

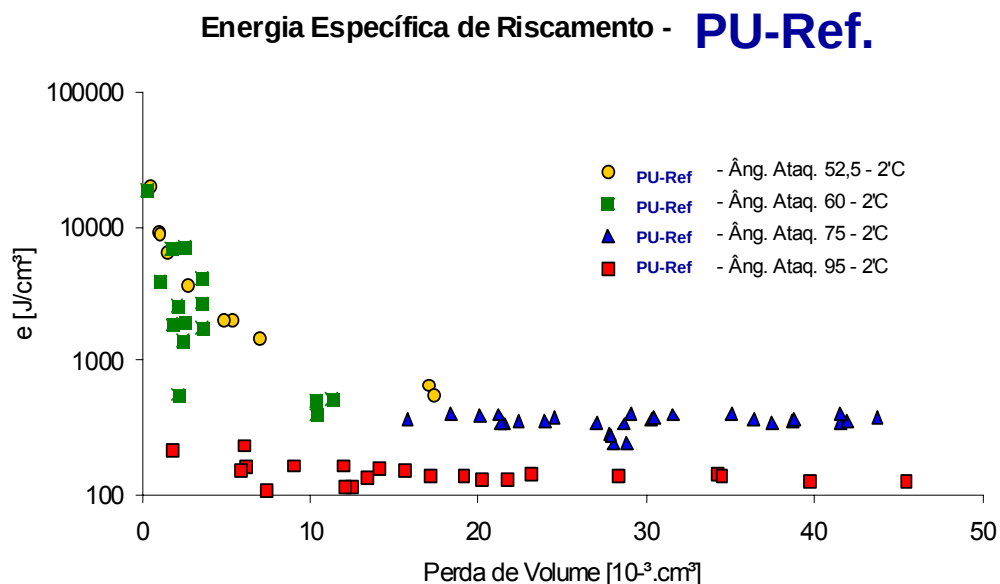


Figura 2.30 – Resultados de esclerometria pendular (energia específica *versus* volume de material removido) para amostras em PU utilizados em calhas protetoras de linhas flexíveis. (PAES *et al*, 2002). Ensaio realizado com amostras na temperatura de 2°C.

Os mecanismos de desgaste passam de microtrincas para microcorte quando se aumenta o ângulo de ataque, (PAES *et al.*, 2002). A **figura 2.31** mostra riscos produzidos no PU-Ref nos dois valores de ângulos de ataque extremos (52,5° e 95°). Em “a” e “b” observa-se um risco, onde predomina a retirada de material por fratura frágil, com destacamento de volumes por trincas paralelas à direção do risco. Em “c”, o mecanismo predominante é o microcorte, com um pequeno percentual de microsulcamento (PAES *et al*, 2002).

Os resultados de esclerometria pendular reproduzem bem a ação do subsolo marinho no que se refere à capacidade de gerar riscos. Além disso, os mecanismos de desgaste são reproduzidos na medida em que o ângulo de ataque é variado. No caso do PU, os mecanismos variam desde o trincamento (baixos ângulos de ataque) até corte puro para ângulos de 75° a 95°. Na Poliamida predomina o riscamento, tal como observado nos restos da linha flexível. A melhor *performance*, com relação ao desgaste abrasivo, foi verificada no PU.

A semelhança da superfície apresentada na **figura 2.22** com a **figura 2.31a** e **2.31b** é notória. Essa figura mostra a morfologia do risco gerado pela esclerometria pendular do PU com ângulo de ataque de 52,5°. A semelhança entre os aspectos das duas figuras é evidente,

sugerindo, portanto, que o citado ângulo possa reproduzir com razoável precisão os mecanismos de desgaste do PU no sistema tribológico em questão.

Isso mostra que predominantemente no fundo do mar ocorrem interações dos *risers* com superfícies de geometrias com baixos ângulos de ataque.

A limitação deste ensaio é não fornecer dados referentes a solicitações cíclicas. Desta forma, mecanismos de falhas por fadiga de contato não podem ser identificados.

O ensaio DIN 53.516, apesar de ser um ensaio normatizado e poder identificar parâmetros de fadiga, tem a desvantagem de trabalhar sempre com eventos de baixas profundidades, pois utiliza uma lixa 60 mesh, com tamanho médio de partícula de aproximadamente 200 μ m.

Além disso, esses dois ensaios requerem a retirada de amostras com geometria e topografia específica, bem como a pesagem das amostras antes e após os ensaios. Isso eleva o tempo de duração dos ensaios, uma vez que as amostras têm que ser levadas a uma estufa para a total retirada da água. No caso da esclerometria pendular, esse tempo pode chegar a três dias nas borrachas já testadas, (FRANCO, 2002).

Dada a importância econômica e ambiental que o assunto representa para a exploração de petróleo em águas profundas (Petróleo Brasileiro S.A., 2003; FRANCO, 2001), justifica-se um trabalho que venha gerar conhecimentos adicionais nesse assunto, bem como contribuir com o projeto da Petrobras.

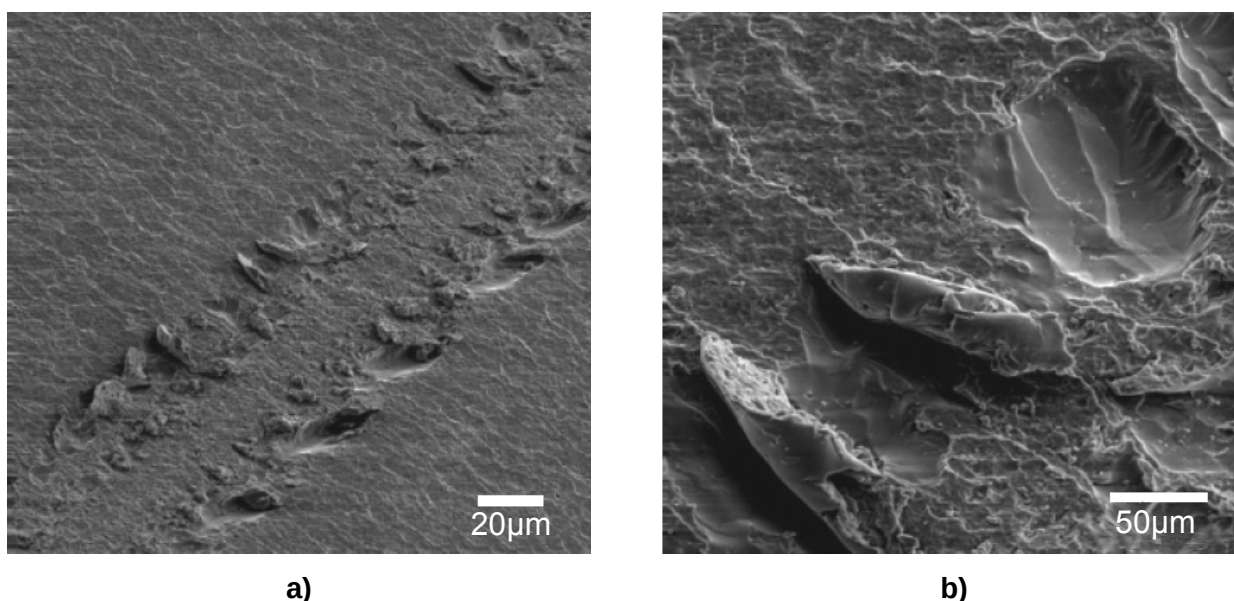
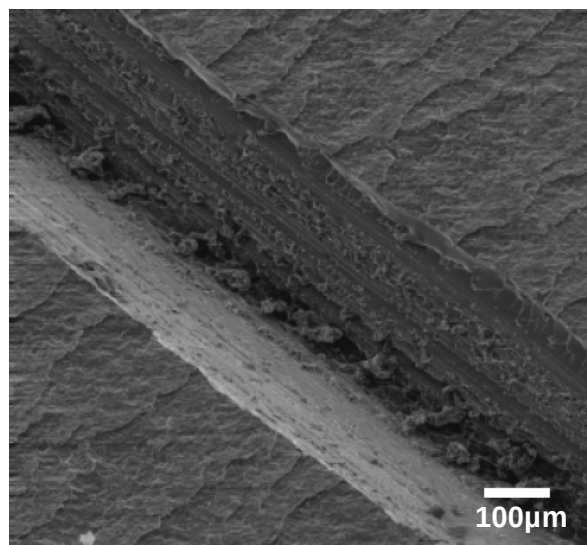


