

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PRESSÃO
DE EXPANSÃO EM ARGAMASSA EXPANSIVA**

Rômulo Augusto Ventura Silva

Campina Grande

Maio/2007

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PRESSÃO
DE EXPANSÃO EM ARGAMASSA EXPANSIVA**

Rômulo Augusto Ventura Silva

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e Engenharia
de Materiais como requisito parcial
à obtenção do título de MESTRE EM
CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

Orientador: Dr. Hélio de Lucena Lira
Agência Financiadora: BNB/FUNDECI

Campina Grande
Maio/2007

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

S586d

2007 Silva, Rômulo Augusto Ventura.

Desenvolvimento de um equipamento para ensaio de pressão de expansão em argamassa expansiva / Rômulo Augusto Ventura Silva . – Campina Grande, 2007.

121 f.: il..

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia.

Referências

Orientador: Dr. Hélio de Lucena Lira.

1. Argamassa Expansiva 2. Agente Demolidor 3. Ensaios Mecânicos 4. Microcontroladores 5. Sistema de Aquisição de Dados
I. Título.

CDU 624-033.21

Aos meus pais,

José Leônidas e Eyres

A minha esposa,

Marcela Danielle

Ao meu irmão,

Leandro José

VITAE DO CANDIDATO

Engenheiro de Materiais pela UFCG (2004).

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO DE PRESSÃO
DE EXPANSÃO PARA ARGAMASSA EXPANSIVA**

Rômulo Augusto Ventura Silva

Dissertação aprovada em 23 de maio de 2007, pela banca examinadora
constituída dos seguintes membros:

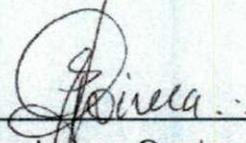
Banca Examinadora:



Dr. Hélio de Lucena Lira

Orientador

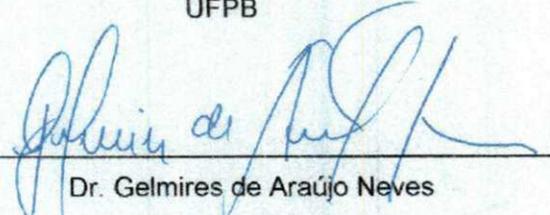
UAEMa - UFCG



Dr. Severino Jackson Guedes de Lima

Examinador Externo

UFPB



Dr. Gelmires de Araújo Neves

Examinador Interno

UAEMa - UEPB

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, gostaria de agradecer a Deus, presente e companheiro em mais esta etapa da minha vida.

Agradeço a meus pais, pelo esforço, trabalho e dedicação a nossa família e, principalmente, na confiança e fé que sempre me direcionaram na minha vida.

Ao meu irmão pela presença constante e o incentivo tão necessário em todas as nossas realizações.

A minha mulher, por todo seu carinho, amor, apoio e compreensão nas minhas muitas ausências no transcorrer desta dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hélio de Lucena Lira, pelo apoio, sugestões à realização do trabalho e pela confiança creditada.

Aos Profs.drs. Gelmires, Héber e Marcelo Rabello pelas sugestões, informações e apoio, desde a graduação até a conclusão deste trabalho.

A Campina Balanças na pessoa do Sr. Janiclaudio Barbosa, pelas importantes informações sobre o funcionamento de instrumentos de medição de peso e pelos pesos padronizados utilizados durante o processo de calibração e validação do equipamento.

A FUJI – Mármore e Granitos S/A na pessoa do Prof. Msc. António Augusto pelas amostras de argamassa expansiva utilizadas no decorrer desta dissertação e pelas informações operacionais de seu uso.

Aos demais professores, colegas e funcionários da Graduação e Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, em particular a Carlos Thiago, Walber e aos funcionários responsáveis pelos laboratórios caracterização.

MÁQUINA DE ENSAIO DE PRESSÃO EXPANSIVA PARA ARGAMASSA

RESUMO

A avaliação correta das propriedades de um determinado material é fundamental para que, na sua aplicação final, o seu desempenho atenda a todas as expectativas para as quais ele foi projetado. No decorrer do desenvolvimento de argamassa expansiva para lavra de rochas ornamentais, verificou-se a deficiência de equipamentos que pudessem avaliar a pressão produzida por esta argamassa durante o processo de expansão, sendo estes dados coletados em uma plataforma na qual o corpo de prova contendo o material esteja submetido a um estado estático. Elaboramos então, um projeto de um equipamento para este fim. O projeto foi desenvolvido utilizando tecnologia de micro controladores, conversores analógico-digitais do tipo SAR (*successive approximation register*), célula de carga do tipo S com capacidade para duas toneladas e, com relação a estrutura física, utilizou-se CAD (Computer Aided Design) tanto para o projeto do equipamento em si, como para o projeto dos circuitos elétricos de controle. O equipamento foi executado e validado com sucesso nos testes preliminares, atendendo os fins para os quais foi projetado. Além do equipamento em si, o programa de computador, responsável pela aquisição e transferência dos dados também foi desenvolvido e testado, exibindo resultados dentro dos padrões desejados.

Palavras chave: Argamassa Expansiva, Agente Demolidor, Ensaio Mecânico, Microcontroladores, Sistema de Aquisição de Dados.

DEVELOPMENT OF A MACHINE FOR EVALUATION OF PRESSURE IN EXPANSIVE CEMENT

ABSTRACT

The correct evaluation of the properties of a material is fundamental to, in the final application, meet all expectative in which they was design. In the development of a expansive cement for ornamental rocks mining, we found the deficiency of machines to measure the expansive pressure originated by the expansive cement in they final application, being that data collected in a stationary state provided by a mechanical structure. Then, we make a project of a machine to meet that expectative. The project was made using the microcontrollers' technology, analogical to digital converters of SAR (successive approximation register), S type load cell, and, for the mechanical structure of the machine and electrical circuitry, we use CAD as tool. The machine was successful made and meets the initial expectative in which they was design, they was tested, with the specifically developed software and both was satisfactory.

Keywords: Expansive Cement, Demolition Agent, Mechanical Tests, Microcontrollers, Data Acquisition Systems

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT.....	iv
SUMÁRIO	vi
Glossário	viii
Índice de Tabelas	x
Índice de Figuras	xi
Lista de Abreviaturas e Símbolos	xiii
Capítulo 1 - Introdução	14
1.1 Objetivos	21
1.1.1 Objetivo Geral.....	21
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 Justificativa	22
1.3 Metodologia	23
1.4 Estrutura do Trabalho.....	25
Capítulo 2 – Argamassa Expansiva	27
2.1 Aplicações.....	27
2.2 Composição Química.....	30
2.3 Utilização em Campo.....	33
2.4 – Ensaio Aplicáveis a Argamassas Expansivas.....	35
2.4.1 Ensaio Gerais de Caracterização	37
2.4.2 Ensaio Mecânicos e Térmicos Específicos Para Argamassas Expansivas... 41	
Capítulo 3 - Equipamento Proposto para Ensaio de Avaliação de Pressão Expansiva... 46	
3.1. Estrutura Mecânica	47
3.2 Corpo de Prova.....	50
3.3 Suportes Mecânicos	52
3.4 Célula de Carga	54
Capítulo 4 – Ensaio de Avaliação de Pressão Expansiva	58
4.1 Definição de Pressão Expansiva	59
4.2 Descrição do Ensaio	59
4.3 Preparação da Amostra	60
4.4 Execução do Ensaio	62
4.5 Tratamento dos Resultados	63
Capítulo 5 - Sistema de Aquisição de Dados	65
5.1 Alimentação	66
5.2 Microcontrolador	67
5.3 Filtragem Digital e Analógica.....	70
5.3.1 – Filtragem Analógica.....	73
5.3.2 – Filtragem Digital	75
5.4 – Amplificação do sinal	75
5.6 Aquisição de dados – Conversores Analógico-Digitais.....	76
5.7 Funcionamento do Equipamento	78

Capítulo 6 – Programa Computacional de Análise de Dados do Equipamento.....	80
6.2 – Funcionalidade	80
6.3 Metodologia do Projeto do Programa Computacional.....	84
6.3.1 – Cenário-Base.....	85
6.3.2 – Aplicação Específica.....	86
6.4 – Arquitetura e Estrutura dos Dados	87
6.5 Recursos Utilizados.....	89
6.5.1 Implementação do Programa	89
6.5.2 – Execução do Programa de Análise dos Dados.....	91
Capítulo 7 – Testes e Resultados do Equipamento	92
7.1 Ensaio com Força Nula	93
7.2 Teste do Sistema Automático de Tara do Equipamento	94
7.3 Ensaio de Adição Sucessiva de Cargas.....	96
7.4 – Ensaio com Argamassa Comercial	98
7.5 – Ensaio com Argamassa Desenvolvida em Laboratório	99
Capítulo 8 – Considerações Finais.....	101
8.1 Conclusões	101
8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros.....	102
8.2.1 Melhorias e Pesquisas Imediatas.....	102
8.2.2 Melhorias e Pesquisas Futuras	103
Referências Bibliográficas	104
Anexo I – Desenhos Técnicos das Principais Partes do Equipamento	107
Anexo II – Principais Algoritmos dos Programas Computacionais	114

Glossário

Banco ou bancada: sistema de exploração mineral em que a extração do material é realizada em degraus devido as condições topográficas.

Beneficiamento ou tratamento: processamento da substância mineral extraída, preparando-a com vistas à sua utilização industrial posterior.

CAD (Computer Aided Design): Conjunto de técnicas e programas de computador dedicados a projetos e simulações de equipamentos com o uso da informática.

CLOCK – Responsável pelo o sinal de partida para o microcontrolador e é obtido a partir de um componente externo chamado “oscilador”. Se considerar que um microcontrolador era um relógio de sala, o nosso “clock” corresponderia ao pêndulo e emitiria um ruído correspondente ao deslocar do pêndulo.

CMRR (Common Rejection Ratio) – Tendência de um dispositivo de rejeitar o mesmo sinal de entrada comum a duas conexões.

Código Fonte: Transcrição textual, com base em padrões pré-estabelecidos, de comandos a serem executados em função de uma ação anterior, sistêmica ou humana, utilizada como base para o processamento e conversão em linguagem de máquina por compiladores ou interpretadores.

CPU (Central Processing Unit) – Processador principal de informações de um microcontrolador ou computador comum, responsável principalmente por tarefas de processamento de dados e manipulação de informações.

DSP (Digital Sampling Processor) – Processador dedicado ao processamento de sinais analógicos na conversão em dados digitais. Normalmente inclui ferramentas de filtragem e condicionamento do sinal.

EMI (Electromagnetic Interference) – Interferências causadas em circuitos eletrônicos por campos eletromagnéticos originados de equipamentos elétricos próximos (motores, servo acionadores, etc.)

Interface Homem-Máquina (IHM) – Definição genérica para mecanismos de interação entre usuários e equipamentos ou programas, sejam estes mecanismos de entrada ou saída de informação.

Linguagem Interpretada de Programação: Linguagens de programação que utilizam código fonte sem a transformação prévia em linguagem de máquina, facilitando a alteração e a leitura direta do código fonte.

Mina: é a jazida mineral em fase de lavra, abrangendo a própria e as instalações de extração, beneficiamento e apoio.

Mineral: é toda substância natural formada por processos inorgânicos e que possui composição química definida. O mineral não significa somente matéria sólida, pois água e mercúrios em temperatura ambientes são líquidos.

Potencial mineral: áreas e regiões nas quais ocorrem reservas minerais que indicam a possibilidade de sua exploração.

Rocha: é um agregado de uma ou mais espécies de minerais constituindo unidades definidas da crosta terrestre. Rocha simples é aquela constituída de um único mineral; rocha composta é a constituída de vários minerais como o granito, composto basicamente de quartzo, feldspato, mica e outros minerais secundários.

SAR (*successive approximation register*): Tecnologia de conversão de informações analógicas em digitais através de sucessivas amostragens do sinal, comparando o resultado de cada amostragem com padrões pré-definidos e cada vez mais próximos.

Software Livre: Conjunto de programas computacionais, sistemas e metodologias oferecidas sem custo para o usuário.

USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) - Formato padrão para comunicação de dados de forma serial. Em forma assíncrona, dois fios são usados para transmitir dados, um em cada direção, em regime full-duplex, ou seja, totalmente bi-direcional. Para isso, cada dispositivo deve ter seu clock, e as velocidades devem ser iguais. Em forma síncrona, uma ponta é mestre e a outra escravo. Um fio é utilizado para dados, em regime half-duplex, ou seja, nos dois sentidos, mas um sentido de cada vez. O outro fio é usado para pulsos de clock emitidos pelo dispositivo mestre.

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Cargas de Rompimento de Rochas Comuns (ROGERTEC, 2005) .	29
Tabela 2 - Consumo de Argamassa Expansiva (ROGERTEC, 2006)	34
Tabela 3 - Composição obtida pela análise química da argamassa expansiva (CUNHA, 2005).....	38
Tabela 4 - Tempo versus Pressão de Expansão Gerada pelo Bristar - 100s (HANIF e AL-MAGHRABI, 2006).....	42
Tabela 5 - Características Principais da Célula de Carga.....	57
Tabela 6 - Dicionário de Dados do Banco de Dados de Ensaio	89
Tabela 7 - Plataformas de Hardware Utilizadas nos Testes Preliminares do Programa	91
Tabela 8 – Sistemas Operacionais Utilizados nos Testes Preliminares do Programa	91

Índice de Figuras

Figura 1 - Distribuição da produção mineral por regiões (DNPM, 2006).....	14
Figura 2 - Oedômetro (CSIC, 2007).....	20
Figura 3 - Material Desagregado por Bancada (ARAUJO NETO, 2006).....	28
Figura 4 - Estruturas Cristalinas do Óxido de Cálcio e do Hidróxido de Cálcio (WEBMINERALS, 2007).....	32
Figura 5 - Execução de furos na rocha com martetele hidráulico (ARAUJO NETO, 2006).....	35
Figura 6 - Gráfico da Análise Térmica Diferencial (DTA) (CUNHA, 2005).....	39
Figura 7 - Gráfico da Análise termogravimétrica (ATG) (CUNHA, 2005).....	40
Figura 8 - Imagem por microscopia eletrônica de grânulos da argamassa expansiva (aumento de 1100 vezes e metalização por carbono) (LUZ, BALAREZO, PEREIRA, 2003).....	40
Figura 9 - Posição dos Furos e dos Transdutores de Pressão no Bloco de Granito (HANIF e AL-MAGHRABI, 2006).....	42
Figura 10 - Deformação x Tempo para Transdutores de Pressão no Bloco de Granito (HANIF e AL-MAGHRABI, 2006).....	43
Figura 11 - Posição do Transdutor de Pressão e dos Termopares no Furo.....	44
Figura 12 - Mudanças na Pressão Expansiva, Temperatura e Contagem de Pontos de Emissão Acústica em Função do Tempo.....	44
Figura 13 - Pontos de Emissão Acústica ao Longo do Tempo.....	45
Figura 14 - Diagrama de Blocos do Equipamento.....	46
Figura 15 - Estrutura Mecânica do Equipamento em CAD.....	48
Figura 16 - Equipamento nas Etapas Iniciais de Produção. No canto superior direito, motor utilizado no projeto, no inferior direito, detalhe do parafuso sem fim.....	49
Figura 17 - Estrutura Mecânica Final do Equipamento.....	50
Figura 18 - Parte Central do Corpo de Prova em CAD.....	51
Figura 19 - Projeto da Parte Inferior e Superior do Corpo de Prova em CAD. A Direita, Corpo de Prova Montado.....	52
Figura 20 - A direita, parafuso duplo de sustentação da célula de carga, no centro suporte inferior, a direita, botão de carga.....	53
Figura 21 - Peças prontas para o corpo de prova. À direita sup., corpo de prova montado com a célula de carga. Na parte inferior, pino de limpeza no centro do corpo de prova.....	53
Figura 22 - Temperaturas e Umidades Médias Anuais do Brasil (INMET, 1990).....	59
Figura 23 - Corpo de Prova Sendo Preenchido com Argamassa Expansiva.....	61
Figura 24 - Ensaio Preparado para Execução, com análise de Temperatura na Parte Central do Molde.....	62
Figura 25 - Diagrama de Blocos do Circuito Eletrônico.....	65
Figura 26 - Simulação em Matriz de Contatos de Circuito Eletrônico de Aquisição de Dados.....	66
Figura 27 - Esquema Elétrico da Fonte de Alimentação.....	66
Figura 28 - Microcontrolador PIC Modelo 16F877 (MICROCHIP, 2001).....	69

Figura 29 - Esquema Elétrico do Filtro Ativo Usado no Equipamento	74
Figura 30 - Resposta de Freqüência do Filtro Ativo	74
Figura 31 - Esquema Elétrico do Amplificador Utilizado.....	76
Figura 32 - Fluxograma de Uso do Equipamento	78
Figura 33-Operação do programa para um ensaio não cadastrado ou um novo ensaio.....	81
Figura 34 - Fluxo de Dados do Programa.....	82
Figura 35 - Formato do Arquivo de Dados Temporário	82
Figura 36 - Arquivamento dos Ensaio no Banco de Dados	83
Figura 37 - Classes e Hierarquia	86
Figura 38 - Diagrama de Blocos do Programa.....	87
Figura 39 - Tela Principal do Programa Computacional de Tratamento dos Dados	87
Figura 40 - Arquitetura do Programa de Análise dos Dados	88
Figura 41 - Relacionamento Entre as Principais Tabelas do Banco de Dados	88
Figura 42 - Ensaio de Peso de 5Kg	92
Figura 43 - Pesos Padronizados Usados Nos Testes do Equipamento	93
Figura 44 - Gráfico Resultante do Ensaio de Peso Nulo.....	94
Figura 45 - Ensaio de Tara com 25Kg e Adição de 5Kg.....	95
Figura 46 - Ensaio de Tara com 25Kg e Adição de 50Kg	96
Figura 47 - Ensaio de Adição Sucessiva de Pesos.....	97
Figura 48 - Ensaio de Oscilação Livre de Carga	97
Figura 49 - Resultado do Ensaio de Pressão para a Argamassa Comercial.....	98
Figura 50 - Resultado do Ensaio de Pressão para a Argamassa Laboratorial	100

Lista de Abreviaturas e Símbolos

A	Área de seção transversal do condutor.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
d	Diâmetro do furo do corpo de prova (m)
DTA	Análise Térmica Diferencial
e_t	Deformação transversal (ou lateral) do condutor.
F	Força gerada pela argamassa expansiva (Kgf)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
ISO	International Standardization Organization
K	Constante correspondente ao ganho do filtro digital
L	Comprimento do condutor
NBR	Norma Brasileira Registrada
P	Pressão gerada pela argamassa expansiva ($Pa=Kgf/m^2$)
r	Resistividade do condutor (também chamada de resistência específica, isto é, uma propriedade do material do condutor);
SAE	Society of Automotive Engineers
x_n	Sinal de entrada coletado em um instante n
y_n	Sinal de saída do filtro digital
z^n	Operador equivalente a n leituras anteriores

Capítulo 1 - Introdução

O mercado internacional tem dado uma crescente importância às rochas ornamentais, particularmente aos mármore e granitos. As aplicações destas rochas são as mais variadas, indo desde a construção civil, cerca de 60% do mercado brasileiro de rochas ornamentais em 2005, até a ornamentação (DNPM, 2006). Conseqüentemente, têm-se observados crescentes investimentos em tecnologia aplicada à extração e manipulação destes minerais.

O potencial geológico brasileiro tem favorecido a produção mineral da nação, devido a sua riqueza e diversidade em rochas. O Brasil detém uma reserva medida de rocha correspondente ao volume de 20,6 bilhões de metros cúbicos para mais de 500 variedades de materiais ornamentais, tendo sido explorados, em 2005, um milhão de metros cúbicos. O Brasil já é um importante produtor mundial de mármore e granitos, representando 4,8% da produção mundial dessas rochas. Adicionando-se a produção de ardósias e outras rochas, a produção nacional atinge cerca de 6,4 milhões de toneladas por ano, dos quais 2,15 milhões foi exportado. As suas exportações têm sido crescentes, atingindo cerca de US\$ 789,97 milhões em 2005 (DNPM, 2006). Uma das rochas mais exigidas no mercado é o granito e este é responsável por 60% dessa mesma produção nacional (CHIODI FILHO, 2002 e BNDES, 2003).

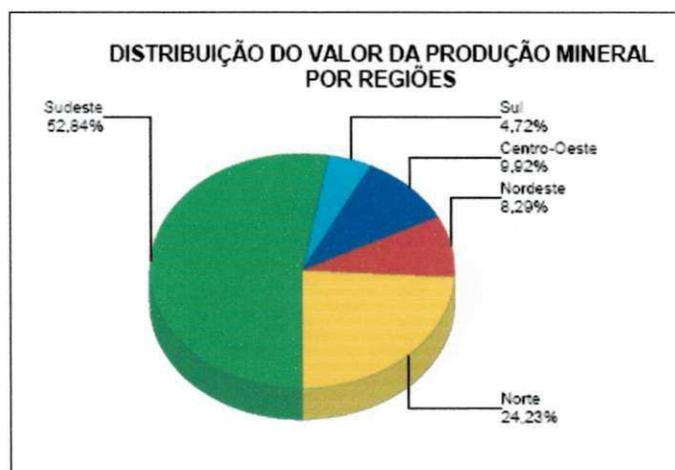


Figura 1 - Distribuição da produção mineral por regiões (DNPM, 2006).

Na Figura 1, pode-se ver que a região nordeste ocupa o quarto lugar na produção nacional de minérios com 8,29%, estando a região sudeste em primeiro com 52,84%. Segundo Vale (1997), ao se analisar a indústria de rochas ornamentais e de revestimento no contexto da realidade econômica e social da Região Nordeste, uma série de vetores se pronuncia, qualificando-a como estratégica para a consolidação de um processo auto-sustentável de desenvolvimento econômico e social da Região. Dentre esses aspectos destacam-se:

- A extensão geográfica das áreas geologicamente favoráveis à ocorrência de rochas ornamentais na região Nordeste, o que eleva a indústria de rochas ornamentais à categoria de reconhecida vocação regional;
- A grande diversidade de rochas com cores, padrões e texturas diversas, principalmente nos Estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Ceará, Pernambuco e Bahia, com forte apelo comercial frente às necessidades do mercado internacional e, portanto, grande capacidade de geração de divisas;
- A significativa interseção geográfica entre as áreas de maior potencial geológico e a extensa região do semi-árido, caracterizada pela adversidade climática e pela carência de alternativas econômicas mais perenes, sugerindo uma expressiva sinergia econômica e social com o setor em estudo, à luz dos seculares desafios impostos ao desenvolvimento da Região;
- O perfil técnico-econômico do setor, receptivo à implementação de pequenas e médias unidades produtivas ao longo de toda uma cadeia industrial, favorecendo, inclusive, uma imobilização gradual de recursos, a partir de uma conceituação modular para os projetos;
- No contexto da criação de empregos estáveis, como política estrutural de combate à miséria da Região, a indústria de rochas ornamentais e de revestimento apresenta distintas vantagens (socialmente) competitivas, ao acomodar espaço para a implementação de programas.

Os granitos da Região Nordeste são exclusivos e de formação geológica específica, por exemplo, pegmatitos, predominando maciço rochoso, cujo método de lavra é de custo alto. Contudo, essa raridade de granito dessa região brasileira tem grande aceitação internacional, conseguindo agregar valor comercial ao produto. Conseqüentemente, deve-se empregar tecnologia avançada, que melhore os processos produtivos em qualidade e quantidade.

A produção mundial de rochas para ornamentação e revestimento é de aproximadamente 83 milhões de toneladas por ano, incluindo o mercado de rochas processadas. A China, Itália e Índia, lideram a lista dos principais produtores e exportadores mundiais, seguidos do Brasil e da Espanha. Estima-se que o setor movimente 40 bilhões de dólares por ano, incluindo-se as transações do mercado internacional e dos mercados internos dos países produtores, bem como a comercialização de máquinas, equipamentos, insumos e serviços. A previsão é de que a produção mundial atinja os 320 milhões de toneladas por ano até 2025, multiplicando as atuais transações internacionais por oito (DNPM, 2006).

No cenário mundial de rochas ornamentais os países atuantes no mercado integram três grupos que exercem papéis característicos: aqueles predominantemente produtores, sobretudo de material bruto (no qual inclui-se o Brasil), aqueles predominantemente consumidores com grande potencial em importar produtos acabados e aqueles produtores e consumidores com tradição formal no setor de rochas ornamentais e historicamente exportadores de produtos, em geral, beneficiados.

A extração de rochas inicia-se com o desmonte em pedreiras, sendo depois desta, realizadas intensivas atividades de beneficiamento que variam em custo, tempo e métodos dependendo da rocha em questão (ARAUJO NETO, 2006). No caso de rochas ornamentais como o granito e o mármore, essa é uma etapa crucial no processo de extração, pois ela definirá de maneira marcante o aproveitamento posterior da rocha.

A argamassa expansiva é um agente de demolição não explosivo cuja aplicação mais comum é o desmonte de rochas ornamentais, podendo ainda

ser utilizada no desmonte de concreto e de outras rochas, sendo o fator limitante a resistência mecânica da rocha em questão.

O desmonte da rocha, feito com o uso da argamassa expansiva, se inicia com a execução de furos no bloco rochoso, ao longo da linha de corte, normalmente a uma profundidade de, pelo menos, 80% da altura da rocha. O espaçamento e o diâmetro dos furos variam de acordo com as especificações dos fabricantes, estando o diâmetro normalmente entre 30 e 40mm e a distância entre os furos de 40 a 80cm.

Depois de executadas, as perfurações são preenchidas com argamassa expansiva, já preparada previamente, normalmente em uma proporção de 30 a 40% em peso de água. Após isso, aguarda-se o período de desmonte, que ocorre devido a expansão da argamassa, período este normalmente entre 4 e 10 horas após a sua aplicação.

Inúmeras são as vantagens da utilização de argamassa expansiva para lavra, pois é necessário um mínimo de perfurações na rocha, além de não provocar impacto ambiental e ser de simples aplicação não necessitando assim de mão-de-obra qualificada. Outra vantagem importante é a resposta no corte, resultando em cortes lineares e sem microfissuras, contribuindo para o melhor aproveitamento e acabamento dos blocos de granito. O uso de explosivos muitas vezes não obtém tal definição e irregularidades, microfissuras e perdas são comuns nos blocos de rocha.

Na argamassa expansiva tem-se ausência de agentes químicos ou mecânicos complexos, ao contrário de explosivos e outros métodos de corte encontrado em lavras de rochas. Esta ausência torna o processo mais limpo, seguro e simples de ser executado, mesmo por operadores com menores conhecimentos técnicos, o que é impraticável no caso de explosivos.

Em termos ambientais, pode-se citar como vantagens a menor emissão de gases, poeiras e resíduos durante o processo de desmonte, aliado a isto, tem-se um melhor aproveitamento da rocha e menores dificuldades em manter a continuidade do maciço rochoso submetido ao corte. Uma outra vantagem marcante no uso da argamassa expansiva é a baixa emissão de ruídos durante o processo de demolição da rocha, o que é particularmente interessante no

caso de demolições de rocha em áreas residenciais ou com restrições ambientais particulares.

Dois fatores negativos marcantes no uso da argamassa expansiva são o tempo de desmonte e o custo da argamassa. No caso do uso de explosivos, tem-se um desmonte imediato da rocha após a preparação para o processo, embora deve-se levar em conta as interrupções necessárias por medida de segurança, já usando fios diamantados, tem-se um corte um pouco mais lento, mas ainda muito mais rápido do que o período de 4 a 10 horas consumidas no corte com argamassa expansiva, podendo este período alcançar as 24 horas, dependendo da resistência do material a ser demolido.

O custo da argamassa expansiva é um outro fator limitante ao seu uso extensivo, sendo ainda agravado pela necessidade de importação, já que não se tem uma argamassa expansiva nacional em produção comercial. Neste sentido, tem sido crescente o interesse em pesquisas para melhor aproveitamento do uso da argamassa e, no caso do Brasil, no desenvolvimento de uma argamassa nacional com um custo mais compatível com a realidade do país.

Outro fator importante a respeito da argamassa expansiva é a ausência de ensaios qualificadores e quantificadores das propriedades químicas e físicas destes agentes de desmonte de rochas. Não foram encontradas normas da ABNT aplicadas diretamente a argamassas expansivas, nem tampouco na ISO. Verificou-se também que os dados fornecidos pelas empresas a respeito de suas argamassas comerciais foram obtidos a partir de ensaios não padronizados, tendo assim a sua utilização comparativa limitada a uma base teórica.

De acordo com os dados obtidos dos fabricantes, que se tomam como referência, tem-se que o início da reação da argamassa expansiva ocorrendo de 15 a 30 minutos após a adição de água e que a pressão expansiva seja superior a 7.000 ton/m^2 para um período de tempo de no máximo 30 horas após a aplicação no furo.

Em um processo de desenvolvimento de uma argamassa expansiva, ensaios adequados, conduzidos de maneira padronizada são fundamentais

para a correta avaliação do produto em desenvolvimento, sendo utilizados também, a partir da aplicação na caracterização de argamassas expansivas de uso comum, como uma fonte de dados confiáveis para fins comparativos.

No caso específico da qualificação de uma determinada argamassa para uso como agente de desmonte de rochas, o principal parâmetro a ser aferido é a carga exercida pelo material ao longo do processo de expansão, seguido deste parâmetro, tem-se a necessidade da avaliação do início da reação, conhecido no meio industrial como “tempo de pega”, e finalmente o comportamento da argamassa após desmonte. É importante também ter conhecimento do comportamento da argamassa ao longo do tempo, dados de pressão expansiva em função do tempo de aplicação podem servir de base para cálculos de tempo aproximado de desmonte.

Em projeto financiado pelo BNB/FUNDECI para desenvolvimento de argamassas expansivas com o uso de minerais regionais do Nordeste do Brasil, verificou-se que o ensaio proposto para a medida de pressão de expansão de argamassas expansivas, usando um equipamento chamado oedômetro (Figura 2), não se mostrou adequado para esta medida. Este equipamento, utilizado na medida de compactação de solos, impõe uma carga para compensar uma expansão prévia de volume do solo após a absorção de uma determinada quantidade de água, o que, no caso da argamassa expansiva, se torna inexecutável, uma vez que, após a expansão, a argamassa expansiva não retorna as suas dimensões anteriores. Isto ocorre devido à natureza química da expansão da argamassa, em contraposição a expansão puramente física de um determinado solo em contato com certa quantidade de água.



Figura 2 - Oedômetro (CSIC, 2007)

Considerando estes pontos, propõe-se, neste trabalho, o desenvolvimento de um equipamento como alternativa mais viável economicamente, mais maleável e completa para a avaliação da pressão exercida pelas argamassas expansivas durante o seu uso.

Os limitantes dos equipamentos e das metodologias existentes atualmente são resumidos em função da forma com que a argamassa se comporta. Tem-se por um lado o tempo que a argamassa utiliza na sua reação, cerca de 30 horas, e por outro, a carga que a argamassa impõe, tanto por questões de dimensões, como ser efetivada de forma estática, ou seja, para ser avaliada adequadamente, tem-se a necessidade de um equipamento que imponha um estado estático e execute o ensaio no tempo adequado ao material em questão.

