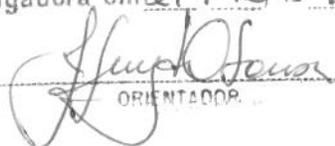


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

Este exemplar corresponde a redação final
da tese defendida por Romero Gomes
da Silva Araujo e aprovada
pela comissão julgadora em 21 / 12 / 1995.


ORIENTADOR

**Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial para a Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo**

**DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA
TEMPERATURA NOS PARÂMETROS ELÁSTICOS E
DE RESISTÊNCIA EM ROCHAS RESERVATÓRIO DE
PETRÓLEO**

49/95

**Autor: Romero Gomes da Silva Araujo
Orientador: José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa**

Dezembro de 1995



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Ar15d Araujo, Romero Gomes da Silva
Determinação da influência da temperatura nos
parâmetros elásticos e de resistência em rochas
reservatório de petróleo / Romero Gomes da Silva
Araujo.--Campinas, SP: [s.n.], 1995.

Orientador: José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Mecânica de rochas. 2. Temperatura. I. Sousa, José
Luiz Antunes de Oliveira e. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	AR15D
V.	Ex.
TOMBO B/	27244
PROC.	667196
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$14,00
DATA	09/04/96
N.º CPD	

CM-00086165-9

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO**

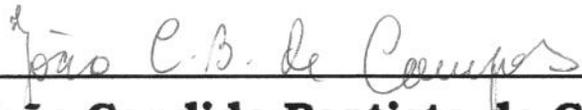
A dissertação “Determinação da Influência da Temperatura nos Parâmetros Elásticos e de Resistência em Rochas Reservatório de Petróleo” elaborada por Romero Gomes da Silva Araujo foi aceita pela Subcomissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 21 de dezembro de 1995.

Banca Examinadora



José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa, Ph.D.



João Candido Baptista de Campos, Ph.D.



Paulo Roberto Ribeiro, Ph.D.

AGRADECIMENTOS

À PETROBRAS, pela oportunidade dada de aperfeiçoamento profissional.

A todos os colegas e profissionais da PETROBRAS/CENPES que de alguma maneira contribuíram com a realização deste trabalho, especialmente aos engenheiros Paulo Dore e Mauro Bloch e aos técnicos de laboratório Sérgio Murilo e Marcos Dantas.

A meu orientador José Luiz Antunes de Oliveira e Sousa pela dedicação e incentivo.

À UNICAMP pelo que ela representa para o nosso País.

Dedico este trabalho a minha esposa Rosângela e a meus filhos Romero e Renata.

rica para verificar a estabilidade das paredes de um poço padrão perfurado na Formação Açú, mostrou que as reduções sofridas pelos parâmetros, entre 24° e 80°C, foram suficientes para produzir zonas de plastificação.

ABSTRACT

In the oil industry, the knowledge of elastic and resistance properties of reservoir rocks is important for the wellbore stability analysis during drilling and production. Normally, these properties (Young's modulus, Poisson's ratio, bulk compressibility, bulk modulus, tensile strength, cohesion and angle of internal friction) are obtained in laboratory at room temperature, while the *in situ* temperature may be significantly above this level. Based on these facts, laboratory tests were conducted at CENPES/PETROBRAS to evaluate the influence of temperatures between 24°C (room temperature) and 150°C on the elastic and resistance parameters of reservoir rocks. Specimens of sandstones from Açu and Pendências formations, from Potiguar basin were used in the tests. The observed thermo-mechanical behavior indicated a strong dependence on the type of rock tested. Sandstones from Açu formation, which are friable and present low homogeneity, were divided in three distinct groups: the first two groups were tested at 24°C and 80°C, and the third group was tested at 24°C and 150°C. When the temperature was increased from 24°C to 150°C, the tensile strength decreased, the Poisson's ratio decreased and the Young's modulus decreased between 24°C and 80°C, but for the third group, Young modulus increased between 24°C and 150°C. The sandstones from Pendências formation, well consolidated and more homogeneous than the previous ones, presented reduction in tensile strength, Young's modulus and Poisson's ratio, for increasing temperatures. However, these variations were less significant than the observed for the the friable sandstones from Açu formation. The shear resistance parameters, cohesion and angle of internal friction, presented significant reductions for the Açu formation. For the Pendências formation no significative variations were observed between 24°C and 80°C, while some reduction in the cohesion for the interval 80°C-150°C was observed. During hidrostatic tests the specimens presented large strains that conducted to significant errors in bulk compressibility when were used the linear equation (without quadratic terms) in the calculation of material volumetric strain. Although the linear equation is wide used in bulk compressibility determination it is not recommended here. The bulk compressibility presented significative reduction in the Açu formation sandstones. A numerical simulation of wellbore stability was conducted

for a standard wellbore drilled in the Açu formation, using experimental results of cohesion and angle of internal friction corresponding to 24°C and 80°C. Results showed that the variations in the parameters were sufficient to create yielding zones around the wellbore when the temperature was increased to 80°C.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS	x
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE QUADROS E TABELAS	xxii
 Capítulo	
I. O EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE OS PARÂMETROS ELÁSTICOS E DE RESISTÊNCIA EM ROCHA RESERVATÓRIO.....	1
Introdução	1
Formulação do Problema	2
Objetivos do Estudo	4
Justificativa do Projeto	5
Apresentação Preliminar da Metodologia do Trabalho	5
Visão Resumida dos Capítulos	6
 II. REVISÃO DA LITERATURA.....	 8
Introdução	8
Revisão da Bibliografia	9
Comentários e Conclusões	32
 III. METODOLOGIA DO TRABALHO.....	 38
Metodologia	38
Descrição dos Equipamentos Utilizados	46
Determinação do Tempo para o Equilíbrio entre a Temperatura do Corpo de Prova e do Óleo Confinante	58
Ensaio de Compressão Triaxiais	59
Ensaio de Compressão Diametral	62
Procedimentos para o Ensaio de Compressão Axial	64

IV. SELEÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO E PROCESSO DE PREPARAÇÃO.....	71
Seleção do Material para Ensaio	71
Caracterização dos Arenitos Ensaaiados	79
Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio de Compressão	89
Preparação das Amostras para Ensaio de Compressão Diametral	109
V. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	112
Ensaio Triaxiais	112
Ensaio de Compressão Diametral	201
Ensaio Dinâmico Simultâneo	202
Resumo do Capítulo	210
VI. ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DAS ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA	213
Análise dos Resultados pelo Critério de Ruptura de Mohr- Coulomb	213
Análise Complementar dos Resultados por Simulação Numérica	232
Resumo do Capítulo	238
VII. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	240
Discussão dos Resultados	240
Conclusões	243
Recomendações	246
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	248

ANEXOS.....253

- 1- Gráficos Obtidos nos Ensaio Hidrostáticos. 254
- 2- Curvas Representativas da Tensão de Ruptura *versus* Pressão de Confinamento no Plano $\sigma_1 - \sigma_3$ para as amostras dos lotes 1 e 2. 263
- 3- Dedução das Equações que Fornecem o Valor da Coesão (c) e o Ângulo de Atrito Interno (ϕ). 270

APÊNDICES.....273

- 1- Verificação do Formato da Curva de Pressão *versus* Deformação Volumétrica. 274
- 2- Comunicação Técnica - Estudo da Influência da Resistência ao Cisalhamento como Função da Temperatura na Estabilidade de Poços de Petróleo (Uma Experiência no Campo de Canto do Amaro). 279

LISTA DE SÍMBOLOS

- C - compressibilidade volumétrica (MPa^{-1})
- C_l - compressibilidade volumétrica linearizada (MPa^{-1})
- C_n - compressibilidade não linearizada (MPa^{-1})
- C_m - coeficiente de compactação uniaxial (MPa^{-1})
- c - coesão (MPa)
- D - diâmetro do corpo de prova (mm)
- d - diâmetro do corpo de prova (mm)
- E - módulo de Young (GPa)
- G - módulo de rigidez (GPa)
- h - altura do corpo de prova
- K - módulo de deformação volumétrica (MPa)
- l - altura do corpo de prova (mm)
- l - distância entre sensores do extensômetro axial (mm)
- n - porosidade (%)
- P_c - pressão de confinamento (MPa)
- P_t - peso da amostra saturada (g)
- P_s - peso da amostra antes da saturação (g)
- t - espessura da amostra para ensaio de compressão diametral (mm)
- t_{95} - tempo necessário para 95% de adensamento (s)
- T - carga axial (kN)
- V_t - volume total da amostra (cm^3)
- v_p - velocidade de propagação da onda P (m/s)
- v_s - velocidade de propagação da onda S (m/s)

- α - coeficiente de dilatação térmica (mm/(mm.K))
- α - inclinação relativa topo-base do corpo de prova (°)
- $\text{tg}(\beta)$ - coeficiente angular (MPa/MPa)
- ε - deformação (mm/mm)
- ε_c - deformação crítica (mm/mm)
- ε_v - deformação volumétrica (cm³/cm³)
- γ_{sat} - peso específico do corpo de prova saturado (g/cm³)
- γ_{seco} - peso específico do corpo de prova seco (g/cm³)
- σ_c - resistência a compressão simples (MPa)
- σ_i - tensão principal (i= 1,2 e 3) (MPa)
- σ_v - tensão vertical (MPa)
- σ_h - tensão horizontal mínima (MPa)
- σ_H - tensão horizontal máxima (MPa)
- σ_t - tensão de resistência a tração (MPa)
- σ_{tmc} - tensão de resistência a tração média para Canto do Amaro (MPa)
- σ_{tml} - tensão de resistência a tração média para Lorena (MPa)
- τ - tensão de cisalhamento (MPa)
- ν - coeficiente de Poisson
- ϕ - ângulo de atrito (°)

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Curvas típicas obtidas em um ensaio triaxial pelo método convencional.....	41
Figura 3.2: Curvas típicas obtida em um ensaio de múltiplo estado de falha.	42
Figura 3.3: CP parcialmente montado sobre a base da célula de ensaio. Atentar para o detalhe das conexões elétricas na base da célula, onde são ligados os extensômetros e os termopares.....	46
Figura 3.4: Esquema do painel de controle do STG.	47
Figura 3.5: Vista completa do painel de controle do STG.	48
Figura 3.6: Cartuchos utilizados na conversão das leituras dos transdutores.	49
Figura 3.7: Extensômetros axial e radial utilizados em ensaios triaxiais ou confinados.....	51
Figura 3.8: Extensômetro axial para ensaio diametral e ensaio uniaxial não confinado.	52
Figura 3.9: CP pronto para ser ensaiado, inclusive com os termopares instalados.	53
Figura 3.10: Painel do controlador de temperatura BARBER-COLMAN modelo 560.....	54
Figura 3.11: Cabeçotes metálicos (<i>caps</i>) utilizados no processo de emissão e recepção das ondas sonoras para determinação das constantes elásticas dinâmicas.	56
Figura 3.12: Esquema do aparato de medição de velocidades de propagação das ondas P e S em amostras de rochas.....	57
Figura 3.13: Classificação do tipo de curva tensão <i>versus</i> deformação axial em ensaio de compressão.....	60

