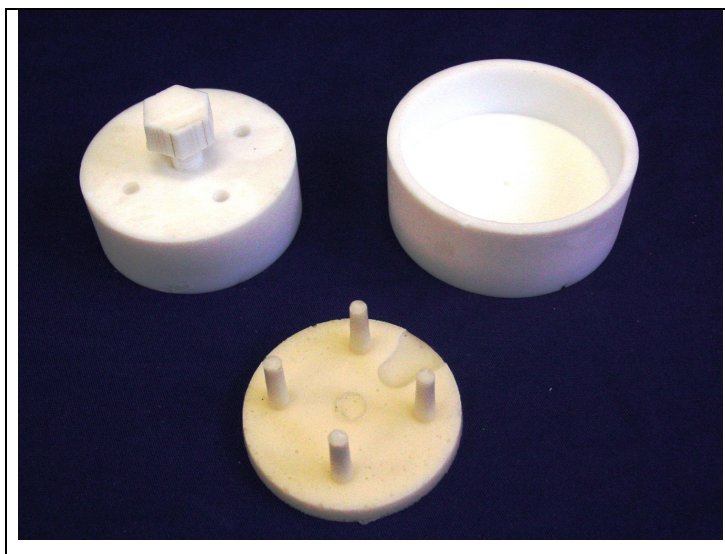


Figura 15: Anel interno (êmbolo), anel externo (corpo) e corpo de prova, respectivamente, em sentido horário.

Um termopar tipo “T”, com graduação de 0 a 150° C, da marca Sallas, foi acoplado ao molde, com sua haste, de diâmetro 0,5 mm, dobrada e introduzida a uma altura de aproximadamente $3 \pm 0,5$ mm acima da superfície interna da base do molde, conforme a Figura 16.

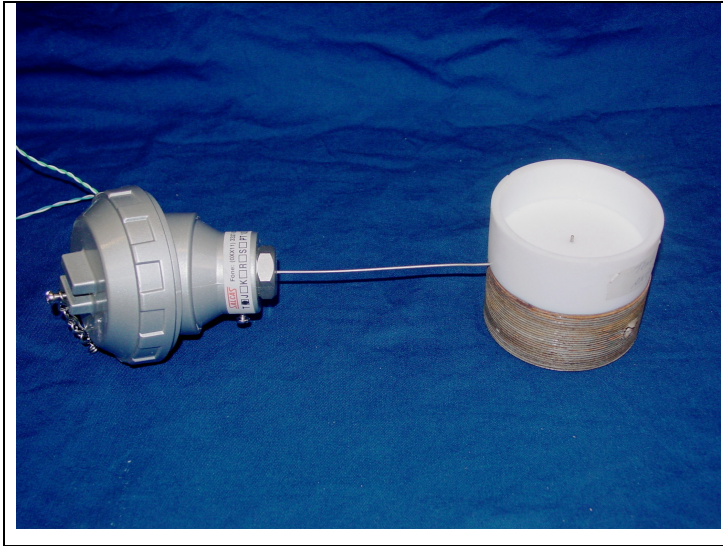


Figura 16: Termopar acoplado ao molde.

Após a realização da mistura, o molde era imediatamente preenchido com aproximadamente 25 g de cimento e o anel interno (êmbolo) então introduzido, desbastando-se o excesso de cimento expelido pelos canais do êmbolo. Uma carga de 14 N era então colocada de forma a assegurar um volume constante dentro do molde (Figura 17).

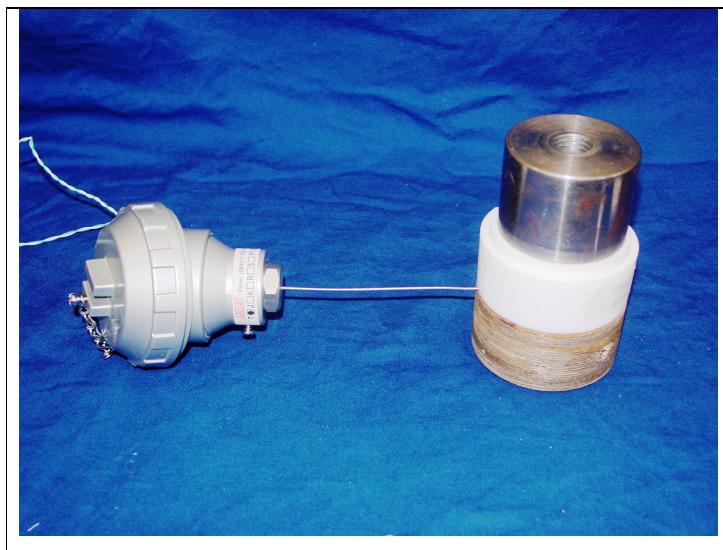


Figura 17: Sistema termopar-molde com carga aplicada.

Para aquisição dos dados, o termopar, que possui saída analógica de tensão elétrica proporcional à temperatura medida, foi conectado a um sistema de aquisição de dados da marca Lynx, modelo ADS-2000, que permitia converter as

tensões elétricas em números binários de 16 bits com uma taxa de 10 amostras por segundo.