Um equipamento que atenda as necessidades dos ensaios a serem aplicados na argamassa expansiva se classificaria como um instrumento de medição de força. Como tal, ele é tipicamente construído a partir de uma estrutura de leitura dos dados, ou seja uma célula de carga e uma estrutura mecânica que imponha um determinado estado físico dinâmico ou estático ao

material a ser ensaiado.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um equipamento de ensaio com o objetivo de atender as demandas específicas da avaliação de qualidade de argamassas expansivas, principalmente no que diz respeito à carga originada durante o processo de expansão.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Projetar e executar estrutura física da máquina de ensaio;
2. Projetar e executar os moldes para a acomodação da argamassa expansiva para as medidas de pressão;
3. Projetar e executar estrutura eletrônica para obtenção e processamento dos dados do ensaio;
4. Desenvolver programa compatível com o equipamento para análise dos dados;
5. Validar a máquina e a metodologia de ensaio proposta com argamassas expansivas comerciais e preparadas em laboratório;
6. Medir a carga exercida pela argamassa expansiva, de forma estática, ao longo de um tempo de ensaio de, pelo menos, 24 horas, variando entre 2 a 2000 Kgf;
7. Possibilitar medidas de temperatura da argamassa durante o ensaio, em espaçamentos iguais dentro do corpo de prova. As temperaturas em questão se elevam pouco acima da temperatura ambiente, assim podem-se utilizar sensores comerciais de baixo custo que permitem avaliação entre -10 e 150°C.

1.2 Justificativa

A avaliação correta das propriedades de um determinado material é fundamental para que, na sua aplicação final, o seu desempenho atenda a todas as expectativas para as quais ele foi projetado (SILVA, 2006). Dentro desta perspectiva, pode-se verificar a grande importância dos ensaios aplicáveis a um determinado fim, seja na mínima necessidade de qualificação de um determinado produto e até mesmo na determinação de seu comportamento em condições finais de uso.

Além da necessidade da aplicação de ensaios a maioria dos produtos industriais, tem-se a prerrogativa de que esses ensaios sejam válidos, gerando dados que reflitam o seu comportamento, da forma mais aproximada possível, no seu uso, reproduzindo na sua metodologia as condições de forma aproximada àquelas encontradas no ambiente onde ele será aplicado.

Um fator a ser levado em conta neste momento é a capacidade de carga a ser suportada pelo aparelho de ensaio. Máquinas de ensaio de tração/compressão comuns no mercado têm as mais variadas capacidades, de acordo com a finalidade, por exemplo, máquinas para ensaios de tração em metais são mais resistentes e robustas do que aquelas utilizadas na avaliação de embalagens plásticas nos mesmos fatores. Neste projeto, o objeto da análise exige uma relativa alta capacidade de carga, podendo atingir 8000 toneladas por metro quadrado. Como o invólucro para o corpo de prova comporta uma quantidade pequena de massa, cerca de 20 gramas, e tem um volume e uma área superficial muito pequena (um círculo com $0,785 \text{ cm}^2$ de área), tem-se uma carga mais moderada a ser aplicada, que varia entre 2 e 2000kgf.

Outro ponto relevante é a reprodutibilidade do ensaio, deve-se prover o máximo de informações e características à metodologia de modo a torná-la amplamente reprodutível, gerando dados idênticos em condições e variáveis idênticas. Neste fim, tem-se inclusive a validação de um ensaio, os ensaios

onde não se consegue obter, ao menos de forma aproximada, as mesmas informações, mantidas as características ao longo de sua execução, não podem ser consideradas instrumento de avaliação e comparação entre produtos ou qualquer outro fim deste ensaio.

No caso específico da argamassa expansiva, tem-se um material com pouquíssimas referências além dos próprios catálogos de seus fabricantes, limitando-se estes a dados genéricos e de pouca precisão obtidos de maneira informal. Assim, estes dados só podem vagamente ser utilizados como material comparativo.

Partindo-se do anteriormente exposto, propõe-se um novo método e um novo equipamento que venha suprir essa lacuna, no que diz respeito à avaliação da principal variável das argamassas expansivas durante a sua aplicação que é a pressão de expansão que ela exerce, ao longo do tempo, na rocha que deve desmontar.

Na mesma linha de desenvolvimento, propõe-se como parte anexa ao ensaio de pressão expansiva, a avaliação da temperatura ao longo do corpo de prova desenvolvido para o ensaio. Estas variáveis, aliadas aos dados de carga, podem nos dar informações importantes sobre as alterações químicas e a cinética das reações geradoras da alteração volumétrica responsável pela pressão expansiva da argamassa.

A partir do desenvolvimento desta metodologia, pode-se estabelecer um padrão confiável para obtenção de dados qualificadores e quantificadores de argamassas expansivas, servindo de instrumento tanto para a comparação entre produtos já comerciais como na geração de informações para a validação de argamassas em desenvolvimento.

1.3 Metodologia

O primeiro passo do trabalho foi uma pesquisa detalhada da argamassa expansiva com relação às suas características físico-químicas e questões

operacionais. Nesta pesquisa também se procurou por metodologias de ensaio direcionadas especificamente para argamassas expansivas.

A partir das informações obtidas sobre a argamassa, estabeleceram-se os princípios básicos nos quais a metodologia de ensaio e o equipamento deveriam ser desenvolvidos. As informações gerais sobre tempo de ensaio e valores teóricos iniciais também foram estipulados nesta etapa.

Depois das definições das linhas gerais do ensaio, procurou-se por equipamentos que pudessem atender a estas características, neste intuito, a primeira tentativa foi feita com um oedômetro, instrumento utilizado na construção civil para medição de expansibilidade de solos. Após alguns testes iniciais, o princípio operacional do equipamento se mostrou ineficaz no caso da argamassa expansiva. Foram buscados outros equipamentos, mas nenhum foi encontrado que atendesse as características necessárias e adequadas a metodologia.

Assim, direcionaram-se esforços para o desenvolvimento de um equipamento específico para este ensaio, utilizando padrões aplicados a ensaios mecânicos de fins similares.

O desenvolvimento do equipamento seguiu três etapas distintas:

1. Desenvolvimento da estrutura mecânica responsável pelo estado físico estático definido pelo ensaio;
2. Desenvolvimento do molde a ser aplicado no ensaio permitindo avaliações de temperatura e condutividade;
3. Desenvolvimento da estrutura eletrônica de obtenção e processamento dos dados obtidos pelo equipamento.

A partir do desenvolvimento do equipamento, iniciou-se o desenvolvimento do programa computacional de análise dos dados, utilizando plataforma livre e com recursos direcionados especificamente a avaliação da argamassa expansiva.

Concluídas as etapas de desenvolvimento do equipamento e do programa computacional, procurou-se executar uma série de ensaios para validação da metodologia de ensaio e da máquina desenvolvida. Os dados

obtidos foram comparados entre si, para avaliação da reprodutibilidade, e com valores obtidos na literatura, tanto de trabalhos científicos quanto de catálogos de fabricantes.

1.4 Estrutura do Trabalho

A dissertação está estruturada em oito capítulos, sendo este o *primeiro* relativo à introdução, que contém a importância do estudo, o objetivo que buscou atingir, a justificativa para a abordagem do tema, a metodologia utilizada e a estruturação do trabalho.

O segundo capítulo trata das argamassas expansivas, contemplando aplicações, definições, composição química, métodos de avaliação e fatores que influenciam as suas propriedades. Além disto, cita-se de forma resumida a metodologia de sua aplicação em campo. São tratados também os ensaios aplicáveis a argamassas expansivas, citando-se os principais parâmetros a serem avaliados na qualificação destas argamassas e quais os ensaios que podem originar estes dados.

No terceiro capítulo descreve-se o ensaio padronizado utilizado por este trabalho para a avaliação da carga originada pela argamassa durante a sua expansão. Também se descrevem como se pode obter, durante o ensaio de avaliação de carga, dados de temperatura.

A máquina de ensaio de carga estática proposta é descrita no quarto capítulo. Descreve-se detalhadamente a sua estrutura mecânica, o modo de operação e as suas características gerais. Detalha-se também o molde desenvolvido para o ensaio, citando as suas características operacionais e dados técnicos.

O capítulo quinto trata do sistema de aquisição de dados desenvolvido para o ensaio. Nesta seção descreve-se a parte eletrônica do equipamento, a célula de carga responsável pela leitura de força, os mecanismos utilizados no tratamento do sinal obtido, o *programa computacional básico* utilizado no seu

microcontrolador e a comunicação do equipamento com um computador através de uma *interface serial*.

O programa computacional desenvolvido para a manipulação dos dados obtidos no ensaio de avaliação de carga é descrito no capítulo seis. Faz-se um resumo da metodologia de desenvolvimento, das suas características operacionais básicas e descrevem-se os procedimentos estatísticos empregados nestes dados.

No sétimo capítulo são apresentados e discutidos os dados obtidos nos ensaios de validação do ensaio de carga e do equipamento, utilizando como parâmetros comparativos dados obtidos a partir de catálogos e trabalhos científicos relacionados com o tema.

O oitavo capítulo apresenta as considerações finais desta dissertação, onde são feitas reflexões sobre o alcance dos objetivos estabelecidos, a contribuição para a indústria de rochas ornamentais, bem como a necessidade da continuidade dos trabalhos sobre ensaios aplicados a argamassas expansivas. Apresentou-se também, neste capítulo, sugestões relevantes para posteriores pesquisas de médio e longo prazo observadas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

Inclui-se também um glossário, dedicado à definição de alguns termos empregados neste texto. Para este fim, disponibiliza-se, além da definição comum, nos casos específicos de termos empregados de forma diferenciada, a sua correta interpretação no escopo desta dissertação.

No final deste texto, incluem-se apêndices com desenhos técnicos do equipamento e os principais algoritmos utilizados nos programas computacionais.

Capítulo 2 – Argamassa Expansiva

Chama-se argamassa (pré-lat. arga + latim massa) à mistura feita com cal, saibro e água, utilizada em alvenaria. Modernamente são constituídas por cimento, areia, água e, em alguns casos, outro material como cal, saibro, barro, caulim, e outros. (WIKIPEDIA, 2007).

No caso específico da argamassa expansiva utilizada para desmonte, tem-se uma mistura de cal, normalmente em torno de 60%, com outros agentes minerais como óxido de alumínio, óxido de ferro, sílica e orgânicos, tanto como cargas inertes, como ativas no retardo da reação de hidratação da cal.

A argamassa expansiva se apresenta como um pó cinza ou branco, com densidade de 3,2 kg/l, inodoro e com área específica em torno de 3000cm²/g. É praticamente insolúvel em água e tem ponto de fusão acima de 1000°C. Por ser altamente alcalino, (pH em torno de 13 em uma solução de 10g/l de H₂O) é considerado um material corrosivo (ROGERTEC, 2005). Estes valores variam levemente de acordo com o fabricante da argamassa e da faixa de temperatura para a qual foi projetada.

O contato com a água provoca uma reação do óxido de cálcio com a água, originando hidróxido de cálcio, com um aumento de volume de 96% e com geração de calor. Esta alteração volumétrica é a responsável pela carga originada na expansão da argamassa.

2.1 Aplicações

A aplicação mais extensiva da argamassa expansiva está relacionada com a extração de rochas ornamentais. A principal vantagem da argamassa expansiva para este fim é o controle do corte no maciço rochoso, além deste controle preciso, têm-se poucas fissuras fora da zona de corte, o que aumenta a quantidade e melhora qualidade da matéria prima produzida, parâmetros cruciais na exploração de rochas ornamentais.

O mercado internacional tem dado uma crescente importância às rochas ornamentais, particularmente aos mármore e granitos. As aplicações destas rochas são as mais variadas, indo desde a própria ornamentação até a construção civil. Conseqüentemente, têm se observado crescentes investimentos em tecnologia aplicada à extração e manipulação destes minerais.

Os principais métodos de lavra de rochas ornamentais são as por bancadas como mostrado na Figura 3, por painéis verticais, por desmoronamento, seletiva, de matacões e lavra subterrânea. Nesses métodos tem sido utilizada a tecnologia de argamassa expansiva, com exceção da lavra de matacões que podem usar métodos simples e conduzido através de mão-de-obra pouco especializada (CUNHA, 2003).



Figura 3 - Material Desagregado por Bancada (ARAUJO NETO, 2006)

A argamassa expansiva é um produto utilizado em larga escala em pedreiras de granito e mármore para corte de rocha. Seu efeito expansivo de 7000 toneladas por metro quadrado resulta em corte linear, sem a necessidade de uso de explosivos, rompedores, cunhas, fios diamantados ou outros métodos de corte. A força necessária para o desmonte de rochas ornamentais comuns está mostrada na Tabela 1. Como se pode aferir, a argamassa se qualifica para o desmonte de qualquer uma destas rochas. Seu alto poder

expansivo permite cortes na vertical e horizontal, em blocos soltos, em bancadas ou em pranchas.

Tabela 1 - Cargas de Rompimento de Rochas Comuns (ROGERTEC, 2005)

<i>Rocha</i>	Carga de Rompimento
Granito	150 ton/m ²
Concreto	300 ton/m ²
Arenito	750 ton/m ²
Dolomita	1000 ton/m ²
Calcário	1200 ton/m ²
Mármore	1400 ton/m ²
Gnaiss	1800 ton/m ²

Grandes produtores de rocha ornamental no Brasil já utilizam argamassa expansiva com grande aumento de produção e melhor custo/benefício. Além disto, a argamassa é muito utilizada para desmonte de rocha em áreas urbanas, onde o uso do explosivo é proibitivo. Também é largamente utilizada em rompimento de concreto para obras civis, corte de pilares, pontes, valas, vigas etc.

O consumo unitário de material expansivo fica em torno de 80 kg/m³, para desmonte industrial em pedreiras (ARAUJO NETO, 2006). Estima-se o custo operacional de aproximadamente US\$ 16.00/m², para aplicação industrial em pedreiras de rochas ornamentais.

Os outros métodos comumente usados para cortes de blocos de grandes dimensões com um aproveitamento adequado da rocha são o corte com maçarico, fio diamantado, fio helicoidal e explosivos. Cada um destes com vantagens e desvantagens, sejam energéticas e da demanda de operadores qualificados no caso de fio adiamantado e fio helicoidal ou de restrições ambientais como barulho e segurança no caso de explosivos.

As vantagens de seu emprego, citadas nos catálogos (por exemplo, FRACT-AG e DEMOX), em relação ao uso de explosivos, são: não requer permissão especial para seu manejo; não há vibrações, explosões ou

emanação de gases; não há poluição acústica; obtém-se ganho de recuperação, pois há minimização de microfissuras interiores ao maciço.

O principal fator limitante ao uso extensivo da argamassa expansiva é o seu custo. No Brasil, não se tem ainda a produção em escala industrial, sendo toda a matéria-prima importada. Em consequência disto, tem-se estudos no sentido do melhor aproveitamento da argamassa e também no sentido de desenvolver uma argamassa expansiva nacional.

Além da aplicação em rochas, a argamassa expansiva também é amplamente utilizada em demolição e corte de concreto. Neste campo, a argamassa também apresenta uma série de vantagens amplamente desejadas, como a menor emissão de poeira, e, principalmente, a menor poluição sonora, característica fundamental para determinadas situações urbanas.

As principais empresas que fabricam argamassas expansivas estão situadas na Itália e Espanha, por isso nesses países o seu uso é mais acentuado. O Brasil importa, principalmente desses dois países, cerca de 110 toneladas por mês de argamassa expansiva, gerando um déficit na balança comercial mensal de aproximadamente US\$ 100.000,00 (CUNHA, 2005).

2.2 Composição Química

A argamassa expansiva é um agente de desmonte de rochas não explosivo, em pó, cujo componente majoritário é a cal virgem. Em contacto com água, iniciam-se reações de hidratação, com aumento de volume durante o progresso dessas reações, promovendo, quando em confinamento, grandes pressões sobre as paredes confinantes, as quais chegam aproximadamente a 78 MPa. Essas tensões geram fissuras no meio confinante (rocha), cuja magnitude e direção vão depender do balanço de esforços atuantes no referido meio.

Shiro Ishi (2006) informa que uma argamassa expansiva comercial é composta de cal, argila e gesso misturados em proporções determinadas.

Essa mistura é calcinada em forno rotatório a 1500°C. A massa resultante é então triturada até atingir 2000 a 3000cm²/g de área específica dos grãos.

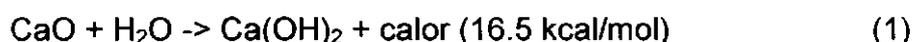
Segundo Kawano et al. (1982) essas argamassas são preparadas pela pulverização de um clínquer obtido principalmente pela mistura de óxidos de cálcio, óxidos de silício (SiO₂) e sulfato de cálcio (CaSO₄). No entanto, Miki et al. (1970) substituiu o SiO₂ pelo Al₂O₃. Também estão presentes outros tipos de óxidos, como o de ferro e magnésio em menores quantidades. Deve-se calcinar o clínquer a alta temperatura, entre 1350 e 1550 °C.

De acordo com MOYER et al. (1980) também é formado o clínquer de uma mistura, onde ele destaca o uso de óxido de cálcio (80 – 95%), cimento portland, hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) e carbonato de cálcio (CaCO₃). Já conforme Rice et. al. (1983) o clínquer consiste em CaO, Al₂O₃ e CaSO₄, que depois de pulverizado é acrescido de cimento portland e gesso.

Segundo Suzukawa et. al. (1984) o clínquer é obtido na temperatura de 1000 a 1400°C e contém CaO (60%), CaF₂ (30%) e Al₂O₃ que depois de pulverizado é acrescido de óxido de alumínio e gesso (CaSO₄) (1,0 - 3,5%).

Apesar das diferenças observa-se que todas obedecem ao princípio da cinética e termodinâmica desse processo químico onde a argamassa (clínquer pulverizado) sofre hidratação em uma velocidade relativamente baixa, mas com aumento volumétrico e grande pressão de expansão por umidade. No controle da cinética da reação tem sido sugeridos o uso de compostos orgânicos, das funções ácidos carboxílicos, álcoois, com o objetivo de retardar a hidratação dos óxidos da argamassa.

Quando a água é adicionada ao cimento expansivo, a cal reage com a água se expandindo 1,96 vezes em volume gerando calor de acordo com a equação 1:



Em termos cristalográficos, tem-se a mudança de um sistema isométrico do óxido de cálcio para um sistema trigonal do hidróxido de cálcio. Esta alteração cristalográfica, facilmente identificada na Figura 4, provoca uma queda de densidade e um conseqüente aumento de volume da argamassa.

Esse aumento de volume é o fato gerador da carga gerada pela argamassa durante o seu uso.

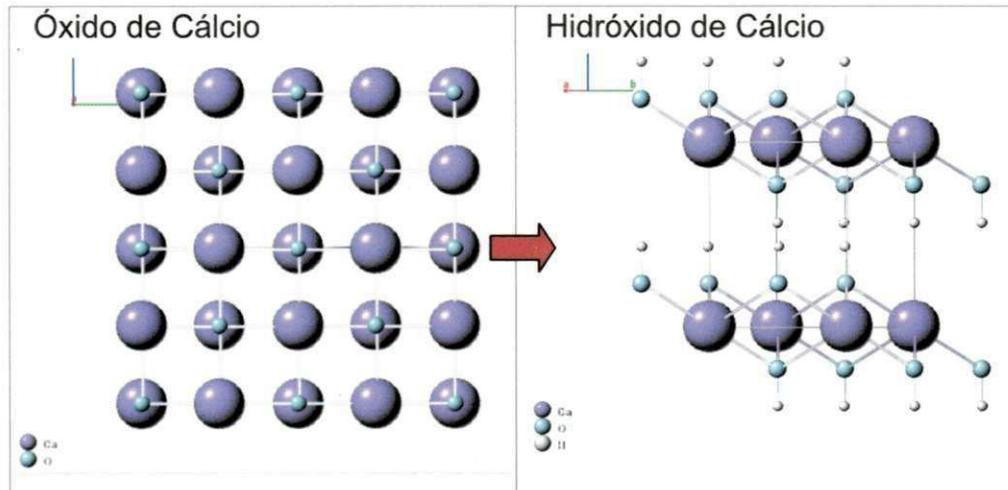


Figura 4 - Estruturas Cristalinas do Óxido de Cálcio e do Hidróxido de Cálcio (WEBMINERALS, 2007)

Definida a reação fundamental do processo de expansão da argamassa, deve-se considerar a presença de outros componentes minerais ou orgânicos responsáveis pelo controle da cinética da reação, tendo assim uma reação química lenta para que os furos preenchidos com essa argamassa possam aplicar uma tensão lenta e gradual, tendo o plano de alinhamento dos furos como preferencial para o rompimento da rocha, evitando também a perda da água por evaporação e a explosão da argamassa contida nos furos.

Também é importante o ajuste da reologia da pasta hidratada, com uso de fluidificantes, de forma que se possa ter uma pasta com fluidez adequada ao seu escoamento, com o mínimo de fase líquida, para dentro dos furos previamente executados na rocha a ser desmontada.

O controle da cominuição e de outros fatores responsáveis pela porosidade é fundamental para o funcionamento da argamassa expansiva. Quanto menor a porosidade inicial do sistema particulado constituinte da argamassa, menor é o espaço interno disponível para acomodações morfológicas com o avanço das reações de hidratação da argamassa, permitindo – essa falta de espaço livre – uma expansão real do volume do material que preenche os furos na rocha a ser desmontada, com o inchamento

das fases cristaloquímicas, e levando conseqüentemente à transmissão de tensões tracionantes.

Dois fatores relevantes de elevação de custos de produção dos agentes expansivos comerciais são a calcinação especial e a cominuição intensiva requeridas. A operação unitária de calcinação das matérias-primas para as argamassas expansivas convencionais é feita dentro de rigorosas condições termodinâmicas, para o surgimento de fases mineralógicas que retardam a reação de hidratação, onerando o processo. A cominuição, em especial a moagem, também é operação de alta incidência de custos industriais.

2.3 Utilização em Campo

Fraturar rochas em blocos de tamanho e forma definidos é essencial para as indústrias de mármore e granito. Os blocos são cortados de forma a serem facilmente transportados para a fábrica, onde são novamente cortados, lixados e polidos até que adquiram as características adequadas ao uso comercial.

A maioria dos fabricantes possui argamassas expansivas classificadas de acordo com a temperatura do ambiente onde ela será aplicada. Estes diferentes tipos de composição têm uma conseqüência direta no tempo de corte da rocha.

O processo de corte com o uso de argamassa expansiva começa com a definição do plano de corte e, em função disto, da definição de pontos no maciço rochoso para a execução de furos para a infusão da argamassa expansiva. Feitas estas definições, fez-se as furações com perfuratrizes de carreta e marteletes hidráulicos, estes furos tem diâmetros variando de 30 a 50mm, de acordo com o tamanho da broca utilizada, o consumo estimado de argamassa expansiva por metro linear de profundidade do orifício em função do diâmetro da broca está mostrado na Tabela 1.

Tabela 2 - Consumo de Argamassa Expansiva (ROGERTEC, 2006)

<i>Diâmetro (mm)</i>	30	32	34	38	40	45	50
Consumo (kg/metro linear)	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,6	3,0

Executados os furos, deve-se proceder com a limpeza e preparação dos mesmos para serem preenchidos pela argamassa expansiva, o que pode ser feito com o uso de um jato de ar provido por um compressor. Nos furos não deve haver água, embora alguns fabricantes indiquem que, caso a rocha ainda esteja em uma temperatura relativamente elevada, deve-se proceder a um resfriamento com água para evitar uma reação muito rápida da argamassa, sendo posteriormente a argamassa colocada dentro de um tubo de PVC, dentro do furo previamente executado. Processo semelhante pode ser executado no caso de infiltrações no maciço rochoso.

A mistura da argamassa expansiva deve ser feita com o uso de um misturador, jamais com o contato da pele do operador, pois é um produto altamente básico e assim pode causar queimaduras. A maioria dos fabricantes disponibiliza a argamassa em sacos de cinco quilos, sendo inicialmente colocado um litro e meio de água em um recipiente, logo depois adicionada, lentamente e sob constante agitação, a argamassa expansiva em pó.

Alguns fabricantes citam a necessidade de um processo efetivo e contínuo de mistura, dadas às características tixotrópicas da pasta obtida. Depois disto, deve-se verter a pasta nos furos previamente executados na rocha. Estes furos devem ser preenchidos até 2,5cm da borda e devem ter cerca de 80% da altura da rocha.

Furos adequadamente alinhados e preenchidos permitem o corte de maciços rochosos de modo mais controlado do que aquele obtido por explosivos, a execução de furos com martetele hidráulico está mostrada na Figura 5. A evolução dos esforços é lenta e são necessárias cerca de 8 a 24 horas para a completa ação de desmonte, dependendo da temperatura ambiente.

Alguns fabricantes indicam também o uso de uma proteção leve do sol, como uma lona, para evitar que a argamassa reaja muito rapidamente e haja

expulsão do furo, o que seria potencialmente perigoso para os operadores próximos.

HANIF e AL-MAGHRABI (2006) fizeram tentativas de economizar a quantidade de argamassa expansiva misturando outros materiais e deixando alguns furos vazios. Os testes realizados com as misturas provou a ineficiência deste método, entretanto, deixar alguns buracos vazios mostrou-se positivo, embora deixar dois furos consecutivos vazios foi inefetivo.



Figura 5 - Execução de furos na rocha com martelete hidráulico (ARAUJO NETO, 2006).

No sentido do dimensionamento dos furos e da distância entre os mesmos, temos a indicação de vários autores de que, 5 a 8 vezes o diâmetro do furo é a faixa de variação adequada para a distância entre os furos.

Em comparação com furos em linha com espaçamentos uniformes, HANIF e AL-MAGHRABI (2006) também verificaram que a mesma quantidade de buracos com o espaçamento crescendo gradativamente provoca um início da fratura e sua propagação mais rapidamente, começando onde o espaçamento é menor.

2.4 – Ensaios Aplicáveis a Argamassas Expansivas

Os ensaios aplicados a um determinado material ou produto podem definir a qualidade do mesmo para a finalidade ao qual se propõe. Além desta

finalidade direta, pode-se mensurar de forma consistente a maioria de suas propriedades físicas e químicas do objeto do ensaio.

Entre as informações que podem ser obtidas a partir de vários ensaios estão propriedades importantes como densidade, condutividade térmica e elétrica, tensões admissíveis, tensões de escoamento, tempo de vida útil, comportamento à quente, tenacidade, etc. Dessa maneira, os testes são importantes tanto para projetos, na medida em que podem ser obtidos parâmetros fundamentais para estes, como para a confecção de catálogos e para controle de qualidade.

Qualquer pessoa pode projetar e aplicar um teste para medir certas características de um material. Se cada fábrica criar o seu próprio ensaio, porém, seus resultados só podem ser considerados para efeitos de controle interno, uma vez que não podem ser comparados com resultados obtidos em outros lugares.

Para evitar este tipo de problema, costuma-se seguir normalizações nacionais ou Internacionais para a realização de alguns ensaios. Normas são conjuntos de procedimentos que são considerados padrões para a obtenção de certos resultados e, quando seguidos, permitem comparações com resultados obtidos em outros laboratórios. Normalmente são especificados desde o tipo de equipamento que vai fazer o ensaio, até o formato da peça que será ensaiada, bem como a obtenção de seus resultados. Normalizações importantes no mundo são da ISO (International Standards Organization), ASTM (American Society of Testing Materials), SAE (Society of Automotive Engineers, também americana) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Cada ensaio necessita de uma norma e dependendo, cada tipo de material também. As normas são conjuntos de fascículos em número muito grande, subdivididos em volumes de acordo com o ensaio, finalidade e material a ser ensaiado.

A título de distinção, cabe aqui dividir os testes em: destrutivos e não destrutivos. Ensaio destrutivo são testes em que o protótipo, peça ou corpo de prova sofre algum tipo de esforço que o deixa visivelmente marcado, inviabilizando sua utilização futura. Mesmo uma pequena marca, causada por um teste de medição de dureza, por exemplo, já é suficiente para caracterizar o

ensaio como destrutivo. Os testes não destrutivos são justamente o contrário, não deixam marca nenhuma nas peças.

No caso da argamassa expansiva, tem-se ensaios qualificadores e quantificadores genéricos para a maioria das suas propriedades, como densidade, área superficial, reologia quando em estado fluido, etc. Mas quando parte-se em busca de ensaios definidos especificamente para a sua aplicação, encontra-se uma lacuna. Neste estudo não foi possível encontrar normas específicas para a medição do tempo de pega, carga originada no processo de expansão e outras propriedades específicas da argamassa expansiva. Estas propriedades, embora indicadas pelos fabricantes em seus catálogos, foram obtidas de maneira não padronizada, conseqüentemente tem seu uso limitado e seus dados não reprodutíveis, tendo em vista que os mesmos não citam os padrões utilizados na obtenção destas informações, além disso, deve-se considerar a origem das argamassas aplicadas no Brasil. Por se tratarem de produtos fabricados em outros continentes, devem-se salientar as diferenças climáticas destes países, na sua maioria de clima temperado, para as condições nacionais, normalmente tendo uma temperatura e umidades relativamente maiores na maior parte do ano.

2.4.1 Ensaio Gerais de Caracterização

No caso específico das argamassas expansivas, os ensaios de caracterização devem ser voltados para a identificação das espécies químicas presentes, as suas proporções e sua morfologia.

O interesse nas espécies presentes vem da relação destas com o comportamento do pó quando em contato com a água. Sabe-se que o óxido de cálcio se tornando hidróxido é a principal reação deste produto, originando a alteração de volume responsável pela sua principal característica operacional, entretanto, os componentes adicionais vão retardar este processo de forma a adequar a argamassa a seu uso comercial, vão também influenciar diretamente a reologia da pasta, facilitando ou dificultando a sua aplicação.

Difração de raios-X é amplamente utilizado na caracterização das estruturas de reticulados, logo, pode ser útil na identificação qualitativa de alguns componentes de argamassas, particularmente aqueles com uma cristalinidade considerável.

A análise química permite quantificar o teor de um determinado componente em uma amostra, como óxidos e outros compostos inorgânicos. Isso é executado através de reações sucessivas, originando precipitados ou outras fases mensuráveis de forma direta ou indireta.

Segue-se, na Tabela 3, a composição obtida através da análise química convencional feita em uma argamassa comercial:

Tabela 3 - Composição obtida pela análise química da argamassa expansiva (CUNHA, 2005)

Composição	Porcentagem por peso
Pr (perda ao rubro)	25,90%
SiO ₂ (óxido de silício)	3,76%
RI (resíduo insolúvel)	0,44%
Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)	0,40%
Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)	Traços
CaO (óxido de cálcio)	63,00%
MgO (óxido de magnésio)	3,63%
Na ₂ O (óxido de sódio)	0,90%
K ₂ O (óxido de potássio)	1,69%

* A amostra estava acondicionada em frasco plástico e pesava 20 gramas

De posse desses dados, pode-se comprovar o alto teor de óxido de cálcio, CaO, presente na argamassa expansiva; “descontando-se” a perda ao rubro (25,9%) do CaO (63%) tem-se a porcentagem de 85% , teor que pode estar presente na amostra na forma de CaO, CaCO₃ e Ca(OH)₂. Óxidos de silício e de magnésio também fazem parte de sua composição e alguns traços de outros óxidos (Fe₂O₃, Al₂O₃, Na₂O e K₂O).

A análise térmica diferencial (DTA) determina a diferença da temperatura de uma amostra em relação a uma referência inerte; a medida é feita em função da temperatura e, quando ocorrem transformações endo e exotérmicas, estas aparecem como deflexões em sentidos opostos na curva termodiferencial.

A análise termogravimétrica (ATG) consiste da variação de massa da amostra em função da temperatura e/ou tempo. A DTA e ATG, fornecem informações importantes sobre a cinética química e termodinâmica das reações que ocorrem na argamassa expansiva.