Figura 3.14: Ensaio múltiplo piloto com controle de deformação lateral.	61
Figura 3.15: Dispositivo utilizado no ensaio de compressão diametral.....	63
Figura 3.16: Instalação da membrana termo-retrátil com pistola térmica.	67
Figura 3.17: CP montado com os extensômetros e termopares, em condição de ser ensaiado.....	68
Figura 3.18: Desenho esquemático da célula triaxial mostrando o posicionamento dos anéis de vedação (o’rings) que devem ser comprimidos na pré-carga.	69
Figura 3.19: Vista da parte externa da célula triaxial, onde estão localizadas as resistências elétricas destinadas ao aquecimento do sistema.....	70
Figura 4.1: Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar.....	74
Figura 4.2: Amostrador utilizada no processo de extração dos CP de 2 pol. de diâmetro.....	91
Figura 4.3: CP do poço CAM-373 (lote 2) que não chegou a ser ensaiado por ter quebrado durante a amostragem. Atentar para a má seleção dos grãos da rocha.....	94
Figura 4.4: CP dos poços de Canto do Amaro (lote 2). Atentar para o aspecto das superfícies externas das amostras.	94
Figura 4.5: CP dos poços de Canto do amaro (lote 3). Apresentaram melhor aspecto após a amostragem. A amostra CAM-540/01 não chegou a ser ensaiada..	95
Figura 4.6: CP LOR-34/02 após ser retificado para corrigir defeitos de amostragem..	96
Figura 4.7: Processo de corte das extremidades do CP.....	97
Figura 4.8: Processo de faceamento do CP em torno mecânico.	98

Figura 4.9: Processo de controle da inclinação relativa topo/base do CP.....	99
Figura 4.10: CP imersos no óleo em dessecador a vácuo. Atentar para o detalhe do ar sendo expulso dos poros da rocha.....	103
Figura 4.11: Bomba de vácuo utilizada no processo de saturação dos CP no dessecador.	104
Figura 5.1: Curva de tensão hidrostática versus deformação volumétrica (segundo Goodman, 1989).....	116
Figura 5.2: Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a temperatura de 24°C, com a amostra AP-98/01.	120
Figura 5.3: Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a temperatura de 150°C, com a amostra CAM-373/08.	120
Figura 5.4: Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a temperatura de 80°C, com a amostra CAM-456/05.	121
Figura 5.5: Curva de pressão de confinamento versus deformação volumétrica da amostra CAM-456/03.....	122
Figura 5.6: Curva de compressibilidade volumétrica não linearizada versus pressão de confinamento do poço CAM-456 nas temperaturas de 24°C e 80°C	123
Figura 5.7: Curvas de compressibilidade volumétrica versus pressão de confinamento não linearizada do poço CAM-373 nas temperaturas de 80°C e 150°C.....	124
Figura 5.8: Curvas de compressibilidade volumétrica não linearizada versus pressão de confinamento dos poços AP-98 e AP-125 nas temperaturas de 80°C e 150°C.	125
Figura 5.9: Curvas de tensão versus deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-456/01	130

- Figura 5.10:** Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-456/06. 131
- Figura 5.11:** Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-456/01. 131
- Figura 5.12:** Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-373/08. 132
- Figura 5.13:** Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio múltiplo da amostra AP-153/01. 132
- Figura 5.14:** Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio múltiplo da amostra CAM-615/01. 133
- Figura 5.15:** Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio múltiplo da amostra LOR-34/04. 133
- Figura 5.16:** Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/07..... 135
- Figura 5.17:** Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/10..... 135
- Figura 5.18:** Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/11..... 136
- Figura 5.19:** Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/04..... 136
- Figura 5.20:** Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/06..... 137
- Figura 5.21:** Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-98/01..... 138

Figura 5.22: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-373/04.....	139
Figura 5.23: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/01.	140
Figura 5.24: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/02.	140
Figura 5.25: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/09.	141
Figura 5.26: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/08.	141
Figura 5.27: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/12.	142
Figura 5.28: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/05.	142
Figura 5.29: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-373/07.	143
Figura 5.30: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-373/06.	143
Figura 5.31: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/03.....	144
Figura 5.32: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-98/02.....	145
Figura 5.33: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-98/03.....	146
Figura 5.34: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-125/02.....	146
Figura 5.35: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-125/03.....	147

Figura 5.36: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-373/05.....	147
Figura 5.37: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-373/08.....	148
Figura 5.38: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtido em um ensaio múltiplo. Atentar para o formato das curvas de deformação axial e lateral.	157
Figura 5.39: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/01.....	161
Figura 5.40: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/06.....	161
Figura 5.41: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/02.....	162
Figura 5.42: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/04.....	162
Figura 5.43: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/03.....	163
Figura 5.44: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/05.....	163
Figura 5.45: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-30/01.....	164
Figura 5.46: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-30/02.....	164
Figura 5.47: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-519/02.	166
Figura 5.48: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-529/01.	167
Figura 5.49: Curva de tensão <i>versus</i> deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-519/01.	167

- Figura 5.50:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/01. 168
- Figura 5.51:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/02. 168
- Figura 5.52:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-128/02. 169
- Figura 5.53:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-615/01.....169
- Figura 5.54:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-510/01. 170
- Figura 5.55:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/01. 170
- Figura 5.56:** Curva de tensão *versus* deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/03. 171
- Figura 5.57:** Curvas de correlação apresentando o comportamento da tensão de ruptura *versus* pressão de confinamento no plano $\sigma_1 - \sigma_3$, em função da temperatura..... 177
- Figura 5.58:** Comportamento do coeficiente de Poisson em função da pressão de confinamento e da temperatura para os arenitos da formação Açú..... 178
- Figura 5.59:** Comportamento do coeficiente de Poisson para os arenitos da formação Açú. Na curva representativa da temperatura de 24°C foi excluído o ponto referente a amostra CAM-456/10..... 179
- Figura 5.60:** Comportamento do módulo de Young à temperatura ambiente e 80°C para os arenitos friáveis da formação Açú. 181
- Figura 5.61:** Comportamento do coeficiente de Poisson à temperatura ambiente e 150°C para as amostras dos arenitos da Formação Açú. Resultados obtidos nos ensaios múltiplos. 186

- Figura 5.62: Comportamento do módulo de Young com a pressão de confinamento, à temperatura ambiente e 150°C, para as amostras dos arenitos da formação Açú. Resultados obtidos nos ensaios múltiplos. 188**
- Figura 5.63: Tensões de ruptura obtidas nos ensaios múltiplos para as amostras dos arenitos da formação Açú..... 192**
- Figura 5.64: Comportamento da tensão de ruptura dos arenitos da formação Pendências, bacia Potiguar. Resultados obtidos a partir das amostras do poço LOR-34..... 195**
- Figura 5.65: CP CAM-456/02, CAM-456/05, CAM-456/08, CAM456/09, CAM-456/12 utilizados nos ensaios de compressão triaxial convencionais. 197**
- Figura 5.66: CP CAM-456/04, CAM-456/06, CAM-456/07, CAM-456/10, CAM-456/11 utilizados nos ensaios de compressão triaxial convencionais. 198**
- Figura 5.67: CP LOR-30/01 utilizados no ensaio de compressão triaxial múltiplo. 199**
- Figura 5.68: CP CAM-519/01, CAM-519/02, CAM-529/01, CAM-510/01, CAM-615/01 utilizados nos ensaios de compressão triaxial múltiplos. 200**
- Figura 5.69: CP LOR-34/02, LOR-34/03, LOR-34/04, LOR-34/05, LOR-34/06 utilizados nos ensaios de compressão triaxial múltiplos. 200**
- Figura 5.70: Efeito da pressão de confinamento σ_3 sobre a relação entre a tensão de ruptura ($\sigma_1 - \sigma_3$) e o módulo de cisalhamento dinâmico, à temperatura ambiente para os arenitos da Formação Açú. 209**
- Figura 5.71: Efeito da temperatura sobre a relação entre a tensão de ruptura ($\sigma_1 - \sigma_3$) e o módulo de cisalhamento dinâmico a uma pressão de confinamento de 20 MPa. Para os arenitos da Formação Açú. 210**

- Figura 6.1: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço AP-98 e CAM-456 à temperatura ambiente. 215**
- Figura 6.2: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço CAM-456 à temperatura ambiente..... 216**
- Figura 6.3: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço CAM-456 a 80°C..... 216**
- Figura 6.4: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras dos poços AP-98, AP-125 e CAM-456 a 150°C..... 217**
- Figura 6.5: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras dos poços AP-153, CAM-519 e CAM-529 à temperatura ambiente..... 217**
- Figura 6.6: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras dos poços AP-128, AP-153 e CAM-615 a 150°C..... 218**
- Figura 6.7: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço LOR-34 à temperatura ambiente. 218**
- Figura 6.8: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço LOR-34 a 80°C. 219**
- Figura 6.9: Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço LOR-34 a 150°C. 219**
- Figura 6.10: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço CAM-456. Resultado à temperatura ambiente.223**
- Figura 6.11: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço CAM-456. Resultado a 80°C..... 224**

- Figura 6.12: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos dos poços AP-153, CAM-519, CAM-529. Resultado a 24°C, obtidos nos ensaios múltiplos. 225**
- Figura 6.13: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos dos poços AP-128, AP-153 e CAM-615. Resultado a 150°C, obtidos nos ensaios múltiplos. 226**
- Figura 6.14: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço LOR-34. Resultado à temperatura ambiente, obtidos nos ensaios múltiplos. 227**
- Figura 6.15: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço LOR-34. Resultado a 80°C. obtidos nos ensaios múltiplos. 228**
- Figura 6.16: Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço LOR-34. Resultado a 150°C, obtidos nos ensaios múltiplos. 229**
- Figura 6.17: Gráfico comparativo das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb à temperatura ambiente e 80°C para o poço CAM-456 do campo de Canto do Amaro, formação Açu, bacia Potiguar. 230**
- Figura 6.18: Gráfico comparativo das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb à temperatura ambiente e 150°C para os poços AP-128, AP-153, CAM-519, CAM-529 e CAM-615 do campo de Canto do Amaro, formação Açu, bacia Potiguar. 231**
- Figura 6.19: Gráfico comparativo das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb à temperatura ambiente, 80° e 150°C para o poço LOR-34 do campo de Lorena, formação Pendências, bacia Potiguar. 232**