Um software para controlar o sistema de aquisição de dados foi desenvolvido (Figura 18), transformando os valores de tensão em temperatura, a qual era registrada com uma exatidão de $0,1^{\circ}\text{C}$ e o tempo registrado em múltiplos de 0,1 segundos.

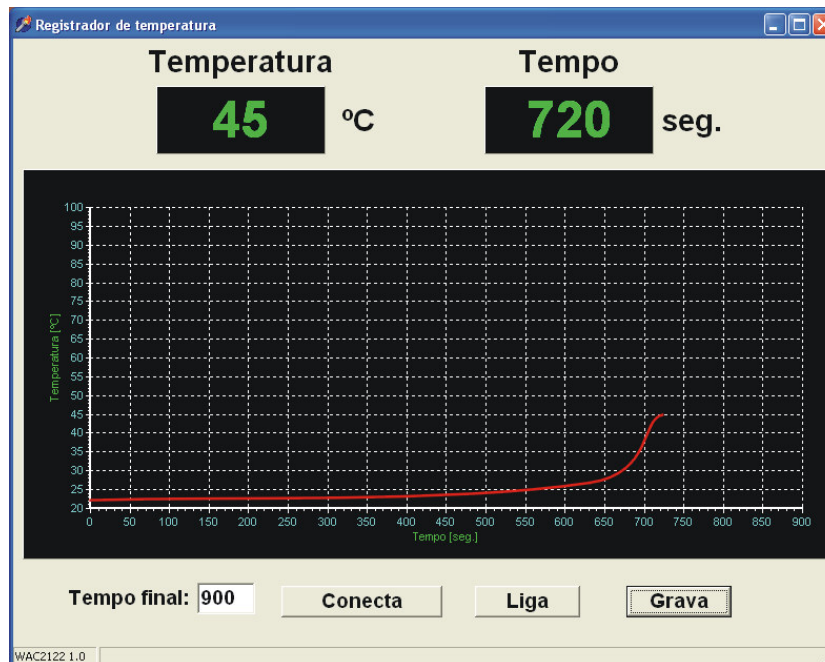


Figura 18: Interface do software utilizado nos ensaios de temperatura.

O dispositivo de aquisição de dados era acionado tão logo o pó e o líquido entrassem em contato, registrando inicialmente a temperatura ambiente, e mantido até pouco tempo depois do início da queda de temperatura, fornecendo uma curva típica com a relação temperatura *versus* tempo, conforme a Figura 19.

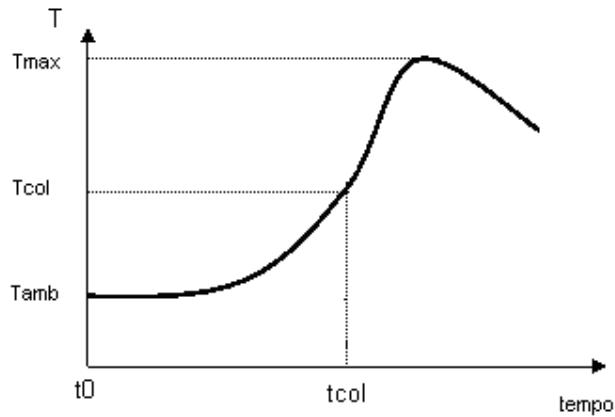


Figura 19: Curva típica temperatura *versus* tempo.

A temperatura máxima é expressa como o valor médio para duas determinações. Caso a diferença entre os valores máximos atingidos nas duas determinações fosse maior que 10° C, o teste era então repetido em duas unidades adicionais, e a temperatura máxima expressa como o valor médio das quatro determinações, aproximando-se para múltiplos de 1° C. A norma determina que este valor não deve exceder 90° C.

Para a determinação do tempo de colocação (ou tempo de endurecimento), primeiramente calculou-se a temperatura de colocação, empregando-se os dados obtidos no gráfico temperatura *versus* tempo na seguinte formulação:

$$T_{col} = \frac{T_{max} + T_{amb}}{2} \quad (3.2)$$

Onde:

T_{col} : temperatura de colocação;

T_{max} : temperatura máxima;

T_{amb} : temperatura ambiente.

A partir da temperatura de colocação, verificou-se o tempo correspondente para este valor na curva temperatura *versus* tempo, determinando assim o tempo de colocação (t_{col}).

O tempo de colocação foi aproximado para múltiplos de 5 segundos. Duas determinações distintas dos tempos de colocação foram realizadas, sendo o valor

final expresso como a média destes valores. Caso os dois tempos de colocação diferissem em mais do que 1 minuto, repetiam-se os testes em duas unidades adicionais, e o tempo de colocação era então expresso como a média das quatro determinações.

Para a aceitação do produto, o tempo de colocação não deve exceder os valores máximo e mínimo permitidos pela norma (3 e 15 minutos, respectivamente).