Na Figura 6 - Gráfico da Análise Térmica Diferencial (DTA) (CUNHA, 2005), encontra-se o gráfico da DTA de uma argamassa expansiva, nele pode-se observar dois picos endotérmicos de grande intensidade; o primeiro em torno dos 520°C indica a decomposição de Ca(OH)_2 na argamassa, já o outro pico próximo aos 900°C, indica a presença do CaCO_3 .

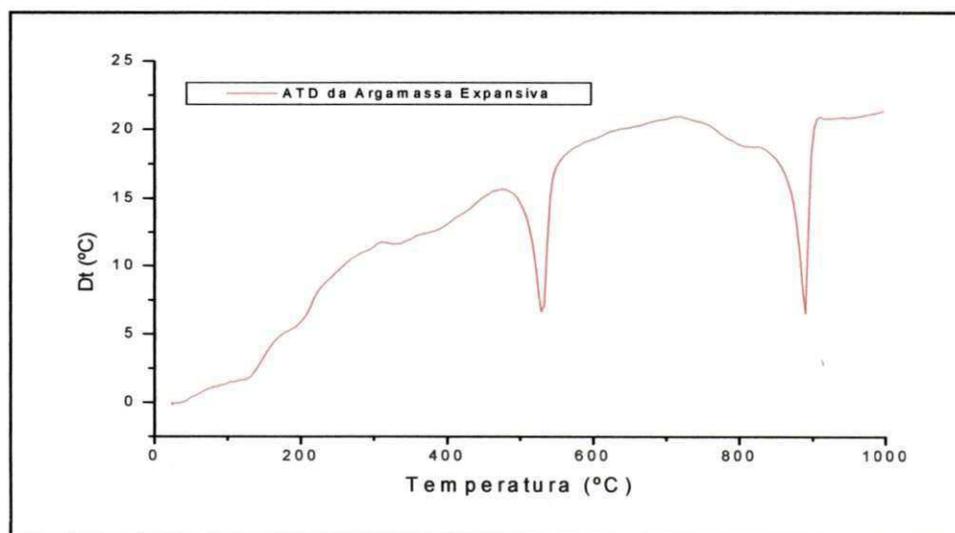


Figura 6 - Gráfico da Análise Térmica Diferencial (DTA) (CUNHA, 2005)

Na Figura 7, encontra-se a ATG da argamassa, podem-se observar perdas de massa características: entre 23°C e 296°C há uma perda de 4,26% indicando a liberação de água absorvida, entre 296°C a 687°C ocorre uma perda de massa de 18,71% referente a perda de hidroxilas (OH^-), por fim entre 687°C a 969°C há uma perda da ordem de 6,47%, indicando a perda de CO_2 .

Uma ferramenta particularmente interessante na caracterização de materiais, principalmente no caso de pós é a microscopia eletrônica, onde efetivamente tem-se a vantagem de uma análise visual dos grãos componentes da amostra. O uso de microscopia eletrônica também pode ser aplicado na caracterização da argamassa expansiva.

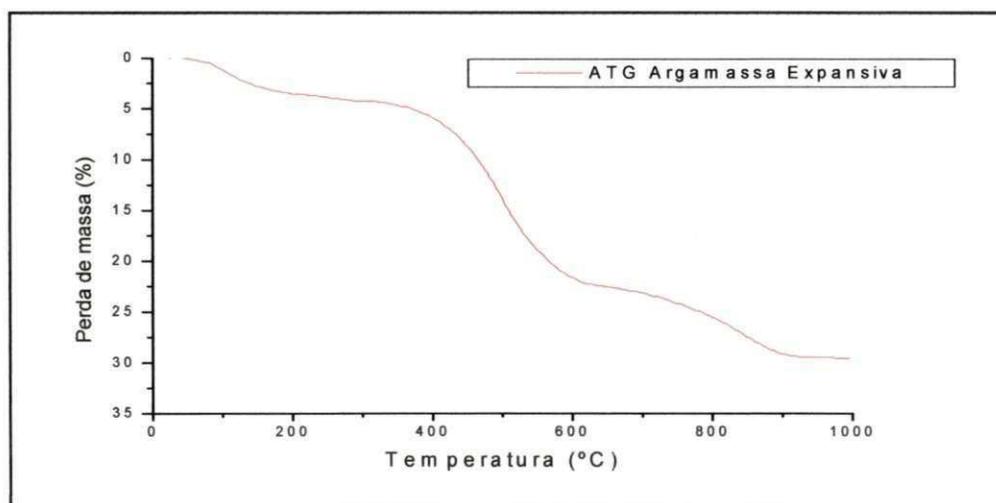


Figura 7 - Gráfico da Análise termogravimétrica (ATG) (CUNHA, 2005)

A observação da argamassa expandida por microscopia eletrônica releva uma acentuada esfoliação dos grânulos após sua hidratação e conseqüente expansão, conforme ilustra a Figura 8.

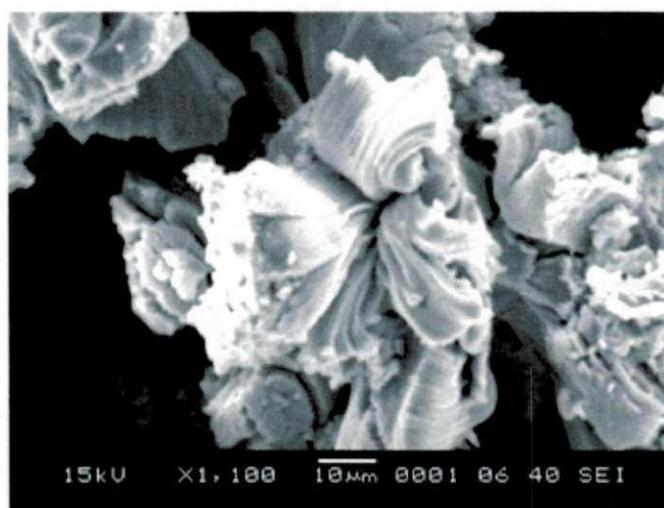


Figura 8 - Imagem por microscopia eletrônica de grânulos da argamassa expansiva (aumento de 1100 vezes e metalização por carbono) (LUZ, BALAREZO, PEREIRA, 2003)

2.4.2 Ensaio Mecânicos e Térmicos Específicos Para Argamassas Expansivas

As características diferenciadas de um determinado material ou produto, no exercer da função para o qual foi projetado, são o fato gerador da necessidade de ensaios especificamente projetados e aplicados para o mesmo.

Quando adicionada de água, a argamassa começa a se expandir conforme o óxido de cálcio se transforma em hidróxido de cálcio. Essa característica é a principal definidora dos métodos aplicados nos ensaios específicos.

Para a aplicação final da argamassa, encontrou-se poucos ensaios específicos descritos de forma detalhada, os mais completos, relativos à carga exercida durante o processo de expansão, a temperatura e o mecanismo de fratura, estão mostrados nos parágrafos seguintes.

Para a determinação da carga exercida pela argamassa durante o processo de expansão, HANIF e AL-MAGHRABI (2006) descrevem em seu trabalho uma metodologia voltada para uma avaliação direta das propriedades da argamassa em uso com blocos de granito.

Eles utilizam cilindros ocos de aço especialmente projetados para este ensaio. Os cilindros têm 250 mm de altura, com um diâmetro interno de 45 mm e externo de 80 mm. Nas paredes externas são colados extensômetros para a determinação da força exercida sobre os mesmos.

Estes cilindros metálicos devem ser inseridos no bloco de granito, entre os furos destinados a aplicação da argamassa expansiva, conforme mostrado na Figura 9.

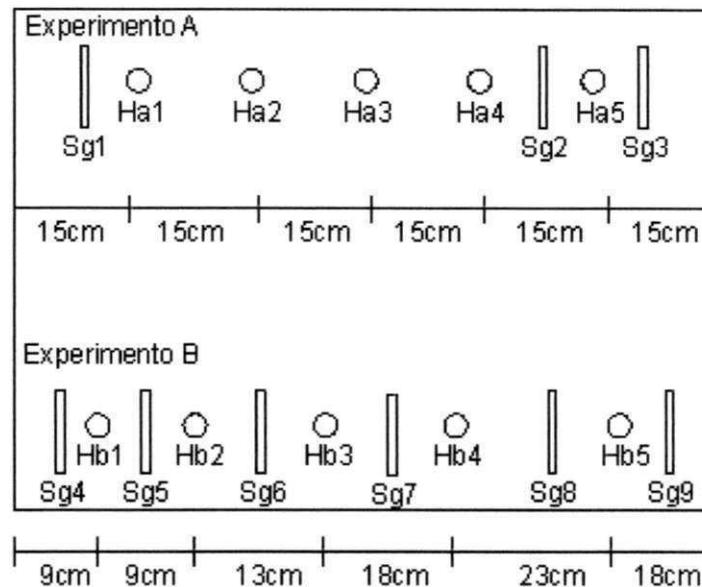


Figura 9 - Posição dos Furos e dos Transdutores de Pressão no Bloco de Granito (HANIF e AL-MAGHRABI, 2006)

Após a realização uma série de ensaios com a argamassa comercial Bristar 100S, eles obtiveram dados médios da pressão em função do tempo mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tempo versus Pressão de Expansão Gerada pelo Bristar - 100s (HANIF e AL-MAGHRABI, 2006)

<i>Tempo (Horas)</i>	24	48	72	96	120	144
Pressão (MPa)	34	41	44	47	50	52

Na Figura 10, tem-se os resultados de carga em função do tempo, medidos por cada um dos cilindros inseridos no bloco de granito.

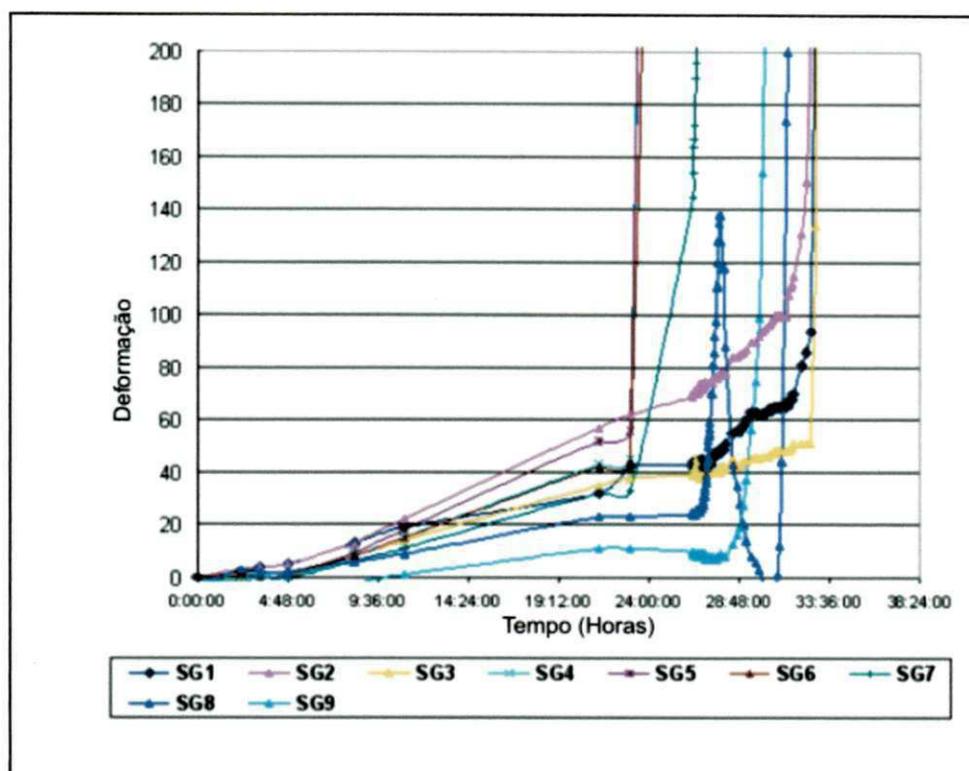


Figura 10 - Deformação x Tempo para Transdutores de Pressão no Bloco de Granito (HANIF e AL-MAGHRABI, 2006)

Outro ensaio semelhante foi realizado por ISHIDA et al. (2005) em um trabalho buscando analisar mecanismos de fratura em decorrência de argamassa expansiva.

Para avaliar a carga originada durante o processo de expansão, juntamente com a temperatura, eles utilizaram o sensor KCP-600S da empresa Tokyo Sokki Kenkyujo Co. Ltda. Este sensor possui dois extensômetros no interior de um cilindro de aço com diâmetro de 12,5 mm e altura de 150 mm.

A temperatura foi medida com três termopares, colados na parte externa de uma haste metálica conforme mostrado na Figura 11. Foram realizados registros de pressão a cada 0,1 segundo e de temperatura a cada 1 segundo.

O contato dos sensores difere do experimento de HANIF e AL-MAGHRABI (2006) por estarem em contato direto com a argamassa, nos moldes mostrados na Figura 11. Embora o experimento também tenha sido executado diretamente com um bloco de rocha, temos neste último um cubo de rocha de lado 300mm com apenas um orifício de 50mm de diâmetro e 260 mm de profundidade no centro da peça.

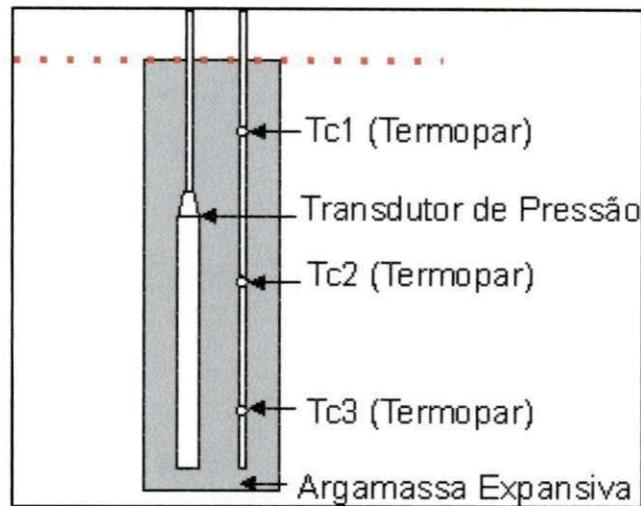


Figura 11 - Posição do Transdutor de Pressão e dos Termopares no Furo

Para o estudo do mecanismo de fratura, eles utilizaram uma série de sensores acústicos colados a superfície do corpo de prova. Estes sensores foram calibrados para calcular, através de emissões acústicas, as fissuras originadas ao longo da rocha.

Os resultados do experimento estão mostrados na Figura 12 e na Figura 13. Onde pode-se verificar de pronto uma fratura do corpo de prova numa velocidade muito superior a encontrada no uso comum de argamassa. Enquanto tem-se uma média de 4-10 horas para a fratura em campo, neste experimento eles obtiveram a fratura com um tempo de 13 minutos, com uma carga expansiva de 22 MPa.

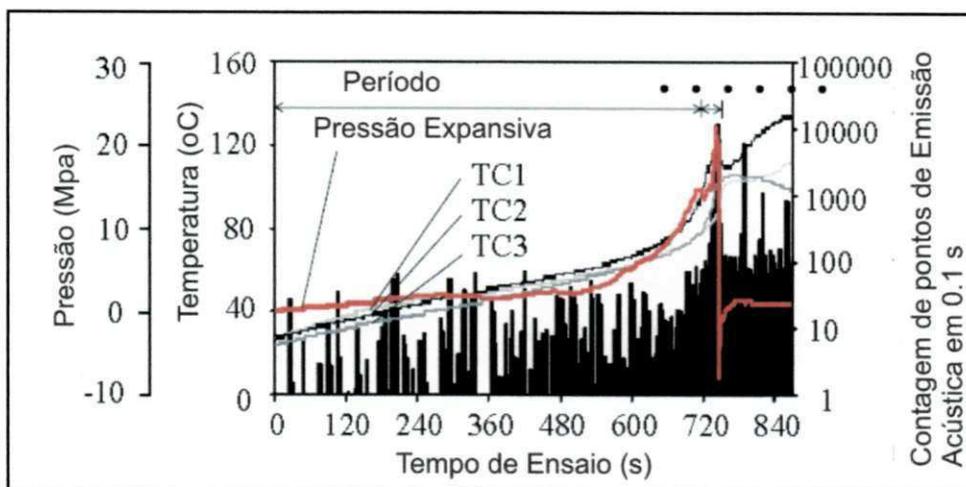


Figura 12 - Mudanças na Pressão Expansiva, Temperatura e Contagem de Pontos de Emissão Acústica em Função do Tempo

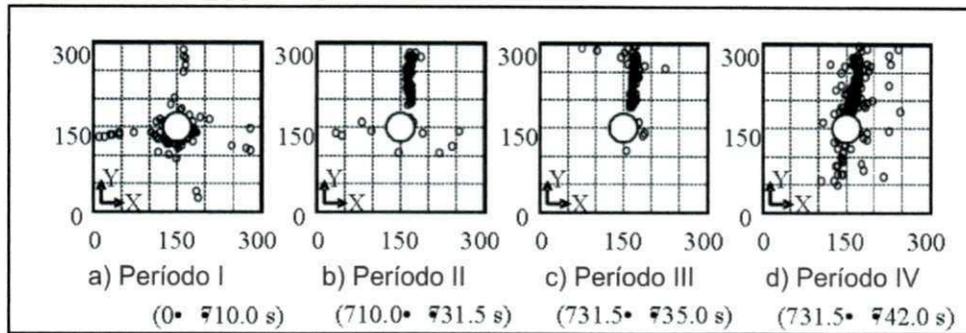


Figura 13 - Pontos de Emissão Acústica ao Longo do Tempo

Capítulo 3 - Equipamento Proposto para Ensaio de Avaliação de Pressão Expansiva

Para o desenvolvimento desta máquina, seguiu-se duas linhas de pesquisa. A primeira envolvendo a parte mecânica, englobando a estrutura que impõe a um corpo de prova um estado estático incluindo corpo de prova e suportes auxiliares, e a segunda compreendendo o sistema que avalia a carga que é exercida para a manutenção deste estado físico estático, incluindo nesta parte célula de carga e estrutura eletrônica com conversor A/D, micro controlador, etc.

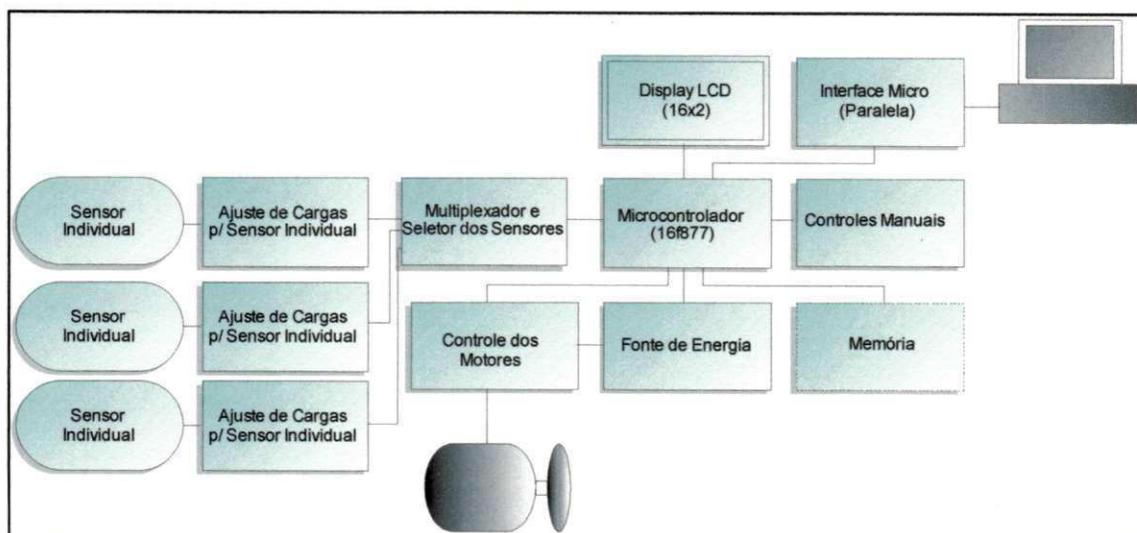


Figura 14 - Diagrama de Blocos do Equipamento

Focando na parte eletrônica, fez-se uso de uma série de tecnologias inovadoras no seu desenvolvimento. Um ponto importante a ser destacado é relativo à estrutura em blocos que foi aplicada no equipamento, mostrada na Figura 14. A principal vantagem desta metodologia é a capacidade de alteração rápida de características bastando-se apenas a inclusão ou substituição de um módulo, como um sensor ou um conjunto, a inclusão de outras interfaces com outras máquinas de análise ou sistemas de controle, etc. Além disso, permitem

manutenções eficientes, rápidas e práticas da parte defeituosa, podendo inclusive ter estruturas de *backup* para módulos fundamentais, como o conversor A/D.

De uma forma mais prática, esta estrutura modulada do equipamento é também inovadora no sentido de permitir uma "personalização" dos ensaios, com a inclusão de novos equipamentos, sendo estes passíveis de uma operação pré-programada. Por exemplo, no caso do interesse de uma avaliação do efeito de uma descarga elétrica ou de uma elevação controlada de temperatura. Isto pode ser feito de maneira automatizada e controlada pela central do equipamento.

Com o intuito de projetar um equipamento desta natureza, seguiu-se as seguintes etapas no desenvolvimento:

1. Determinação das características físicas do equipamento (carga a ser suportada, variáveis a serem determinadas, formatos suportados, etc.).
2. Projeto da estrutura mecânica.
3. Definição dos sensores principais e secundários.
4. Projeto do sistema de controle e aquisição de dados.
5. Testes de calibração e avaliação dos materiais e técnicas utilizados.
6. Re-projeto das partes que apresentaram falhas ou insuficiência de características necessárias às análises.
7. Testes de calibração e avaliação dos novos materiais e/ou técnicas utilizados.
8. Efetivação das análises para as quais o equipamento foi projetado

3.1. Estrutura Mecânica

A estrutura mecânica do equipamento é um fator de fundamental importância para o desenvolvimento da máquina. É ela quem vai garantir o estado estático no ensaio, mesmo diante das cargas elevadas às quais o braço mecânico será submetido. O desenho básico da máquina segue um padrão

básico amplamente difundido em máquinas semelhantes com fins parecidos, em forma de quadro, com um avaliador de simetria do braço, com ajustes laterais para altura e com uma base ampla para manter a estabilidade estática geral.

Assim, de acordo com os valores definidos pela avaliação dos dados gerais obtidos na literatura, foram estabelecidos, além dos valores dos sensores, as cargas às quais a estrutura estará submetida. A partir deste ponto, também definiu-se os materiais aplicados no equipamento a partir da carga que cada parte da máquina vai suportar. Optou-se pelo aço, que tem alta resistência mecânica e boa resistência à corrosão.

O projeto da estrutura mecânica do equipamento, mostrado na Figura 15, foi desenvolvido com tecnologia CAD (*Computer Aided Design*), o que permitiu, de forma antecipada à execução, uma série de avaliações que qualificaram várias partes do equipamento. Exemplos disto são os suportes da célula de carga, que foram projetados e executados sem a necessidade de correções posteriores, outro ponto foi o desenvolvimento do corpo de prova, que veio a solucionar vários problemas de uma versão preliminar além de possibilitar a inserção lateral de seis sensores variados, observados os diâmetros dos orifícios.

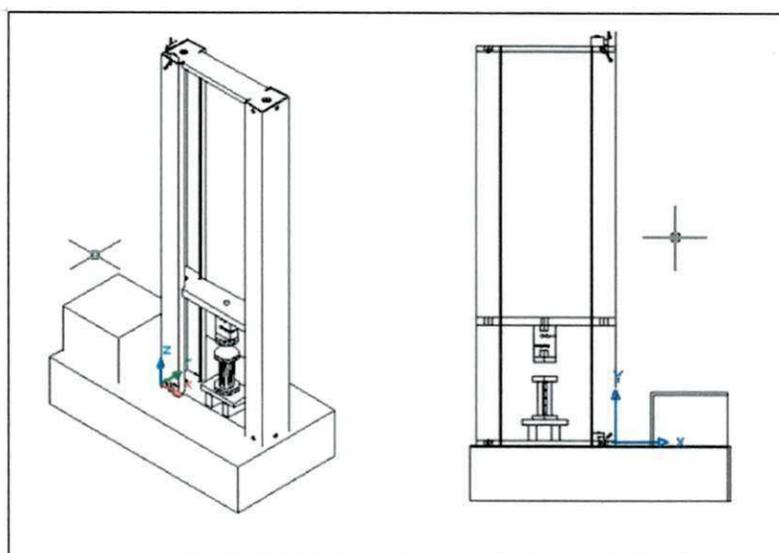


Figura 15 - Estrutura Mecânica do Equipamento em CAD

A parte responsável pela movimentação da plataforma de suporte da célula de carga foi desenvolvida usando um motor elétrico simples, utilizado comumente em portões eletrônicos, cuja movimentação é controlada por um microcontrolador PIC, e dois parafusos sem fim localizados nas partes laterais do equipamento. Estes parafusos quando giram sob a força do motor, movimentam a plataforma para cima ou para baixo conforme o sentido do giro.

Na Figura 16, tem-se o equipamento nas suas etapas iniciais de desenvolvimento.



Figura 16 - Equipamento nas Etapas Iniciais de Produção. No canto superior direito, motor utilizado no projeto, no inferior direito, detalhe do parafuso sem fim.

Após a montagem de toda a parte mecânica, foram executados testes de movimentação, vibração e estabilidade da máquina. Para o teste de movimentação, a plataforma móvel foi submetida a 90 kg de peso, e assim, foram executados repetidos movimentos de curso completo. Ascendendo-se e descendendo-se a plataforma móvel. Neste mesmo momento, foram também executadas avaliações qualitativas de ruído e vibração.

A estabilidade do equipamento foi avaliada posteriormente, juntamente com os ensaios de avaliação da parte eletrônica da máquina. O teste foi executado com a submissão do equipamento a uma carga estática, obtida com

a descida da plataforma móvel sobre o corpo de prova vazio, até que fosse obtida a carga de 120 Kgf. Foi verificada a manutenção do estado estático durante 12 horas.

A estrutura final do equipamento está mostrada na Figura 17, já acompanhada da parte eletrônica e do computador utilizado durante os testes de validação da máquina.

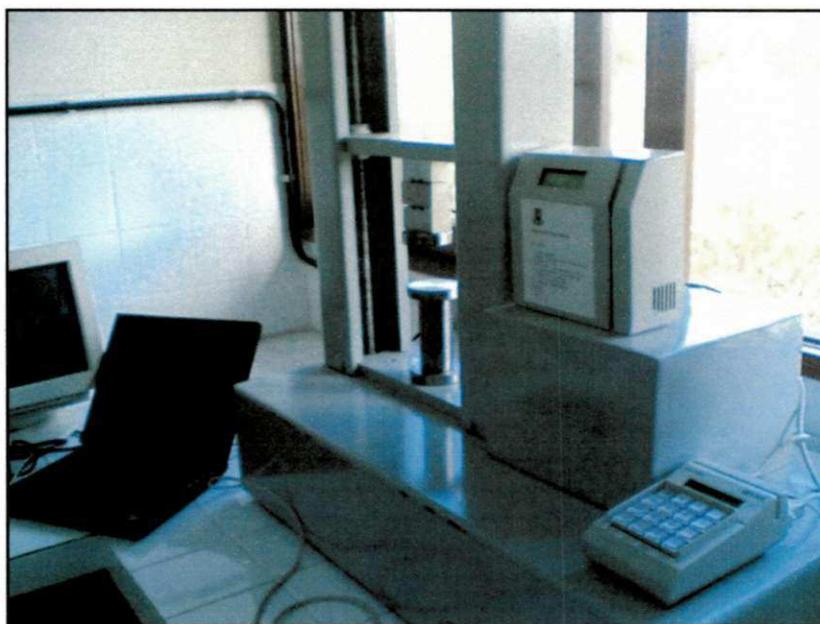


Figura 17 - Estrutura Mecânica Final do Equipamento

3.2 Corpo de Prova

O corpo de prova foi projetado, como mostra a Figura 18, com o objetivo de suportar as altas cargas a que será submetido durante o ensaio e facilitar a limpeza e o desmonte, facilitando assim o manuseio e evitando resíduos para novas análises.

Um outro ponto adicional levado em consideração foi a necessidade de sensores que estivessem em contato com a argamassa expansiva durante o período de ensaio, principalmente sensores de temperatura. Para isto, o corpo de prova foi dotado de seis orifícios laterais, três de cada lado espaçados em 2,5 cm com um diâmetro de 0,22cm, possibilitando a inserção de termopares

comuns ou de outros sensores de diâmetros semelhantes. Tanto a disposição quanto as dimensões dos furos foram planejados para que proporcionassem uma avaliação ao longo da altura do corpo de prova, sendo o diâmetro o menor possível para evitar que os sensores sejam submetidos a cargas excessivas.



Figura 18 - Parte Central do Corpo de Prova em CAD

O corpo de prova completo é composto de três peças, como mostrado na Figura 19, uma parte central na forma de cilindro com um orifício central de um centímetro de diâmetro e paredes com quatro centímetros de espessura em aço, e duas partes iguais, circulares, responsáveis pelo fechamento deste cilindro nas duas extremidades. Uma peça adicional, um cilindro com pouco menos de um centímetro de diâmetro, foi também projetado para que fosse usado na limpeza da argamassa depois do ensaio, neste sentido, o suporte do corpo de prova também é dotado de um orifício central para que a operação possa ser executada.

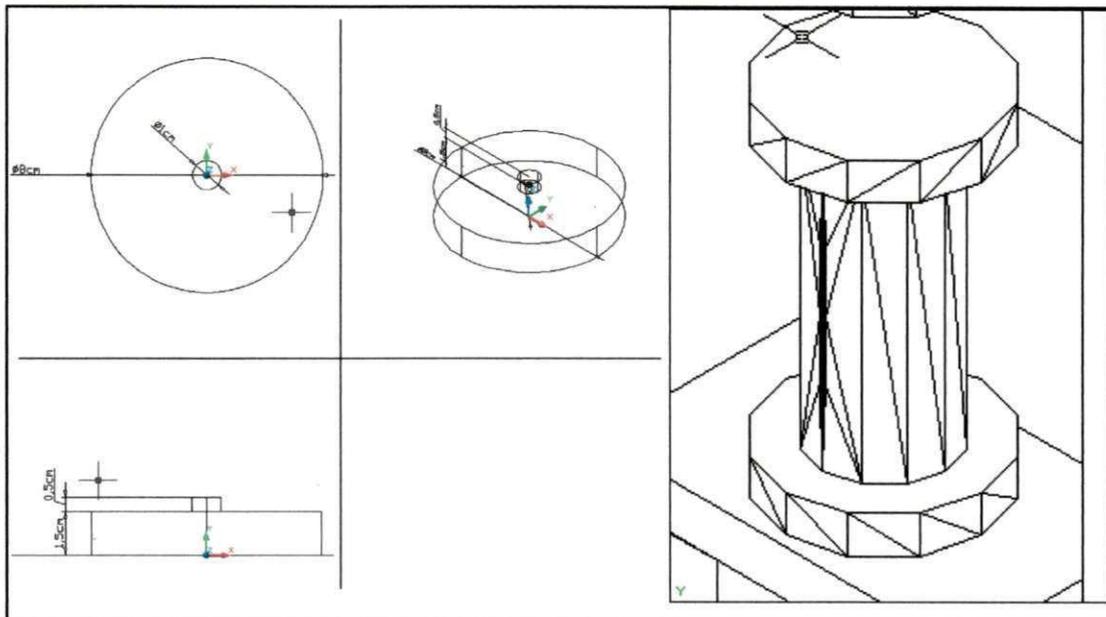


Figura 19 - Projeto da Parte Inferior e Superior do Corpo de Prova em CAD. A Direita, Corpo de Prova Montado

As peças do corpo de prova foram executadas na oficina mecânica da FUGI – Mármore e Granitos S/A. Foram executados testes dimensionais, para aferição das medidas do corpo de prova, principalmente dos orifícios laterais destinados a sensores de temperatura. O termopar utilizado durante este teste foi do tipo K.