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 3.1: Características dos extensômetros utilizados.	52
Tabela 3.2: Evolução das temperaturas fora e dentro do CP durante ensaio para determinação do tempo necessário para o equilíbrio entre elas.....	59
Tabela 4.1: Relação dos poços e as profundidades em que foram retirados os corpos de prova.....	77
Tabela 4.1-continuação: Relação dos poços e as profundidades em que foram retirados os corpos de prova.	78
Tabela 4.2: Relação resumida dos poço que forneceram os testemunhos para este projeto seguido do respectivo n° de amostras fornecidas.....	78
Quadro 4.1: Ensaio para caracterização dos arenitos e parâmetros.... obtidos.....	80
Quadro 4.2: Legenda utilizada na descrição macrocópica.....	81
Quadro 4.3: Descrição visual dos corpos de prova.....	82
Tabela 4.3: Resultado da análise mineralógica das amostras.....	86
Tabela 4.3-continuação: Resultado da análise mineralógica das amostras.....	87
Tabela 4.4: Resultados das análises de mineralogia de argilas.....	88
Quadro 4.4: Etapas do processo de preparação dos corpos de prova.	89
Tabela 4.5: Relação dos CP do lote 1 com respectivas características geométricas.....	100
Tabela 4.6: Relação dos CP do lote 2 com respectivas características geométricas.....	100
Tabela 4.7: Relação dos CP do lote 3 com respectivas características geométricas.....	101

Tabela 4.8: Demonstrativo da saturação das amostras do lote 1 com óleo LUBRAX OB-9 e sob vácuo.	105
Tabela 4.9: Demonstrativo da saturação das amostras do lote 2 com óleo LUBRAX OB-9 e sob vácuo.	105
Tabela 4.10: Demonstrativo da saturação das amostras do lote 3 com óleo LUBRAX OB-9 sob vácuo, depois de terem passado pela estufa.....	106
Tabela 4.11: Peso específico e porosidade das amostras.....	107
Tabela 4.11: -continuação: Peso específico e porosidade das amostras	108
Tabela 4.12: Demonstrativo das características geométricas das amostras para ensaio diametral.....	110
Tabela 4.13: Demonstrativo da saturação das amostras para ensaio diametral, com óleo LUBRAX OB-9 sob vácuo, depois de terem passado pela estufa.....	111
Tabela 5.1: Compressibilidades volumétricas das amostras do primeiro lote, obtidas a partir das curvas de pressão de confinamento <i>versus</i> deformação volumétrica linearizadas e não linearizadas e os respectivos erros relativos.....	117
Tabela 5.2: Compressibilidades volumétricas das amostras do segundo lote, obtidas a partir das curvas de pressão de confinamento <i>versus</i> deformação volumétrica linearizadas e não linearizadas e os respectivos erros relativos.....	118
Tabela 5.3: Relação das amostras do primeiro e segundo lotes submetidas aos ensaios convencionais.	152
Tabela 5.4: Relação das amostras de Lorena submetidas ao ensaio de múltiplo estado de falha.....	155
Tabela 5.5: Relação das amostras de Canto do Amaro submetidas ao ensaio de múltiplo estado de falha.	156

Tabela 5.6: Tensões de ruptura obtidas nos ensaios triaxiais convencionais.....	173
Tabela 5.7: Valores das constantes elásticas obtidas nos ensaios triaxiais convencionais.....	174
Tabela 5.8: Valores médios das tensões de ruptura para cada temperatura (sem considerar os dados do poço CAM-373).....	176
Tabela 5.9: Valores das constantes elásticas obtidas nos ensaios múltiplos com as amostras dos arenito do campo de Canto do Amaro.....	184
Tabela 5.10: Valores das constantes elásticas obtidas nos ensaios múltiplos com as amostras dos arenito do campo de Lorena.....	185
Tabela 5.11: Valores da tensão de ruptura obtidos com as amostras dos poços do campo de Canto do Amaro, nos ensaios múltiplos.....	190
Tabela 5.12: Valores das tensões de ruptura obtidos nos ensaios múltiplos com as amostras dos arenitos da formação Pendências (campo de Lorena).....	194
Tabela 5.13: Resultados dos ensaios diametrais à temperatura ambiente.....	201
Tabela 5.14: Propriedades estáticas e dinâmica das amostras dos arenitos dos poços do campo de Canto do Amaro, da formação Açu, bacia Potiguar.....	206
Tabela 6.1: Valores da coesão e do ângulo de atrito obtidos nos ensaios.....	221
Tabela 6.2: Parâmetros de resistência e elásticos utilizados na simulação numérica.....	234
Tabela 6.3: Dados do reservatório produtor de petróleo do campo de Canto do Amaro utilizados na simulação numérica.....	235

CAPÍTULO I

O EFEITO DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS ELÁSTICOS E DE RESISTÊNCIA EM ROCHA RESERVATÓRIO

Introdução

O conhecimento das propriedades mecânicas e de resistência das rochas é essencial ao estudo da Mecânica das Rochas para aplicação nas atividades de mineração, na construção de túneis e barragens, nos trabalhos em maciços rochosos, no estudo de reservatórios geotérmicos, no estudo de reservatórios de hidrocarbonetos, no estudo do comportamento de depósitos subterrâneos para resíduos nucleares e de petróleo, etc.

A indústria do petróleo, em face dos seus custos elevados, reserva uma atenção especial a esta parte da ciência. Os resultados das análises feitas em laboratórios de mecânica das rochas formam uma base fundamental para decisões estratégicas nas atividades de perfuração, completação e estimulação de poços.

Durante a fase de perfuração, parte do tempo despendido pelos técnicos e engenheiros envolvidos no projeto está voltado para o problema da estabilidade das paredes do poço. Até atingir o objetivo, ou seja, a camada do subsolo onde estão armazenados os hidrocarbonetos, a broca atravessa várias camadas rochosas com características próprias e normalmente diferentes entre si. O melhor conhecimento das características destas camadas é um ponto que justifica os investimentos em técnicas mais aperfeiçoadas de pesquisa, e principalmente, pelos crescentes avanços na utilização da técnica de poços horizontais.

Manter um poço com secção circular é fundamental para que se tenha um trabalho seguro e com menor custo. Os desmoronamentos das paredes de um poço por problemas de instabilidade é um problema sério e indesejável pois, além de provocarem o alargamento deste, podem levar a prisão das ferramentas de perfuração comprometendo o custo e a segurança do projeto.

Vencida esta primeira etapa, nas fases seguintes, outras atividades como os fraturamentos hidráulicos, acidificações, injeção de vapor, injeção de água, combustão *in-situ* e o próprio fluxo dos fluidos contidos na rocha reservatório podem levar ao surgimento de outros fenômenos como produção de areia, colapso de poros, carreamento de finos, etc.

Quando se quer avaliar o comportamento de um maciço rochoso à luz da Mecânica das Rochas, procura-se traduzir os fenômenos que estão ocorrendo no *meio*, em função das cargas e dos esforços aplicados, como sendo estados de tensão e de deformação. Desta forma, os processos que venham a ocorrer, sejam fraturas, fluxo ou simplesmente deformação, podem ser estimados a partir das propriedades mecânicas das rochas que o compõem. No entanto, as propriedades mecânicas dependem da composição mineral, da estrutura e da textura, e também da condição à qual aquela porção de rocha está submetida, ex.: temperatura, pressões de fluidos contidos nos seus interstícios, tensões naturais internas, sobrecarga das camadas superiores, etc.

Formulação do Problema

Os parâmetros elásticos e de resistência das rochas, determinados em laboratório e largamente utilizados nos estudos de reservatórios de petróleo, são obtidos à temperatura ambiente (22° a 28°C). Essa condição não está de acordo com aquela encontrada na natureza pois a profundidades entre 500 e 3000m as temperaturas normais, obtidas a partir do gradiente geotérmico, situam-se numa faixa entre 50° e 150°C.

Os reservatórios de petróleo ocorrem em sua grande maioria em rochas do tipo sedimentar (arenitos, carbonatos, conglomerados, etc.) que foram formadas ao longo de milhões de anos como consequência da ação do intemperismo, da força dos ventos, dos rios, das geleiras, etc sobre as rochas mais duras que compunham a crosta terrestre.

Como já foi mencionado, as análises de laboratório formam uma base fundamental nas decisões tomadas na indústria do petróleo. As condições nas quais ocorrem os reservatórios de petróleo - profundidades elevadas, temperaturas elevadas, presença de fluidos a alta pressão, etc. - não permite o acesso direto do homem para estudar e avaliar. Esta si-

tuação difere bastante daquelas que ocorrem em minas convencionais, por exemplo, que através das suas galerias permite o acesso para o desenvolvimento de estudos e avaliações dos parâmetros das rochas que a compõem. De qualquer forma, este recurso não dispensa a análise feita em laboratório.

O estudo de um *meio* pela forma indireta, através de modelos e simulação criadas em laboratório, requer um cuidado especial, pois a reprodução de um ambiente original ainda é bastante limitada. A avaliação dos fenômenos que podem ocorrer em uma rocha reservatório de hidrocarbonetos é feita a partir de amostras (corpos de prova) que, devido aos custos e dificuldades de extração, nem sempre são representativos do ambiente que se deseja estudar. É comum a utilização de amostras de laboratório com características supostamente semelhantes.

Foi possível verificar na literatura pesquisada um número substancial de trabalhos a partir de rochas pouco significativas ao estudo de reservatórios de petróleo. É comum a utilização de amostras de granito, mármore e mesmo certos tipos de arenitos (por exemplo o BEREIA), cujas características de homogeneidade facilitam o desenvolvimento da pesquisa bem como a conclusão dos resultados, uma vez que trata-se de uma situação ideal e não real. Os reservatórios de petróleo ocorrem em sua grande maioria em sedimentos, que fogem a esta situação ideal.

Se um dos objetivos da ciência é levar o homem até bem próximo da natureza, não se pode esquecer o desafio de estudá-la em sua plenitude, procurando analisá-la com mais fidelidade pois do contrário a pesquisa em si perde bastante do seu sentido.

O quadro descrito a partir dos comentários apresentados nos parágrafos anteriores levou a alguns questionamentos que serviram como base ao desenvolvimento deste projeto:

1. Qual o efeito da temperatura de subsuperfície sobre os parâmetros elásticos e de resistência, lembrando que esta é uma condição real na qual se encontram as rochas de um reservatório de petróleo e que nem sempre é considerada?

2. Diante da variedade e tipos de rochas reservatório, não seria importante apresentar resultados a partir de corpos de prova retirados destas e não simplesmente a partir de amostras padrão?
3. A Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS S.A.) é responsável atualmente pela pesquisa e desenvolvimento de todas as bacias sedimentares brasileiras. Qual seria a importância de um estudo para determinar os parâmetros elásticos e de resistência das rochas que compõem pelo menos as bacias responsáveis pela manutenção dos níveis atuais de produção de petróleo do país?
4. Caso ocorram diferenças nos parâmetros determinados nas condições consideradas mais reais do ponto de vista de temperatura, qual o impacto disto em projetos que dependam destes dados? Como por exemplo, aqueles que verificam a estabilidade dos poços?

Objetivos do Estudo

O objetivo do presente projeto é o de determinar a Influência da Temperatura nos Parâmetros Elásticos e de Resistência em Rocha Reservatório. Porém, o mesmo deve ser encarado de forma mais ampla pelas seguintes razões:

1. Pretende-se obter respostas a partir de condições próximas daquela em que se encontra a rocha reservatório escolhida para ser avaliada;
2. O estudo parte da utilização de corpos de prova de um reservatório real. Portanto, a escolha das amostras deve ser criteriosa para garantir a representatividade do *meio*;
3. O estudo deve ter um caráter comparativo ou seja: serão comparados resultados obtidos pelo método convencional (temperatura ambiente) com os resultados obtidos nas condições propostas no item primeiro;
4. A apresentação dos resultados da simulação numérica bidimensional utilizada pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES) em projetos de estabilidade de poços de petróleo permite avaliar o impacto provocado pelas diferentes condições utilizados nos ensaios.