3.2.6. Intrusão

Neste ensaio, o cimento é misturado e comprimido em um molde com a face do fundo perfurada. Após o cimento ter endurecido, mede-se a extensão da intrusão do cimento dentro das perfurações de acordo com o Anexo D da norma ABNT NBR ISO 5833.

O molde para a realização do ensaio foi fabricado de acordo com as especificações da norma (Anexo 2) em poli(tetrafluoretileno) (PTFE), ilustrado na Figura 20.

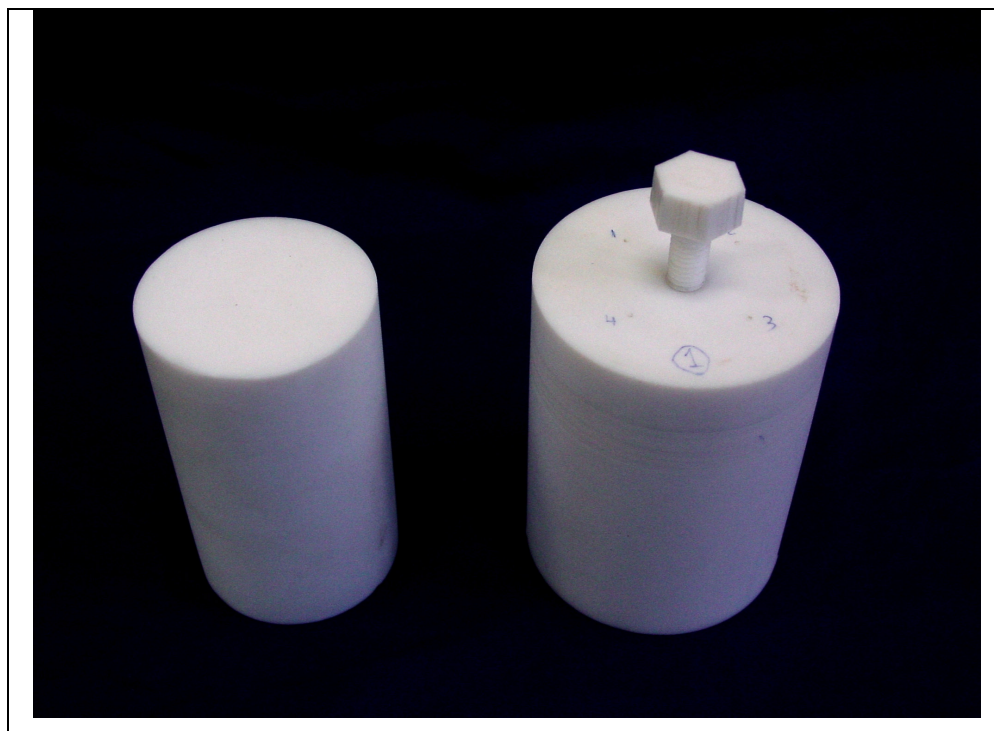


Figura 20: Conjunto composto por êmbolo e corpo (com identificação dos furos) utilizado como molde para ensaios de intrusão.

Para cada marca de cimento ósseo, uma unidade completa (pó e líquido) foi misturada de acordo com as instruções do fabricante. Quando a consistência de massa foi atingida (isto é, quando a massa deixou de aderir às luvas cirúrgicas), toda a mistura foi cuidadosamente inserida dentro do molde e posteriormente o êmbolo foi adicionado. Após $1 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$ do tempo de formação de massa, aplicou-se uma força de 49 N sobre o êmbolo durante $1 \text{ min} \pm 2 \text{ s}$ conforme a ilustração abaixo (Figura 21).



Figura 21: Carga de 49 N aplicada sobre êmbolo no conjunto do molde de intrusão.

Após o completo endurecimento do cimento, o êmbolo foi removido e o corpo de prova foi então sacado do molde, e registrou-se o comprimento de intrusão do corpo de prova em cada um dos quatro furos do molde, utilizando-se um paquímetro digital da marca Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm (Figura 22). Calculou-se a média dos quatro valores, expressando-a pelo mais próximo múltiplo de 0,5 mm.

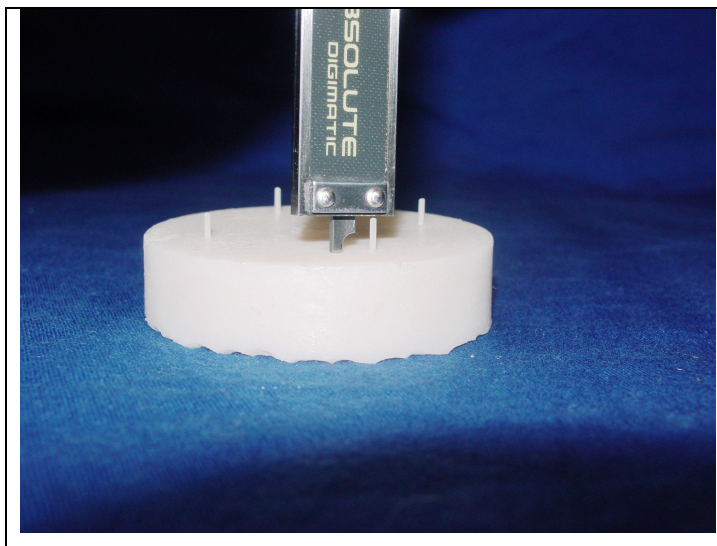


Figura 22: Medida do comprimento de intrusão em corpo de prova cilíndrico utilizando-se paquímetro digital.