3.3 Suportes Mecânicos

Foram projetados três suportes mecânicos para este equipamento, como mostrado na Figura 20. O primeiro é o suporte da célula de carga, ou seja, o cilindro metálico que é parafusado na plataforma e na célula de carga, dando sustentação a célula de carga na parte superior do equipamento.

O outro suporte é o que fica embaixo do corpo de prova. Este suporte foi planejado para ter dupla finalidade, ele sustenta o corpo de prova durante o ensaio e, quando o ensaio está concluído, pode ser utilizado na limpeza do corpo de prova, pois ele foi dotado de um furo central para que, no momento da

limpeza, o cilindro metálico passe pelo orifício principal da parte central e expulse a argamassa para parte inferior do suporte.

O terceiro suporte mecânico é o que fica na outra extremidade da célula de carga, atuando de forma semelhante a um êmbolo, sendo ele quem entra em contato com o corpo de prova propriamente dito. É conhecido em termos comerciais como “load button”, sendo utilizados com outras finalidades em outros tipos de ensaios mecânicos.

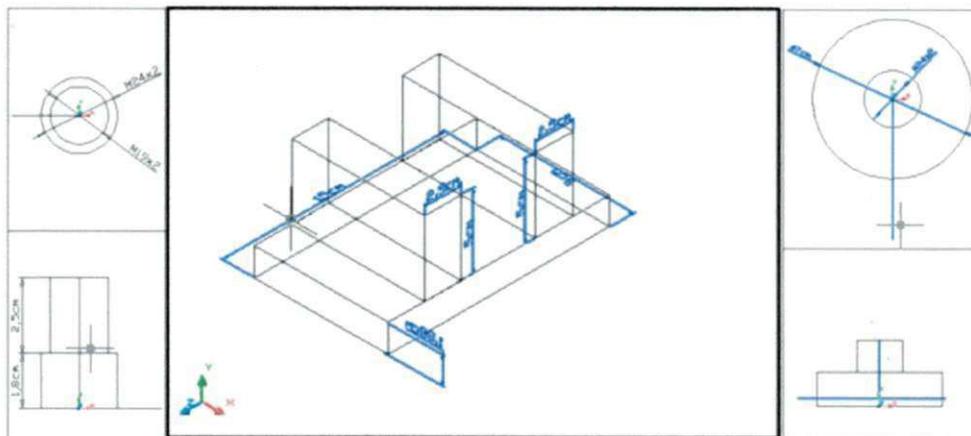


Figura 20 - A direita, parafuso duplo de sustentação da célula de carga, no centro suporte inferior, a direita, botão de carga.

Assim como o corpo de prova, estas partes do equipamento também são de aço, pois todas três estarão submetidas a cargas elevadas durante o período de ensaio. A Figura 21 mostra as peças, descritas anteriormente, prontas.



Figura 21 - Peças prontas para o corpo de prova. À direita sup., corpo de prova montado com a célula de carga. Na parte inferior, pino de limpeza no centro do corpo de prova

Os suportes mecânicos, da mesma forma que corpo de prova, foram executados na oficina mecânica da FUGI – Mármore e Granitos S/A. Os ensaios dimensionais qualificadores também foram aplicados, principalmente quanto aos fios da rosca do botão de carga e do suporte superior do equipamento.

3.4 Célula de Carga

A célula de carga é o coração de qualquer sistema de avaliação de força. Do ponto de vista elétrico, são transdutores de alta precisão que podem obter informação normalmente não acessível através de outros meios, seja devido a limitações tecnológicas ou econômicas (REVERE TRANSDUCERS, 2001).

As medições da deformação, da tensão, da força e do torque estão intimamente relacionadas. Primeiro porque a medição de tensão se faz através da medição da deformação: mede-se a deformação e então se determina a tensão aplicando-se a lei de Hooke. E segundo, porque a medição de força se realiza, da forma mais freqüente, através de uma medição da tensão com o uso de células de carga eletrônicas. O torque é uma medida derivada: conhecendo-se a força aplicada e a distância entre seu ponto de aplicação e um centro de giro, calcula-se o torque.

A medição de deformação é usualmente realizada com extensômetros: uma pequena superfície metálica que é colada no corpo do material que se deformará. No caso de células de carga comerciais não é diferente. As mais comuns, do tipo S, tem extensômetros colados ao centro de seu corpo metálico, sendo seladas para uma proteção ambiental efetiva.

A deformação do extensômetro é medida por variação da sua resistência elétrica na medida em que ele compõe parte de um circuito eletrônico. Considere então um condutor metálico com propriedades uniformes e que tenha resistência R. A resistência elétrica do condutor é calculada pela equação 2:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2)$$

onde:

ρ = resistividade do condutor (também chamada de resistência específica, isto é, uma propriedade do material do condutor);

L = comprimento do condutor;

A = a área de seção transversal do condutor.

Se diferenciarmos a equação anterior e dividimos todos os termos por R , obteremos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (3)$$

Esta equação relaciona variações de resistência elétrica do condutor com alterações de resistividade (o chamado termo piezoresistivo), com a deformação axial do condutor ($e_a = dL/L$) e com a variação da área de seção transversal A . Veremos a seguir que dA/A e dL/L estão relacionados. Assim, se a variação de resistividade do condutor é pequena, estando ele sob carga ou não, pode-se pensar em medir a deformação de um condutor metálico medindo-se a variação de sua resistência elétrica, estando ele sem carregamento ou com carregamento.

O termo dA/A pode ser escrito de acordo com a equação 4:

$$\frac{dA}{A} = \frac{2dD}{D} = 2\varepsilon_t \quad (4)$$

onde:

ε_t = deformação transversal (ou lateral) do condutor.

É importante mencionar aqui que quando o material está sob carregamento unidimensional, a sua seção transversal pode variar. Isto é, o material está sob carregamento axial e lateral, o qual é definido por (dD/D) . A

razão entre as deformações transversal e axial é o chamado módulo de Poisson, ν . Da mesma forma que a resistividade e que o módulo de elasticidade, o módulo de Poisson é uma propriedade do material do condutor, como mostra a equação 5:

$$\nu = -\frac{\text{tensão transversal}}{\text{tensão axial}} = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \quad (5)$$

Desta forma, então, pode-se relacionar a variação de resistência elétrica do condutor com a deformação axial, de acordo com as equações 6 e 7:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon_a - 2\epsilon_t \quad (6)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon_a(1 + 2\nu) \quad (7)$$

Há ainda a considerar a variação relativa da resistividade e do módulo de Poisson, mas estas são influências secundárias se o material não estiver sendo submetido a carregamentos extremos (por exemplo, oscilando em alta frequência, o que pode resultar em aquecimento do elemento), portanto, estes termos devem ser constantes na faixa de carregamento do material.

Na qualificação de um extensômetro, a variável básica é o denominado fator do extensômetro, K , fornecido nos catálogos dos fabricantes. O fator do extensômetro é a razão entre a variação relativa da resistência e a deformação axial, $(dR/R/\epsilon_a)$. O extensômetro é então instalado (colado) no material que sofrerá carregamento e ligado ao circuito eletrônico (ponte de Wheatstone) que o alimentará e medirá. O material é submetido ao carregamento, a variação relativa da resistência, dR/R , será medida, e a deformação axial poderá ser calculada. Usando então a lei de Hooke, a tensão poderá ser calculada.

Os extensômetros tipo folha são os mais usados e são confeccionados com técnicas de circuito impresso, normalmente sobre substratos de plástico ou papel, principalmente, devido ao grande desenvolvimento que sofreram as técnicas de circuito impresso o material resistivo (filme) possui alguns micra de

espessura e está depositado num material eletricamente isolado, chamado base (REGGIANI, MARCICANO 2002).

Os tamanhos, formas e aplicações de células de carga são diversos. Para cada aplicação é preciso definir a geometria adequada, dimensioná-la de forma a obter apenas deformação elástica e escolher o circuito de extensômetro que permite uma aquisição de sinais confiável. Para a correta seleção de uma célula de carga, deve-se levar em conta principalmente a capacidade, precisão e o ambiente em que ela será utilizada, tendo em mente, o princípio de medição que ela usa (compressão, torção, etc.).

As células de carga dominam a indústria pesada, existem em grande versatilidade, possuem alta precisão e baixo custo. Têm também grande variação na sensibilidade devido à diversidade de modelos, com comprimentos variando de 15 a 400 mm (REGGIANI, MARCICANO 2002).

Os principais parâmetros que nortearam a escolha da célula de carga foram a carga máxima, no caso duas toneladas, a sobrecarga máxima, ou seja, qual o máximo de carga a que a célula pode ser submetida sem danos permanentes.

Foram observados outros parâmetros, como o tipo de célula, foi selecionado o tipo S com seis fios de comunicação.

A célula selecionada e utilizada no projeto foi o modelo S-40 para 2 toneladas da HBM – Células de carga. As principais características dela estão mostradas na

Tabela 5. Esta célula é hermeticamente fechada, assim como outros componentes similares, é compensada quanto à temperatura e têm várias vantagens operacionais como simplicidade do circuito de aquisição de dados e alta linearidade.

Tabela 5 - Características Principais da Célula de Carga

<i>Característica</i>	Valor
Classe de Precisão	C
Capacidade Máxima	2 Toneladas
Faixa de Temperatura Operacional	-30 a 70°C
Sobrecarga Limite	3 Toneladas
Material	Aço Inoxidável

Capítulo 4 – Ensaio de Avaliação de Pressão Expansiva

No desenvolvimento do equipamento para o ensaio de avaliação de pressão expansiva iniciou-se com a busca, na literatura técnica disponível, de metodologias com objetivos semelhantes. A partir destas informações, partiu-se para a elaboração de um modelo mecânico representativo da condição real do ensaio.

Para reproduzir-se de forma padronizada o comportamento da argamassa expansiva, propõe-se o uso de um cilindro metálico com paredes espessas, selado na parte superior e inferior. Essa opção de dupla abertura permite uma limpeza mais simples do molde após o ensaio.

Este cilindro, contendo a argamassa expansiva deve ser submetido a uma condição estática, sendo a força necessária para tanto, medida de forma periódica. Os dados de força e tempo de ensaio podem ser depurados para posteriores estudos da massa expansiva.

Para a preparação da amostra, buscaram-se informações nos catálogos dos fabricantes de argamassas expansivas, a partir destas, estabeleceram-se as proporções, metodologia de mistura e obteve-se informações sobre os tempos de pega, com as quais estabeleceu-se os tempos a serem aplicados durante o processo de preparação.

Fatores ambientais como umidade relativa do ar e temperatura influenciam os resultados, assim, a padronização é necessária para que o método de ensaio apresente a reprodutibilidade. Assim, procuraram-se dados climáticos para o Brasil e, a partir destes, estabeleceu-se valores de temperatura e umidade relativa representativos para a maior parte do território nacional. A Figura 22 mostra as médias anuais de temperatura e umidade para o Brasil (INMET, 1990)

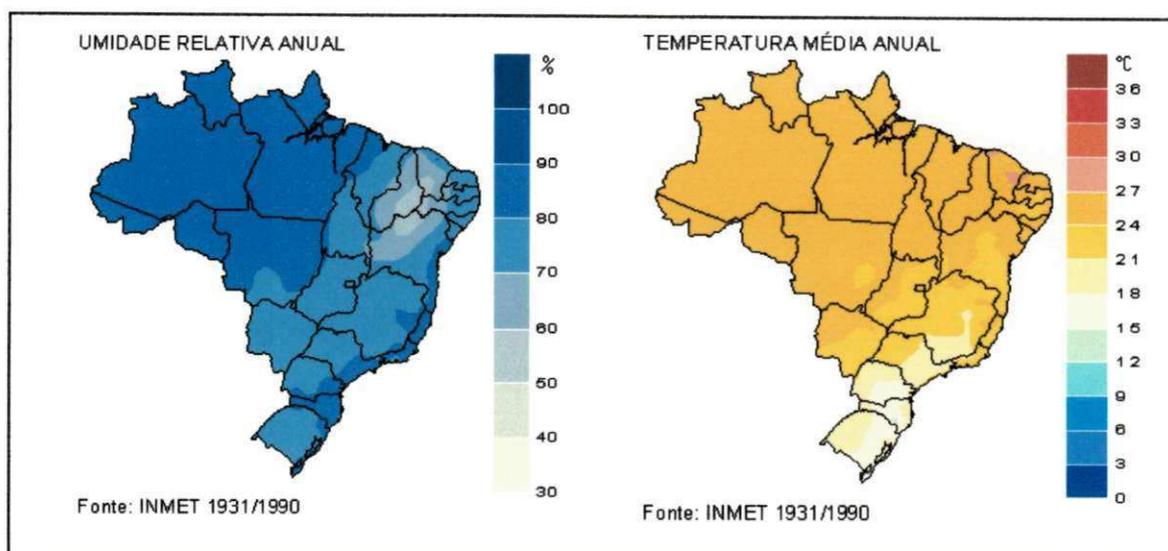


Figura 22 - Temperaturas e Umidades Médias Anuais do Brasil (INMET, 1990)

4.1 Definição de Pressão Expansiva

A carga expansiva da argamassa corresponde à pressão, medida em Pa, gerada pela reação de hidratação do óxido de cálcio. Esta reação diminui a densidade da massa que, estando confinada, exerce uma pressão sobre o meio confinante.

4.2 Descrição do Ensaio

O primeiro passo do ensaio é a preparação da massa a ser avaliada. A preparação é uma das etapas mais importantes, onde deve-se ter a máxima atenção na correta proporção dos componentes e na mistura, para garantir a reprodutibilidade dos dados obtidos.

Depois da preparação da pasta, deve-se seguir com a transferência para o molde metálico, posteriormente fechamos o molde, limpa-se a argamassa que eventualmente esteja em excesso e coloca-se o molde metálico, previamente limpo e lubrificado, na máquina de ensaio propriamente programada para leituras periódicas em um tempo total de ensaio de 24 horas.

A lubrificação do molde deve ser feita apenas nas extremidades, onde tem-se a abertura para limpeza após a finalização do ensaio. Embora a lubrificação completa do molde seja possível e facilite a sua limpeza, ela pode interferir de maneira negativa nos dados de pressão expansiva, comprometendo a reprodutibilidade dos mesmos.

Na transferência para o molde, o processo deve ser conduzido de forma a atingir a maior uniformidade possível da argamassa no seu interior, evitando a formação de bolhas de ar, vazios ou outras substâncias.

Em termos ambientais, o ensaio deve ser executado em uma temperatura de $(25 \pm 4) ^\circ\text{C}$ com uma umidade relativa do ar em $(60 \pm 5)\%$. Estas condições procuram refletir as condições climáticas normais para a maior parte do Brasil.

A umidade é um fator crítico, devido a alta reatividade do óxido de cálcio com a água, deve-se manter a argamassa expansiva fechada até o momento do ensaio. Depois da pesagem, deve-se imediatamente selar o recipiente ou embalagem da qual ela foi amostrada para evitar reações de hidratação que poderiam interferir em ensaios posteriores.

A temperatura tem um papel importante na cinética da reação de hidratação. Considerando que a maioria dos fornecedores tem uma composição específica para cada faixa de temperatura, indica-se que a faixa escolhida contenha o valor da temperatura padrão do ensaio.

4.3 Preparação da Amostra

A mistura deve ser feita a partir de 30g de argamassa expansiva, recém retirada da embalagem. A essa massa devem ser acrescentados de 9ml de água em um recipiente plástico com pelo menos 4 cm de diâmetro interno para facilitar o processo de homogeneização.

Durante todo o processo de preparação da amostra, devem ser utilizados luvas e óculos de proteção. A alta alcalinidade da argamassa pode provocar queimaduras se entrar em contato com a pele ou com os olhos.

O corpo de prova, mostrado na Figura 23, consome cerca de 20 gramas da mistura para ser preenchido, o resto deve ser deixado no recipiente plástico da mistura para o acompanhamento visual do processo de expansão. Recomenda-se que, ao fazer a análise visual deste recipiente, sejam utilizados óculos de proteção. Ar preso na pasta pode provocar explosões leves da massa, que pode ser nociva se entrar em contato com a pele ou os olhos do operador.



Figura 23 - Corpo de Prova Sendo Preenchido com Argamassa Expansiva

Não são indicados recipientes de vidro, cerâmica ou outros materiais frágeis, tendo em vista que a argamassa deixada no mesmo, para referência, pode expandir e despedaçar o recipiente.

A quantidade de água corresponde a 30% em massa da quantidade de argamassa expansiva, conforme indicado na maioria dos catálogos para a preparação visando o uso em rochas. A correta quantidade de água é fundamental, pois tem também influencia na cinética de reação, assim, dosagens incorretas podem comprometer os resultados.

A mistura deve ser feita com um bastão, de forma intensa, em movimentos circulares em um tempo de 3 minutos. Neste momento, a argamassa deve apresentar uma viscosidade elevada no começo da mistura, se tornando menor conforme a homogeneização prossegue, devido ao comportamento tixotrópico da mistura.

4.4 Execução do Ensaio

A pasta preparada deve ser imediatamente vertida no molde metálico. Para isso, a pasta, mantida sob constante agitação deve ser lentamente transferida, para evitar a formação de bolhas no interior do molde.

Após a transferência, deve-se bater levemente algumas vezes no molde para que as bolhas geradas durante o processo de transferência afluam a superfície.

Após a transferência, fecha-se o molde com a parte superior, lentamente, e faz-se a limpeza externa com o auxílio de um pano úmido. Deixa-se o excedente de argamassa no copo, para que se possa fazer um acompanhamento visual da expansão.

Depois de preparado, o molde com a argamassa deve ser colocado na máquina de ensaio como mostrado na Figura 24. Neste momento, deve-se observar a centralização do corpo de prova na máquina e o tempo máximo para o início da medição, recomenda-se que, do início da mistura até o início da leitura, não exceda-se 10 minutos. Programa-se o intervalo de leituras e o programa computacional de captura dos dados.



Figura 24 - Ensaio Preparado para Execução, com análise de Temperatura na Parte Central do Molde

O intervalo programado no equipamento vai definir a qualidade estatística dos resultados obtidos. Quando menor o intervalo, maior a quantidade de dados, e melhor a qualidade dos resultados obtidos, embora uma quantidade muito grande de dados aumente consideravelmente o tempo de processamento e os recursos computacionais requeridos.

O tempo de ensaio padrão é de 24 horas, podendo ser estendido em função do estudo a ser executado na argamassa.

4.5 Tratamento dos Resultados

São gerados, ao longo do ensaio, dados de carga, em Kgf, e temperatura em °C. Esses dados são gerados em intervalos de tempo predefinidos pelo operador no momento em que configura o ensaio no equipamento.

Os dados do ensaio podem ser obtidos diretamente através da tela do equipamento ou por um computador ligado a porta serial da máquina. No caso de leituras feitas diretamente no equipamento, o operador deve tomar nota dos dados em intervalos padronizados de 15, 30 ou 60 minutos.

As leituras feitas pela interface serial não precisam da interferência de um operador, sendo gravadas em um arquivo previamente definido a partir dos intervalos de leitura programados no equipamento.

A pressão é o quociente da força pela área da superfície, na qual a força atua. Assim, para converter a força em pressão, deve-se usar a equação 8:

$$P = \frac{F}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (8)$$

Onde:

P = Pressão gerada pela argamassa expansiva (Pa=Kgf/m²)

F = Força gerada pela argamassa expansiva (Kgf)

d = Diâmetro do furo do corpo de prova (m)

Os valores de pressão assim obtidos podem ser utilizados para a elaboração de gráficos e tabelas de pressão expansiva versus tempo. Estes dados também podem ser utilizados na obtenção de várias informações estatísticas pertinentes como desvio padrão, desvio médio, variância, etc.

Estas informações, juntamente com o gráfico de comportamento em função do tempo, vão servir de fundamentação teórica para comparações, estudos e análises de diversas formulações de argamassas expansivas.

Capítulo 5 - Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição dos dados foi desenvolvido em blocos individuais. Os principais foram a alimentação, a parte de visualização das mensagens do equipamento, por meio de display LCD, o microcontrolador, o teclado, os filtros e o amplificador. A relação entre estes blocos está mostrada na Figura 25.



Figura 25 - Diagrama de Blocos do Circuito Eletrônico

Os circuitos eletrônicos do amplificador, fonte e do microcontrolador foram projetados e simulados com o auxílio do programa computacional Proteus, disponível em <http://www.labcenter.co.uk/>. Os filtros analógicos foram desenvolvidos com o programa FilterLab, disponível em <http://www.microchip.com/>.

As simulações práticas foram executadas em matriz de contatos como mostrado na Figura 26. Após a avaliações de desempenho com base em pré requisitos de ruído, eficiência energética e resposta adequada ao fim projetado, os circuitos foram então executadas em placas de circuito convencionais.

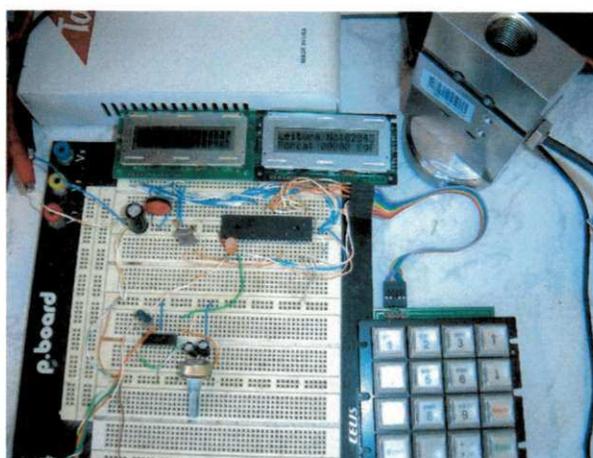


Figura 26 - Simulação em Matriz de Contatos de Circuito Eletrônico de Aquisição de Dados

5.1 Alimentação

Na alimentação do circuito, utilizou-se uma fonte padrão de 15 volts, encontrada na maioria dos equipamentos modernos com pequenas diferenças de “*design*” e potencial gerado. A escolha se baseou na qualidade da energia gerada e na disponibilidade de mercado, sendo a fonte simples, além de fácil reposição no caso de falhas. Outros pontos importantes são as diferentes voltagens necessárias ao circuito, sendo estas de 5, 6 e 12 volts. Estas voltagens são obtidas a partir de um circuito de retificação e ajuste das voltagens. O circuito elétrico da fonte de alimentação está mostrado na Figura 27

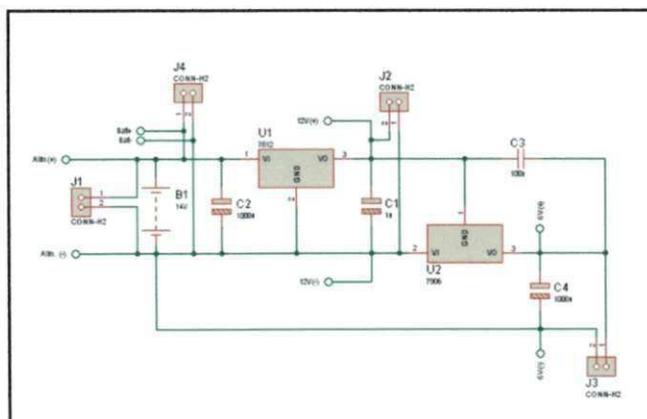


Figura 27 - Esquema Elétrico da Fonte de Alimentação

Na parte da visualização das mensagens por parte do equipamento, utilizou-se dois “*displays*” LCD com dezesseis colunas e duas linhas, baseados no circuito HD44780U da HITACHI. Neste caso também adotou-se opções voltadas a disponibilidade de mercado e custo de aquisição. Este tipo de *display* é extremamente comum, sendo vastamente utilizado em vários equipamentos eletrônicos como balanças, termômetros digitais, etc.

O teclado utilizado é um teclado numérico simples ligado diretamente ao microcontrolador.

5.2 Microcontrolador

Um microcontrolador é um computador programável, em um chip otimizado para controlar dispositivos eletrônicos. É uma espécie de microprocessador, com memória e interfaces de entrada/saída integrados, enfatizando a auto-suficiência, em contraste com um microprocessador de propósito geral, o mesmo tipo usado nos PCs, que requer chips adicionais para prover as funções necessárias.

Os microcontroladores são componentes utilizados em muitos tipos de equipamentos eletrônicos, sendo a grande maioria entre os chips vendidos. Cerca de 50% são controladores “simples”, outros 20% são processadores de sinais digitais (DSPs) mais especializados. Os microcontroladores podem ser encontrados em máquinas de lavar, forno de microondas, telefones, etc.

O que diferencia os diversos tipos de microcontroladores, são as quantidades de memória interna (programa e dados), velocidade de processamento, quantidade de pinos de entrada/saída (*I/O input/output*), alimentação, periféricos, arquitetura e set de instruções.

Devido às suas dimensões reduzidas, os microcontroladores têm pouca memória, e o seu processador só reconhece algumas instruções básicas, além de limitado na ligação direta a periféricos específicos. Segundo a DATAQUEST, no ano 1999, foram usados 15 vezes mais microcontroladores do que processadores e, no ano 2000, havia uma média de 240 microcontroladores num lar americano.

O microcontrolador integra num único componente os três elementos principais na arquitetura de um computador: CPU, memória e entrada/saída. Os microcontroladores dispõem sempre de entradas/saídas digital ou analógica, o que não se verifica nos microprocessadores. A memória interna só de leitura verifica-se apenas nos microcontroladores (pode ser ROM, já programada de fábrica, pode ser programável pelo utilizador ou pode mesmo não existir internamente) (MARQUES, 2005). Alguns outros componentes podem estar presentes de acordo com o modelo e a finalidade do microcontrolador, entres estes pode-se destacar os conversores analógico-digitais, portas de comunicação com padrões avançados (I²C, USART, etc.) e até mesmo sensores de temperatura.

Os microcontroladores mais comuns usam arquitetura de Harvard. Neste tipo de arquitetura, a memória de programa e a memória de dados estão fisicamente separadas, o mesmo acontecendo com os respectivos barramentos de interligação com a CPU. Dado que o acesso a estas memórias é feito através de barramentos diferentes, é possível a utilização da memória de dados ao mesmo tempo em que é feita a pesquisa de uma instrução da memória de programa (BAPTISTA, 2004).

Ao contrário das CPUs que utilizam uma arquitetura de Von-Neuman, em que aquela distinção física não é verificada e o ciclo de funcionamento é feito através do sequenciamento de operações de busca e de execução, nas CPUs com arquitetura de Harvard a execução da instrução atual pode ser feita em simultâneo com a busca da próxima instrução. Este tipo de operação permite obter uma velocidade de processamento que, teoricamente, será o dobro da obtida com um CPU com arquitetura Von-Neuman (BAPTISTA, 2004).

Um microcontrolador tem sua velocidade controlada de maneira externa, ou seja, ele executa cada comando em uma ordem pré-determinada a partir de estímulos externos através do "clock". O relógio ("clock"), é quem dá o sinal de partida para o microcontrolador e é obtido a partir de um componente externo chamado "oscilador". Se considerar que um microcontrolador era um relógio de sala, o nosso "clock" corresponderia ao pêndulo e emitiria um ruído correspondente ao deslocar do pêndulo.

Os osciladores comuns utilizados em microcontroladores tem normalmente entre 4 e 20MHz sendo na sua maioria baseados em cristais de quartzo. Ainda são utilizados outros tipos de osciladores menos precisos, como por exemplo os do tipo resistor-capacitor ou baseados em circuitos eletrônicos como o 555. Cada comando é executado em um determinado conjunto de oscilações, normalmente quatro. Esse conjunto de oscilações é denominado *ciclo de máquina* ou *ciclo de instrução*.

Como os microcontroladores tem pouco espaço de memória e um conjunto resumido de instruções, as linguagens mais comuns utilizadas na sua programação são o “Assembler” e o C, em ambos os casos, tem-se linguagens simples, mas extremamente poderosas. As vantagens do “Assembler” estão na sua velocidade de execução, pois cada comando corresponde diretamente a um ciclo de máquina, e na facilidade de manipulação direta do microcontrolador. A linguagem C tem mais comandos e é capaz de gerar programas mais complexos com menores dificuldades de programação.

O microcontrolador selecionado para o projeto foi o PIC16F877A, mostrado na Figura 28. Esta escolha foi norteada pela disponibilidade de recursos deste componente, dentre eles pode-se destacar o conversor A/D do tipo SAR de 10 bits de resolução e as várias possibilidades de comunicação que ele apresenta (SPI, I²C, USART e 5 portas paralelas).

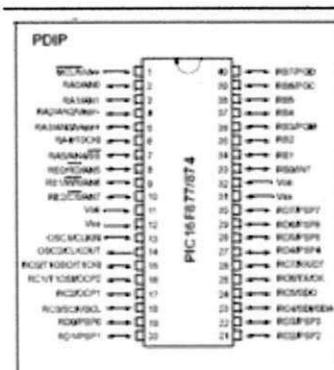


Figura 28 - Microcontrolador PIC Modelo 16F877 (MICROCHIP, 2001)

As principais aplicações do microcontrolador neste equipamento são

- Conversão A/D.
- Filtro Digital.
- Leitura do Teclado.

- Geração de Mensagem pelo Display LCD.
- Comunicação com o computador.

5.3 Filtragem Digital e Analógica

No processamento de sinais, a função de um filtro é remover partes indesejadas do sinal, como ruídos randômicos. Uma outra possível aplicação é extrair partes úteis, como componentes pertencentes a um determinado intervalo de frequências.

Para avaliar de uma forma mais efetiva as fontes de ruído, o primeiro conceito a ser entendido é o “*aliasing*” ou “*foldback*”, que é o espelhamento de sinal de frequências mais altas em zonas mais graves do espectro quando tenta-se reproduzir uma frequência maior que a metade da frequência de amostragem. Esta frequência mínima para que não ocorra “*aliasing*” é conhecida como frequência de Nyquist. Esta fonte de ruído é sistemática e ocorre normalmente na ausência de filtros analógicos, considerando principalmente que, além da frequência do sinal a ser analisado, tem-se frequências provenientes de outras fontes que entram como ruído na etapa de conversão (BAKER, 2001).

Uma fonte comum de ruído em um circuito digital é a fonte de energia. Uma forma interessante de contornar este problema é ter um capacitor de $10\mu\text{F}$ na entrada da alimentação no circuito elétrico e um capacitor de $0,1\ \mu\text{F}$ próximo aos pinos de alimentação de cada componente ativo do sistema (BAKER, 2001).

Outra fonte de ruído em um circuito são os osciladores dos componentes digitais do circuito, se este ruído estiver relacionado com o processo de conversão, ela não vai interferir nos valores resultantes. Nestes casos, o problema pode ser resolvido com a mudança de desenho da placa, afastando os componentes de alta impedância da parte digital. Uma outra alternativa é a implantação de filtros “*anti-aliasing*” no sinal antes que ele chegue ao conversor A/D (BAKER, 2001).

Em última análise, ainda pode-se ter algumas outras fontes de ruído, como o uso impróprio de amplificadores operacionais (principalmente quando o ganho for muito elevado) e os ruídos ambientais provenientes de outros aparelhos eletro-eletrônicos situados próximo ao circuito, como celulares, ventiladores, etc. Este tipo de interferência é conhecida como EMI (“eletromagnetic interference”) e é ainda mais importante e efetiva em ambientes industriais, onde se tem máquinas com motores elétricos de grande porte.