Justificativa do Projeto

A PETROBRAS S.A., tem sob sua responsabilidade para pesquisa e exploração, bacias sedimentares espalhadas em várias áreas do país. Destas, as portadoras de hidrocarbonetos, possuem intervalos produtores que se situam em profundidades desde 150 m, na Bacia Potiguar, até mais de 3000 m, na Bacia de Santos, cujas temperaturas variam de 40°C até mais de 150°C em condições normais.

Os resultados deste projeto podem levar a mudanças significativas nos procedimentos adotados em seu laboratório quando da obtenção dos parâmetros de rochas, pois parte-se da hipótese que, mesmo tratando-se de temperaturas relativamente baixas, podem ocorrer alterações importantes e que não são consideradas pelo métodos atuais de ensaio.

Apresentação Preliminar da Metodologia do Trabalho

Foram determinados em laboratório os seguintes parâmetros:

- Resistência a compressão simples;
- Resistência a compressão em ensaio triaxial;
- Módulo de Young;
- Coeficiente de Poisson;
- Compressibilidade total.

E também:

- Envoltórias de Ruptura de Mohr-Coulomb (valores da coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ)) para cada temperatura estabelecida nos ensaios.

Os experimentos foram conduzidos no laboratório de mecânica das rochas do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello (CENPES) e conta com a utilização de equipamentos modernos e eficientes, como uma prensa servocontrolada com quadro de reação de alta rigidez (9GN/m), capaz de realizar experimentos até 200°C, fabricada pela MTS.

As temperaturas escolhidas foram a ambiente (em torno de 24°C), 80°C e 150°C, por estarem dentro de uma margem considerada

adequada às condições encontradas nas bacias brasileiras. O ensaio à temperatura ambiente serviu como parâmetro para os resultados obtidos nas outras temperaturas porque trata-se da condição normalmente utilizada em ensaios para a determinação de parâmetros elásticos e de resistência.

O projeto proposto pelo CENPES, em seu caráter mais amplo, prevê um estudo completo abrangendo as mais importantes bacias produtoras brasileiras, devido à diversificação nos tipos de rochas encontradas nestas, e também em virtude da hipótese de que as respostas diferem em função das características do material utilizado. O presente trabalho consiste em uma parte desse projeto, concentrando a atenção no estudo do comportamento de arenitos friáveis.

Os resultados deste trabalho foram obtidos a partir de amostras de arenitos das formações AÇU e PENDÊNCIAS da bacia Potiguar, no estado do Rio Grande do Norte.

Os arenitos da formação AÇU caracterizam-se por apresentarem granulometria entre grosseira e fina e pouca consolidação. Esta última característica confere ao material um aspecto frágil o que requer cuidados no manuseio e na preparação dos corpos de prova. Foram retirados por testemunhagem de poços do campo produtor de petróleo de CANTO DO AMARO. Os arenitos da formação PENDÊNCIAS caracterizam-se por serem finos bem consolidados e homogêneos, e as amostras foram retiradas de poços do campo produtor de LORENA. São amostras mais resistentes e de mais fácil manuseio. Este aspectos iniciais já são responsáveis por diferenças significativas nos resultados. Todas as amostras são oriundas de rochas reservatório situados a profundidades entre 550 e 1100m.

Visão Resumida dos Capítulos

Esta dissertação foi dividido em 7 capítulos distribuídos de forma a facilitar a sua leitura e compreensão.

O primeiro capítulo fornece uma visão global do projeto onde foi levantada a hipótese principal bem como as justificativas e áreas de interesse nos resultados.

O segundo capítulo apresenta a revisão de literatura. São comentadas também as fontes utilizadas na pesquisa e as dificuldades encontradas.

O terceiro capítulo traz a descrição dos equipamentos e demais recursos utilizados no projeto, além da metodologia empregada nas diversas etapas do trabalho.

O quarto capítulo apresenta uma fase de vital importância para o projeto, que foi a escolha do tipo de rocha ensaiada. Esta etapa esteve cercada de um grau de dificuldade maior do que o esperado. A conclusão a que se pode chegar foi de que realmente não é fácil utilizar materiais oriundos de reservatórios de petróleo. Um outro assunto tratado no quarto capítulo foram as fases necessárias à preparação dos corpos de prova, que requereram uma atenção redobrada em face das características do material escolhido.

O quinto capítulo está reservado à análise dos resultados obtidos. Alguns destes chegaram a ser discordantes de outros apresentados na literatura, indicando que o assunto precisa ser melhor explorado.

O sexto capítulo trata da análise feita sobre os parâmetros de resistência das rochas estudadas, bem como dos resultados de uma simulação numérica da estabilidade das paredes de poços de petróleo, utilizando-se os resultados obtidos neste projeto.

No sétimo capítulo, são apresentados a conclusão os comentários e sugestões destinados aos pesquisadores que pretendam dar continuidade ao tema em questão.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

Introdução

Vários foram os estudos nesses últimos 40 anos que procuraram avaliar e definir propriedades para as rochas e assim permitir sua caracterização. O objetivo básico é o de atender as exigências crescentes da indústria e da ciência. Este projeto em particular tem por objetivo esclarecer mais um destes questionamentos. A hipótese mencionada no capítulo anterior, de que as diferenças entre as condições de temperatura utilizadas em laboratório e a condição real encontrada no meio rochoso podem levar a resultados distintos nos valores dos parâmetros, permitiu a abertura do projeto.

Durante a fase da pesquisa bibliográfica, identificou-se alguns trabalhos, que com certeza ajudaram a esclarecer parte dos fenômenos esperados. Ao longo dos 12 meses destinados à realização da revisão, que teve início em julho de 1994, tomou-se como ponto de partida o acervo disponível na Biblioteca da Área de Engenharia (BAE) UNICAMP. Encontraram-se poucos trabalhos, alguns livros, e que mesmo assim versavam sobre o assunto Mecânica das Rochas de uma forma mais abrangente. Outro recurso inicial foi a biblioteca do Departamento de Engenharia de Petróleo (DEP). Esta por ser mais específica, forneceu um maior número de trabalhos, entre livros e artigos. Um destaque deve ser conferido as publicações do SPE (Society of Petroleum Engineers), por se tratar de uma entidade direcionada ao acompanhamento e divulgação das pesquisas na área de petróleo. Outra biblioteca consultada foi a do CENPES, que também apresentou um bom acervo com relação ao assunto a ser estudado.

Outros recursos utilizados foram as bases de dados de outras universidades como New Mexico (USA), Cornell (USA) e USP (SP), consultadas via INTERNET. Porém, além de não terem sido localizados mais do que três artigos que atendessem os objetivos, o processo de resgate mostrou-se bastante lento e desestimulante, pelo menos 50 dias entre o pedido e a resposta.

É interessante observar que a pesquisa bibliográfica apresentada a seguir em forma de resumo dos trabalhos mais importantes, demonstra que o estudo dos efeitos da temperatura sobre os parâmetros elásticos e de resistência em rochas reservatório de petróleo não é um assunto muito explorado. A maioria dos pesquisadores atentou para os fenômenos que ocorrem envolvendo diversos tipos de rochas e em condições bem mais severas que aquelas encontradas nos reservatórios de hidrocarbonetos ou seja, para temperaturas bem mais elevadas.

Revisão Bibliográfica

SOMERTON (1958), avaliou a condutividade e a difusividade térmicas e o calor específico de amostras de arenitos homogêneos e bem consolidados, folhelhos, calcários e siltitos. O objetivo da pesquisa consistia em fornecer dados mais confiáveis para a utilização de processos térmicos de recuperação de hidrocarbonetos.

As amostras foram ensaiadas secas e saturadas com água destilada e metano, e com temperaturas entre 126° e 527°C. SOMERTON concluiu que o calor específico pode ser calculado a partir da análise química do material. Portanto, uma boa estimativa desta propriedade pode ser feita se conhecermos a composição mineralógica da rocha. Rochas ricas em *quartzo* apresentaram calor específico menor do que aquelas com maior concentração de *feldspato* e *argila*. A saturação de vapor apresentou pouca influência porém, a saturação de água pode elevar em até 35% esta propriedade, dependendo da temperatura e da pressão. Havendo saturação de petróleo, SOMERTON também concluiu que há aumento do calor específico.

A condutividade térmica ficou mais elevada para rochas que também apresentavam maior concentração de *quartzo* e bom contato entre os grãos. O mesmo não foi observado para rochas com alta concentração de *feldspato* e *argila* e com baixa força de contato entre os grãos. A saturação de fluido aumenta a condutividade térmica que também depende das características do fluido.

A difusividade térmica é bastante sensível a mudança de temperatura, diminuindo com o aumento desta.

SOMERTON e BOOZER (1959) determinaram basicamente a difusividade térmica de amostras dos arenitos BEREÁ, BOISE e BANDERA e também de amostras de carbonatos e folhelhos, desta vez para temperaturas entre 93° e 982°C. Verificou-se também que a difusividade térmica caía com o aumento da temperatura. Nesse mesmo trabalho foi observada uma série de reações em função das temperaturas utilizadas. Em torno dos 574°C ocorreu a mais importante delas, o *quartzo* muda da fase^{2.1} α para a fase β . Este tipo de reação é reversível com o abaixamento da temperatura. A 832°C os *carbonatos* presentes nos arenitos como cimento perdem *dióxido de carbono*. Porém, abaixo dos 400°C nenhuma reação térmica importante foi observada.

SOMERTON e SELIM (1960) voltaram a abordar o problema das reações térmicas a que estão sujeitas as rochas porosas e seus minerais constituintes. Desta vez, enfocaram o calor (energia) necessário para que estas reações ocorressem e as temperaturas de reação. Verificaram que algumas *argilas* (*Ca-montmorilonita* e a *Mg-montmorilonita*) sofrem dissorção entre 25° e 220°C, o *carbonato de cálcio* (CaCO_3) se decompõe entre 700° e 830°C e o *quartzo* sofre mudança de fase ($\alpha - \beta$) a 573°C. Esta última reação confirmou-se como reversível com o abaixamento da temperatura. Ao avaliarem os processos de expansão térmica em amostras dos arenitos BEREÁ, BOISE e BANDERA entre 22° e 1000°C, SOMERTON e SELIM perceberam que em torno dos 573°C ocorrem mudanças bruscas de inclinação nas curvas expansão linear *versus* temperatura. Isto foi atribuído à influência do *quartzo* na composição destas rochas (entre 50 e 90%). E finalmente concluíram que os diferentes valores de expansão térmica dos diversos constituintes do material podem levar a danos estruturais durante a fase de aquecimento.