Para valores de intrusão média inferiores a 2 mm, um segundo teste era realizado. Permanecendo este resultado, o cimento era então reprovado neste item.

3.2.7. Resistência à compressão

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 5833, em seu Anexo E, a resistência à compressão é determinada através da aplicação de uma força axial sobre cilindros de cimento polimerizado. Foram ensaiadas cinco amostras obtidas de uma unidade de cimento de cada uma das marcas.

Os corpos de prova foram confeccionados em molde de aço inoxidável de acordo com a norma ASTM F451 (Figura 23). A escolha do molde em questão se deve ao fato de produzir 48 corpos de prova, única diferença em relação ao molde proposto pela norma ABNT NBR ISO 5833 (Anexo 3), que produz apenas 5 amostras. Desta maneira conseguiu-se uma margem de segurança já que os cilindros devem apresentar altura de 12mm e diâmetro de 6mm, com tolerância de $\pm 0,1\text{mm}$ para ambas as medidas.

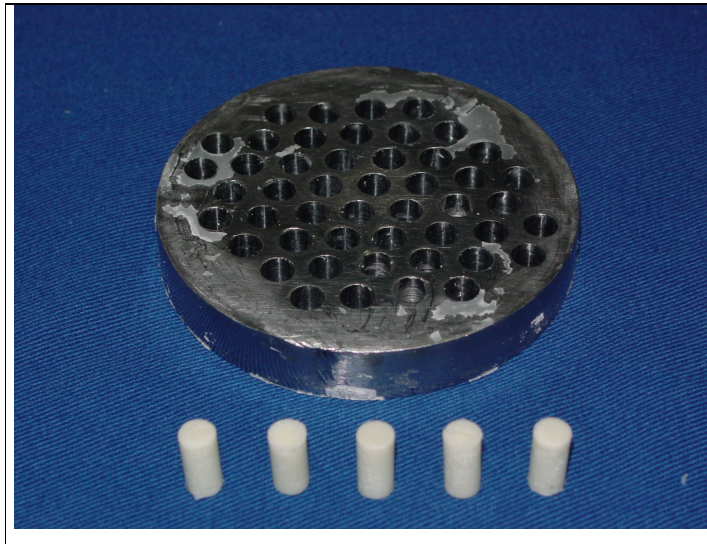


Figura 23: Molde e corpos de prova para ensaio de resistência à compressão.

Para a confecção dos corpos de prova, inicialmente realizou-se a lubrificação do molde com agente desmoldante de marca WD-40. Em seguida, os componentes de cimento foram misturados, determinando o tempo de formação de massa. Dentro de 1 minuto após este momento, preencheu-se, com ligeiro excesso, cada uma das cavidades do molde. Duas placas foram ajustadas sobre as faces superior e inferior do molde e o conjunto comprimido em uma morsa. Após aproximadamente 1 hora, retirou-se o conjunto da morsa e as placas-suporte foram removidas. Lixaram-se ambas as faces do molde em uma superfície coberta com o abrasivo de carbeto de silício e água, realizando assim o faceamento das extremidades dos corpos de prova. Terminado este procedimento, os cilindros de cimento foram sacados do molde, identificados e armazenados a uma temperatura de $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Após o período de 24 ± 2 horas após a mistura do cimento, mediram-se a altura, e os diâmetros superior, inferior e central, com duas medidas para cada seção, utilizando um paquímetro digital Mitutoyo, com resolução de 0,01mm, calculando em seguida a média aritmética das três seções.

Os ensaios de resistência à compressão foram efetuados em uma prensa universal de ensaios mecânicos da marca KRATOS, modelo K5002, dotada de uma célula de carga de 49050 N (5000 kgf) e dispositivos para ensaios de compressão, sendo um atuador acoplado à célula de carga e uma base regulável (Figura 24).