Existem dois tipos principais de filtros, os analógicos e os digitais. As diferenças entre eles vão desde a forma como eles são projetados até a forma como eles atuam em um sinal.

Um filtro analógico é composto de componentes eletrônicos como resistores, capacitores e amplificadores operacionais trabalhando em conjunto para atingir um efeito de filtragem desejado. Esse tipo de circuito é amplamente utilizado em aplicações como redução de ruído, processamento de sinais de vídeo, equalizadores gráficos e em muitas outras áreas.

Uma importante aplicação dos filtros analógicos é remover ruídos de alta frequência do sinal antes que este sinal seja processado por um conversor A/D, evitando assim o aparecimento de ruídos estranhos de baixo nível bem como de picos não pertencentes ao sinal.

As técnicas utilizadas para desenvolver um filtro analógico já estão definidas para a maioria das aplicações. Em todos os estágios do processo, o sinal a ser filtrado é uma corrente elétrica ou voltagem diretamente proporcional a uma quantidade física (um sinal de um transdutor, por exemplo).

Filtros analógicos podem ser encontrados em quase todo circuito eletrônico. Sistemas de som usam para pré-amplificação e controle de tom, e em sistemas de comunicação eles são utilizados para sintonizar determinadas frequências e eliminar as outras. Sistemas digitais usam os filtros analógicos para evitar o “*aliasing*” e os sinais fora da faixa de amplitude do sistema.

Com filtros passa-baixas analógicos, os sinais de alta frequência de ruído e interferência (proveniente de outras partes do circuito, por exemplo) podem ser eliminados antes da sua chegada ao conversor A/D. Desta maneira, o sinal processado não vai conter interferência harmônica indesejada.

Quando um filtro analógico é implementado, ele é colocado antes do conversor A/D. De forma oposta, um filtro digital, quando implementado, ele opera depois do conversor. Assim, apesar dos motivos pelos quais essa disposição deve ser sempre seguida, as conseqüências desta configuração nem sempre são tão óbvias, como exemplo disto, pode-se observar que um filtro analógico pode remover ruído imposto ao sinal antes que ele atinja o conversor A/D, particularmente os picos mais expressivos. Filtros digitais não podem remover estes picos presentes no sinal analógico, assim, estes picos podem saturar o modulador analógico do conversor, mesmo quando o sinal está entre os limites do conversor.

Filtros analógicos também são mais adequados para sistemas de alta freqüência de operação, por exemplo, acima de 1 MHz. Neste tipo de sistema, um filtro analógico pode reduzir o ruído na região fora da banda.

Os modelos mais comuns de filtros analógicos são o Butterworth, Bessel, Sallen-Key, e o Chebyshev. Outros tipos de modelos são o Chebyshev inverso, o elíptico e o Cauer. Cada um deles se diferencia nos parâmetros matemáticos em na forma da banda passante de cada um deles, sendo está também dependente da ordem do filtro (normalmente representada pela quantidade de etapas a que o sinal é submetido durante a filtragem). Em geral, quanto maior a ordem, mais eficiente é o corte de freqüência de um filtro analógico.

Já um filtro digital usa um processador para executar cálculos nos valores amostrados do sinal de entrada. Este processador pode ser um computador de uso comum ou um processador especializado conhecido como o DSP (Digital Signal Processor).

O sinal a ser processado por um filtro digital deve ser inicialmente amostrado por um conversor analógico para digital. O resultado desta operação é um número correspondendo a amplitude do sinal de entrada.

Logo depois da amostragem do sinal, é aplicada uma ou mais funções sobre a amostra do sinal. Estas funções podem ser amplificações diretas, como na equação 9:

$$y_n = K \cdot x_n \quad (9)$$

Onde temos:

x_n = sinal de entrada coletado em um instante n

K = constante correspondente ao ganho do filtro digital

y_n = sinal de saída do filtro digital

No caso dos filtros digitais, por definição, usam-se amostragens repetitivas e técnicas numéricas baseadas em médias para reduzir ruídos, estes dois processos levam tempo, assim, limitam de certa forma a eficiência de filtros digitais no que diz respeito a sua frequência de operação. Como o filtro digital atua depois da conversão do sinal analógico, ele tem a vantagem de reduzir o ruído proveniente das operações do conversor A/D. Outra vantagem importante do filtro digital é facilidade de alteração de seus parâmetros, já que isto pode ser feito através de alterações no seu programa de operação, não sendo necessárias alterações físicas de componentes como no caso dos filtros analógicos, como exemplo disto, podemos citar as alterações da frequência de corte e da taxa de saída de dados (BAKER, 2001).

5.3.1 – Filtragem Analógica

Os filtros analógicos utilizados seguiram o padrão Butterworth e tiveram como meta a redução de ruído, principalmente considerando a alta taxa de amplificação do sinal e presença do motor elétrico no circuito.

Projetou-se um filtro de ordem 8 (Figura 29), o que garante um corte mais preciso de frequência, corte este definido em 50 Hz, abaixo da frequência da rede elétrica e em acordo com o teorema de Nyquist para a taxa de amostragem do equipamento.

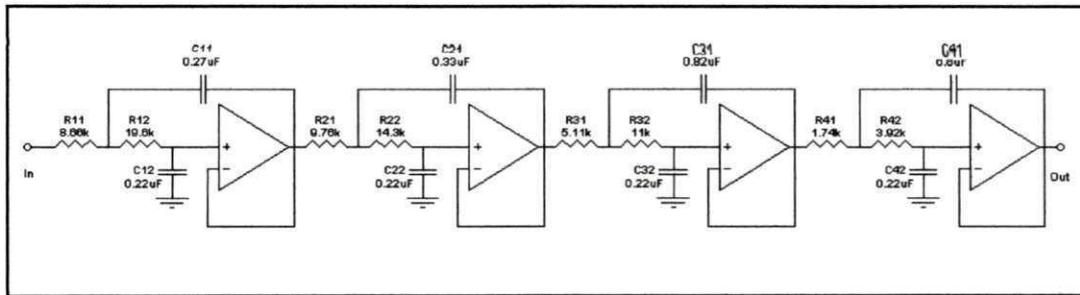


Figura 29 - Esquema Elétrico do Filtro Ativo Usado no Equipamento

A resposta teórica do filtro está mostrada na Figura 30, onde pode-se avaliar a efetividade do filtro em frequências superiores.

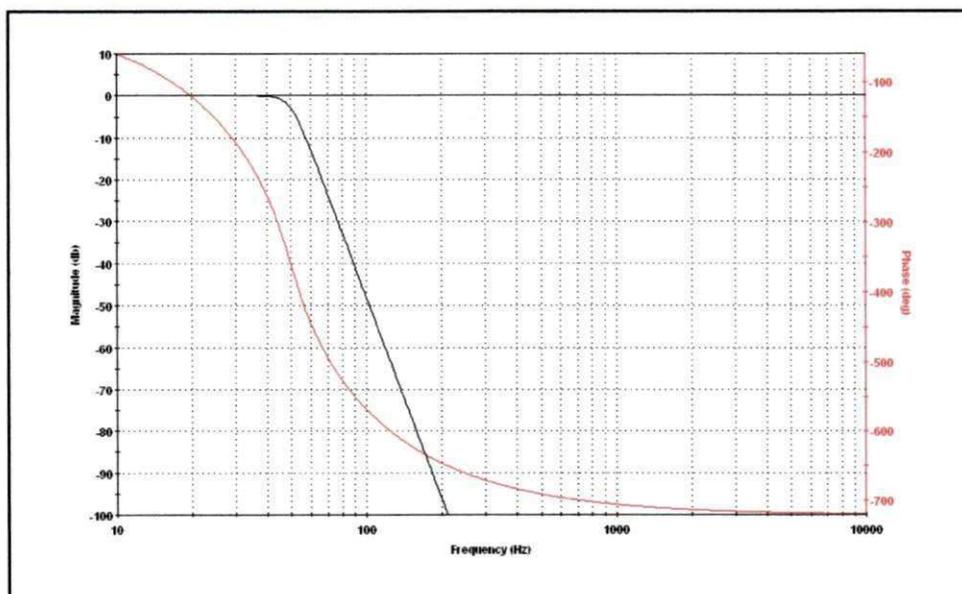


Figura 30 - Resposta de Frequência do Filtro Ativo

Como pode-se verificar através do gráfico, o filtro projetado trabalha com uma frequência de corte de 50Hz, a partir da qual os sinais são removidos do sinal com uma eficiência crescente conforme cresce a sua frequência. A escolha de 50Hz seguiu os parâmetros da velocidade de amostragem do conversor a/d, cerca de 200Hz, e da interferência padrão da rede elétrica, que tem frequência na faixa 60Hz.

A resposta eficiente do filtro também pode ser notada através do gráfico, onde a rápida queda da magnitude do sinal é mostrada.

5.3.2 – Filtragem Digital

Após a amostragem do sinal e conversão em dados digitais, aplicou-se um filtro digital para a remoção de ruídos provenientes do próprio conversor, visto que este opera na parte de alta frequência do circuito estando assim o sinal, após o filtro analógico, submetido a uma outra fonte de ruído.

A fórmula do filtro digital aplicado está mostrada na equação 10:

$$\frac{y_n}{x_n} = \frac{z^{-2} + z^{-1}}{4 - z^{-1}} \quad (10)$$

Onde temos:

y_n = Valor final da conversão A/D

x_n = Resultado do conversor A/D

z^n = Operador equivalente a n leituras anteriores

O filtro digital aplicado é do tipo recursivo, ou seja, utilizamos a leitura anterior, aliada a novas leituras para a obtenção do resultado final. Neste caso, o microcontrolador executa 100 leituras, o resultado final é o registrado como o resultado da operação.

5.4 – Amplificação do sinal

Os amplificadores têm a função de elevar o nível do sinal para que ele seja corretamente convertido em dados digitais pelo conversor A/D. Neste equipamento, os amplificadores trabalharam com uma faixa de amplificação de 300 vezes.

O “*design*” do amplificador é mostrado na Figura 31, desenvolvido com base em um padrão comum para amplificadores diferenciais, recomendado para instrumentação de precisão. O CMRR, erro proveniente de pequenas

diferenças de valor dos componentes, deste design é extremamente baixo e tem-se a vantagem do tratamento dos dois sinais de forma idêntica.

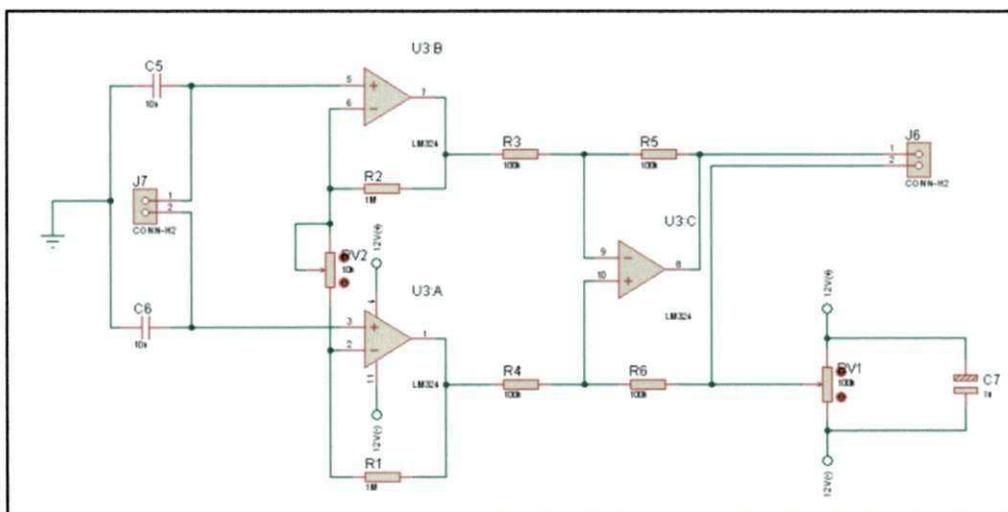


Figura 31 - Esquema Elétrico do Amplificador Utilizado

5.6 Aquisição de dados – Conversores Analógico-Digitais

Os sistemas de aquisição e conversão de dados são utilizados para ler sinais analógicos das mais diversas origens e converter estes sinais em dados digitais para transmissão por outros dispositivos como computadores, gravadores ou redes de comunicação. Os sinais utilizados em sistemas de aquisição de dados são gerados, na sua maioria, por sensores e transdutores que convertem valores do mundo real como pressão, temperatura, peso, força, fluxo, etc. em sinais elétricos equivalentes. Os sinais elétricos obtidos são então convertidos em dados digitais. A capacidade do sistema eletrônico de preservar a integridade e a precisão do sinal são a principal medida da qualidade deste sistema.

Os componentes básicos de um sistema de aquisição e conversão de sinais analógicos na sua forma digital equivalente são os seguintes:

- Multiplexador analógico.
- Capacitor de amostragem.

- Conversor analógico-digital.
- Temporizador.

Atualmente, a maioria dos sistemas de aquisição de dados contém todos os elementos necessários a aquisição e conversão dos dados, a exceção dos filtros analógicos e/ou digitais.

De uma forma simplificada, a operação de um sistema de conversão começa com a divisão do sinal no tempo pelo multiplexador analógico, em seguida, a saída deste multiplexador é conectada a um amplificador diferencial altamente linear e/ou a um capacitor de amostragem com uma faixa de atuação pequena, este capacitor fará a amostragem de cada parte proveniente do multiplexador que será convertida na forma digital pelo conversor A/D. Depois disto, o resultado é mostrado de forma paralela ou serial na saída do sistema para posterior processamento por outros dispositivos (BURR-BROWN, 2000).

A resolução de um conversor A/D refere-se ao número de bits usados para representar cada amostra. Uma amostra representada por apenas um bit poderia receber apenas dois valores: "0" ou "1". Já uma representação com 3 bits poderia receber 8 valores diferentes ($2^3 = 8$): 000, 001, 010, 100, 110, 101, 011, 111.

Quando é feita a amostragem do sinal, o valor medido é aproximado (quantizado) para o patamar mais próximo na escala de amplitude, gerando pequenos desvios em relação ao valor do sinal original. Esses desvios, chamados erros de quantização modificam o sinal original introduzindo ruído nas frequências mais altas. Pode-se minimizar os erros de quantização com o aumento da resolução em bits.

A correta seleção de um sistema de aquisição, considerando principalmente a performance tanto em termos de velocidade quanto de resolução é determinada pelos seguintes parâmetros:

- Número de canais analógicos de entrada;
- Amplitude dos sinais de entrada;
- Comprimento de banda dos dados;

- Resolução desejada;
- Freqüência de leitura.

Apesar desta linha não tratar de todos os critérios sob um ponto de vista matemático rigoroso, ela atua de uma forma extremamente eficiente do ponto de vista prático (BURR, BROWN – 2000)

5.7 Funcionamento do Equipamento

A principal característica do funcionamento do equipamento é a sua fácil operação. Procuramos assim, simplificar ao máximo a *interface* homem-máquina, reduzindo a um mínimo a quantidade de etapas para o início de um ensaio.



Figura 32 - Fluxograma de Uso do Equipamento

A Figura 32 mostra o fluxograma de uso do equipamento, onde as principais informações disponíveis na tela são o tempo de ensaio e a última carga lida. Para que não se tenha uma quantidade muito elevada de leituras, o intervalo de leitura do equipamento é configurada pelo operador no início do

ensaio, possibilitando assim uma melhor personalização frente ao tempo de ensaio.

Foi observada também a possibilidade de cancelamento imediato do ensaio (através da tecla ANULA), bem como alta capacidade de leituras e de tempo de ensaio. Os limites para utilização em um ensaio contínuo são de 999 horas ou 99.999 leituras, dando assim uma margem suficiente para largos tempos de análise da carga gerada pela argamassa.

Capítulo 6 – Programa Computacional de Análise de Dados do Equipamento

Para a análise dos dados obtidos em qualquer instrumento de ensaio, deve-se ter um processo padronizado para o processamento e avaliação das informações obtidas. A maioria dos equipamentos de ensaio gera resultados nos formatos mais simples, indo de valores analógicos até valores digitais em formato utilizável por um computador ou equipamento similar, como um coletor de dados.

O equipamento que se propõe gera dados em formato digital transmitidos via interface serial, podendo ser também lidos de maneira direta pela tela da própria máquina.

Para facilitar o trabalho com os dados obtidos, propõe-se o uso de um programa computacional simples, responsável pela leitura dos dados, arquivamento em um banco de dados, processamento e geração de gráficos e dados estatísticos.

Como característica adicional, o programa tem a capacidade de acesso remoto, permitindo o acesso as suas funcionalidades através de rede local ou Internet.

Neste capítulo, descreve-se a funcionalidade do programa dentro do sistema como um todo, a metodologia empregada no seu desenvolvimento e em seguida explora-se a sua arquitetura. Também são detalhados a implementação, os recursos mínimos (*programa computacional* e *“hardware”*) exigidos para a sua execução, e por fim a interface com o usuário.

6.2 – Funcionalidade

A função principal deste sistema é reduzir os dados coletados pelo equipamento de ensaio de pressão em informações úteis ao usuário do

sistema: valores médios e máximos de pressão, desvio padrão das amostras, gráficos de evolução da pressão expansiva, etc.

A aquisição de dados do sistema pode ser executada de maneira direta, pelo próprio programa proposto, ou de maneira indireta, com o programa comercial de comunicação serial com funcionalidade de captura de texto.

Após a etapa de aquisição, o programa armazena os dados obtidos no banco de dados geral do sistema, para realização das etapas de processamento gerenciadas pelo programa.

A operação do programa pressupõe certa seqüencialidade nas tarefas a serem executadas para ensaios não cadastrados. A Figura 32 mostra o fluxograma de uso do equipamento para um ensaio novo ou um já cadastrado, em um primeiro instante, os dados precisam ser lidos da máquina e gravados em um arquivo temporário. Este arquivo temporário, obtido de maneira direta ou indireta, deve ser gravado no banco de dados da máquina. A seguir, estes dados são processados em dados médios e estatísticos. A partir deste instante, todas as opções do sistema estão disponíveis para este ensaio, podendo ser executadas na seqüência em que o usuário preferir: impressão dos dados, visualização dos gráficos, busca de ensaios, início de novo ensaio, etc.

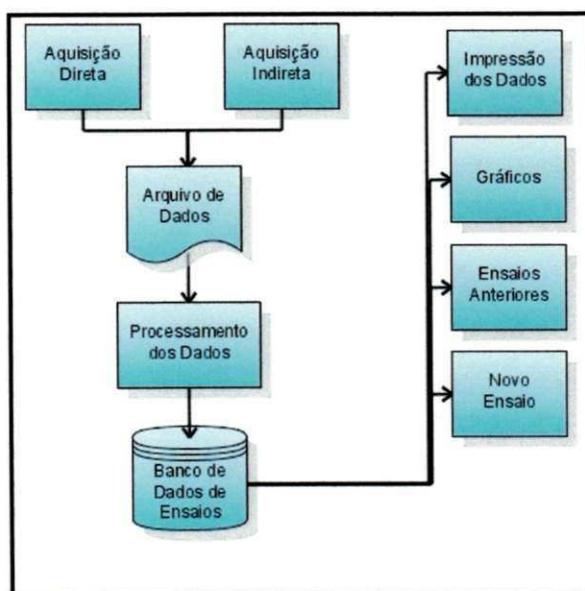


Figura 33-Operação do programa para um ensaio não cadastrado ou um novo ensaio

No caso da operação com um ensaio já cadastrado anteriormente, as opções estão disponíveis para uso direto, em qualquer seqüência definida pelo operador.

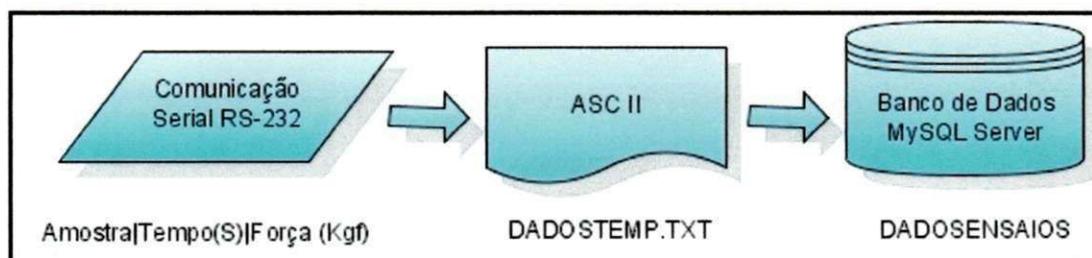


Figura 34 - Fluxo de Dados do Programa

Na Figura 34 tem-se ilustrado o fluxo de dados através do sistema. Como pode-se ver, os dados de força, tempo e amostras são gerados no equipamento e transmitidos ao computador via porta serial. Estes dados são gravados em um arquivo temporário em formato texto denominado DADOSTEMP.TXT, sem alteração de formatação.

A unidade de carga, neste arquivo, é quilograma força (Kgf). O formato deste arquivo é exibido na Figura 35.

Arquivo DADOSTEMP.TXT	Cabeçalho do Arquivo	Conteúdo: Nome e Versão da Máquina Tipo de Ensaio
	Corpo do Arquivo	Conteúdo: Número da Leitura Carga (Kgf) Tempo
	Final do Arquivo	Conteúdo: Intervalo entre leituras

Figura 35 - Formato do Arquivo de Dados Temporário

A partir do arquivo temporário, onde estão gravados os dados não tratados, o sistema executa processos de conversão e cálculos estatísticos. Os resultados deste processamento são anexados de outras informações do ensaio fornecidas pelo usuário (nome da argamassa, operador do ensaio, data do ensaio, etc.), depois ocorre a padronização destes dados para a etapa seguinte, de arquivamento em um banco de dados no "MySql".

Para executar o processamento e a gravação dos dados do arquivo temporário no banco de dados do ensaio, o operador escolhe a opção *Novo Ensaio* ou *Importar Arquivo de Dados*, respectivamente, no caso de uma leitura executada de maneira direta pelo programa e no caso de uma leitura indireta com a gravação dos dados por um outro programa de comunicação serial. Após a seleção da origem do arquivo, é solicitado ao operador os dados gerais do ensaio: nome do operador, argamassa utilizada, data do ensaio e observações. Assim, o arquivo é processado juntamente com os dados do experimento e arquivado no banco de dados para usos posteriores. O fluxograma desta operação está mostrado na Figura 36.

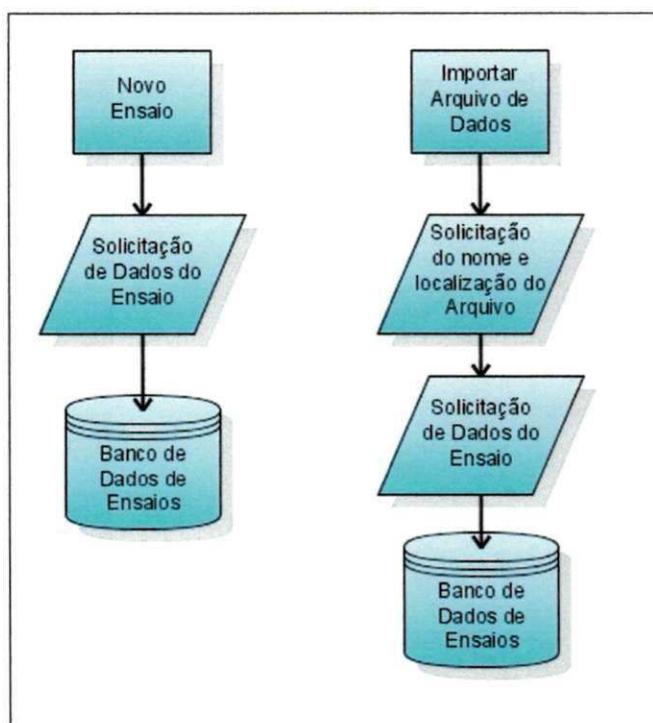


Figura 36 - Arquivamento dos Ensaios no Banco de Dados

A partir do arquivamento do ensaio no banco de dados, todos os ensaios estão acessíveis a qualquer momento no uso do programa, não sendo necessários reprocessamentos, acesso a outros arquivos ou uma conexão com o equipamento de ensaio.

O programa computacional foi desenvolvido para atender dois perfis de usuários, o operador do equipamento, geralmente com conhecimentos laboratoriais e de ensaios mecânicos, e o pesquisador dedicado à análise e interpretação dos dados obtidos nos ensaios de argamassa expansiva, com

demandas maiores de informações estatísticas. Para ambos os perfis, se buscou a máxima simplicidade e eficiência do programa, tendo em mente as principais demandas (gráficos, informações complementares, acessibilidade, etc.) de ambos os perfis.

6.3 Metodologia do Projeto do Programa Computacional

As características principais requeridas pelo programa computacional são compartilhadas pela estrutura física da máquina: confiabilidade e facilidade de operação. Além disso, a facilidade de manutenção e atualização são requisitos fundamentais em qualquer programa atual, pois sabe-se que quanto mais ele é usado, maior é a probabilidade de solicitações de usuários para alterações ou inclusão de novos recursos.

De forma similar a segurança e confiabilidade da parte física, que são atingidas pelos testes controlados com valores padrão, a confiabilidade do programa computacional pode ser atingida com a comparação dos valores obtidos pelo programa com valores processados através de outros métodos, manuais ou computadorizados. Também se executou testes intensivos e de uso crítico na versão preliminar do sistema com o acompanhamento de operadores e de especialistas na área de programação.

Na característica da facilidade de operação, relacionada com questões de interface homem-máquina, adotou-se a fórmula *janela-menu* como elementos estruturais para facilitar a operação do sistema. Para facilidade de manutenção e de reuso do código fonte adotamos o uso intensivo de *software livre* e de linguagem de programação interpretada.

O sistema foi construído em duas etapas: projeto da interface homem-máquina e projeto da aplicação específica. Inicialmente desenvolveu-se o cenário base para fornecer ferramentas elementares para a interface homem-máquina, depois passou-se ao desenvolvimento do programa de análise estatística dos dados obtidos pelo equipamento. Nos itens que se segue, discute-se sobre estas etapas de construção do projeto.

6.3.1 – Cenário-Base

O cenário-base para o desenrolar da aplicação específica, consiste de classes de objetos elementares como: janelas retangulares com acessórios (sombreamento, títulos, movimentação, redimensionamento), menus de opções com barra de seleção, lista de seleção, página gráfica, gráficos de linha, recursos do sistema operacional, arquivos e banco de dados em disco e em impressora e diretório de arquivos.

As classes de objetos criadas para este projeto, e seus relacionamentos (hierarquia), são mostrados na Figura 37. Deve-se observar que os métodos e atributos adotados para cada classe de objetos desenvolvidas para o projeto não esgotaram todas as possibilidades de comportamento e qualificação existentes para as entidades representadas, mas foram levadas em consideração, as necessidades padrão exigidas para o sistema em questão.

As classes *Diretório* e *Menu* herdam atributos da classe *Lista de Seleção*, a qual, por sua vez, é derivada da classe *Janela*. A mesma hierarquia é observada para as classes de objetos gráficos. Existe ainda uma classe de objetos com informações do sistema operacional (unidade de disco e diretório corrente, hora e data do sistema, dados de arquivo do diretório, etc.) que não deriva e nem é ascendente de qualquer outra classe. A classe *Edição de Texto* está mostrada no diagrama do projeto relacionando-se através de composição com as classes *Janela* e *Disco*, e ela representa objetos texto com métodos de manipulação dos mesmos em tela cheia.

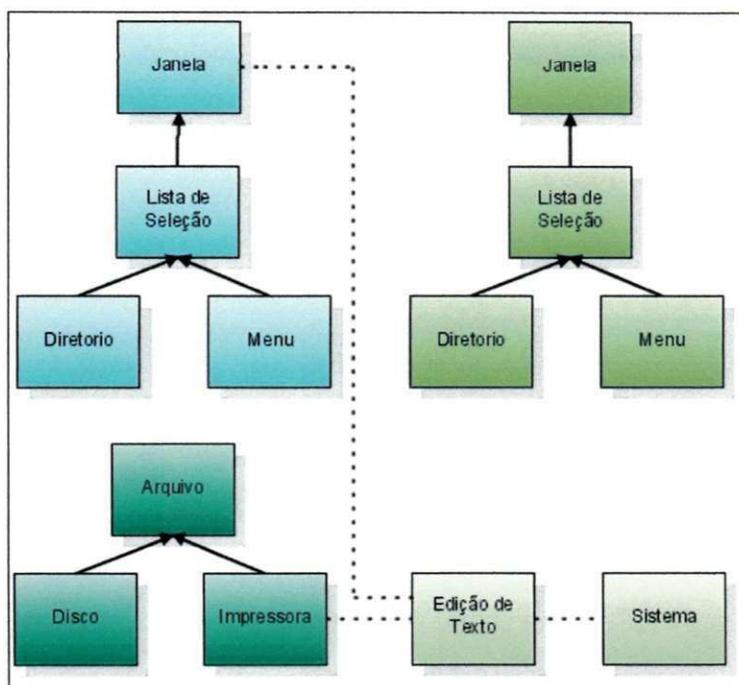


Figura 37 - Classes e Hierarquia

6.3.2 – Aplicação Específica

Após a conclusão do projeto do cenário, o desenvolvimento da aplicação específica se tornou simples com a decomposição funcional para a modelagem da espinha dorsal do programa. Desta estruturação funcional, surgiram módulos de programa gerenciadores que atendem às opções disponíveis nesta versão do programa, mostrada em diagrama de blocos na Figura 38.

Nestes módulos gerenciadores é que são criados dinamicamente os objetos, de acordo com as aplicações escolhidas pelo usuário durante a execução do programa e um módulo denominado *principal* faz a abertura da primeira tela do programa e a geração de algumas variáveis globais, como também o gerenciamento dos demais módulos. A primeira tela do programa está mostrada na Figura 39, bem como as opções iniciais disponíveis ao operador do ensaio ou ao analista dos dados.

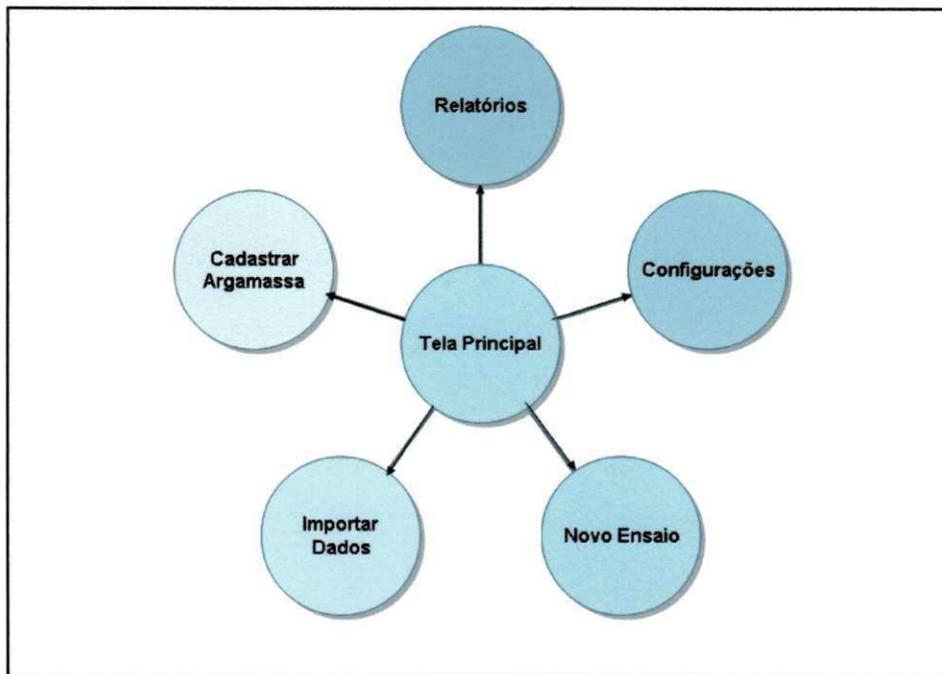


Figura 40 - Arquitetura do Programa de Análise dos Dados

Os dados do sistema são armazenados em um banco de dados em um servidor MySQL, sendo agrupados em Ensaio, Dados de Ensaio, Argamassas, Configurações e Usuários. Os relacionamentos entre as principais tabelas deste banco de dados estão mostrados na Figura 41.