Os autores lembram ainda que todos os testes realizados ocorreram a pressão atmosférica e em amostras de arenitos secas. Portanto, para a aplicação dos resultados em condições de subsuperfície, outros fa-

^{2.1} A mudança de fase $\alpha - \beta$ refere-se as alterações que ocorrem na estrutura cristalina do *quartzo* em função da temperatura. O *quartzo* α ocorre até a temperatura de 573°C e o *quartzo* β acima deste valor até um novo limite de temperatura, quando ocorrem novas mudanças na estrutura do mineral e este recebe nova denominação.

tores deveriam ser levados em conta como pressão de sobrecarga das camadas e saturação de fluidos.

HOMAND-ETIENNE (1989), estudou os fenômenos de dilatação térmica e formação de fissuras em rochas compostas de *quartzo* (granitos e arenitos) e *carbonatos* (mármore e micrita) quando submetidas a temperaturas entre 20° e 600°C.

Richeter e Simmons (1974), apud HOMAND-ETIENNE (1989), verificaram que para rochas magmáticas, entre 25° e 550°C a dilatação térmica depende da porosidade, das microfissuras iniciais, da velocidade de aquecimento, da máxima temperatura atingida, da composição mineralógica e da anisotropia da estrutura do material. Com relação a velocidade de aquecimento, para valores inferiores a 2°C/min e temperaturas inferiores a 250°C, o coeficiente de dilatação térmica α , determinado experimentalmente, está bem próximo do valor calculado a partir da composição mineralógica da rocha.

Ao avaliar o comportamento da temperatura sobre os minerais que compõem as rochas, HOMAND-ETIENNE observa que na literatura pesquisada as opiniões são bem unificadas. O principal efeito é a dilatação térmica. "...o *quartzo*, submetido a pressão atmosférica, sofre uma mudança brusca no valor do coeficiente de dilatação ao atingir 573°C, em virtude da mudança de fase..." (Somerton & Selim, 1960). O *feldspato* sofre pouca dilatação térmica, as *argilas* são mais afetadas. Os minerais argilosos geralmente perdem água adsorvida, que faz parte da estrutura cristalina, em torno de 105°C. A reação de desidroxilação situa-se em torno de:

- 410°C para a *ilita*;
- 430°C para a *caolinita*;
- 700°C para *sericita*.

A *calcita* sofre descarbonatação próximo aos 660°C. Estes fenômenos também foram previstos por Somerton e Boozer (1959).

HOMAND-ETIENNE (1989) mostra que alguns fatores estruturais são mais sensíveis aos tratamentos térmicos, dentre eles:

- aspectos da cristalização da rocha,
- composição cristalina,

- textura granular,
- origem da rocha (ex.: rocha magmática, rocha metamórfica, etc.).

O tamanho do grão tem um papel importante quando se quer prever o comportamento de rochas da mesma família. O calcário por exemplo, o tipo mais grosseiro é mais sensível à temperatura (em termos da formação de fissuras e da dilatação). As microfissuras iniciais agem como *absorvedor* da dilatação e reduzem o processo de formação de novas fissuras. Outras conclusões importantes do trabalho:

- Os monocristais apresentam uma boa reversibilidade da curva de dilatação térmica porque não ocorre a formação de microfissuras;
- Nas rochas monominerais as fissuras ocorrem em função da anisotropia de dilatação térmica dos minerais;
- Nas rochas polimineriais^{2.2}, o processo de fissuração ocorre devido a superposição das desigualdades dos coeficientes de dilatação térmica dos diferentes minerais e das tensões inter-granulares de tração e compressão que se desenvolvem e muitas vezes ultrapassam a resistência dos minerais. Estes fenômenos levam à formação de fissuras inter e intra-granulares.

SOMERTON (1961) chegou à mesma conclusão obtida por Homand-Etienne (1989) para rochas polimineriais, ao estudar o comportamento de amostras de arenitos submetidos a altas temperaturas.

Neste trabalho, SOMERTON avaliou os aspectos das propriedades mecânicas e dos poros com amostras dos arenitos BEREA, BOISE e BANDERA quando submetidas a temperaturas entre 300° e 1000°C.

Os parâmetros avaliados foram:

- Expansão térmica linear;
- Variação volumétrica total;
- Permeabilidade;
- Resistência a Compressão;
- Curva tensão *versus* deformação;

^{2.2} As rochas polimineriais são aquelas constituídas por mais de um tipo de mineral. Como por exemplo, os arenitos, cuja composição mineralógica pode ser formada por minerais de quartzo, argilas, feldspato, calcita, etc.

- Velocidades das ondas ultra-sônicas através dos corpos de prova antes e após o processo de aquecimento.

Os ensaios foram conduzidos em 5 níveis de temperaturas distintos, 300°C, 500°C, 600°C, 800°C e 1000°C. Para cada nível adotado, a amostra era aquecida e depois resfriada, tanto numa situação quanto na outra, a uma taxa de 2,5°C/min.

A avaliação da expansão térmica linear comprovou mais uma vez os resultados obtidos em trabalhos anteriores, a mudança de fase α - β do *quartzo* a 573°C.

A porosidade mudou pouco até 500°C e as alterações foram atribuídas à desidratação e à deformação residual decorrente das diferenças entre as expansões térmicas dos minerais constituintes da rocha. Acima de 500°C, várias reações químicas foram observadas como a desidratação das argilas e dissociação dos *carbonatos* que contribuíram para o aumento mais sensível da porosidade e permeabilidade.

Quanto à resistência mecânica, ocorreu uma redução sensível nas amostras aquecidas além dos 500°C. As amostras do arenito BOISE aquecidas a 300°C e as do arenito BEREA e BANDERA aquecidas a 500°C apresentaram um ligeiro aumento de resistência. Este fenômeno foi atribuído à perda de água e conseqüente aumento do atrito interno entre os grãos da rocha.

Na avaliação das curvas de tensão *versus* deformação, SOMERTON (1961) observou uma redução nas inclinações das curvas de deformação lateral e axial comprovando que o módulo de Young diminui com o aumento da temperatura. Porém, nenhuma alteração sensível foi observada com relação ao coeficiente de Poisson.

Quanto às medições de velocidade de ondas sônicas efetuadas, observou-se uma redução sensível com o aumento da temperatura. SOMERTON (1961) justificou como sendo conseqüência dos danos estruturais provocados por altas temperaturas.

Com relação ao módulo de Young, VUTUKURI e LAMA, em seu trabalho denominado "Handbook on Mechanical Properties of Rocks" vol II

apresentaram vários resultados interessantes de outros pesquisadores como Handin e Hager (1958), que não observaram grandes variações no módulo de Young de amostras do arenito BARNES quando testados em temperaturas entre a ambiente e 300°C. Porém, Hughes e Maurette (1965), ao avaliarem amostras do arenito CAPLEN DORNE entre 25° e 200°C a pressão de confinamento de 49 MPa, obtiveram uma redução da ordem de 20% no valor do módulo de Young. Griggs, Turner e Heard (1960) também observaram redução do valor do módulo de Young de amostras de granito ensaiados entre 25° e 800°C.

SOMERTON, METHA e DEAN (1964) avaliaram o comportamento de permeabilidade, velocidade sônica, tensão de ruptura e índice de fratura^{2,3} em corpos de prova dos arenitos BEREA, BANDERA, e St. PETER submetidos a temperaturas entre 400° e 800°C. As principais conclusões foram:

- O aquecimento das rochas e seu posterior resfriamento leva a grandes alterações nas propriedades avaliadas. De uma forma geral todos aumentaram significativamente. E para as temperaturas mais elevadas (800°C) as variações foram ainda maiores;
- Durante os ensaios foram adotadas duas condições distintas de pressão: a primeira em condições atmosféricas e a outra com pressão de confinamento de 10,3 MPa, e 5,2 MPa de pressão de poro. Estas duas situações ocasionaram diferenças sensíveis. Ao adotar a segunda hipótese, SOMERTON et al. (1964) procuravam condições mais representativas do meio que originaram algumas das amostras;
- As condições de pressão e temperatura criadas em cada ensaio também ocasionaram alterações termoquímicas nos componentes das rochas. Fenômenos como a *queima* das argilas, inversão α - β do *quartzo*, dissociação da dolomita foram observados e considerados responsáveis por mudanças sensíveis nos parâmetros.

Os resultados obtidos se assemelharam e portanto confirmaram aqueles obtidos por Somerton (1961).

^{2,3} O índice de fratura mede um certo tipo de dano sofrido pela rocha em função do aquecimento. Para obtê-lo faz-se uma contagem, com o auxílio de microscópio, do número de fraturas existentes nos grãos de quartzo e feldspato antes e após a rocha ter sido submetida a um determinado tratamento térmico. O índice é obtido dividindo-se o valor da contagem após pelo valor da contagem antes do tratamento. Quando maior o índice maior foi o dano estrutural.

SOMERTON e GUPTA (1965) estudaram o comportamento de amostras dos arenitos BEREA, BOISE e BANDERA quando saturados com soluções salinas de CaCl_2 , KCl e NaCl a 30% e aquecidas entre 500° e 900°C. Verificou-se que, além dos fenômenos já descritos por Somerton e Selim (1961) e por Somerton (1965), outros foram verificados em função da presença de sais. O *feldspato* sofreu alterações que poderiam ter aumentado os danos estruturais a rocha. Também ocorreram reações envolvendo argilas, sais e partículas ferrosas com a formação de novos minerais mais densos. Tais reações permitiram o aumento da permeabilidade e da velocidade das ondas sônicas.

VON GONTEN e CHOUDHARY (1969) estudaram o efeito da compactação e da porosidade sobre a compressibilidade do volume poroso. Ensaíram 18 corpos de prova sendo 16 de arenito BEREA e 2 de calcário. Os ensaios foram conduzidos com pressões de compactação de 103 MPa e em duas temperaturas: 24° e 204,4°C.

Alguns resultados se mostraram interessantes, como por exemplo o aumento da compressibilidade com a porosidade, em amostras cujos valores desta propriedade estavam entre 19 e 28%. Quando a porosidade estava abaixo de 19%, não foi possível verificar qualquer tipo de correlação.

VON GONTEN e CHOUDHARY apresentaram como conclusão o fato que a compressibilidade do volume poroso depende pelo menos da pressão de compactação, da porosidade e da temperatura. Esta última variável provocou um aumento da ordem de 21% quando se compararam os valores de compressibilidades obtidos a 204,4°C com os obtidos a 24°C.

Alguns anos mais tarde, em 1973, NEWMAN estudou a respeito da compressibilidade do volume poroso de amostras de arenitos bem consolidados, mal consolidados e friáveis.