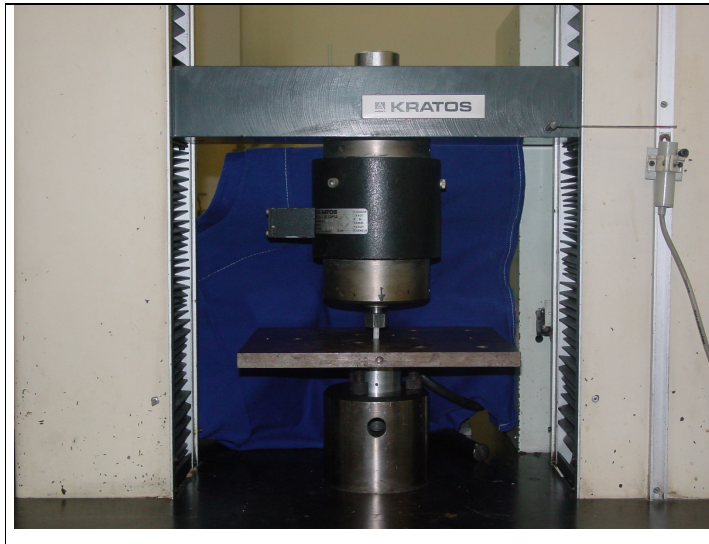


Figura 24: Realização do ensaio de compressão.

Um bloco padrão de 25 mm Mitutoyo n° 67-101 foi utilizado para ajustar a altura entre a superfície de contato do corpo de prova com a célula de carga (Figura 25).

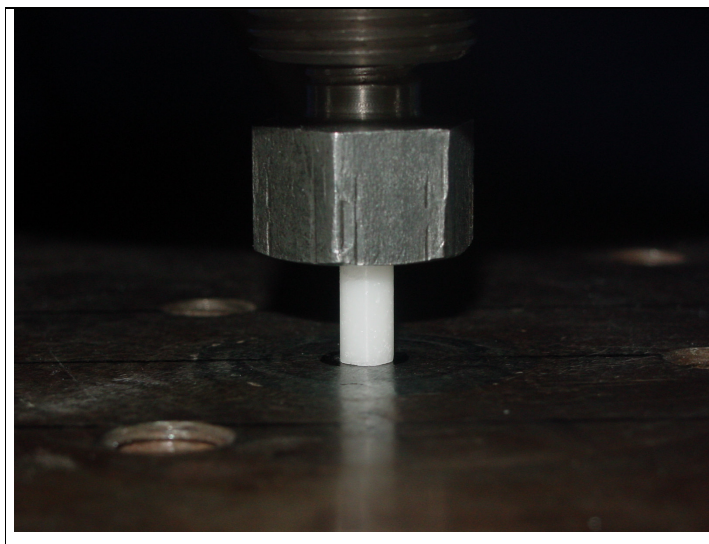


Figura 25: Detalhe do bloco sobre o corpo de prova sujeito ao ensaio de compressão.

A velocidade de compressão utilizada no ensaio foi de 20mm/min (entre 19,8 e 25,6 segundo a norma ABNT NBR ISO 5833). Os dados de força e deformação, provenientes da máquina de ensaio, foram armazenados em computador a uma taxa de 25 amostras por segundo. O ensaio era interrompido

na ocorrência de ruptura do cilindro (Figura 26), ou quando o limite superior de escoamento era ultrapassado.

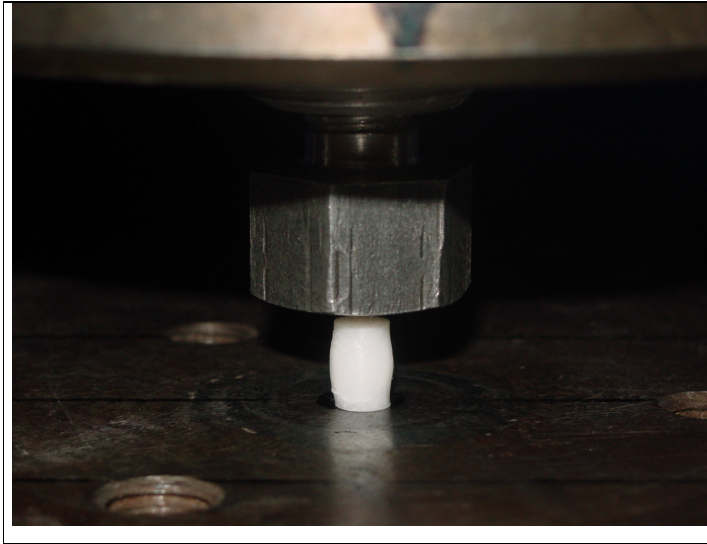


Figura 26: Detalhe do corpo de prova ao final do ensaio.

A Figura 27 ilustra a curva teórica para um ensaio de compressão.

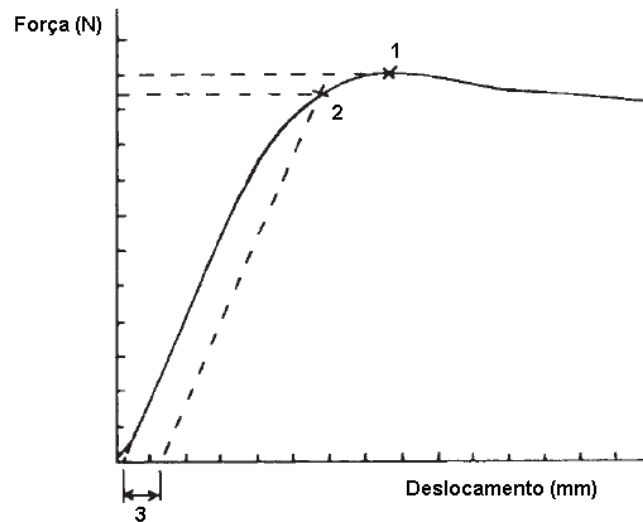


Figura 27: Curva hipotética de força *versus* deformação para ensaios de compressão. Método gráfico para a determinação do limite superior de escoamento (1) e limite convencional de elasticidade (2) para o deslocamento de 2% (3) do comprimento inicial.