Figura 2.31 – Aparência típica de um risco em PU – Ref.; a) ângulo de ataque 52,5°, b) detalhe de “a” e c) ângulo de ataque 95°, (PAES *et al.*, 2002).



c)

Figura 2.31 – Continuação.

Capítulo III

3. Procedimentos experimentais

O presente trabalho foi desenvolvido conforme sequência de atividades apresentadas na **figura 3.1**.

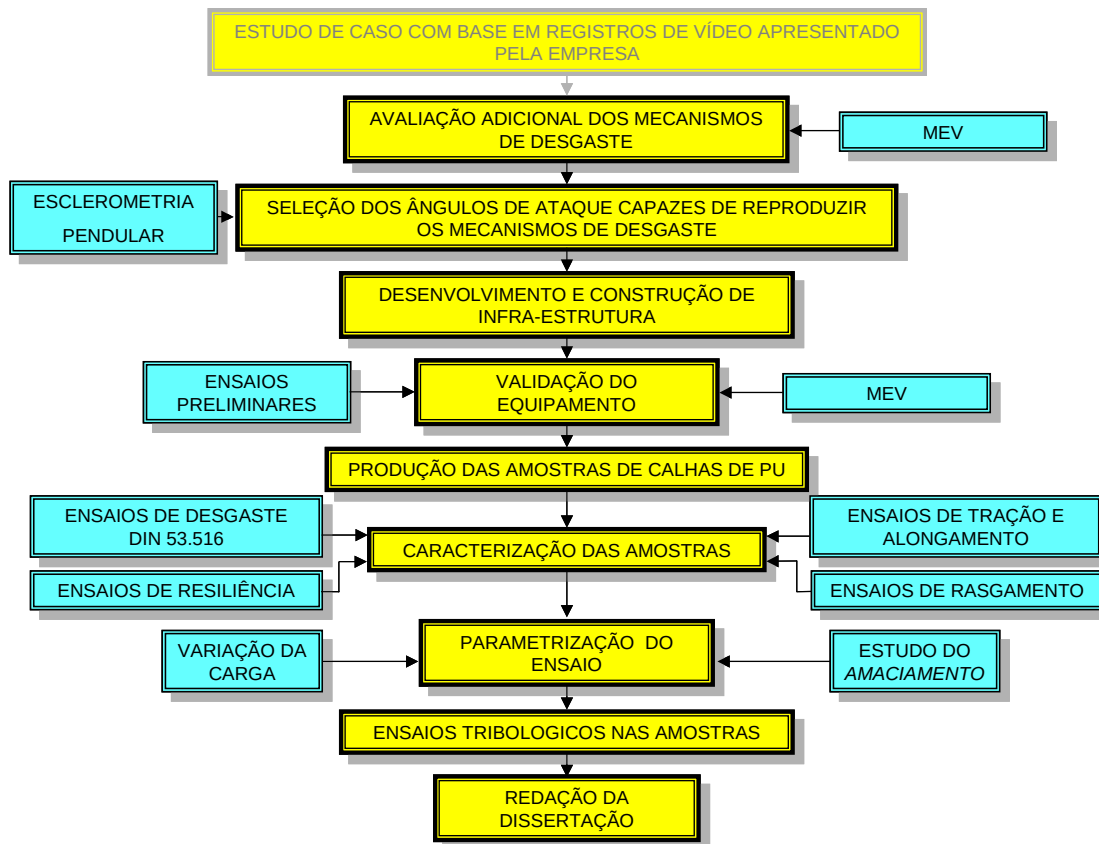


Figura 3.1 – Resumo das várias etapas adotadas no desenvolvimento do presente trabalho.

A metodologia adotada inclui, numa primeira etapa, um estudo de caso complementar ao já realizado em trabalhos passados, com objetivo de compreender os fenômenos, bem como verificar quais são os mecanismos de desgaste atuantes e predominantes no sistema tribológico em questão.

A próxima etapa refere-se à investigação e seleção de configurações laboratoriais que reproduzam os mecanismos de desgaste encontrados. Foram analisados trabalhos de ensaios de esclerometria com vários ângulos de ataque em amostras de Poliamida e PU, realizados

pelo autor deste trabalho em (PAES *et al.*, 2002). A partir desses resultados foi selecionada uma geometria de penetrador capaz de reproduzir aqueles mecanismos.

Determinada a geometria do elemento riscante, passou-se, então, para uma etapa de projeto, onde foi desenvolvido um sistema que pudesse simular as interações mecânicas experimentadas pelo componente em estudo.

Essa fase constituiu-se do projeto de um equipamento de desgaste abrasivo com características específicas, necessárias para avaliar segmentos de calhas em tamanho comercial e com boa repetibilidade e confiabilidade. Esse equipamento foi construído pelo Laboratório de Tribologia e Materiais, LTM, da Universidade Federal de Uberlândia – UFU (Convênio Petrobras/UFU). Sua configuração é a de um multi-esclerômetro e foi denominado Simulador de Interações Marítimo-Mecânicas em Calhas - SIMMC. Na avaliação e validação do equipamento foram realizados ensaios em materiais conhecidos e já utilizados na prática. Nesses ensaios verificou-se a repetibilidade do ensaio e a reprodução dos mecanismos de desgaste.