Analisando o trabalho apresentado por Von Gonten e Choudhary (1969), descrito anteriormente e comparando-o ao de Newman, pode-se observar uma certa similaridade, o que permite tirar algumas conclusões:

- No trabalho de Von Gonten e Choudhary foram utilizadas poucas amostras, num total de 18, sendo 9 para cada temperatura de teste (24°C e 204,4°C). Destas amostras apenas duas eram de calcário e o restante de arenitos bem conhecidos (BEREA).
- Para desenvolver sua pesquisa, NEWMAN utilizou 256 amostras, sendo 197 de arenitos de 29 reservatórios distintos e 59 de calcários de 11 reservatórios distintos.
- Em ambos os trabalhos, os autores tentavam entre outros aspectos relacionar a porosidade inicial das amostras com a compressibilidade do volume poroso. Enquanto Von Gonten e Chourhary trabalharam em um intervalo de 10 a 28%, Newman trabalhou entre 1 e 35% de porosidade inicial.
- NEWMAN utilizou arenitos bem consolidados, mal consolidados e friáveis, e calcários.
- Von Gonten e Choudhary tiveram uma preocupação especial em determinar influências da temperatura nos valores de compressibilidade do volume poroso, enquanto Newman não conseguiu estabelecer uma correlação confiável. De acordo com suas palavras: “ Em virtude da dispersão dos resultados encontrados para os valores de compressibilidade, não foi possível estabelecer qual a amplitude da influência da temperatura.” (NEWMAN, 1973 - grifo deste autor)

Newman (1973) apresenta em seu trabalho, na página 132, algumas discussões interessantes:

A representação gráfica da compressibilidade do volume poroso contra a porosidade inicial da amostra à pressão efetiva zero (diferença entre a pressão de confinamento e a pressão de poros), revelou que para arenitos e calcários de baixa porosidade, o comportamento segue a tendência obtida por HALL (1953): a com-

pressibilidade do volume poroso aumenta com a diminuição da porosidade.

Este fenômeno ficou bem caracterizado nos pontos representativos dos calcários bem consolidados que acompanham as tendências de Hall (1953) e Van Der Knaap's (1959) e para os arenitos bem consolidados que também acompanham as tendências encontradas por Hall (1953) (p. 132)

Segundo NEWMAN, geralmente as amostras bem consolidadas apresentaram comportamento elástico. Portanto, a maior parte do volume poroso foi recuperado após o relaxamento das tensões.

Newman prossegue dizendo que geralmente as amostras com porosidades mais altas (não quantificadas pelo autor do trabalho), são aquelas de rochas mal consolidadas, e que apresentaram um comportamento oposto ao encontrado por Hall (1953), ou seja: a compressibilidade tende a aumentar com a porosidade.

De acordo com NEWMAN, as amostras de rochas mal consolidadas mostraram um significativo comportamento inelástico, ou seja, ocorreu uma redução de volume poroso permanente devido à quebra dos grãos internos. Este último comportamento está de acordo com os resultados obtidos por Von Gonten e Choudhary (1969), que encontraram o tipo de correlação acima em um intervalo de porosidade entre 19 e 28%.

Conforme NEWMAN, as rochas friáveis, embora também tivessem comportamento inelástico, não apresentaram boa correlação entre compressibilidade e porosidade inicial.

NEWMAN observou, a partir do seu trabalho, que houve uma ampla variação dos valores de compressibilidade em função da porosidade e dos tipos de rochas e que estes resultados apresentaram uma fraca correlação com os obtidos por Hall (1953). NEWMAN verificou também que na literatura os valores de compressibilidade de 79 amostras (inclusive as de Hall), apresentaram uma dispersão semelhante à sua, fato este que dá suporte aos seus resultados.

Quando analisa os resultados obtidos por Van Der Knaap (1959), resultados estes que apresentaram uma boa correlação entre a

compressibilidade do volume poroso e a porosidade, NEWMAN ressalta o fato de que as 23 amostras de calcário utilizadas por Van Der Knaap, foram retiradas de um único poço. E mesmo os estudos desenvolvidos por Hall levaram em conta 12 amostras, sendo 7 calcários e 5 arenitos com porosidade entre 2 e 26%. Das 256 amostras utilizadas por Newman, 194 estavam neste intervalo. Baseado nessa pesquisa, NEWMAN concluiu que:

- A compressibilidade do volume poroso para uma dada porosidade pode variar bastante, dependendo do tipo de rocha;
- Atentando para a correlação dos dados observa-se que os arenitos bem consolidados diferem bastante dos calcários e dos arenitos mal consolidados e friáveis. Mesmo assim, os dados obtidos ficaram muito espalhados, tornando a correlação entre a compressibilidade do volume poroso e a porosidade pouco confiáveis;
- Verificou-se também que uma tendência bem definida de comportamento ocorreu apenas para os arenitos bem e mal consolidados. No caso das amostras de arenitos friáveis ocorreu pouca ou nenhuma relação. Estes dados sugerem que as correlações devem ser procuradas para arenitos e calcários bem consolidados com litologias similares. Ou seja, estas correlações podem ser obtidas a partir de amostras coletadas dentro de um mesmo reservatório cujas variações litológicas são pequenas;
- Muitas das aproximações encontradas para os arenitos e calcários bem consolidados são recomendadas para as amostras friáveis e mal consolidadas. Porém, nestes casos, a compressibilidade do volume poroso não depende exclusivamente da porosidade. Outros parâmetros devem ser investigados e analisados.

SOMERTON, EL-SHAARANI e MOBARRAK (1974), estudaram o comportamento da compressibilidade total, da compressibilidade da matriz e da velocidade das ondas compressoriais (P) em amostras dos arenitos BEREJA, BOISE e BANDERA e de corpos de prova de siltitos extraídos da formação IMPERIAL VALLEY na Califórnia. Os ensaios foram conduzidos a temperaturas entre 20° e 200°C e com pressões efetivas até 110 MPa e em amostras secas e saturadas com solução de KCl ou óleo.

Os resultados mostraram que a velocidade das ondas **P** aumentaram com a tensão efetiva e diminuiu com a temperatura e a saturação de líquido. A magnitude dos efeitos variou de uma amostra para outra. O efeito mais pronunciado da pressão, temperatura e saturação de fluido sobre a velocidade das ondas **P** no arenito BANDERA, foi justificado como uma consequência da concentração de calcita e por se tratar de uma rocha com granulometria mais fina.

O efeito da temperatura foi mais pronunciado em amostras saturadas com óleo e ficou na faixa dos 15%. Para pressões mais baixas esta variável afeta pouco a velocidade.

O arenito BOISE, por possuir granulometria mais grosseira, mostrou menor efeito das três variáveis sobre a velocidade das ondas **P**. Outro detalhe observado foi o fato desta amostra apresentar os mais baixos níveis de velocidade.

Os corpos de prova do IMPERIAL VALLEY foram retirados em três profundidades distintas. As amostras da profundidade menor (732 m) e com granulometria mais fina mostraram-se bastante afetadas pela pressão e temperatura. Já os corpos de prova obtidos da profundidade maior (1543 m) mostraram menor efeito da temperatura.

Mobarak (1971), apud SOMERTON et al. (1974), mostrou que geralmente o aumento da pressão leva ao aumento das velocidades das ondas **P** e **S** e que a elevação da temperatura leva à redução da velocidade destes tipos de ondas em rochas.

A redução das velocidades em cerca de 12% com a variação da temperatura de 27° para 200°C também foi observado por Hugles & Cross (1951), apud SOMERTON et al. (1974).

VUTUKURI e LAMA (1978) apresentam vários resultados de outros pesquisadores em diversos tipos de rochas comprovando que normalmente ocorre a redução das velocidades das ondas **P** e **S** com o aumento da temperatura. Porém, os resultados apresentados por Hugles e Jones (1951) mostraram que algumas dolomitas tiveram comportamento

oposto quando a temperatura das amostras variou de 100° para 125°C. Hughes & Jones, apud VUTUKURI e LAMA (1978), atribuíram tal resposta a alterações nas propriedades do material em função das temperaturas adotadas. Acima desta faixa de temperatura, ocorreram reduções nas velocidades das ondas **P** e **S**. Na época as supostas alterações não foram justificadas.

Quanto à compressibilidade total, SOMERTON et al. (1974) observaram que os efeitos da pressão sobre este parâmetro são melhor conhecidos que os efeitos da temperatura. Mencionaram o trabalho de Newman (1973) salientando que este não obteve dados conclusivos dos efeitos da temperatura sobre os 256 corpos de prova ensaiados.

Ao comentarem resultados de outros trabalhos, SOMERTON et al. (1974) fizeram algumas comparações importantes:

- Os resultados obtidos por Lobree (1968) e El Shaarani (1973) a partir de amostra dos arenitos BEREÁ, BANDERA e BOISE mostraram algumas diferenças, principalmente para níveis de pressão mais baixos. Lobree inicialmente determinou os valores de compressibilidade total a pressões mais altas, em que variações foram pequenas. Depois, colheu poucos dados a baixas pressões, obtendo assim um alto grau de incerteza no cálculo da compressibilidade nesta condição. El Shaarani, por outro lado, utilizou os dados a cada 6,9 MPa de incremento de pressão. Esse procedimento conduziu a resultados mais confiáveis em pressões mais baixas.

Segundo SOMERTON et al. (1974), tanto Lobree quanto El Shaarani fizeram medições das compressibilidades com a mesma amostra de rocha a duas ou três temperaturas diferentes. Sendo assim, a variação entre corpos de prova não foi um fator importante na interpretação dos efeitos da temperatura.

Lobree, achou 15% em média de aumento na compressibilidade total quando a temperatura passou de 20° para 200°C, enquanto El Shaarani verificou para o arenito BEREÁ, um aumento de 11% quando a temperatura passou de 20° para 100°C e de 23% quando a temperatura variou de 20° para 200°C, ou seja, aproximadamente o dobro nas pressões mais altas. Para as pressões mais baixas, o aumento da compressibilidade foi de 40 a 50% quando a temperatura variou no mesmo intervalo.

Segundo SOMERTON et al. (1974), o efeito da temperatura sobre os resultados com as amostras mais profundas do IMPERIAL VALLEY (1543m) foi o de aumentar o valor da compressibilidade total cerca de 14% comparando o ensaio a 200°C com o ensaio a 20°C. Por outro lado, a amostra coletada a uma profundidade intermediária (1012m), mostrou maior influência quando comparados os seus resultados com o do arenito BEREÁ.

A respeito da compressibilidade da matriz, SOMERTON et al. (1974) observaram que Lobree obteve um aumento de 5% com a temperatura variando de 20° para 200°C. Este valor foi consideravelmente menor do que as variações da compressibilidade total. El Sharaani mostrou resultados com maior variação, embora hajam inconsistências, principalmente com os ensaios das amostras do IMPERIAL VALLEY. As grandes variações obtidas com amostras coletadas a 1543m, embora bastante verificadas e confirmadas pela repetição dos resultados, não puderam ser explicadas. A amostra coletada a 1012m também mostrou um comportamento incomum para a compressibilidade da matriz: foram muito altos e diminuíram com o aumento da temperatura. Timur (197_), apud SOMERTON et al. (1974), atribuiu os altos valores de compressibilidade da matriz à presença de *argilas* nos arenitos e siltitos.