Em seguida, efetuou-se o cálculo da resistência à compressão, dividindo-se a força no limite convencional de elasticidade, quando da ruptura do cilindro, ou

no limite superior de escoamento (qual ocorresse primeiro), pela área do cilindro, através da equação a seguir, aproximando-se o resultado para múltiplos de 1MPa.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

Onde:

σ : resistência à compressão em MPa;

F: força em N;

A: área inicial em mm².

A norma ABNT NBR ISO 5833, determina que a resistência à compressão média dos cinco cilindros deve ser igual ou superior a 70 MPa.

3.2.8. Resistência e módulo de flexão

O cimento é misturado e são preparadas amostras retangulares de ensaio. O módulo de flexão e a resistência ao dobramento das amostras são determinados através de um ensaio de flexão de quatro pontos de acordo com o Anexo F da norma ABNT NBR ISO 5833.

O ensaio consiste em deformar o corpo de prova até a sua ruptura, quando o material é frágil, ou até sua resistência máxima, quando o material é dúctil. Essa deformação é conhecida como deflexão e é medida na região central no corpo de prova.

Para cada marca, foram ensaiadas cinco amostras obtidas de uma unidade de cimento, confeccionadas em um molde de aço inoxidável com dimensões adequadas para produzir corpos de prova de aproximadamente 75 mm de comprimento, 10 mm de largura e 3,3 mm de espessura (Figura 28).

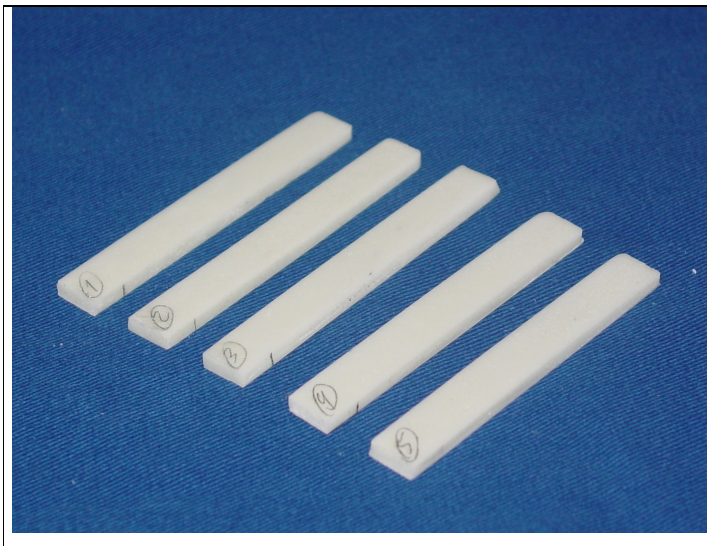


Figura 28: Detalhe dos corpos de prova para ensaios de flexão.

Inicialmente, realizou-se a mistura dos componentes pó e líquido de acordo com as instruções dos fabricantes. Quando a consistência de massa foi atingida, toda a mistura foi introduzida no molde e este posteriormente prensado entre duas placas. Após 1 hora, as placas foram removidas e em seguida realizou-se o lixamento de ambas as faces do molde em uma placa coberta com o abrasivo de carbeto de silício e água a fim de regularizar as superfícies dos corpos de prova. Em seguida as amostras foram sacadas do molde e efetuaram-se as medições de suas dimensões com um paquímetro digital Mitutoyo, com resolução de 0,01 mm. As amostras obtidas foram então armazenadas a uma temperatura de $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24 ± 2 horas antes do ensaio.

Os ensaios foram realizados utilizando-se uma prensa universal de ensaios mecânicos da marca KRATOS, modelo K5002, dotada de uma célula de carga de 981 N, a uma velocidade de êmbolo de 5 mm/min, e dispositivos para ensaios de flexão. O sistema de equipamentos utilizados é ilustrado na Figura 29.



Figura 29: Sistema de equipamentos utilizados nos ensaios de flexão.

Para a realização dos ensaios as amostras foram posicionadas de forma centralizada sobre suporte de alumínio contendo apoio em dois pontos (cutelos inferiores), com um relógio comparador acoplado para registrar a deflexão, marca Mitutoyo, com resolução de 0,01mm (Figura 30).