Em uma outra etapa foram produzidas amostras de quatro tipos de poliuretano que, paralelamente, seriam estudadas como possíveis materiais para esta aplicação. Esses materiais foram caracterizados através de ensaios mecânicos normatizados. Propriedades como resistência à tração, alongamento, rasgamento, resiliência, dureza e densidade foram obtidas. Também foram realizados ensaios de abrasometria DIN 53.516 para uma comparação entre os ensaios de desgaste.

Foi realizado, ainda, ensaio de indentação instrumentada, buscando correlacionar informações sobre os materiais e seu comportamento tribológico. Apesar de ser uma técnica atualmente aplicada basicamente em metais, acredita-se que propriedades assim obtidas possam facilitar o estabelecimento de correlações envolvendo propriedades mecânicas e resultados de desgaste.

Na etapa de parametrização do ensaio SIMMC, variou-se, de forma sistemática, cargas e quantidades de ciclos, procurando observar o comportamento do ensaio. A partir desses resultados, foi possível determinar uma faixa ótima de operação do equipamento.

Foram, então, realizados ensaios de desgaste abrasivo no SIMMC nas condições indicadas pelos resultados dos testes de parametrização e, assim, avaliada a resistência à abrasão destes materiais.

Em toda etapa de caracterização tribológica, a microscopia eletrônica de varredura foi intensamente utilizada na caracterização dos micromecanismos de desgaste atuantes.

A seguir, apresenta-se a metodologia das etapas desenvolvidas.

3.1 – Avaliação dos Mecanismos de Desgaste e Seleção dos Ângulos de Ataque

Para identificar os mecanismos de desgaste que as calhas de proteção experimentam, foi realizada microscopia eletrônica de varredura em elementos que tinham sido utilizados em campo, **figura 3.2**. Os resultados encontrados foram semelhantes aos observados em estudos anteriores (PAES *et al.*, 2002) e os resultados obtidos indicam mecanismos envolvendo propagação de trincas na formação de fragmentos de desgaste como mostrado na seção **2.3.3**.

PAES *et al.*, (2002) investigou geometrias através de esclerometria pendular buscando encontrar parâmetros que reproduzissem o mecanismo de desgaste real.

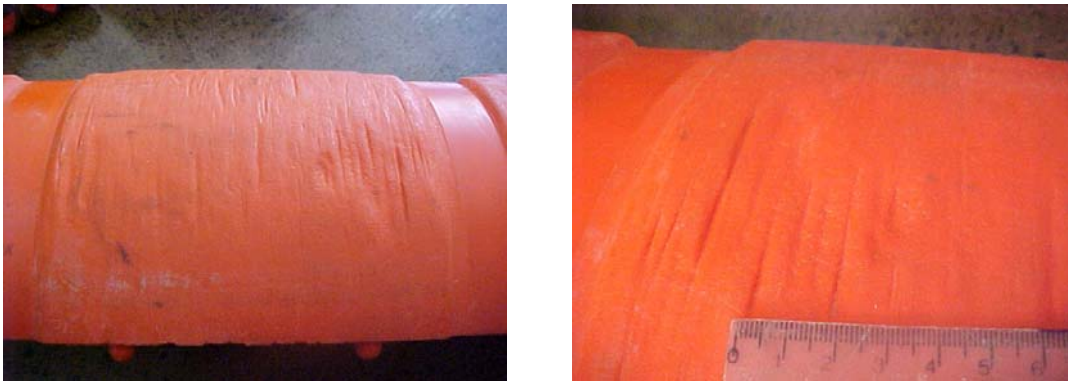


Figura 3.2 – Regiões de desgaste em uma proteção de linha flexível retirada após 40 meses.

Com base em ensaios realizados pelo autor deste trabalho, a seleção dos ângulos de ataque foi investigativa. PAES *et al.*, (2002) realizaram um estudo de esclerometria pendular com vários ângulos de ataque. Foram realizados ensaios com cinco diferentes ângulos, quais sejam: 40°, 52,5°, 60°, 75° e 95°, **Figura 3.3**. As amostras utilizadas foram, entre outros materiais, Poliamida e um PU, pois são materiais já utilizados nessas aplicações.

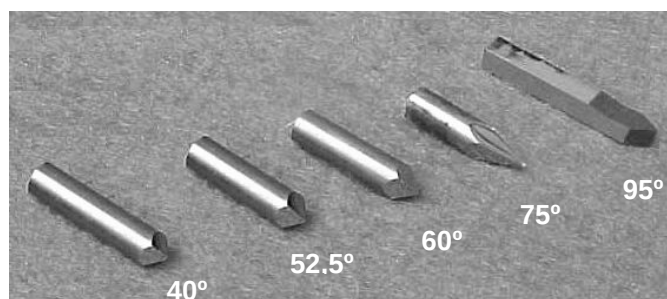


Figura 3.3 – Penetradores utilizados nos ensaio de esclerometria pendular, (PAES *et al.*, 2002), confeccionados em WC-Co.

Esses ensaios indicaram que ângulos de ataque baixos ($52,5^\circ$ e 60°) geram mecanismos de desgaste semelhantes aos observados na prática. Desta forma, no escopo desse trabalho procurou-se desenvolver um equipamento que fosse capaz de reproduzir esses mecanismos, ou seja, utilizando penetradores em WC-Co, com ângulo de ataque de 55° .

3.2 – Concepção e construção da infra-estrutura de ensaios de desgaste abrasivo

3.2.1 – Método proposto

A nova metodologia proposta baseia-se no princípio da esclerometria (penetradores riscando a superfície da amostra). Para tanto, é proposto um novo equipamento que permite adicionar uma característica de multiplicidade dos eventos de riscamento, e assim, aumentar a quantidade de material removido em cada ensaio. A esclerometria múltipla justifica-se ainda pelo fato de que a interação entre eventos gerados pode ser importante no processo, pois na situação de campo, tem-se um processo de riscamento alternado, e sempre transversal à linha flexível, como mostrado na seção relativa a revisão bibliográfica (página 37). Desta forma, o ensaio aqui proposto baseia-se em um processo de riscamento alternado, e sobre uma mesma região na amostra.

O princípio básico do ensaio proposto consiste em fixar uma amostra de calha em tamanho comercial sobre um cilindro que trabalha em movimento alternado de rotação. A ação abrasiva é exercida por um conjunto de penetradores com geometria conhecida. Sobre esse conjunto é aplicada uma carga através de um braço rotulado e peso morto. A disposição destes penetradores promove, com a movimentação relativa, um desgaste uniforme numa região com largura de cerca de 60 mm. O ensaio é realizado de forma submersa em uma cuba com água refrigerada a 4°C .

3.2.2 – Projeto e desenvolvimento do equipamento

Para simular o desgaste abrasivo que as proteções das linhas flexíveis experimentam, foi desenvolvido um equipamento de esclerometria múltipla (SIMMC – Simulador de Interações Mecânico-Marítimas em Calhas). A **figura 3.4** apresenta o equipamento desenvolvido, projetado e construído, que é constituído, basicamente, das seguintes unidades:

- Cuba de teste;
- Sistema de refrigeração;
- Sistema de acionamento do cilindro porta-amostra;
- Sistema de movimentação do porta-penetradores;

- Sistema de controle.