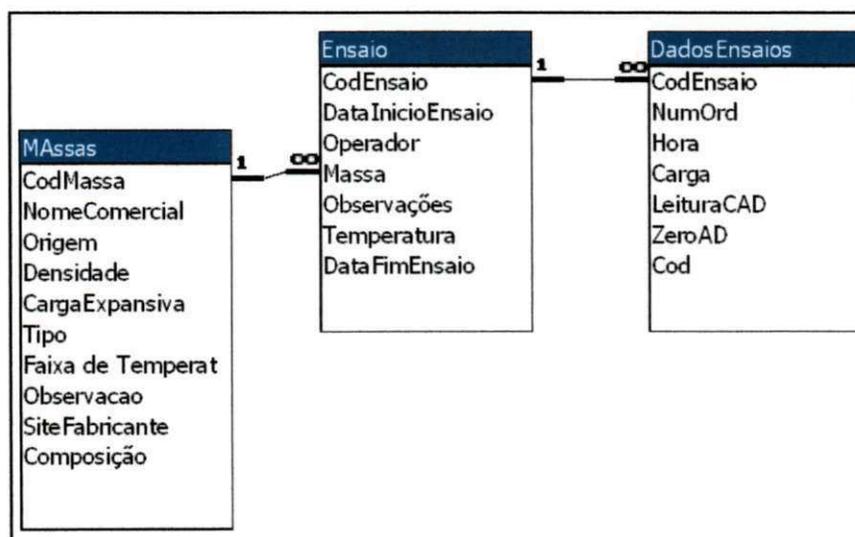


Figura 41 - Relacionamento Entre as Principais Tabelas do Banco de Dados

Os dados são armazenados neste banco de dados de forma padronizada e organizada pelo programa de análise dos dados, o dicionário de

dados que define os padrões nos quais os dados estão armazenados está mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Dicionário de Dados do Banco de Dados de Ensaio

Dadosensaios			
Campo	Tipo	Nulo	Padrão
CodEnsaio	int(11)	Sim	NULL
NumOrd	int(11)	Sim	NULL
Hora	Text	Sim	NULL
Carga	int(11)	Sim	NULL
LeituraCAD	int(11)	Sim	NULL
ZeroAD	int(11)	Sim	NULL
Cod	int(11)	Não	0
Ensaio			
Campo	Tipo	Nulo	Padrão
CodEnsaio	int(11)	Não	0
DataInicioEnsaio	datetime	Sim	NULL
Operador	Text	Sim	NULL
Massa	int(11)	Sim	NULL
Observações	Text	Sim	NULL
Temperatura	int(11)	Sim	NULL
DataFimEnsaio	datetime	Sim	NULL
Argamassas			
Campo	Tipo	Nulo	Padrão
CodMassa	int(11)	Não	0
NomeComercial	Text	Sim	NULL
Origem	Text	Sim	NULL
Densidade	Double	Sim	NULL
CargaExpansiva	Float	Sim	NULL
Tipo	Text	Sim	NULL
Faixa_de_Temperatura	Text	Sim	NULL
Observacao	Text	Sim	NULL
SiteFabricante	mediumtext	Sim	NULL
Composição	Text	Sim	NULL

6.5 Recursos Utilizados

6.5.1 Implementação do Programa

No desenvolvimento do programa, optou-se por linguagens de programação voltadas para aplicativos executados via Internet ou Intranet. Esta

escolha se baseou em algumas características desejáveis desta metodologia de programação: fácil utilização de diversos sistemas operacionais (Plataformas Linux, Windows, Mac, etc.), ferramentas de desenvolvimento gratuitas, fácil integração, disponibilidade para acesso remoto via Internet ou Intranet.

Dentre as linguagens mais comuns para o desenvolvimento de aplicativos nos padrões desejados, as mais citadas são o Java e o PHP. Ambas têm ampla gama de ferramentas de desenvolvimento livres e gratuitas. A opção entre as duas se norteou na facilidade de programação e leitura de código, considerando principalmente a simplicidade do programa a ser desenvolvido, neste sentido, o PHP se mostrou a ferramenta ideal para o desenvolvimento do programa.

A linguagem PHP é interpretada, ou seja, o código-fonte do programa é compilado no momento da execução do mesmo, permitindo assim o acesso e alteração em qualquer etapa do processo. Outra característica importante é a facilidade de leitura do código, o PHP é uma linguagem de comandos simples e amplamente intuitivos.

A versão utilizada no programa foi a 5.0 *beta*, apesar de ser ainda uma versão preliminar, ela possui recursos de acesso a porta serial do computador, inexistente em versões anteriores, o que seria um fator limitante grave no uso da versão 4.0.

Os arquivos de código-fonte possuem a extensão *.php*, sendo extremamente pequenos, neste programa, utilizamos apenas 230 *kilobytes* em cerca de 3000 linhas de código, desenvolvidos ao longo de 5 meses.

Para o arquivamento dos dados, seguiu-se a mesma linha adotada no caso da linguagem de programação, ou seja, gerenciadores de banco de dados gratuitos voltados para Internet e Intranet. Dentre os mais conhecidos, tem-se o MySQL, muitas vezes incorporado em pacotes de desenvolvimento voltados para o PHP. Como vantagens têm-se a velocidade deste gerenciador de banco de dados, a facilidade de uso e a possibilidade de migração simples entre diversos sistemas operacionais.

6.5.2 – Execução do Programa de Análise dos Dados

A plataforma computacional mínima para a execução do programa deve ter CPU com uma velocidade mínima de 750 MHz (Pentium III ou similar). Memória RAM mínima de 128 *megabytes*, memória de massa (disco rígido) com pelo menos 2 gigabytes de espaço livre, monitor de vídeo com uma resolução mínima de 800x600 pontos. Deve-se ter também uma porta de comunicação serial RS-232 e uma forma de transferência de dados como uma placa de rede, porta USB ou unidade de disquetes.

O programa foi desenvolvido para trabalhar em qualquer sistema operacional baseado em Windows ou Linux, em versões que tenham suporte a servidores de Internet.

Foram executados testes em três plataformas de *hardware* descritas na Tabela 7 com o desempenho qualitativo.

Tabela 7 - Plataformas de Hardware Utilizadas nos Testes Preliminares do Programa

	<i>Plataforma 1</i>	<i>Plataforma 2</i>	<i>Plataforma 3</i>
Processador	Pentium III – 750MHZ	Athlon 1800+ – 1100MHz	Pentium IV Xeon – 3.06GHz
Memória	256 <i>Megabytes</i>	256 <i>Megabytes</i>	512 <i>Megabytes</i>
Desempenho	Bom	Excelente	Excelente

Os testes de sistema operacional também foram executados em três plataformas, descritas na Tabela 7 com o desempenho qualitativo.

Tabela 8 – Sistemas Operacionais Utilizados nos Testes Preliminares do Programa

<i>Sistema Operacional</i>	<i>Windows 2000 Server</i>	<i>Windows XP</i>	Ubuntu (Linux)
Processador	Pentium III – 750MHZ	Athlon 1800+ – 1100MHz	Athlon 1800+ – 1100MHz
Memória	256 <i>Megabytes</i>	256 <i>Megabytes</i>	256 <i>Megabytes</i>
Desempenho	Bom	Excelente	Excelente

Capítulo 7 – Testes e Resultados do Equipamento

O equipamento e o programa de análise dos dados obtidos durante os ensaios de pressão expansiva foram avaliados em testes padronizados de dois tipos: ensaios com variáveis conhecidas e ensaios com argamassas expansivas.

Os ensaios com variáveis conhecidas (carga, evolução da carga ao longo do ensaio) foram executados para a calibração do equipamento, testes do programa e avaliação do desempenho geral. Estes ensaios foram executados sem a utilização da estrutura mecânica completa, sendo os pesos aplicados diretamente a célula de carga como mostrado na Figura 42.



Figura 42 - Ensaio de Peso de 5Kg

Os ensaios com argamassas expansivas foram executados para a validação da estrutura mecânica, da metodologia, avaliação do corpo de prova e do comportamento geral do equipamento no seu uso final.

Todos os ensaios foram executados com o uso do programa de análise dos dados em contato direto com o equipamento. Os pesos padronizados utilizados durante estes testes foram gentilmente cedidos pela Campina Balanças e são mostrados na Figura 43.



Figura 43 - Pesos Padronizados Usados Nos Testes do Equipamento

7.1 Ensaio com Força Nula

Este ensaio foi realizado para avaliar a estabilidade do equipamento, na ausência de qualquer pressão. A partir dele, tem-se como verificar principalmente a estabilidade do circuito eletrônico frente a um estado estático simples.

Para a sua execução, estacionou-se a plataforma do equipamento em uma posição livre de qualquer barreira, e iniciou-se um ensaio com intervalo de leitura de 1 segundo. As leituras resultantes devem se manter estáticas durante um período mínimo de 15 minutos, o equivalente a 900 leituras de força executadas pelo circuito eletrônico, recebidas e processadas pelo programa de análise de dados.

O gráfico resultante deste teste, gerado no programa de análise de dados do equipamento, está mostrado na Figura 44.

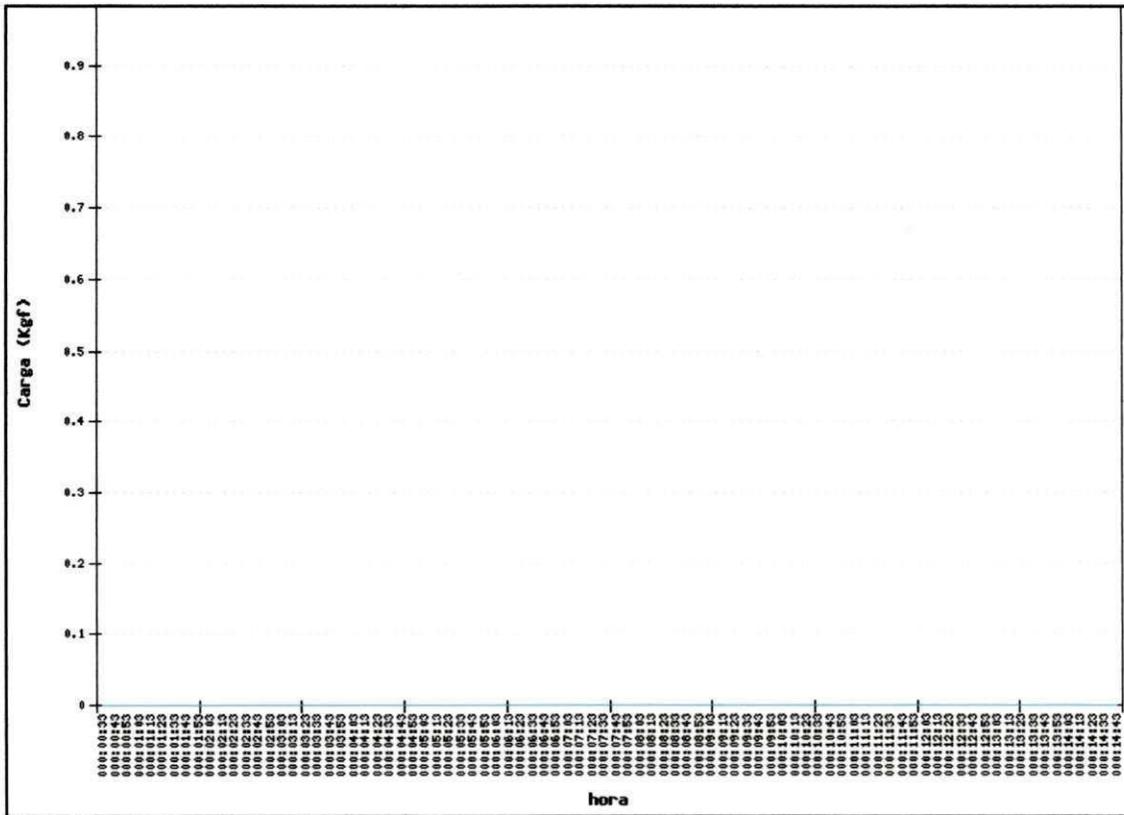


Figura 44 - Gráfico Resultante do Ensaio de Peso Nulo

Conforme pode-se verificar, a estabilidade do equipamento durante este ensaio demonstra a sua qualificação positiva neste teste de validação.

7.2 Teste do Sistema Automático de Tara do Equipamento

O equipamento foi projetado para que, no início dos ensaios, a carga seja tarada e a leitura estacionada em zero. Para avaliar o funcionamento deste recurso, executaram-se três ensaios: ensaio com peso inicial de 25Kg, ensaio com peso inicial de 25Kg e posterior adição de 5Kg e ensaio com peso inicial de 25Kg com adição de 50Kg.

O ensaio com peso inicial de 25Kg foi executado para o teste mais simples do sistema de tara do equipamento, avaliando a estabilidade do circuito eletrônico frente a esta carga inicial. O resultado deste teste foi bem sucedido, gerando informações similares ao ensaio com peso inicial nulo.

O ensaio de adição de 5Kg foi executado com o mesmo peso inicial, sendo adicionado um peso padrão de 5Kg aos 25Kg impostos inicialmente ao equipamento. Os resultados deste teste estão mostrados na Figura 45.

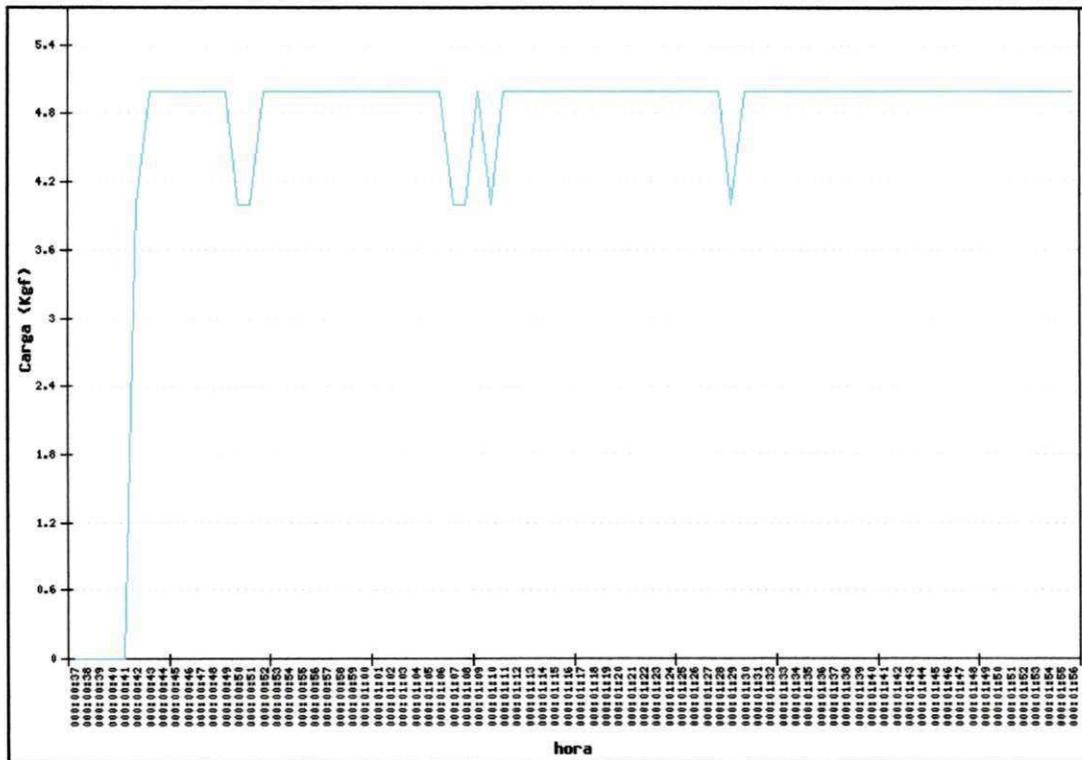
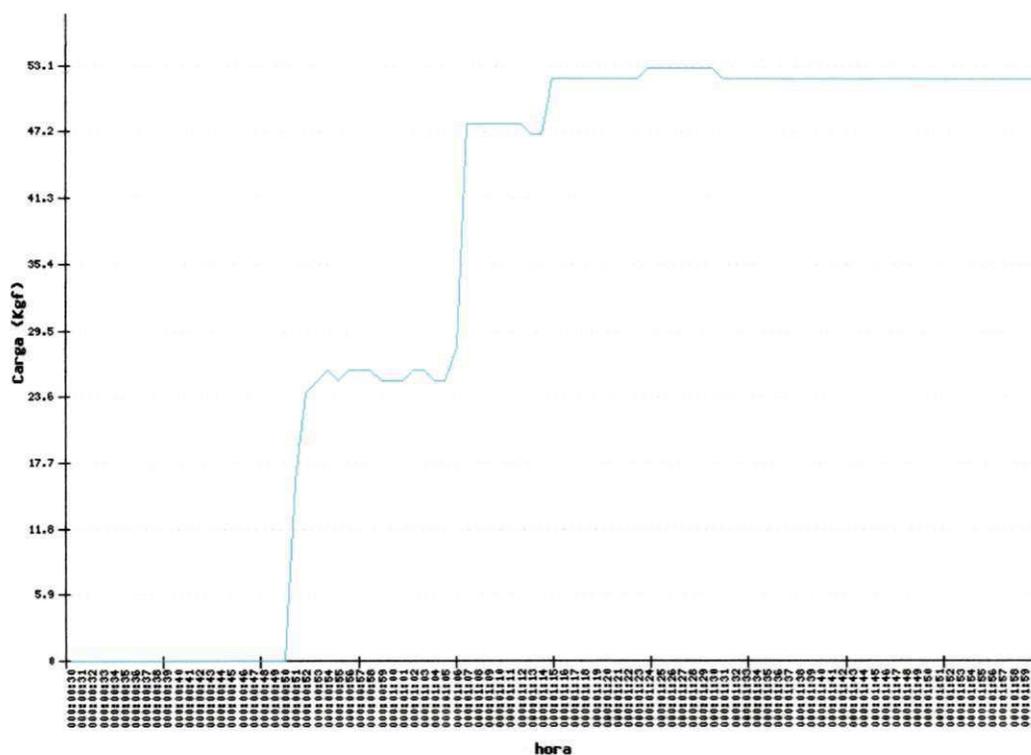


Figura 45 - Ensaio de Tara com 25Kg e Adição de 5Kg

Conforme podemos observar, o equipamento manteve-se estável, com apenas algumas oscilações irrelevantes e consideradas normais.

Após o ensaio com a adição de 5Kg, adicionou-se 50Kg ao equipamento, partindo-se do mesmo ponto inicial de tara em 25 kg. Os dados deste ensaio estão na Figura 46.

O primeiro patamar, em 25kgf, corresponde a primeira adição de pesos, a segunda completa os 50Kgf e finaliza a adição de pesos. Pode-se verificar, mais uma vez, a estabilidade do equipamento nestas condições.



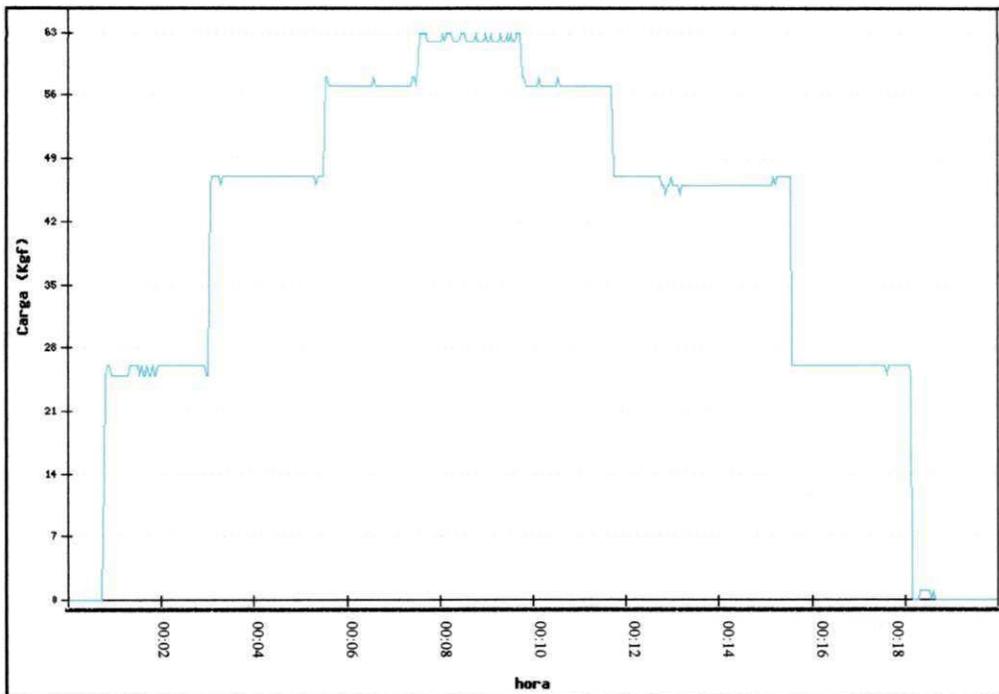


Figura 47 - Ensaio de Adição Sucessiva de Pesos

Como ensaio complementar, executamos mais um ensaio submetendo o equipamento a uma oscilação de massa imposta fisicamente, os resultados estão na Figura 48.

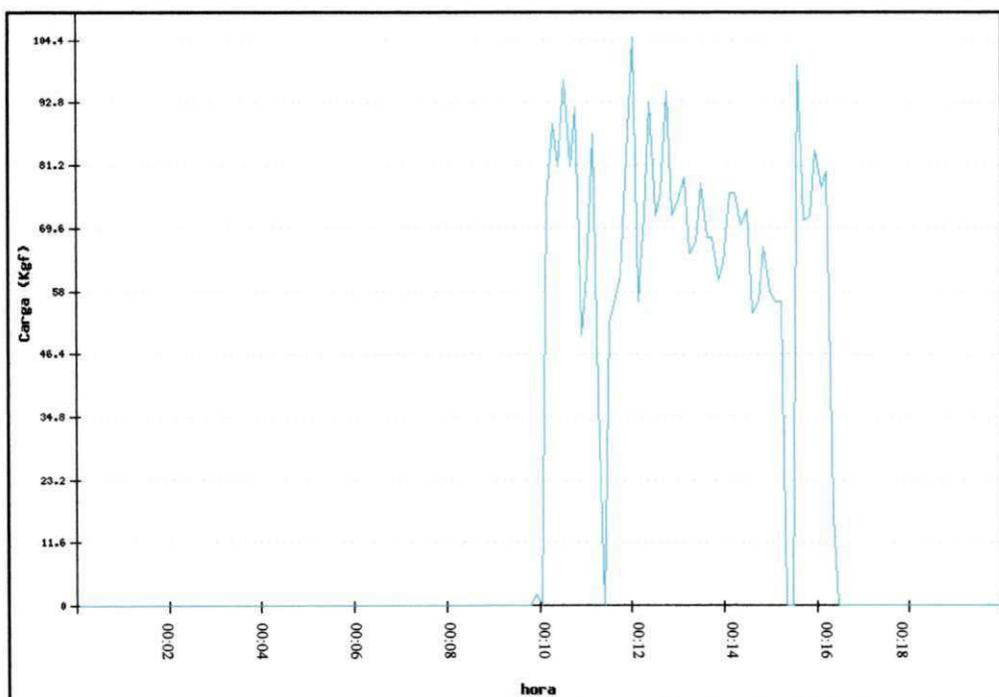


Figura 48 - Ensaio de Oscilação Livre de Carga

7.4 – Ensaio com Argamassa Comercial

Para o ensaio de uma argamassa comercial, utilizou-se uma argamassa expansiva de origem chinesa, cedida pela FUJI – Mármore e Granitos S/A, de marca não informada.

O ensaio foi executado em um período de 24 horas, no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG, sendo os dados capturados em uma estação de trabalho local e analisados posteriormente em um computador Pentium III com 750MHz,

Foi adotada a metodologia descrita no Capítulo 4 no dia 26 de março de 2007. A temperatura do laboratório, aferida nas primeiras horas do ensaio com um multímetro modelo ET-2042C da marca Minipa, foi de $26^{\circ}\text{C} \pm 2$. O resultado obtido está mostrado na Figura 49.

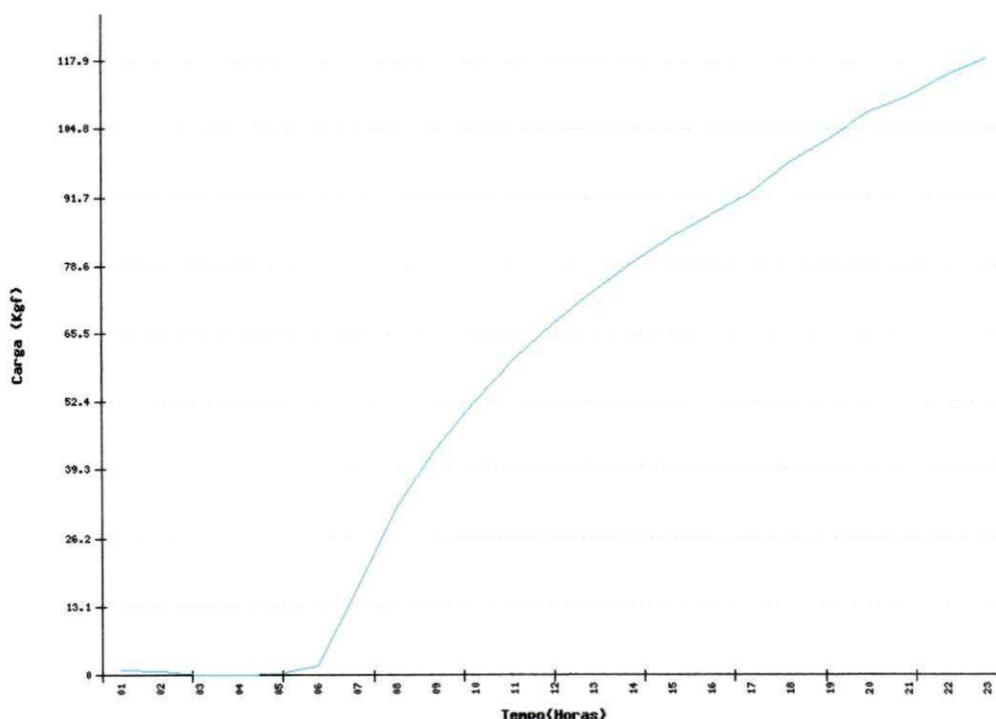


Figura 49 - Resultado do Ensaio de Pressão para a Argamassa Comercial

De forma similar a argamassa laboratorial, o comportamento da argamassa comercial é de uma expansão relativamente lenta, com uma tendência de diminuição da taxa de crescimento. A força máxima atingida foi de 117 Kgf, equivalente a 5958 toneladas por metro quadrado.

Pode-se observar também que o tempo de início de reação de expansão é maior no caso da argamassa comercial, bem como a pressão de expansão final também é maior, demonstrando uma maior eficiência que a argamassa laboratorial.

7.5 – Ensaio com Argamassa Desenvolvida em Laboratório

Os ensaios com argamassas expansivas começou com o ensaio de uma argamassa desenvolvida no projeto financiado pelo BNB/FUNDEC1 para desenvolvimento de argamassas expansivas com o uso de minerais regionais do Nordeste do Brasil.

A argamassa em questão tem 60% de óxido de cálcio, agente retardador e aditivos reguladores do tempo de pega.

O ensaio foi executado em um período de 24 horas, no Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG, sendo os dados capturados em uma estação de trabalho local e analisados posteriormente em um computador Pentium III com 750MHz.

O ensaio foi executado seguindo a metodologia descrita no Capítulo 4 no dia 14 de março de 2007. A temperatura do laboratório, aferida nas primeiras horas do ensaio com um multímetro modelo ET-2042C da marca Minipa, foi de $25^{\circ}\text{C}\pm 2$. O resultado obtido está mostrado na Figura 50.

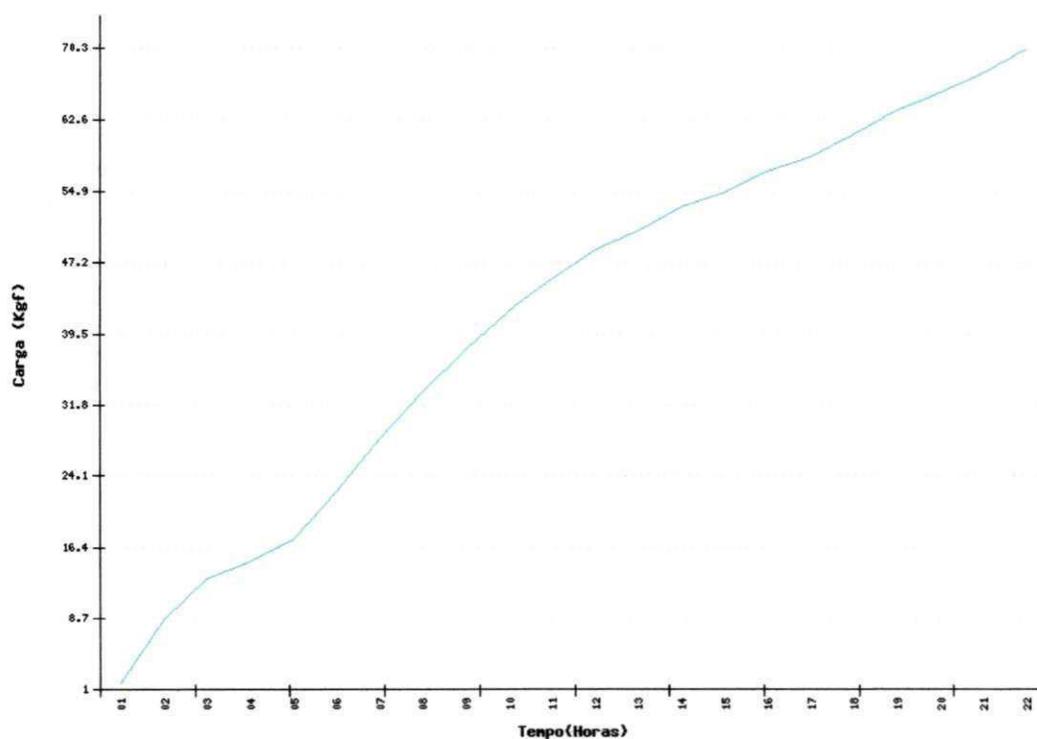


Figura 50 - Resultado do Ensaio de Pressão para a Argamassa Laboratorial

Como pode-se verificar, o comportamento da argamassa laboratorial é de uma expansão relativamente lenta, com uma tendência de diminuição da taxa de crescimento. A força máxima atingida foi de 71Kgf, equivalente a 3616 toneladas por metro quadrado.

Capítulo 8 – Considerações Finais

8.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um equipamento de ensaio para avaliação de pressão de expansão de argamassa expansiva, utilizando para isso ferramentas de desenvolvimento baseadas em metodologias CAD, microcontroladores, e tecnologia de software livre. Com o uso destas ferramentas e a adoção da metodologia proposta, foi possível a execução do equipamento de avaliação de pressão expansiva, composto da estrutura mecânica, do circuito eletrônico de aquisição de dados do ensaio e do programa computacional de análise dos resultados.