As conclusões e observações de SOMERTON et al (1974) foram:

- Os ensaios foram realizados para avaliar certas propriedades e comportamentos a altas temperaturas de um número limitado de arenitos e siltitos, os quais cobrem um grande intervalo de propriedades mineralógicas, petrofísicas e físicas. Os testes foram realizados em três temperaturas, 20°, 100° e 200°C e pressões até 110 MPa. Portanto, as conclusões apresentadas baseiam-se nesses dados limitados;
- Os valores de velocidade das ondas compressoriais (**P**) de todas as rochas ensaiadas diminuíram com o aumento da temperatura. O efeito foi mais pronunciado nas amostras secas e em níveis de pressão mais baixos. Embora não tenha havido consistência nas correlações entre o efeito da temperatura e as propriedades das rochas, as amostras com maior concentração de calcita (arenito BANDERA) mostrou maior alteração da velocidade com a temperatura;

- A compressibilidade total de todas as rochas aumentou com a temperatura e o efeito foi mais pronunciado em níveis de tensão mais baixos. Como houve insuficiência de dados, não foi possível tirar conclusões definitivas a respeito do efeito da temperatura sobre a compressibilidade de rochas saturadas;
- Os valores de compressibilidade da matriz da rocha foram um tanto erráticas no comportamento porém, de um modo geral aumentaram com a temperatura. O efeito da presença de argilas na compressibilidade da matriz requer mais investigações;
- O cálculo de subsidência de reservatórios de subsuperfície baseado nos valores de compressibilidades calculados nesse trabalho mostrou que o efeito da temperatura não pode ser negligenciado. Mesmo sabendo que o valor da subsidência tenha sido pequeno para as rochas ensaiadas.

SOMERTON (1992), observa que na literatura existe um número substancial de dados provando que a compressibilidade dos poros diminui com o aumento das tensões (Hall 1953, Fatt 1958, Geertma 1957), porém o efeito da temperatura é pouco conhecido. Resultados experimentais obtidos por Lobree (1968), a partir de corpos de prova de três arenitos, mostraram que houve aumento na compressibilidade total quando elevou-se a temperatura das amostras de 20°C para 200°C e que a compressibilidade da rocha cresceu também cerca de 5%.

Von Gonten e Choudhary (1969), encontraram um aumento de 20% na compressibilidade dos poros para vários arenitos que sofreram a mesma variação de temperatura.

Newman (1973), não encontrou efeitos consistentes da temperatura sobre a compressibilidade dos poros em 256 amostras de arenitos. No entanto, ele recomenda que toda compressibilidade deve ser medida à temperatura de reservatório.

El Shaarani (1973), repetiu os testes feitos por Lobree (1968) com amostras de três arenitos (BANDERA, BEREA e BOISE) e estendeu os trabalhos para alguns testemunhos do reservatório geotérmico denominado

IMPERIAL VALLEY. Os ensaios de compressibilidade total e da matriz foram feitos com corpos de prova enjaquetados^{2.4} e não enjaquetados respectivamente. Aos valores de compressibilidade foram medidos a partir de observações das variações nas dimensões dos corpos de prova quando submetidos a pressão hidrostática.

Os testes foram feitos utilizando-se um vaso de alta pressão, o qual podia também ser aquecido. As medidas foram realizadas em pressão até 110 MPa, e em três temperaturas distintas: 20°, 100° e 200°C. Os valores de compressibilidade total referem-se a corpos de prova secos. Um detalhe importante observado foi o fato de se obter valores diferentes de compressibilidade total para diferentes amostras do mesmo arenito e para diferentes operadores. No entanto, ficou claro que o aumento da temperatura resultou no aumento da compressibilidade total para os três arenitos.

Para os corpos de prova obtidos a partir do IMPERIAL VALLEY, tentou-se observar o comportamento quando submetidos a pressão e em duas situações:

- corpos de prova secos;
- corpos de prova saturados com solução salina.

Esses corpos de prova foram descritos como altamente compactados, arenitos de grãos muito finos, baixa concentração de *quartzo* (36%) e alta de *calcita* (26%) e *argilas* (28%). Houve uma diferença pequena nos valores de compressibilidade entre os espécimes secos e os saturados.

O efeito da temperatura sobre a compressibilidade foi substancialmente menor do que os valores encontrados nos outros arenitos. Tudo leva a crer que diferenças na composição mineralógica e na porosidade justificam as diferenças encontradas.

O efeito da temperatura na compressibilidade da matriz (arcabouço), para os diversos arenitos testados, mostrou-se forte. Aumentando-se a temperatura, observou-se um aumento nos valores da compressibilidade. Embora os valores de compressibilidade dos poros não

^{2.4} O termo refere-se ao revestimento do corpo de prova com uma película com o objetivo de isolá-lo do fluido utilizado na aplicação da pressão hidrostática. Na época em que esse trabalho foi realizado, era comum a utilização de folhas muito finas de latão neste processo.

tenham sido medidos nos trabalhos relacionados anteriormente, Mann (1959) mostrou existir uma excelente concordância entre compressibilidade de poros medidas e as calculadas a partir da seguinte fórmula:

$$C_p = C_b / \phi \quad (2.1)$$

onde: C_p = compressibilidade do poro (MPa^{-1})

C_b = compressibilidade total (MPa^{-1})

ϕ = porosidade (%)

Comparando a compressibilidade do volume poroso medido e reportado por Von Gonten e Choudhary (1969), para o arenito BERE A, com os valores calculados a partir da compressibilidade total obtidos por Lobree (1968) para o mesmo arenito, observou-se uma diferença de 3% na maior parte do intervalo de pressão (de 0 a 110 MPa) para uma temperatura de 20°C. À temperatura de 200°C esta diferença chega a 10%.

Von Gonten e Choudhary (1969) reportaram o aumento médio de 12% na compressibilidade do volume poroso para o arenito BERE A quando varia a temperatura de 24° para 200°C. Esse dado está muito próximo das observações de Lobree quanto à variação da compressibilidade total para esse arenito no mesmo intervalo de pressão. Assim, se a porosidade não variar muito dentro de um certo intervalo de temperatura, a concordância entre os valores medidos e calculados fica muito boa. Embora este tipo de concordância não ocorra para todos os tipos de rocha, o uso da equação descrita anteriormente fornece uma aproximação aceitável.

Os efeitos da temperatura na porosidade não são determinados diretamente. Contudo, combinando-se os dados de Von Gonten e Choudhary (1969) referentes aos efeitos da temperatura e pressão sobre o volume poroso, e os dados de Lobree (1968) para o volume total, o efeito da temperatura e da pressão sobre a porosidade podem ser estimados. Como exemplo SOMERTON (1992), cita os resultados dos cálculos acima para o arenito BERE A a duas temperaturas distintas: 20° e 200°C. A redução da porosidade com a pressão chega a ser cerca de 4% maior na temperatura mais elevada.

Conforme SOMERTON (1992), os valores de compressibilidade da rocha e total foram usados por Geertsma (1973), para estimar a subsidência na superfície do solo em função da redução da pressão dos fluidos nos poros da rocha reservatório. As análises de Geertsma basearam-se na relação de compactação de reservatórios de sub-superfície com os conceitos de *Núcleo de Deformação*, os quais dão expressão similar aos modelos para Tensão Esférica de Mc Cann e Wilts (1951) apud SOMERTON (1992). Necessita-se nessa análise de um dado denominado Coeficiente de Compactação Uniaxial (C_m), definido como:

$$C_m = \frac{(1 + \nu)(1 - \beta)C_b}{3(1 - \nu)} \quad (2.2)$$

onde: ν = Coeficiente de Poisson

$(1 - \beta)$ = Constante de BIOT = $1 - C_r / C_b$

C_r = Compressibilidade da rocha

C_b = Compressibilidade total

El Shaarani (1973), fez cálculos para determinar a subsidência com base nessas análises e utilizando seus próprios dados medidos a altas temperaturas. As conclusões encontradas foram que a subsidência pode ser aumentada sensivelmente quando a pressão do poro está caindo em reservatórios a altas temperaturas.

Mobarak (1971), apud SOMERTON (1992), observou na literatura os efeitos da pressão e da temperatura sobre a velocidade das ondas nas rochas. Vários pesquisadores verificaram que tanto as ondas compressionais (**P**) quanto as cisalhantes (**S**) têm suas velocidades aumentadas com a pressão. Porém, poucos pesquisadores verificaram a redução da velocidade sônica com o aumento da temperatura.

O trabalho de Hughes e Cross (1951), apud SOMERTON (1992), é particularmente significativo a esse respeito, mostrando que a velocidade da onda compressional reduz cerca de 12%, enquanto a onda cisalhante reduz cerca de 5% quando a temperatura é elevada de 27° para 200° C. Uma redução na velocidade da onda compressional da ordem de 15% foi verificada em arenitos saturados com água quando a temperatura variou no mesmo intervalo.

SOMERTON (1992), cita que vários colaboradores seus, entre eles Mobarak (1971), Al-Khafaji (1975) e Palen (1978), estudaram os efeitos da tensão e temperatura na velocidade das ondas elásticas em corpos de prova de arenitos saturados e secos. Houve uma concordância geral nos resultados desses estudos, porém, apenas o trabalho mais recente publicado por Palen é discutido aqui.

As conclusões apresentadas por SOMERTON foram:

- O aumento na velocidade dos dois tipos de onda com o aumento da tensão efetiva também foram observados em outros trabalhos;
- O efeito da saturação de fluido nas velocidades: aumento na velocidade das ondas compressoriais e diminuição na velocidade das ondas cisalhantes também foram verificados nos outros trabalhos;
- O efeito da temperatura mostrou-se como um redutor nas velocidades em todos os experimentos realizados. Porém, com maior intensidade que nos trabalhos realizados por Hughes e Cross (1951).

Para amostras saturadas de líquidos a redução nas velocidades das ondas compressoriais e cisalhantes foram da ordem de 4 a 6%, para temperaturas no intervalo de 20° a 200°C. Enquanto para amostras secas a redução na velocidade das ondas cisalhantes foi pequena (cerca de 2%), foi maior para as ondas compressoriais (cerca de 7%).

O efeito da tensão, entre 3,5 MPa e 70 MPa, sobre as velocidades das ondas cisalhantes e compressoriais podem ser representadas pela equação:

$$V_{p,s} = A_{p,s} \sigma^{1/x_{(p,s)}} \quad (2.3)$$

onde: A = uma constante para diferentes tipos de rochas

σ = tensão efetiva

x = expoente para diferentes tipos de rochas

Nos subscritos, **P** e **S** referem-se as ondas compressoriais e cisalhantes respectivamente.

Palen (1978) conclui que o valor de A para a velocidade das Ondas Cisalhantes varia amplamente para diferentes tipos de rochas, partindo de 500 para rochas menos duras até 3000 no caso oposto. O valor de A no caso das ondas compressionais é 50% maior. O valor do denominador do expoente (x) varia de 6 para arenitos inconsolidados até mais de 40 para rochas duras.

Embora nenhuma expressão analítica representando o efeito da temperatura e da saturação de fluido sobre a velocidade sônica tenha sido formulada, é provável que um ajuste nas constantes A e x possa representar estes efeitos.

Nos testes realizados nas amostras de arenitos CERRO PIETRO, que é bem mais friável que o arenito BEREA, foi observado um valor médio para o expoente da ordem de 9 na condição seca. Quando saturado com líquido, este valor cresce para aproximadamente 20, indicando uma redução do efeito da tensão. Este efeito porém, em menor grau, também foi observado para o arenito BEREA.