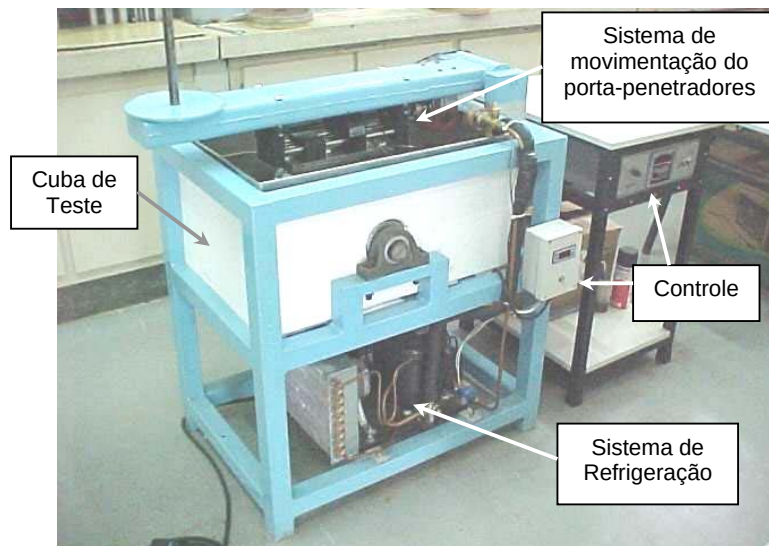


Figura 3.4 – Equipamento de esclerometria múltipla, desenvolvido, projetado e construído no LTM (SIMMC).

3.2.2.1 – Cuba de Teste

A montagem da cuba foi feita de forma a proporcionar que os mancais do eixo ficassem fora dela. Sua função é acomodar o fluido (água) responsável pelo resfriamento da amostra. A vedação foi realizada através de retentores entre a cuba e o eixo do cilindro. Um isolamento térmico foi incorporado para minimizar as trocas de calor com o ambiente, aumentando a eficiência do processo de resfriamento. Como material construtivo foi selecionado o aço inoxidável austenítico AISI 304. A cuba tem capacidade de 80 litros e a quantidade de água a ser colocada é o suficiente para que toda a amostra seja submersa, **figura 3.5**.

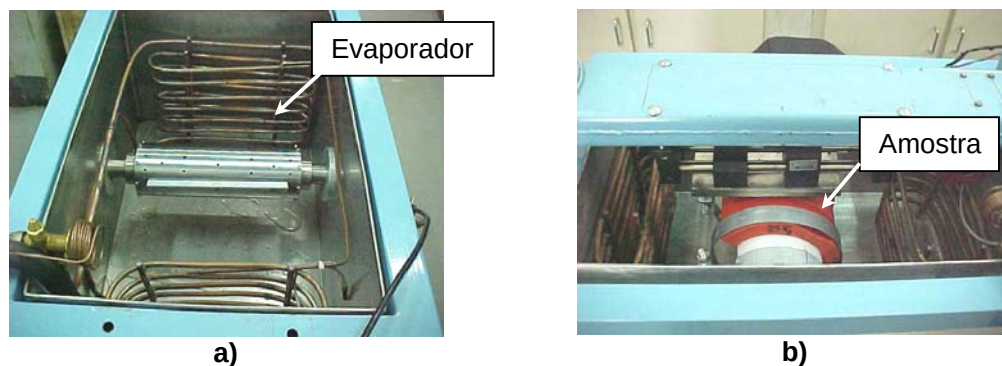


Figura 3.5 – Cuba de teste. a) Detalhe do evaporador; b) Detalhe da fixação da amostra.

3.2.2.2 – Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração tem como finalidade o controle da temperatura dentro da cuba durante o ensaio. Esse sistema é constituído de um ciclo de refrigeração com R22, com capacidade de variar a temperatura desde a temperatura ambiente até -15°C . O controle é feito através de um sistema termostatzado com mostrador digital, que mantém a temperatura selecionada permitindo no máximo variações de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, **figura 3.6**.

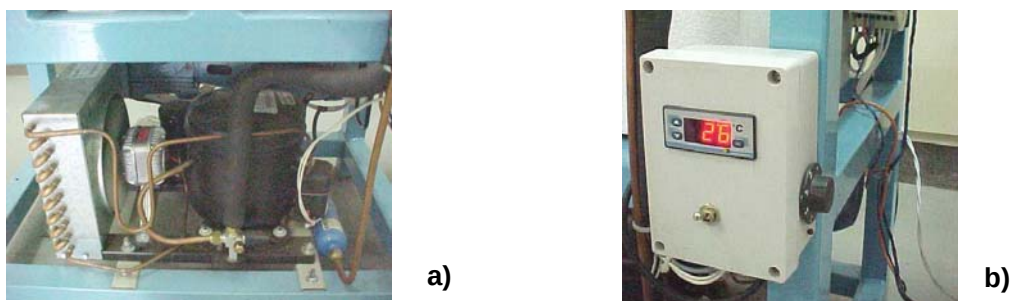


Figura 3.6 – Sistema de Refrigeração: a) Compressor hermeticamente fechado e condensador; b) Controle e mostrador digital.

3.2.2.3 – Sistema de movimentação relativa entre calhas e penetradores

A movimentação relativa entre a amostra e os penetradores pode ser separada em dois movimentos. O primeiro é responsável por promover efetivamente o riscamento e um segundo, de caráter secundário, que tem como finalidade promover o revezamento dos penetradores, além de promover uma redução uniforme da espessura das calhas.

Essa configuração é importante e tem como principal motivo manter poucos penetradores em contato com a amostra e de maneira bem afastada, mantendo de forma eficiente a pressão de contato em valores altos. Outro objetivo é, mesmo mantendo esse espaçamento entre os penetradores que estão em contato, produzir no final do ensaio uma região uniforme de desgaste. Essa cinemática pode ser observada na **figura 3.7**.

O primeiro sistema foi projetado para baixas velocidades relativas (100mm/s), estimadas através de estudos da movimentação dos *risers* no fundo do mar. Esse sistema de movimentação relativa é composto de um motor de indução de 1CV e um redutor do tipo pinhão-coroa, com uma redução de 1:40. Seu acionamento é feito através de um inversor de frequência. Assim, a velocidade média do motor pode ser variada de forma contínua, desde valores próximos a zero até cerca de 43 rpm. Isso gera velocidades médias de deslizamento entre amostra e penetradores de 0 a 255 mm/s, **figura 3.8**. O movimento experimentado pela

amostra é um movimento alternado de rotação, podendo ser em um arco de 90° ou 40°. Esse movimento é proporcionado por um sistema de quatro barras do tipo biela-manivela, **figura 3.9**.