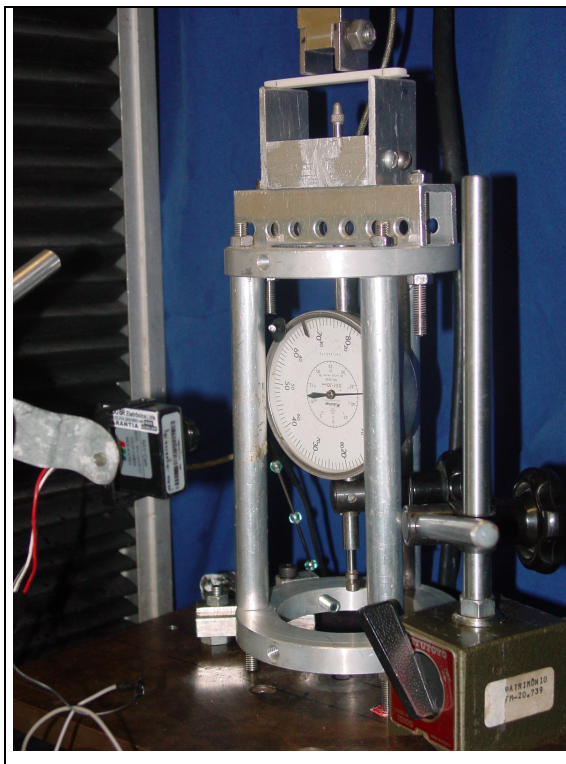


Figura 30: Relógio comparador acoplado ao suporte de alumínio dotado de cutelos inferiores.

No travessão móvel da máquina de ensaio, fixou-se a célula de carga com uma peça de aço inoxidável contendo dois cutelos, configurando desta maneira um ensaio de quatro pontos (Figuras 31 e 32), de acordo com o esquema ilustrado na norma (Anexo 4).

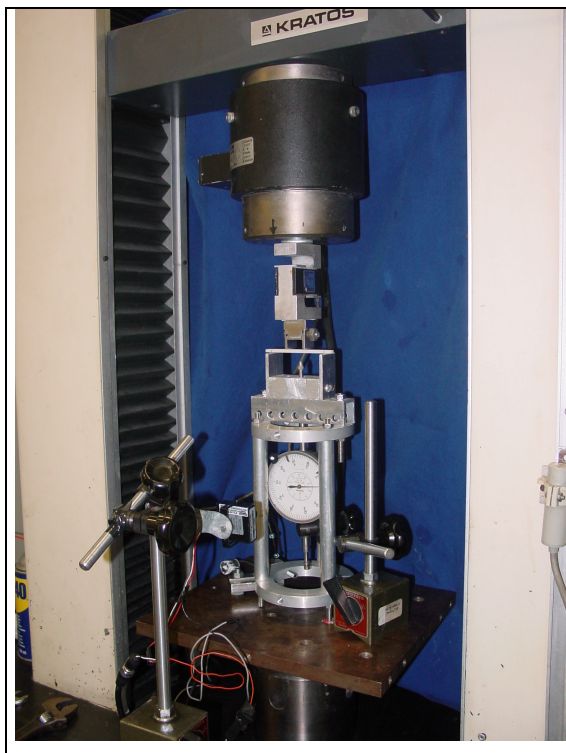


Figura 31: Sistema composto por célula de carga, cutelos superior e inferior e relógio comparador.

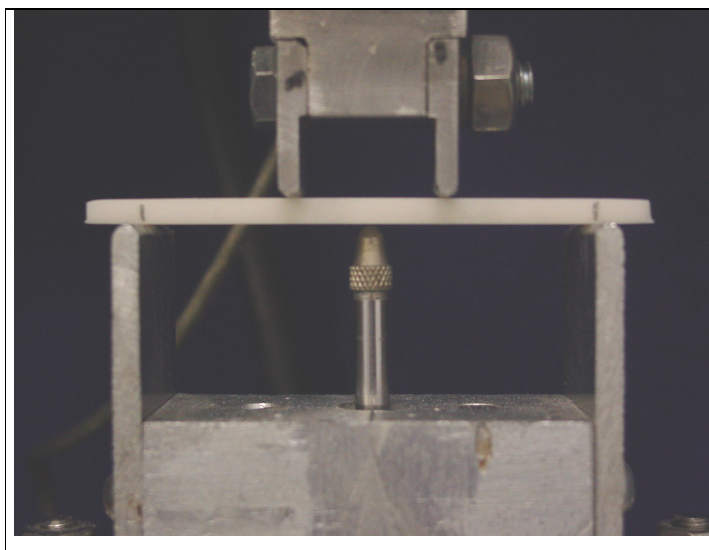


Figura 32: Detalhe do corpo de prova em ensaio de quatro pontos com a haste do relógio comparador posicionada entre os cutelos inferiores.

Assim que o ensaio era iniciado, uma mini-câmera com placa de captura de imagens Pinnacle DC-10 era acionada para a gravação das deflexões medidas pelo relógio comparador. O sincronismo foi feito por um LED que acendia no momento da gravação dos dados da máquina de ensaio, enquanto que a placa de captura já estava registrando as imagens.