A estrutura mecânica atendeu as expectativas iniciais, tendo esta a estabilidade e a funcionalidade demandadas pela metodologia do ensaio.

O circuito eletrônico de aquisição dos dados se mostrou eficaz na conversão dos dados obtidos pela célula de carga em dados digitais passíveis de manipulação, tanto de forma direta, através dos *displays LCD* do equipamento, quanto de forma indireta através do envio das informações para um microcomputador via porta de comunicação serial.

A capacidade de acoplamento de outros sensores, como temperatura ou condutividade foi disponibilizada, tanto no corpo de prova através de orifícios laterais, como no circuito eletrônico através de canais de dados suplementares. A aquisição dos dados via circuito eletrônico não foi propriamente testada, sendo dados de temperatura obtidos, no decorrer dos testes preliminares do equipamento, obtidos já do corpo de prova, mas de forma isolada do circuito de aquisição de dados.

O programa computacional corresponde de maneira simples e eficiente as principais demandas do pesquisador ou usuário que trabalhe com suas ferramentas. Foi também eficiente no sentido de portabilidade entre sistemas operacionais e no uso de *software livre* na totalidade de seu desenvolvimento.

O equipamento desenvolvido neste trabalho é capaz de executar a avaliação de pressão de expansão desenvolvida ao longo de ensaios com a argamassa expansiva. Além disso, seu funcionamento é regular e sensível o suficiente para a execução de ensaios de longa duração, possibilitando assim o estudo do comportamento da argamassa expansiva ao longo do tempo.

8.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões de melhoria do equipamento e de pesquisas baseadas neste trabalho podem ser divididas em dois grupos distintos, de acordo com as suas complexidades de realização, esforço e tempo de adaptação de equipamentos e metodologia.

8.2.1 Melhorias e Pesquisas Imediatas

- Utilização de novos formatos de corpos de prova, procurando assim avaliar o comportamento das argamassas expansivas de acordo com o formato do meio confinante.
- Testes de argamassas com células de carga mais sensíveis. Tendo em vista que a velocidade de expansão é extremamente lenta, uma precisão maior na aquisição dos dados pode melhorar os dados obtidos nos ensaios.
- Avaliação da implantação de termopares do tipo K no corpo de prova, com as informações de temperatura sendo transferidas através do programa computacional desenvolvido.
- Implantação de metodologias de melhora de desempenho no banco de dados, visto que a quantidade de dados obtidas em ensaios de longa duração é muito grande, podendo causar a lentidão do programa computacional de análise dos dados.
- Implementação de um sistema de alimentação ininterrupta para garantir a continuidade do ensaio no caso de parada da rede elétrica.

8.2.2 Melhorias e Pesquisas Futuras

- Troca do motor elétrico do equipamento por um servomotor, provendo assim uma maior precisão no movimento, menor ruído elétrico, e possibilidade de execução de ensaios dinâmicos.
- Implantação de leitor/gravador de cartões de memória, para possibilitar o funcionamento do equipamento de forma isolada de um computador.
- Permitir o controle remoto do equipamento via programa de operação.
- Implementação de um microcontrolador ou microcontrolador com arquitetura de 16 ou 32 bits, ampliando assim a capacidade de expansão do equipamento.
- Utilização de um conversor analógico/digital isolado do microcontrolador, permitindo uma maior frequência de leitura e maior precisão nos dados obtidos.
- Troca dos *displays* LCD por um monitor LCD, permitindo a visualização direta do comportamento da argamassa.
- Substituição da interface serial por uma USB ou compatível com redes de computadores.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14081 (ABNT 1998)**; Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - Especificação. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14082 (ABNT 1998)**; Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - Execução do substrato-padrão e aplicação de argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14083 (ABNT 1998)**; Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14084 (ABNT 1998)**; Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14085 (ABNT 1998)**; Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 14086 (ABNT 1998)**; Argamassa colante industrializada para assentamento de placas de cerâmica - Ensaios de caracterização no estado anidro. Rio de Janeiro, 1998.

BNDES Setorial. Banco Nacional de Desenvolvimento. Rochas Ornamentais : Exportações Promissoras Rio de Janeiro, n. 17, mar. 2003.

CHIODI FILHO, C. Situação e Perspectivas Brasileiras no Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ROCHAS ORNAMENTAIS DO NORDESTE, 2, 2001 Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: CETEM; SGM, 2001.

Consejo Superior de Investigaciones Cientificas - CSIS - **Museo Virtual de La Ciência**. Disponível em < http://museovirtual.csic.es/coleccion/torres/fichas_aparatos/toap35.htm>. Acesso em maio de 2007.

Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM , **Anuário Mineral Brasileiro**, Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM, Ano 35, 2006.

HANIF, M., AL-MAGHRABI, M. N. H. Effective Use of Expansive Cement for the Deformation.... **G.U. Journal of Science**, Jeddah – Arabia Saudita, p. 1-5, 22 de novembro de 2006. Disponível em < [http://www.fbe.gazi.edu.tr/dergi/tr/dergi/tam/20\(1\)/1.pdf](http://www.fbe.gazi.edu.tr/dergi/tr/dergi/tam/20(1)/1.pdf) >. Acesso em 7 de maio de 2007.

ISHIDA, T. et al. Effect of thermal stress in fracturing by expansive cement agent... In: The U.S. Symposium on Rock Mechanics, 40., 2005, Alaska. **Anais**... Alaska: American Rock Mechanics Association, 2005. Disponível em <http://www.geolab.jp/report/PDF/033_200506.pdf>. Acesso em 2 de maio de 2007.

KAWANO, et al. **Patente nº 4,316,583**. Disponível em <<http://www.patft.uspto.gov>>. Acesso em fevereiro de 2005.

LUZ, J. A. M., BALAREZO, F. J. M., PEREIRA, C. A. **Emprego de argamassa expansiva em termoconsolidação de peças em cantaria**. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 56(3): 161-167, jul. set. 2003.

MOYER, Jr, et al. **Patente nº 4,205,994**. Disponível em <<http://www.patft.uspto.gov>>. Acesso em fevereiro de 2005.

PINHEIRO, J. R. **O emprego da argamassa expansiva na extração de rochas ornamentais**. Rochas de Qualidade, v. 28, n. 145, março/abril, 1999

SHIRO ISHI. **Study of a Demolition Method Using Non Explosive Demolition Agent**, R & D Laboratório de Novos Produtos, Onada Cement Co., Japão, 2006.

SUZUKAWA, et al. **Patente nº 4,452,637**. Disponível em <<http://www.patft.uspto.gov>>. Acesso em fevereiro de 2005.

VALE, E. **Aspectos Legais e Institucionais do Setor de Rochas Ornamentais**. Vol 1. Fortaleza, 1997. Instituto Euvaldo Lodi.

VILLASCHI FILHO, A., SABADINI, M. S. **Arranjo produtivo de rochas Ornamentais (mármore e granito) no Estado do Espírito Santo**. Rio de Janeiro: Instituto de Economia - IE/UFRJ, 2000.

WEBMINERALS. Disponível em <<http://www.webminerals.com>>. Acesso em maio de 2007

WIKIPEDIA. Disponível em <<http://pt.wikipedia.org/>> . Acesso em maio de 2007.

ROGERTEC. **Cimento expansivo**. Disponível em <<http://www.rogertec.com.br>>. Acesso em fevereiro de 2005.

ARAUJO NETO, T. L. **Problemas Gerados Pela Extração De Rochas....**, Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro, 2006. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CUNHA, C. T. C. **Desenvolvimento de Argamassa Expansiva para Lavra de Rochas...**, Relatório Parcial de Iniciação Científica, Campina Grande, 2005. Universidade Federal de Campina Grande.

SILVA, R. A. V. **Máquina de Análise de Carga Estática...**, Seminário, Campina Grande, 2006. Universidade Federal de Campina Grande.

Anexo I – Desenhos Técnicos das Principais Partes do Equipamento

A

A

B

B

C

C

D

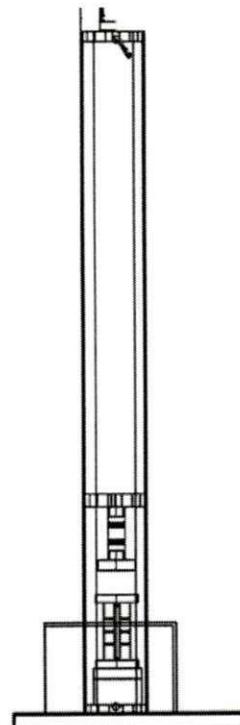
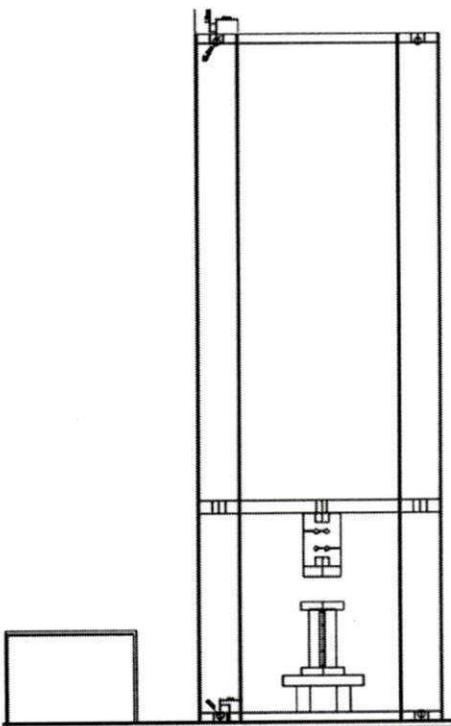
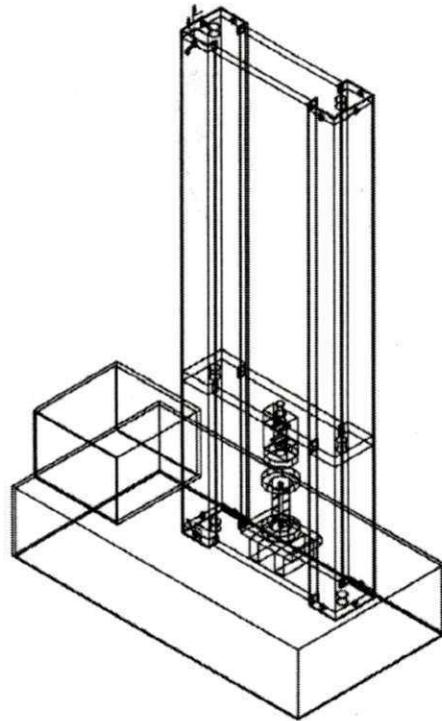
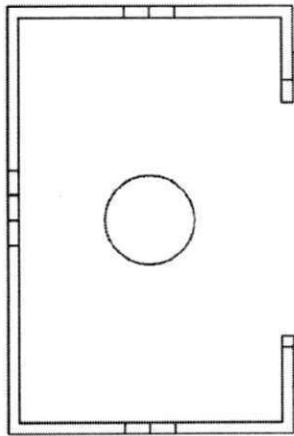
D

E

E

F

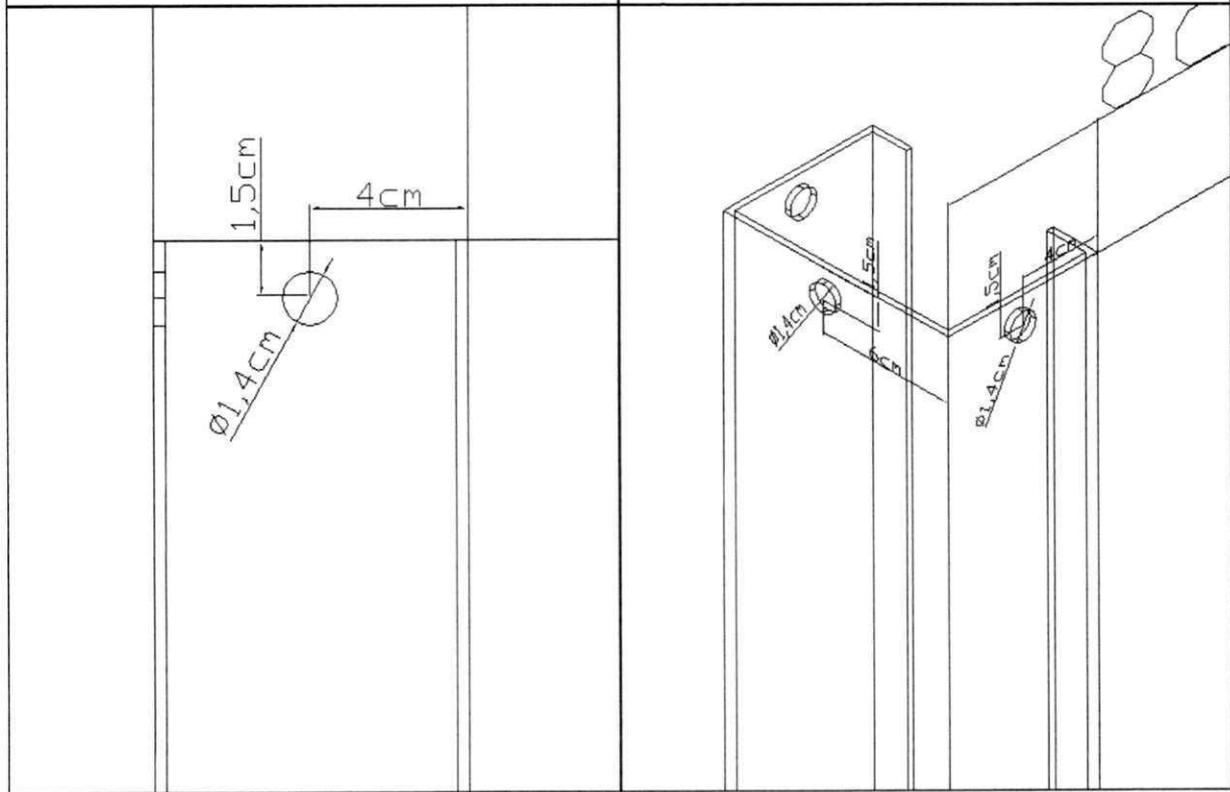
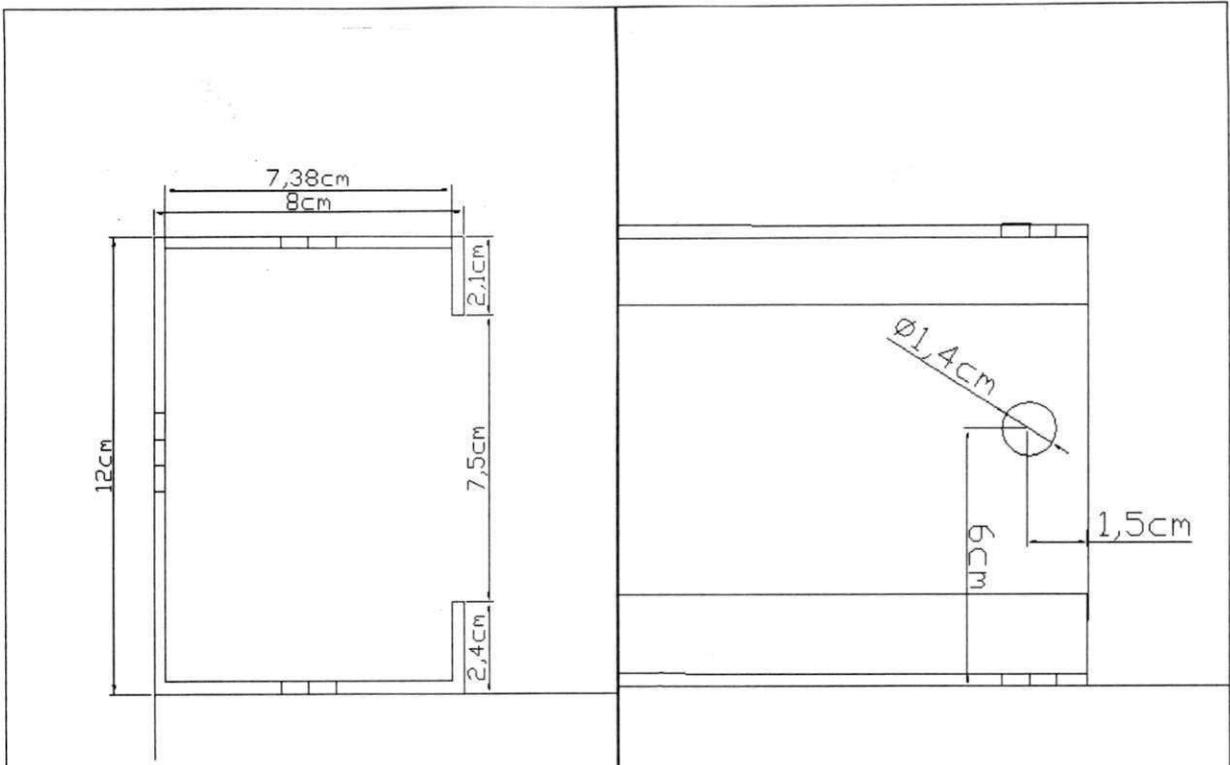
F



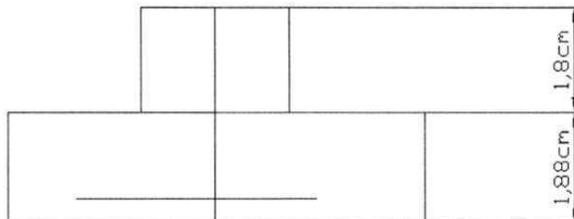
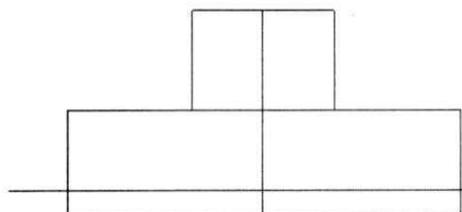
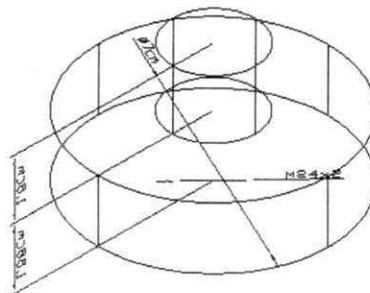
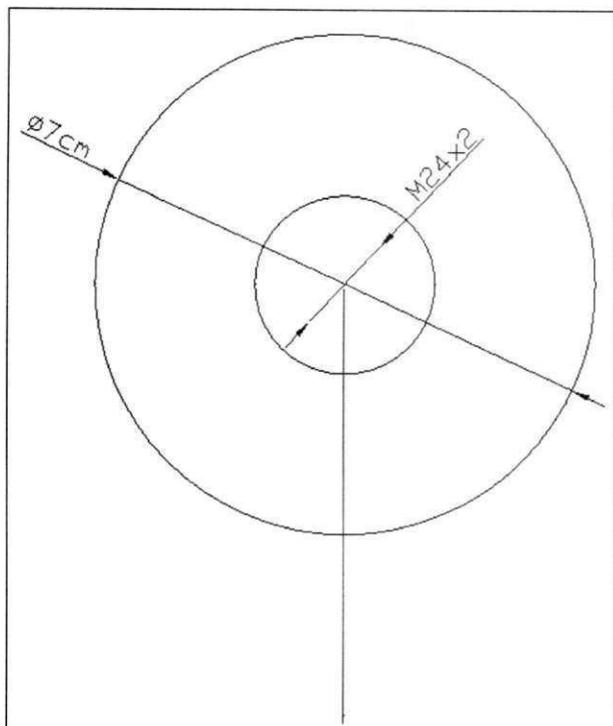
002/02	1	Barra Lateral Esquerda		001/02	
Designed by	Checked by	Approved by - date	File name	Date	Scale
Rômulo Augusto	Rômulo	18/01/2006	lateralesqu...	18/01/2006	-
Rômulo Augusto			Barra Lateral		
			2/2	Edition	Sheet
				1	2/2

UFMG/BIBLIOTECA

1	2	3	4
RevNo	Barra Lateral Esquerda	18/01/2006	RAVS
		Checked	

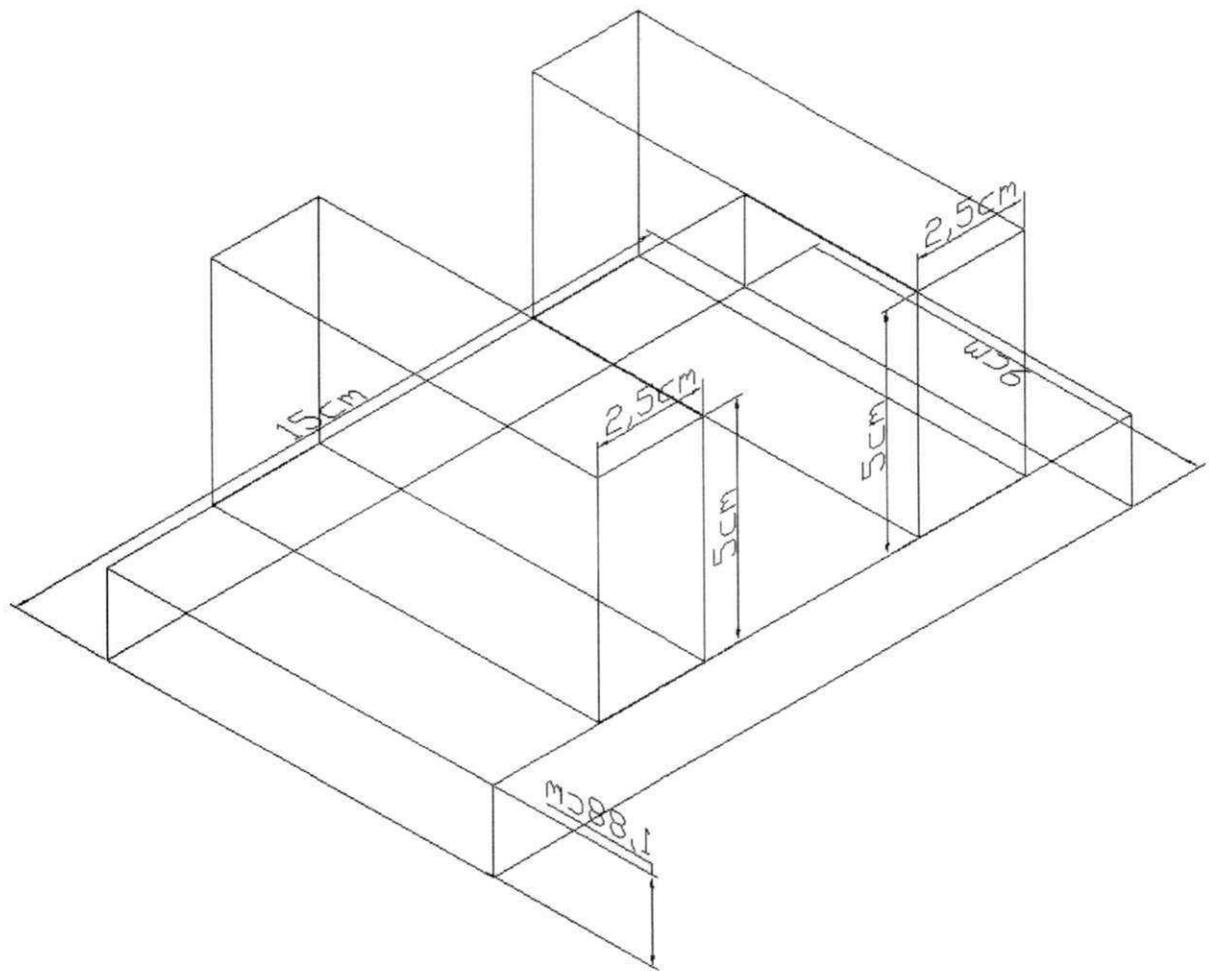


002/02	1	Barra Lateral Esquerda	001/02
Designed by Rômulo Augusto	Checked by Rômulo	Approved by - date 18/01/2006	File name lateralesqu...
Rômulo Augusto		Barra Lateral - Detalhe	
		1/2	Edition 1
			Sheet 1/2

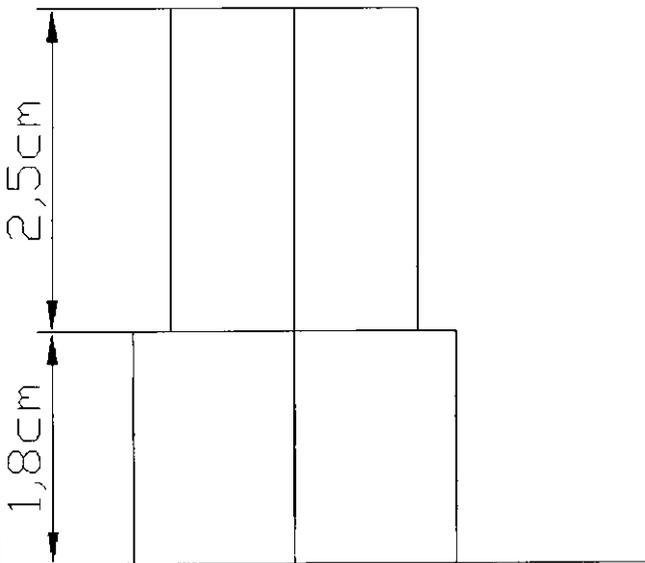
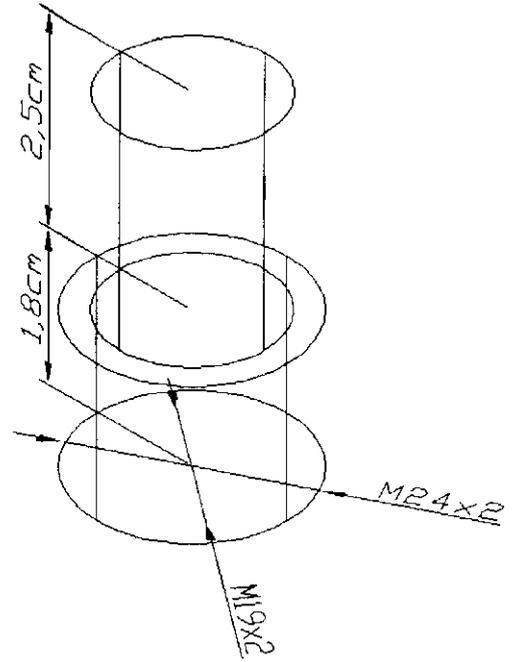
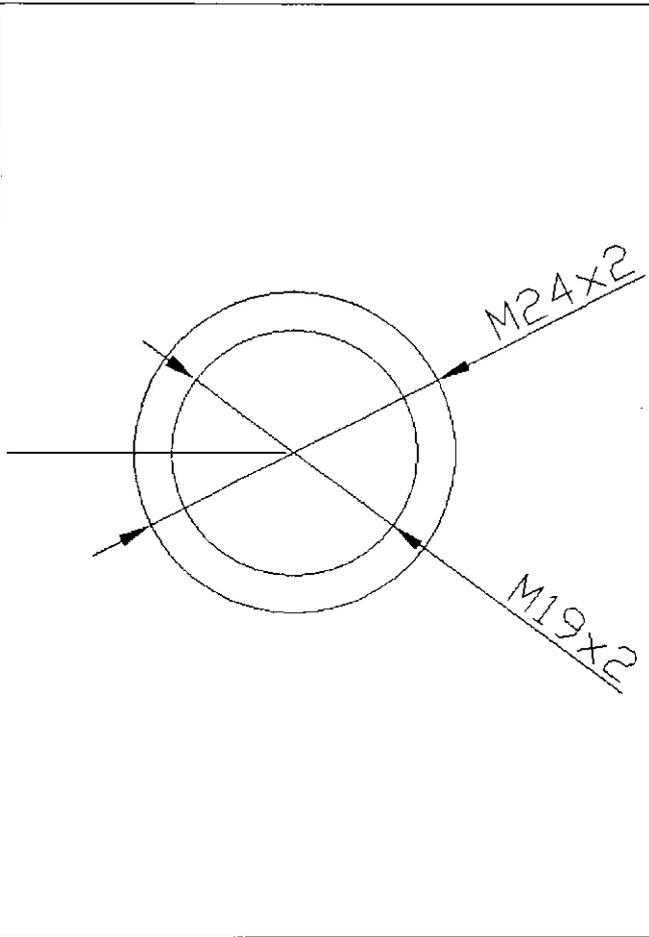


1/1	Quantity	Botão de Carga para Corpo de Prova			002/01
Designed by Rômulo Augusto	Checked by Rômulo	Approved by - date 17/01/2006	File name loadbutton.dwg	Date 17/10/2006	Scale 1:1
Rômulo Augusto		Botão de Carga			
		2	Edition 1	Sheet 1/1	