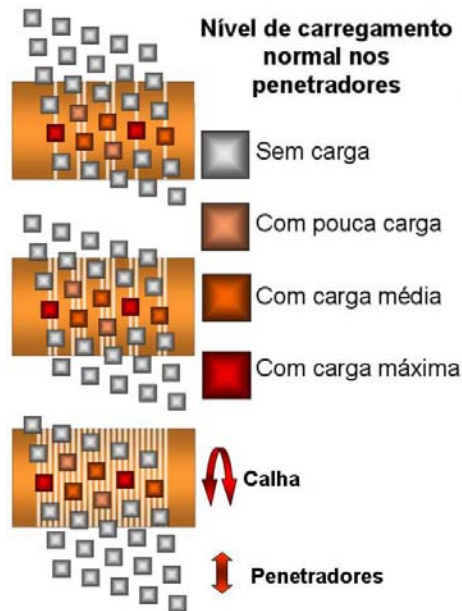
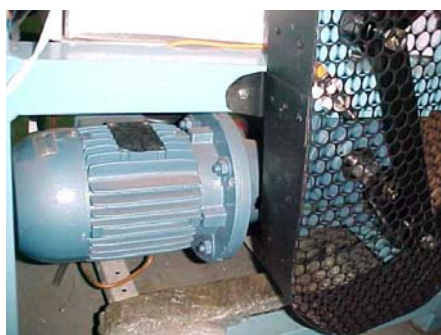


Figura 3.7 – Movimento relativo para distribuição da região de desgaste.

O segundo sistema movimenta a cama de penetradores na direção paralela aos riscos é responsável por promover um desgaste uniforme na região de ensaio mesmo com os penetradores afastados uns dos outros. Ele foi configurado de maneira que sua velocidade fosse tão baixa (1-3 mm/s), que não alterasse de forma significativa a velocidade relativa do ensaio. Esse sistema é constituído de um motor de passo, um redutor de engrenagens helicoidais com redução de 1:15 e uma mesa de deslocamento linear. O acionamento deste sistema é feito através de um *drive* de potência e duas chaves de fim-de-curso, **figura 3.10a**.

As **figuras 3.10b** e **3.10c** mostram ainda detalhes do conjunto de penetradores, dispostos de forma a solicitar uniformemente a calha polimérica. A chapa porta-penetradores é composta de 90 penetradores confeccionados em WC-Co.

A geometria dos penetradores utilizados foi uma pirâmide de base quadrada e truncada, e pode ser observada na **figura 3.11** juntamente com uma distribuição normal referente ao controle das medidas da base retangular.

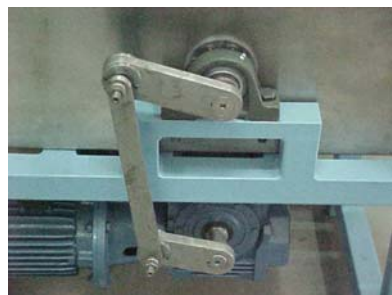


a)



b)

Figura 3.8 – Sistema de movimentação do cilindro porta-amostras. a) Moto-reductor; b) Inversor de frequência.



a)

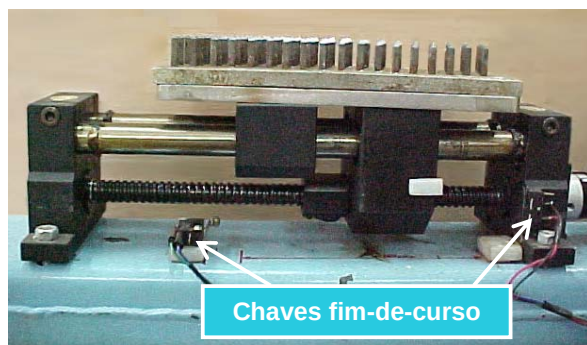


b)

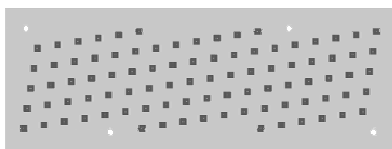


c)

Figura 3.9 – Vista mostrando sistema de acionamento do cilindro porta-amostra.



a)



b)



c)

Figura 3.10 – Sistema de revezamento dos penetradores, a) conjunto mesa de deslocamento, b) e c) disposição dos penetradores na chapa porta-penetradores.

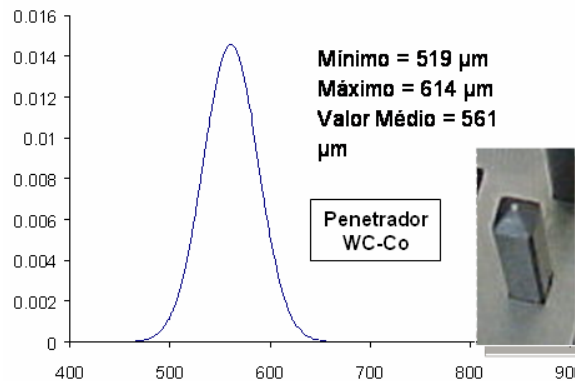


Figura 3.11 – Curva de distribuição do valor médio da extremidade truncada dos penetradores.

3.2.2.4 – Sistema de Controle

Para controle e sincronização da partida e parada dos dois movimentos foi desenvolvido um sistema a partir de um conta-ciclos e um PIC (Circuito Integrado Programável). O esquema representativo desse controle é mostrado na **figura 3.12**, onde:

C1 é o circuito que aciona, simultaneamente, os sistemas 01 e 02 através de chave mecânica e os interrompe no final do ensaio ao receber um sinal do conta-ciclos, e **C2** é o circuito capaz de:

- Injetar um pulso que determine a frequência de chaveamento do “driver” (rotação do motor);
- Inverter a rotação através de duas chaves fim de curso;
- Parar o motor eletronicamente ao receber um sinal de C1.

O sistema 01 é composto de um *driver* não programável controlado por C2 para acionamento de um motor de passo. O sistema 02, por sua vez, é composto de um inversor de frequência com porta lógica on/off e um motorreductor (motor de indução). O sistema 03 é composto de um conta-ciclos programável com porta de entrada que recebe sinal de um sensor (indutivo, como pulso de ciclos) e porta de saída analógica, que envia sinal para C1.

A sequência de acionamento é processada, então, da seguinte forma: determina-se no conta-ciclos o valor de ciclos desejado para o ensaio e através do botão de partida é iniciado o ensaio. Esse será encerrado automaticamente após a contagem dos ciclos pré-determinados, ou manualmente, caso for necessário. O valor de ciclos desejados também pode ser alterado durante o ensaio.