As informações provenientes da máquina de ensaio foram armazenadas em um software a uma velocidade de 25 amostras por segundo. Estes dados forneciam base para a elaboração de uma curva força *versus* tempo.

O ensaio era interrompido no momento da ruptura da amostra (Figura 33). Em alguns casos não houve ruptura, e sim um valor de pico e posterior escorregamento do corpo de prova.

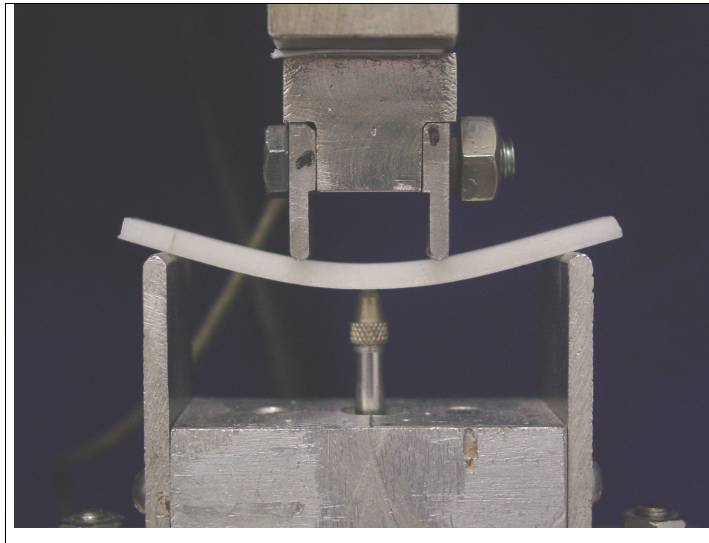


Figura 33: Amostra no momento de ruptura.

Conforme especificações da norma, o módulo de flexão (ou módulo de dobramento) foi calculado a partir do diagrama força versus tempo. Através do diagrama verificaram-se os pontos quando a força atingiu 15 N e 50 N e o tempo correspondente a estes pontos. O tempo decorrido em cada ponto de interesse foi registrado e através do arquivo de vídeo verificou-se o valor de deflexão obtido na imagem do relógio comparador (Figura 34).

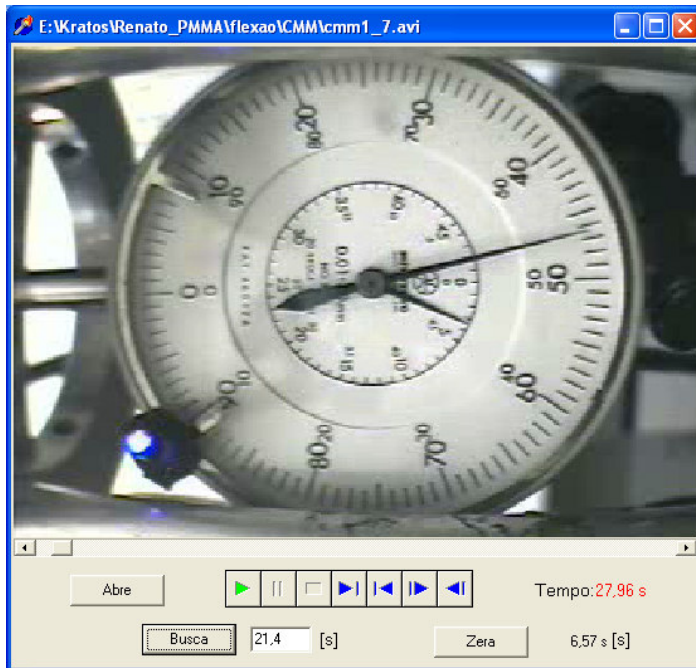


Figura 34: Imagem de vídeo correspondente ao tempo em que a força atingiu 15 N.

Para o cálculo dos valores do módulo de flexão, utilizou-se a seguinte equação:

$$E = \frac{\Delta F a}{4 f b h^3} (3L^2 - 4a^2) \quad (3.4)$$

Onde:

E: módulo de flexão ou módulo de dobramento;

ΔF : faixa de carga (50 N – 15 N = 35 N);

a: distância entre os pontos de carregamento internos e externos (20mm);

f: diferença entre as deflexões sob as cargas de 15 N e 50 N, em mm;

b: largura média da amostra, em mm;

h: espessura média da amostra, em mm;

L: distância entre os pontos de carregamento externos (60 mm);

Os valores de resistência à flexão (ou resistência ao dobramento) foram obtidos pela seguinte equação:

$$B = \frac{3Fa}{bh^2} \quad (3.5)$$

Onde:

B: resistência à flexão ou resistência ao dobramento;

F: força medida na quebra, em N;

a: distância entre os pontos de carregamento internos e externos (20 mm);

b: largura média da amostra, em mm;

h: espessura média da amostra, em mm.

Os valores mínimos estipulados pela norma são de 1800 MPa para módulo de flexão e 50 MPa para resistência à compressão. Caso as marcas não atingissem algum destes valores o cimento era então reprovado neste item.