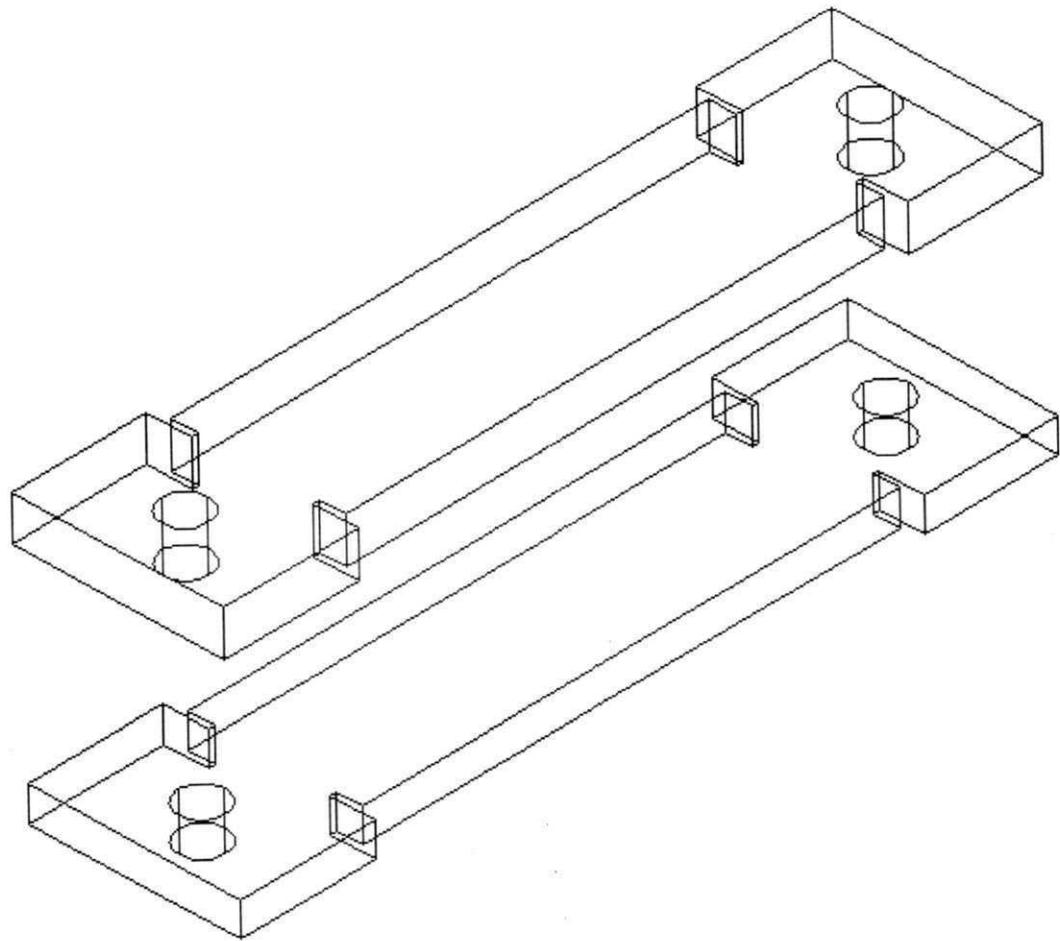
Base do Corpo de Prova



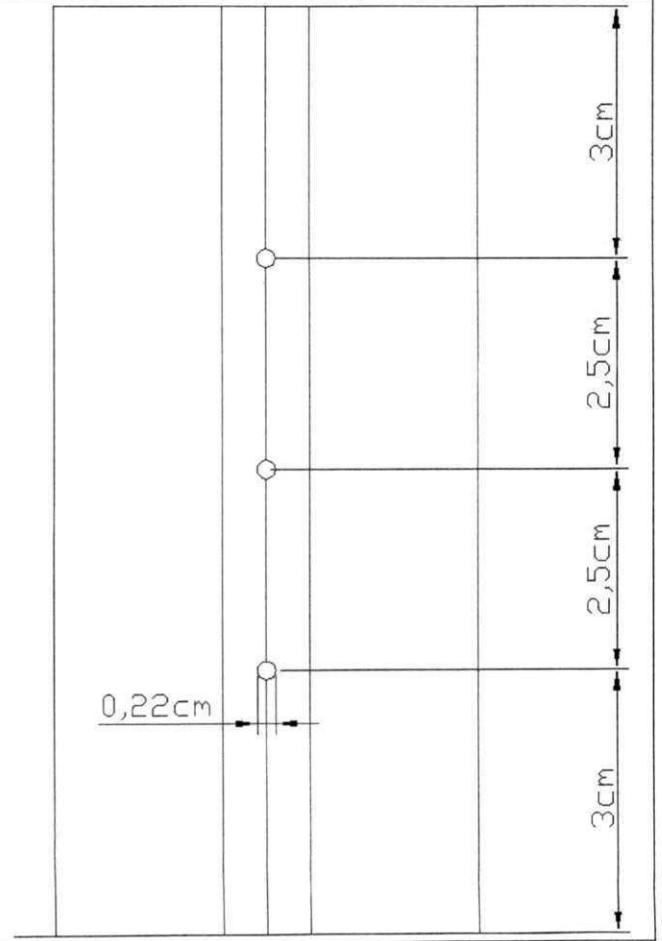
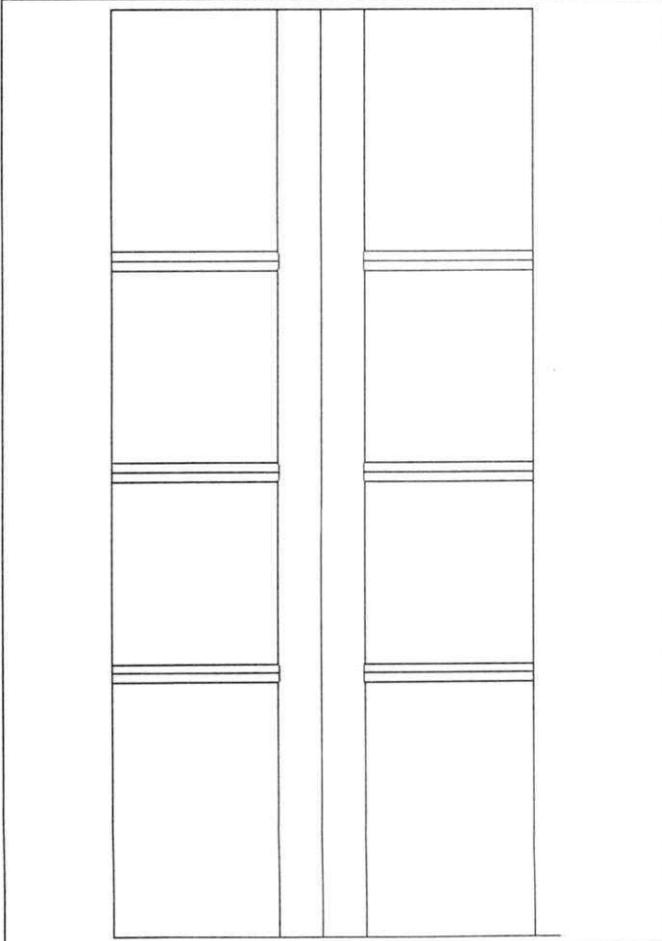
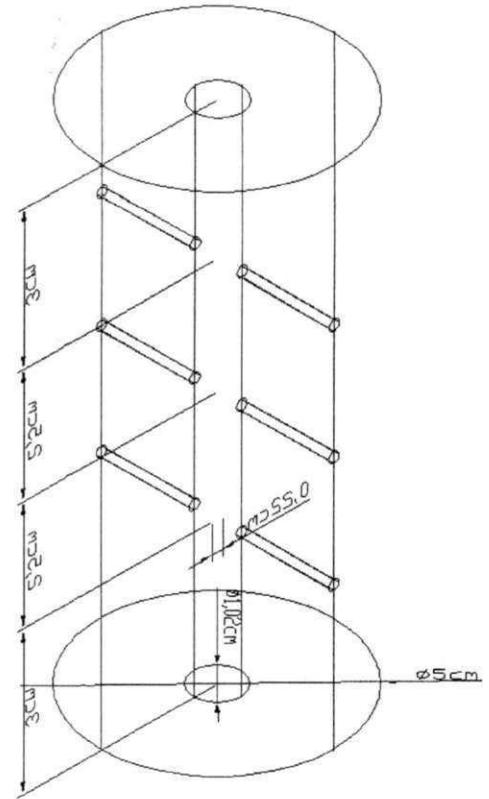
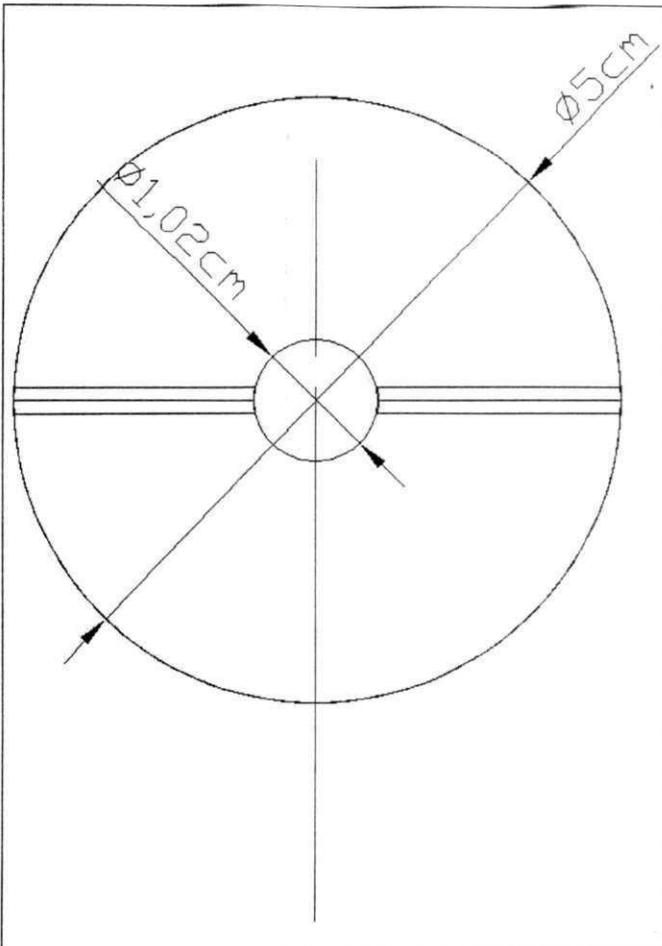
Pino de Sustentação da Célula de Carga



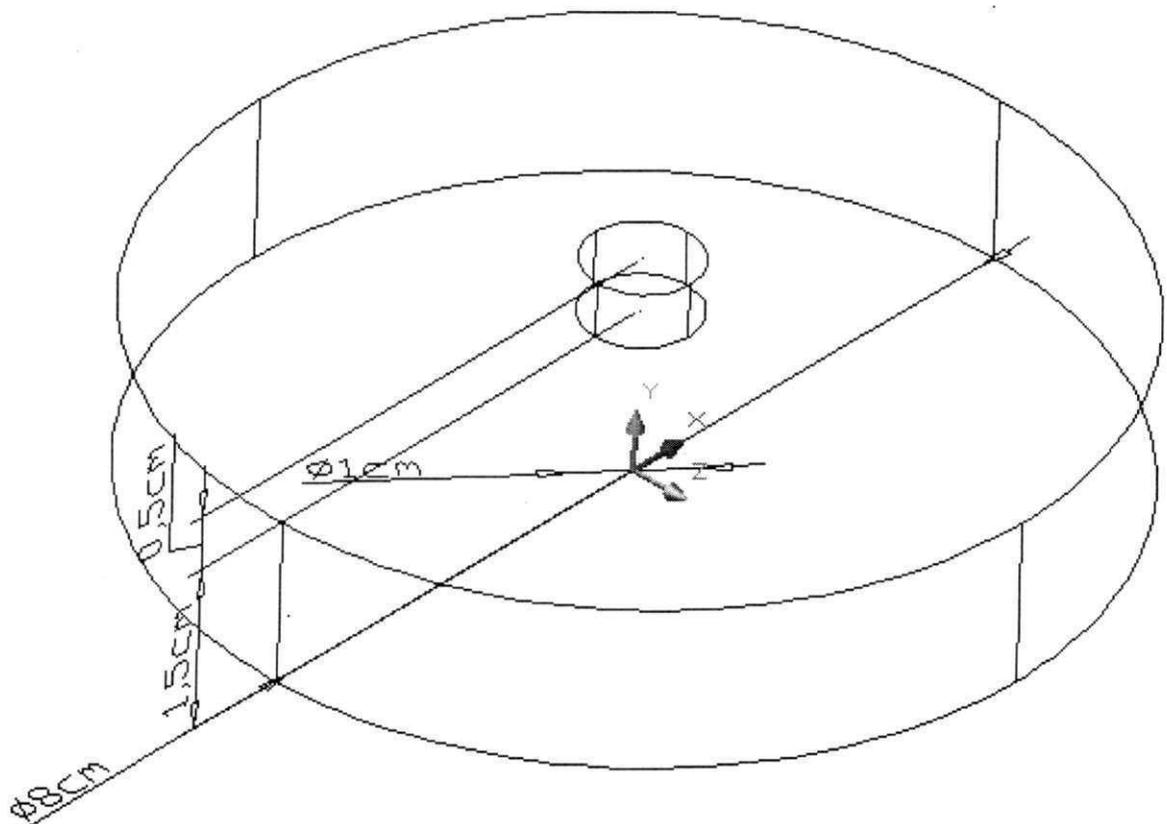
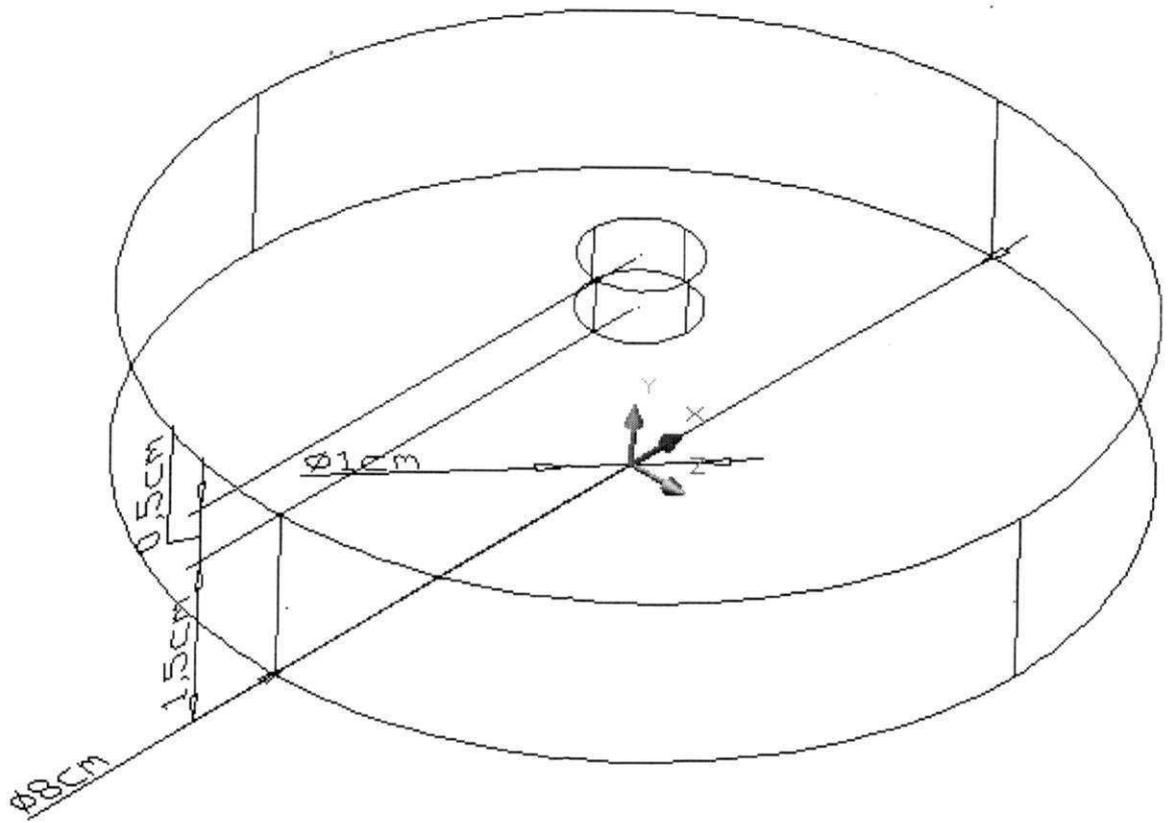
Plataforma Superior e Inferior



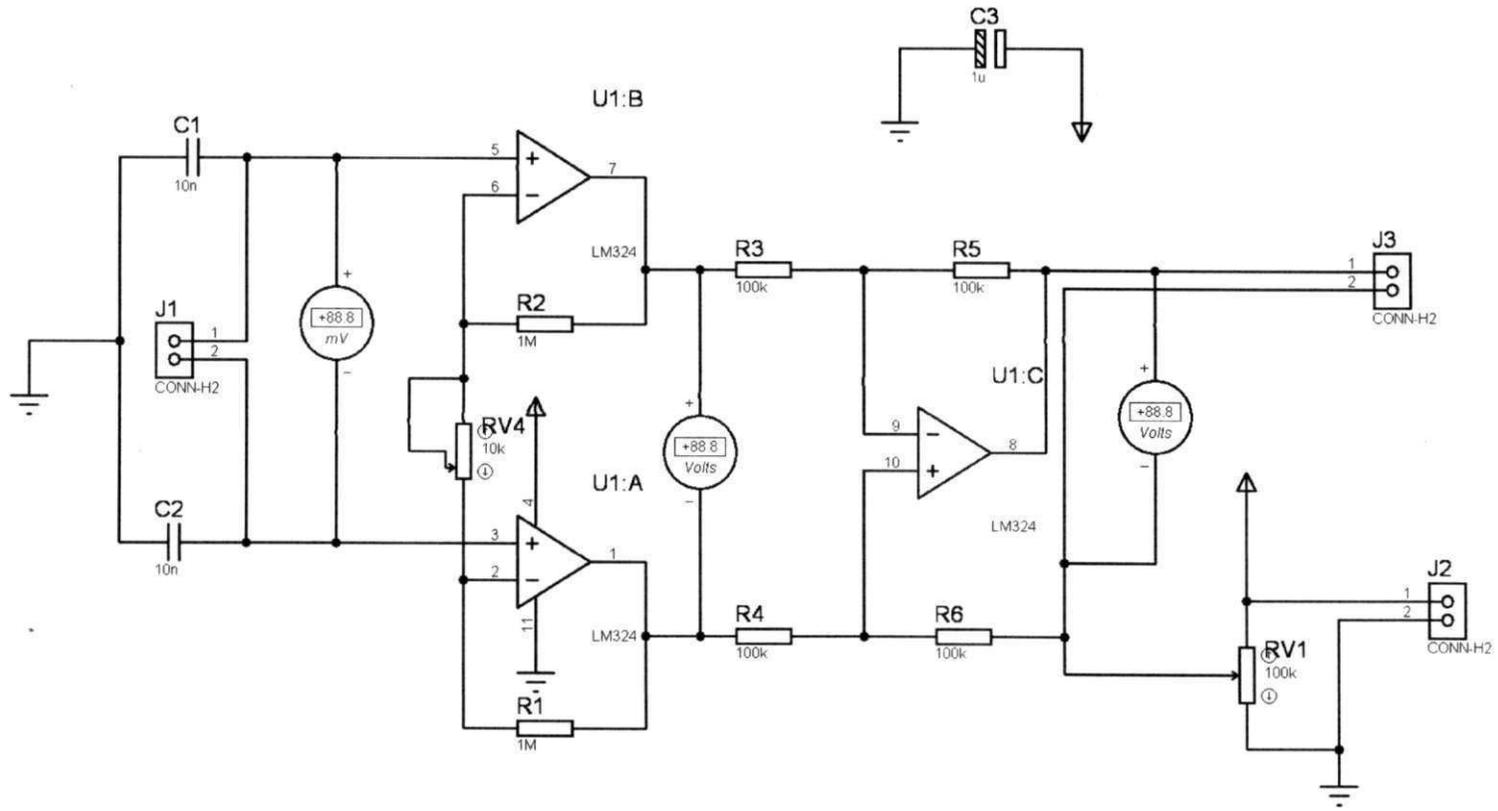
Parte Central do Corpo de Prova



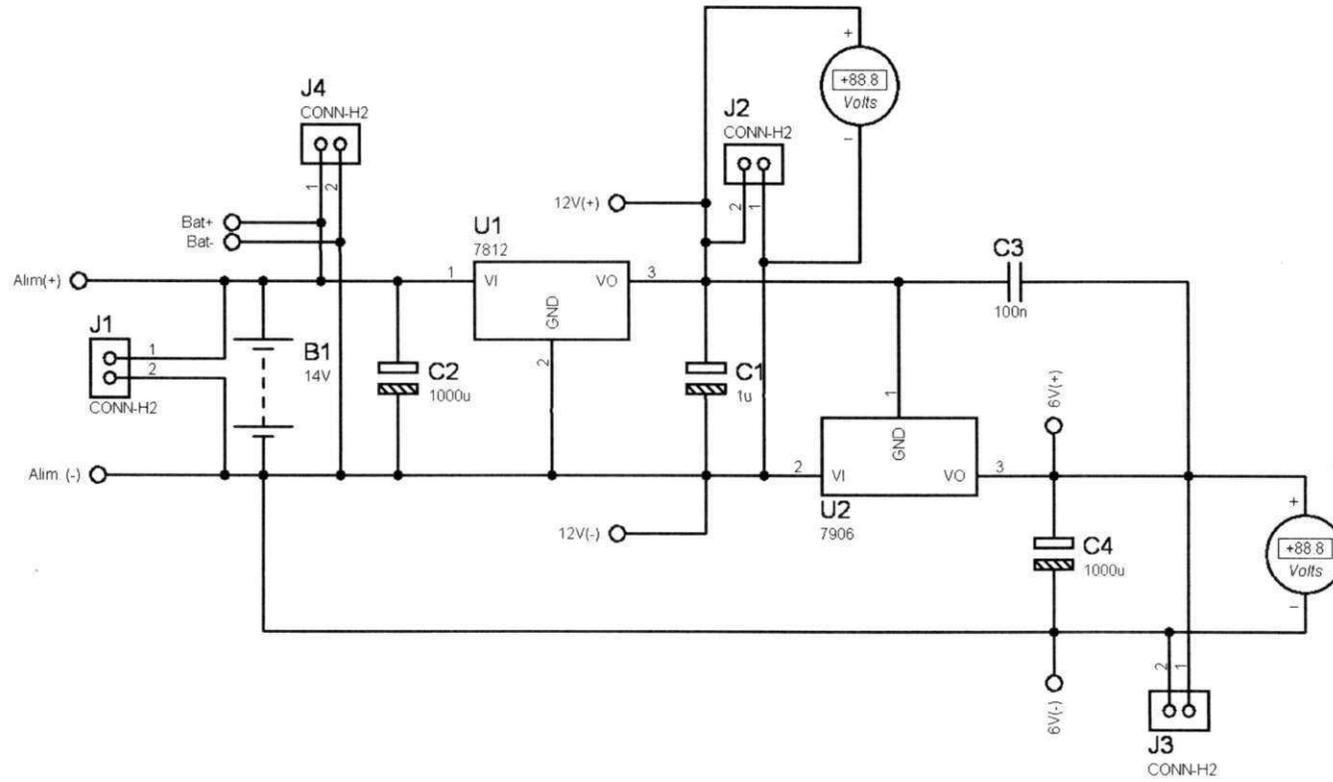
Parte Superior e Inferior do Corpo de Prova



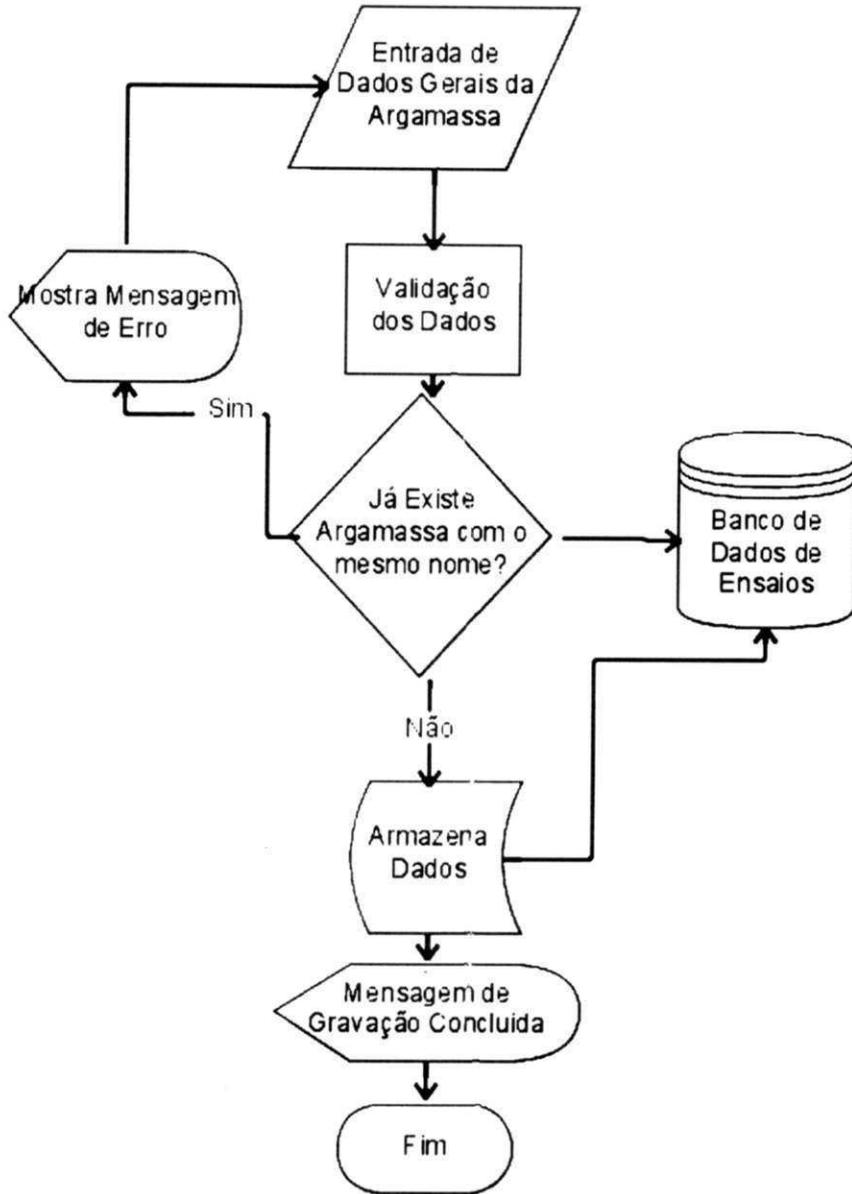
Amplificador



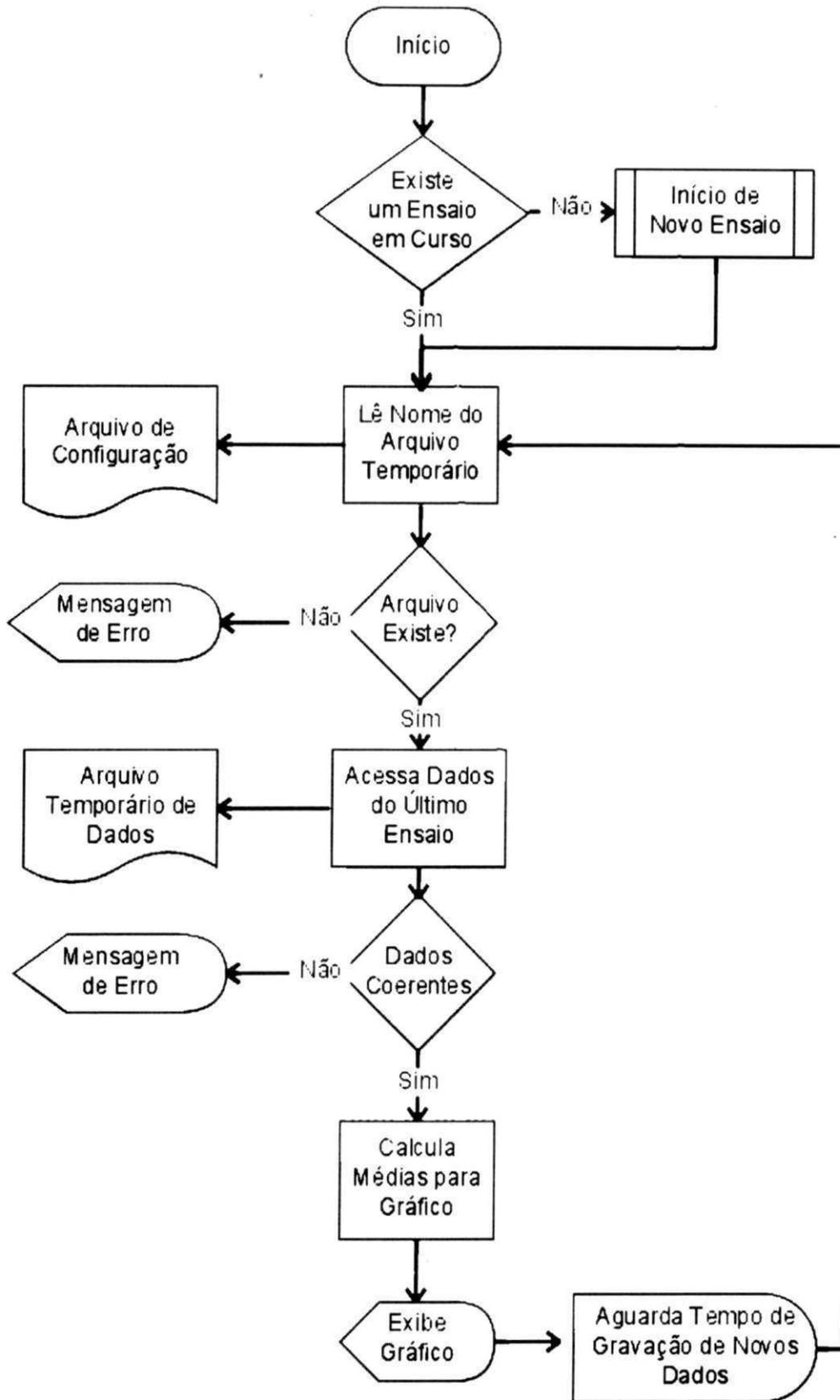
Fonte



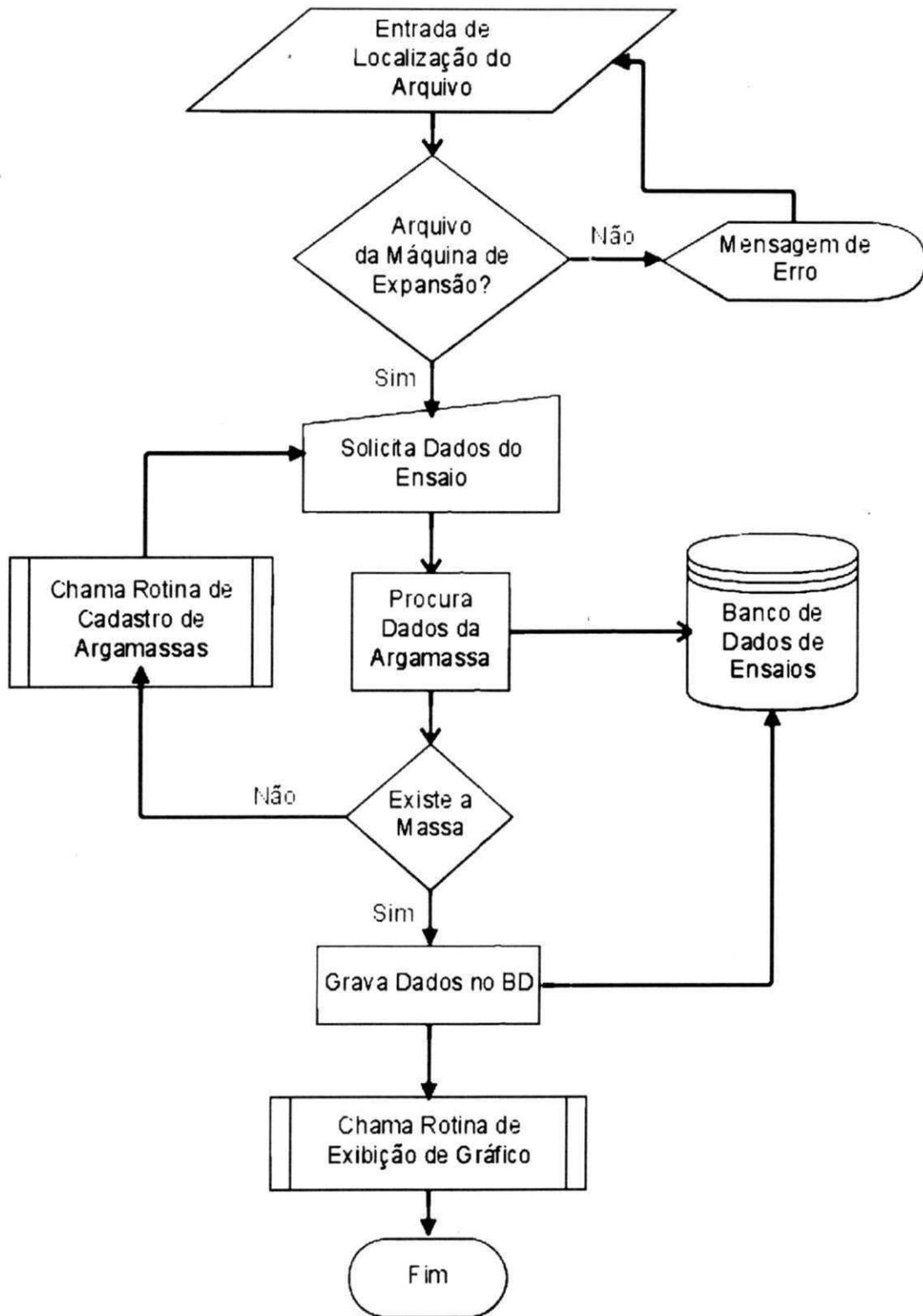
Cadastro de Argamassas



Ensaio em Curso



Importação de Arquivo



Anexo II – Principais Algoritmos dos Programas Computacionais