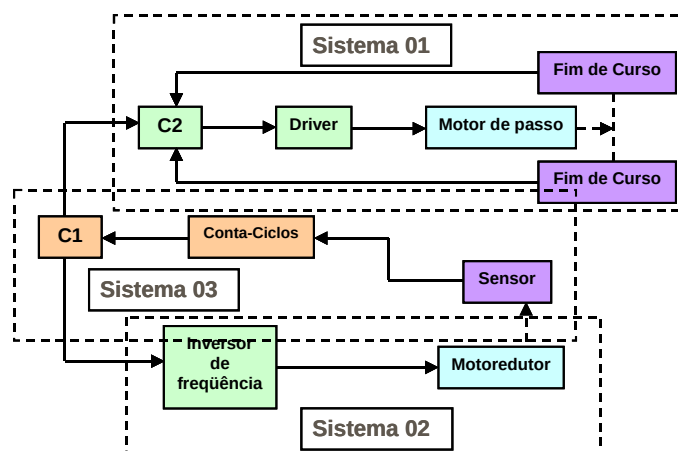


Figura 3.12 – Diagrama de blocos do sistema eletrônico de acionamento.

O equipamento foi projetado de maneira que se conseguisse uma reprodução do movimento relativo e carregamentos do ensaio de esclerometria já realizado e estudado.

3.2.3 – Operacionalização do SIMMC

Após o desenvolvimento, projeto e construção do equipamento de desgaste abrasivo, foram realizadas a montagem e operacionalização dos vários sistemas constituintes.

O surgimento de comportamentos não previstos no projeto, como vibração excessiva, direcionou esforços no sentido de otimizar parâmetros de teste. Um deles foi a velocidade de translação da mesa. O trabalho com baixas velocidades através do “drive” controlador diminuiu de modo comprometedor o torque fornecido pelo motor. A solução para esse problema foi a aquisição de um redutor que permitisse que o sistema trabalhasse em baixa velocidade de translação, porém, com o motor de passo girando numa rotação que fornece um torque suficiente.

Outro problema encontrado foi a vibração do sistema de aplicação de carga durante o ensaio. A velocidade de oscilação do cilindro, acoplada com o atrito do par de materiais excitava o sistema em frequências muito próximas da frequência natural, convergindo assim, em ressonância, o que levava a grandes amplitudes de vibração. Essa problemática foi solucionada diminuindo a velocidade de rotação do motor de indução através do controle do inversor. Uma consequência dessa medida foi a perda de torque no movimento do cilindro, limitando assim a carga máxima no ensaio.

Um terceiro problema foi a interferência do funcionamento do inversor de frequência no sistema de controle. O bloco responsável direto pelo fornecimento da forma de onda do tipo PWM (Pulse Width Modulation - Modulação por Largura de Pulso) de saída, através do chaveamento dos circuitos IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor), injeta harmônicos na

rede que comprometeram o funcionamento perfeito dos circuitos controladores e do “drive”. Desta forma, fez-se necessária a utilização de um filtro a base de capacitores cerâmicos na entrada da alimentação do circuito controlador.

3.3 – Validação do equipamento

Nessa etapa foram realizados ensaios com o objetivo de avaliar a superfície de desgaste. O material utilizado para esses ensaios foi o PU-Ref (PU utilizado atualmente - referência). A comparação das superfícies via MEV revelaram que a superfície encontrada após o ensaio é semelhante à observada nas amostras de campo, sendo necessário a parametrização do ensaio para estabelecimento de uma metodologia de teste.

3.4 – Produção das amostras

3.4.1 – Material

O material selecionado neste trabalho foi um tipo de poliuretano MDI poliéter, curado com Butanodiol devido à tendência ambiental da indústria, que atualmente caminha no sentido de substituir reagentes tóxicos. Foram escolhidas quatro formulações de modo a obter-se durezas de 75, 85, 90 e 95 Shore A. Os valores de NCO (radical isocianato) teórico e real para cada formulação são apresentados na **tabela 3.1**. As amostras foram diferenciadas através de pigmentos orgânicos (cores). A temperatura da resina (pré-polímero) e do agente de cura (BD) foram controladas para todas as formulações. Da mesma forma, o tempo de mistura foi suficiente para que a reação inicial fosse homogênea e permitisse o vazamento no molde dentro da fase de baixa viscosidade, denominada “pote life”.

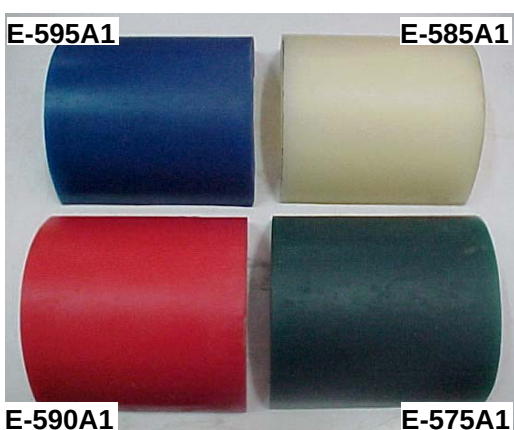
Foi ensaiado, também, um PU de dureza 85 Shore A, que atualmente é usado na fabricação de calhas de proteção de linhas flexíveis. Esse material foi denominado PU – Ref.

Tabela 3.1 – Constituição dos poliuretanos MDI's poliéteres testados.

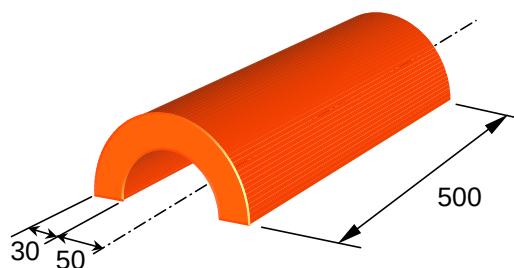
Nomenclatura	NCO _{teor} (%)	NCO _{real} (%)	Pigmento/Cor
E-575A1	6,80	6,77	Ftalocianina Clorada / verde
E-585A1	8,16	8,15	Sem pigmento / Branco
E-590A1	10,22	10,20	Molibdato / Vermelho
E-595A1	11,90	11,87	Ftalocianina de Cobre / Azul

3.4.2 – Dimensões

As amostras para o ensaio SIMMC foram produzidas na forma de calhas, cujas dimensões são apresentadas na **figura 3.13**. Essa geometria é a mesma geometria de calhas de proteção utilizadas atualmente, com exceção de detalhes de fabricação encontrado nas calhas comerciais para fixação das mesmas nas linhas flexíveis. Paralelamente, foram fabricadas placas com os mesmos materiais para caracterização destas amostras através de ensaios destrutivos, **figura 3.14**. Os parâmetros de produção são mostrados na **tabela 3.2**.



a)

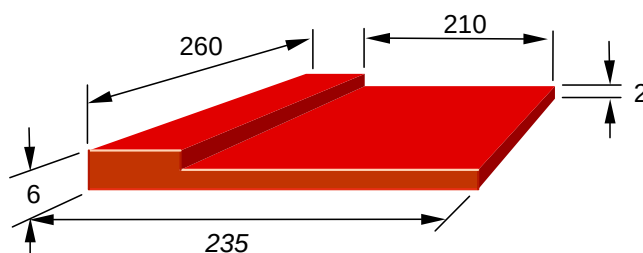


b)

Figura 3.13 – a) Amostra para ensaio de abrasão SIMMC; b) Dimensão, cotas em mm.



a)



b)

Figura 3.14 – a) Produção de placas para a retirada dos corpos de prova de tração, rasgamento e DIN 53.516; b) Dimensões, cotas em mm.

Tabela 3.2 – Parâmetros do processo de fabricação das placas e calhas.

Nomenclatura	Estequiométrica (%)	Pot-life (minutos)	Cura (minutos)	PósCura (horas)
E-575A1	100	20	180	48
E-585A1	100	11	120	48
E-590A1	100	6	90	48
E-595A1	100	4	60	48

Onde *pot-life* é o tempo de vida onde o PU tem fluidez suficiente para ser vazado.

3.5 – Caracterização das propriedades mecânicas das amostras

Para caracterização das amostras foram realizados ensaios destrutivos a partir de placas vazadas na mesma rota de produção das amostras na forma de calhas. A seguir são fornecidos os procedimentos experimentais para a realização de cada um dos ensaios de propriedades mecânicas.

3.5.1 – Ensaios de tração e alongamento

Ensaio de Tração: O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM D412 – “Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers –Tension”, utilizando-se corpos de prova do tipo C. Os corpos de prova foram retirados através de uma matriz a partir de placas confeccionadas para esse fim, **figura 3.15a e b**. A velocidade do ensaio foi de 200 mm/min. A tensão sob tração expressa em MPa, foi calculada de acordo com a **equação 3.1**. Na **figura 3.15c** vê-se a máquina de teste utilizada, EMIC modelo MEM 2000.

As medidas de espessura foram realizadas através de um medidor de espessura da marca JSGUS, com relógio comparador com resolução de 0,01mm.

$$\sigma = \frac{F}{(h * L)} \quad (3.1)$$

Onde:

F é a força aplicada [N];

L é a largura da seção útil do corpo de prova [mm];

h é a espessura do corpo de prova [mm];

σ é tensão de tração [MPa].

As medidas de alongamento foram acompanhadas através de uma régua e de marcações iniciais no corpo de prova. Foram colhidos valores de resistência a 100% e 300% de alongamento, e o alongamento máximo para a situação instantaneamente antes da ruptura.

Foram realizados também testes a 500 mm/min, onde o alongamento foi monitorado durante o ensaio, gerando curvas de tensão deformação. Para cada material foram realizados quatro ensaios.

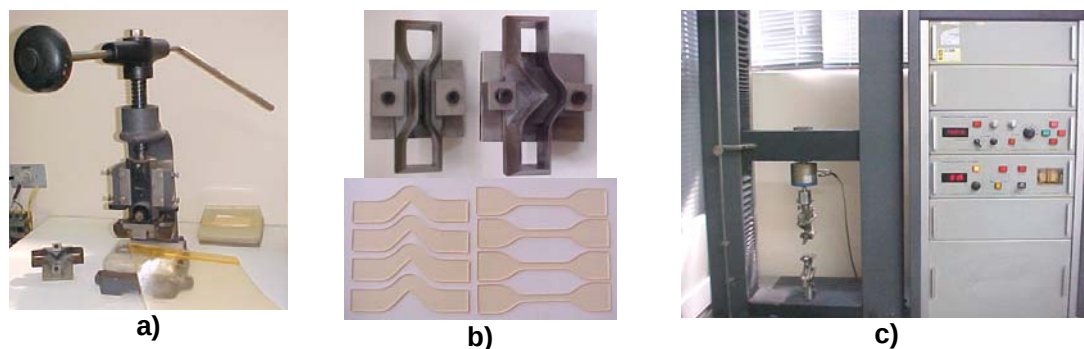


Figura 3.15 – a) Guilhotina e placa de poliuretano, b) Facas para corte e corpos de prova de rasgamento e tração, c) Máquina de tração EMIC, modelo MEM 2000.

3.5.2 – Ensaio de rasgamento

Os ensaios de rasgamento foram realizados conforme a norma ASTM D624 – “Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers”. O rasgamento da borracha é o processo mecânico de iniciação e propagação da ruptura em uma região de alta concentração de tensão, causada por um corte, defeito ou deformação localizada. Foi utilizado um corpo de prova tipo C, **figura 3.16**, aonde a resistência ao rasgamento é dada como a força necessária para causar a ruptura, dividida pela espessura do corpo de prova.

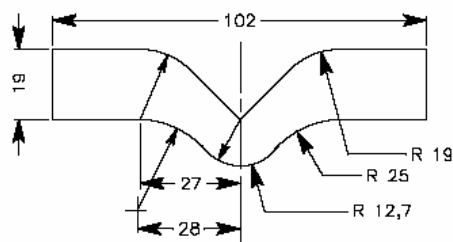


Figura 3.16 – Corpo de prova de rasgamento tipo C, cotas em mm.

A velocidade utilizada foi de 500mm/min e os valores de limite de resistência ao rasgo são obtidos através da **expressão 3.2**.

$$\sigma_{\text{rasg}} = \frac{F}{t} \quad (3.2)$$

Onde:

F é força medida [N];

t é a espessura da corpo de prova [mm];

σ_{rasg} é a resistência ao rasgo [N/mm].

Foram ensaiados três corpos de prova para cada material.

3.5.3 – Ensaio de dureza

A medição de dureza foi realizada conforme a ASTM D2240 – “Standard Test Method for Rubber Property – Durometer Hardness”. Este método de ensaio baseia-se na penetração de um indentador quando forçado contra o material sob condições específicas. A dureza por indentação é relacionada de forma inversamente proporcional à penetração e depende do módulo elástico e do comportamento viscoelástico do material. A geometria do indentador e a força aplicada influem no resultado e, portando, não há uma relação simples entre as diferentes medidas obtidas com um durômetro e as medidas obtidas com outro tipo de durômetro ou outro dispositivo usado para medir dureza. Os índices numéricos de dureza podem representar profundidade de penetração, ou valores arbitrários convenientes, derivados dessa profundidade de penetração.

Este é um teste empírico, que tem por objetivo, principalmente, o controle de qualidade. Aparentemente, não existe nenhuma relação simples entre a dureza medida e qualquer propriedade fundamental do material, DELAWARE (1957).

Foi utilizado um durômetro Shore A Zwick Materials Testing 3100 (ASTM D 2240, DIN 53505, ISO 868). A norma seguida foi a ASTM D 2240-03, **figura 17a**. Os valores apresentados representam a média de dureza para cinco amostras.

3.5.4 – Ensaio de densidade

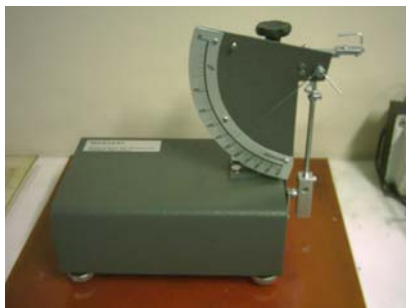
Os ensaios de densidade foram realizados conforme a norma ASTM D792 – “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement”. Neste ensaio, a densidade é determinada por deslocamento de um fluído baseado no princípio de Arquimedes.

3.5.5 – Ensaios de resiliência

Estes ensaios foram realizados conforme a norma DIN 53512 – “Testing of rubber - Determination of rebound resilience (Schob pendulum)”, em um resiliômetro de impacto Maq test, **figura 3.17b**. Os valores são expressos em porcentagem e representam a média de seis medições.



a)



b)

Figura 3.17 – a) Durômetro Shore A, b) Resiliômetro Maq test.

3.5.6 – Fratura frágil

Amostras de materiais produzidos foram fraturadas em nitrogênio líquido a -176°C . A fratura foi obtida através de um carregamento dinâmico em pequenos blocos com entales concentradores de tensão. A **figura 3.18** mostra detalhes dessas regiões.

As amostras fraturadas foram, então, levadas ao MEV para visualização e análise da fratura, principalmente no que tange à ocorrência de porosidade.

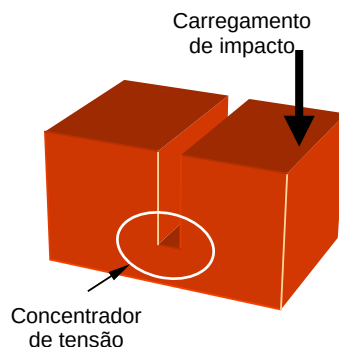


Figura 3.18 – Esquema das amostras fraturadas.

3.5.7 – Indentação-Esférico-Instrumentada (IEI)

Foram realizados ensaios de indentação instrumentada nos polímeros com a finalidade de obter, a partir das curvas de carga *versus* profundidade de penetração, a energia de deformação. Para cada material foram realizados três ensaios de um único ciclo de carregamento e descarregamento, utilizando uma esfera de 12,25 mm (½”), e com carga máxima fixada em 500 N, **figura 3.19**. O equipamento utilizado foi desenvolvido, projetado e construído por uma equipe coordenada pelo orientador desse trabalho, e encontra-se descrito em CARDOSO, F. C., 2004.

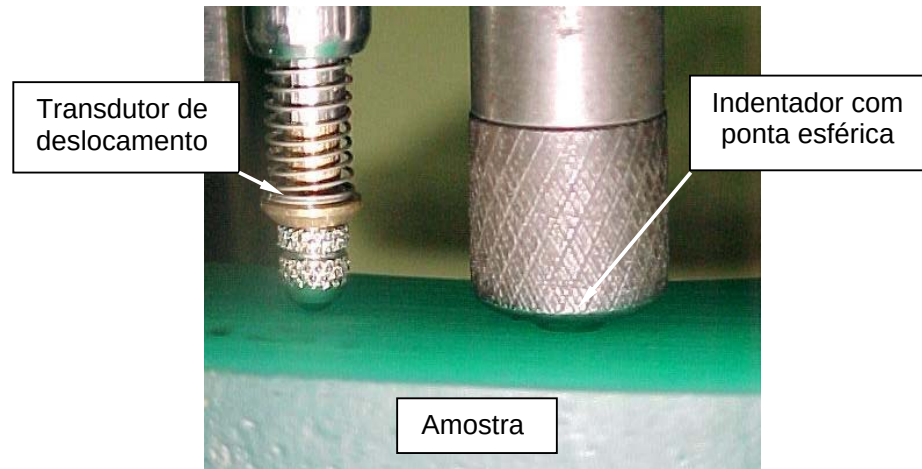


Figura 3.19 – Ensaio de IEI de uma amostra de PU.

Para cada curva foi feito um ajuste polinomial de terceiro grau, **figura 3.20**. A energia de deformação durante o carregamento e o descarregamento foi obtida com as equações 3.3 e 3.4. E a diferença entre essas energias é a energia envolvida no fenômeno de histerese.

$$\bar{E}_C = \frac{\sum_{i=1}^n \int_0^{h_{\max}} P_{\text{carregamento}}(h) dh}{n} \quad (3.3)$$

$$\bar{E}_d = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{h_{\max}}^0 P_{\text{descarregamento}}(h) dh}{n} \quad (3.4)$$

Onde:

$\bar{E}_C$: Energia média de deformação durante o carregamento;

$\bar{E}d$: Energia média de deformação durante o descarregamento;

$P_{\text{carregamento}}(h)$: Polinômio de ajuste sobre a curva de carga x profundidade obtida na fase de carregamento;

$P_{\text{descarregamento}}(h)$: Polinômio de ajuste sobre a curva de carga x profundidade obtida na fase de descarregamento;

h : profundidade de penetração;

n : número de curvas para cada amostra.

Outros parâmetros do ensaio são descritos abaixo:

- Aceleração (mm/s^2)=1000
- Passo (mm)=0,005
- Velocidade (mm/s)=0,15
- Carga máxima (N)=500

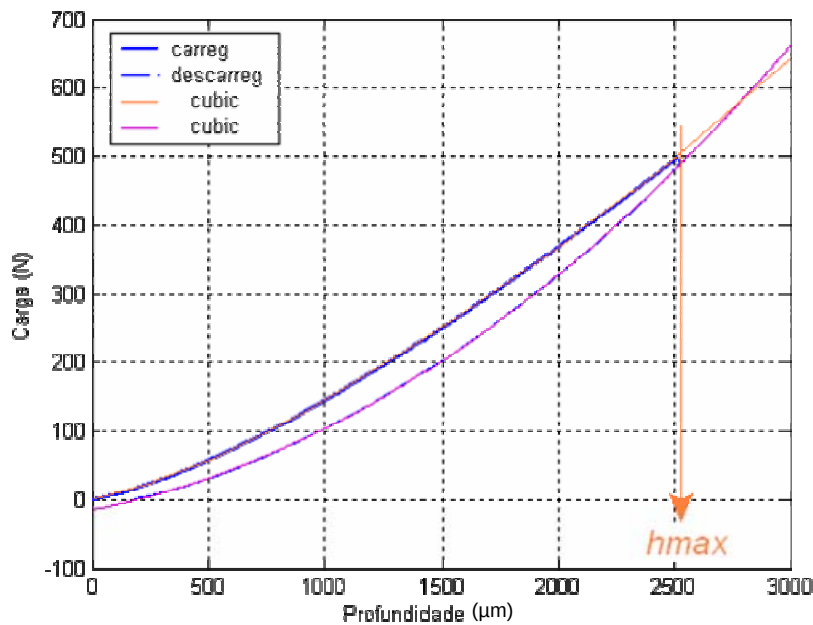


Figura 3.20 – Curva típica do ensaio de IEI para uma amostra de PU com carregamento, descarregamento e ajustes polinomiais de terceiro grau.