Baseado nas conhecidas expressões relacionadas as velocidades das ondas \mathbf{P} e \mathbf{S} com os módulos elásticos dinâmicos, Palen (1978), calculou o módulo de Young, módulo de elasticidade volumétrica (*bulk modul*) e coeficiente de Poisson para o arenito CERRO PIETRO. Todos os três módulos mostraram uma redução quando aumentava-se a temperatura era aumentada.

De acordo com SOMERTON et al. (1974), os valores da compressibilidade total calculados a partir de velocidade sônica (dinâmica) podem ser convertidos para valores estáticos pela expressão:

$$C_{bs} = \frac{C_{bd}}{5} \times \sigma^{1/6} \quad (2.4)$$

SOMERTON et al. (1974) ao aplicarem a equação 2.4, verificaram boa concordância com resultados experimentais obtidos para o arenito BEREA entre as pressões de confinamento de 7 MPa e 100 MPa. Porém, os mesmos resultados não se repetiram para os outros materiais ensaiados (siltitos).

SOMERTON (1992), conclui o capítulo dizendo que ignorar o efeito da temperatura sobre as velocidades sônicas pode levar a erros de interpretação no tempo de trânsito dos perfis corridos em reservatórios a altas temperaturas. A redução da velocidade sônica para temperatura elevada pode resultar em estimativas de alta porosidade pelo uso da relação do tempo médio. Isto é contraditório para algumas evidências de que a porosidade tende a diminuir em altas temperaturas.

ZIMMERMAN, HARADEN e SOMERTON (1985), apresentaram um estudo com o objetivo de propor alguns métodos que permitissem a determinação da compressibilidade total e do volume poroso a partir de um sistema computadorizado.

Existem quatro compressibilidades diferentes definidas para corpos porosos em que se relacionam os volumes de poros e total, com as pressões de confinamento e de poros.

Conforme os autores, estas compressibilidades podem ser definidas como:

$$C_{bc} = -(1/V_b) \left(\partial V_b / \partial P_c \right)_{P_p} \quad (2.5)$$

$$C_{bp} = (1/V_b) \left(\partial V_b / \partial P_p \right)_{P_c} \quad (2.6)$$

$$C_{pc} = -(1/V_p) \left(\partial V_p / \partial P_c \right)_{P_p} \quad (2.7)$$

$$C_{pp} = (1/V_p) \left(\partial V_p / \partial P_p \right)_{P_c} \quad (2.8)$$

onde:

C_{bc} = compressibilidade total para um dado valor fixo da pressão de poro P_p em que varia apenas a pressão de confinamento, P_c .

C_{bp} = compressibilidade total para um dado valor fixo da pressão de confinamento P_c em que varia apenas a pressão de poro, P_p .

C_{pc} = compressibilidade do volume poroso para um dado valor fixo da pressão de poro P_p , em que varia apenas a pressão de confinamento, P_c .

C_{pp} = compressibilidade do volume poroso para um dada valor fixo da pressão de confinamento P_c , em que varia apenas a pressão de poro P_p .

ZIMMERMAN et al. (1985) relatam que na maioria dos trabalhos já publicados por outros pesquisadores dificilmente determinam-se simultaneamente mais de um dos tipos das compressibilidades relacionadas acima. Portanto, a proposta desse trabalho é a de medir os quatro tipos de compressibilidades para um certo tipo de rocha sob as mesmas condições. Uma outra proposta, é a de testar algumas das relações teóricas entre as diferentes compressibilidades válidas para meios porosos consolidados, compostos por um material linear elástico, e na ausência de efeitos químicos e de superfície.

Se a compressibilidade da matriz de rocha (sem espaços porosos) é dada por C_r e a porosidade da rocha $\phi = V_p / V_b$, (2.9) as relações teóricas mencionadas anteriormente são:

$$C_{bp} = C_{bc} - C_r \quad (2.10)$$

$$\phi \cdot C_{pc} = C_{bc} - C_r \quad (2.11)$$

$$\phi \cdot C_{pp} = C_{bc} - (1 + \phi) \cdot C_r \quad (2.12)$$

Antes de partir para as conclusões apresentadas por ZIMERRMAN et al., é interessante mostrar algumas das análises feitas pelos autores de trabalhos anteriores:

- Hughes e Cook (1953) realizaram trabalhos importantes na determinação da compressibilidade do volume poroso (C_{pc} ou C_{pp}) em arenitos bem consolidados. Mostraram que em amostras secas do arenito BEREA o valor da compressibilidade variou de $7,94 \times 10^{-4}$ para $4,82 \times 10^{-4}$ MPa⁻¹ quando a pressão de confinamento aumentou de 5 para 100 MPa.
- Hall (1953) apresentou vários resultados de compressibilidade do volume poroso de corpos de prova enjaquetados com LUCITE cuja espessura era

de 0,635 cm. A membrana separava o fluido confinante do fluido contido nos poros da rocha. Segundo ZIMMERMAN et al. o método tinha o inconveniente de produzir pressões na interface entre a amostra e a película diferentes da pressão de confinamento aplicada. Isto levava a erro na determinação dos valores de compressibilidade.

- Newman (1973) utilizou o resultado dos ensaios de 256 corpos de prova de arenitos e calcários com porosidade variando entre 1 e 35%. Segundo ZIMMERMAN et al., embora seus dados sejam comparáveis aos de outros pesquisadores, tal comparação não faz sentido porque a determinação os valores de compressibilidade dos poros foi feita a 75% da pressão de confinamento em relação à profundidade da qual a amostra foi retirada. Isto significa que as compressibilidades de diferentes arenitos foram comparadas a diferentes pressões de confinamento o que do ponto de vista de comportamento mecânico de materiais, é puramente arbitrário. Isto provavelmente levou Newman a concluir que arenitos de porosidades semelhantes pudessem ter compressibilidades cujas diferenças chegassem a um fator de 10.

ZIMMERMAN et al. (1985) determinaram neste trabalho C_{bp} à temperatura ambiente (22°C) para amostras dos arenitos BEREIA, BANDERA e BOISE, compostos por corpos de prova cilíndricos medindo 5,08 cm de diâmetro por 5,08 cm de altura.

Verificou-se nos ensaios a ocorrência de histerese, que tornava-se cada vez menor a cada ciclo de carregamento e descarregamento das amostras dentro da célula de ensaio. O carregamento consiste em variar a tensão efetiva sobre o corpo de prova (*tensão efetiva = pressão de confinamento - pressão de poro*).

A inclinação das curvas de C_{pc} versus P_c , diminuiu a medida que aumentava a pressão de confinamento P_c para um dado valor de pressão de poro P_p . Devido à histerese, a compressibilidade também variou entre uma curva de carregamento (aumento da pressão de confinamento P_c) e a subsequente curva de descarregamento (redução da pressão de confinamento), correspondentes a um ciclo carga-descarga.

Os autores verificaram também que C_{pc} (compressibilidade do volume poroso) varia em função da tensão efetiva atuando sobre a rocha. Os

pesquisadores efetuaram os ensaios utilizando várias pressões de poro e concluíram que os valores das compressibilidades medidas recaíram aproximadamente sobre a mesma curva de C_{pc} versus $P_c - P_p$ (*pressão confinante - pressão de poro*), demonstrando que prevalece a regra da pressão efetiva.

ZIMMERMAN et al. (1985) mostraram experimentalmente que a compressibilidade do volume poroso, C_{pc} , de três arenitos bem consolidados é função da tensão efetiva confinante, $P_e = P_c - P_p$. Uma explicação física para esse fato foi dada em consequência do fechamento das finas microfaturas existentes nos grãos da rocha quando submetidas a tensão de confinamento. Esta explicação é válida não especificamente para arenitos, e sim para qualquer material poroso e consolidado e que apresente comportamento poroelástico.

As medições das outras compressibilidades não foram feitas. Porém, comparações preliminares feitas pelos autores dentre os valores de C_{bc} , obtidas nesse trabalho e dados semelhantes alcançados por Contreras et al. (1982), para o arenito BEREIA, demonstraram boa concordância com a equação 2.11. ZIMMERMAN et al. também argumentaram que seus valores de C_{pc} estão condizentes com aqueles calculados por Hughes e Cook (1953), que utilizaram $P_p = 0$.

WAI e LO (1981) estudaram o efeito da temperatura sobre a resistência e a deformação de rochas. Para isto, amostras de carbonatos e granito foram retiradas de um poço de teste de 303 m de profundidade perfurado nas margens do lago Ontario ao leste de Toronto no Canadá.

Os ensaios foram conduzidos em laboratório, utilizando-se corpos de prova com 32,5 mm de diâmetro e altura de duas vezes este valor. WAI e LO estabeleceram como condições de ensaios temperaturas entre a ambiente e 350°C para obter alguns parâmetros como:

- Resistência a compressão simples;
- Módulo de Young estático e dinâmico;
- Coeficiente de Poisson.

O módulo de Young estático foi obtido pelo cálculo da inclinação da reta secante traçada entre o ponto inicial da curva de tensão *versus*

deformação axial e o ponto desta curva correspondente a 50% da tensão de ruptura. Neste caso, o módulo de deformação é denominado de módulo de Young secante, E_{sec} , ou simplesmente E_{50} .

Da análise dos resultados, WAI e LO chegaram as seguintes conclusões:

- O módulo de Young do granito teve um ligeiro aumento com a temperatura até 120°C. Para temperaturas mais altas, o módulo diminuíram a razão de 25% para cada 100°C. O coeficiente de Poisson em geral diminuiu até cerca de 250°C;
- O módulo de Young do granito também demonstrou dependência do histórico de temperaturas e pode apresentar diferentes valores dependendo da máxima temperatura atingida no passado;
- Tanto o módulo de Young quanto o coeficiente de Poisson dos carbonatos do THENTON-BLACK RIVER GROUP se mostraram pouco sensíveis aos efeitos da temperatura;
- A resistência a compressão uniaxial do granito diminuiu com o aumento da temperatura no intervalo entre 100° e 350°C a uma taxa de 30 MPa por 100°C;
- Para carbonatos, a resistência a compressão simples permaneceu quase constante até ser atingida a máxima temperatura de 350°C;
- Os resultados evidenciam que os comportamentos de resistência e de deformação sob condições distintas de temperatura variam em função dos tipos de rochas ensaiadas.

Comentários e Conclusões

A análise dos trabalhos estudados e apresentados de forma resumida, permitiu tirar algumas conclusões importantes:

- Pela leitura dos artigos foi possível verificar a evolução dos métodos e procedimentos empregados na determinação dos parâmetros desejados;

- Houve casos em que os pesquisadores não conseguiram ser mais criteriosos na escolha dos métodos de ensaio em virtude das limitações impostas pela época em que foram conduzidos. Este aspecto chega a ser evidenciado no texto de alguns artigos. A utilização simultânea de pressão e temperatura, por exemplo, só foi verificada em trabalhos da década de 70;
- O grande número de trabalhos abordando o efeito da temperatura sobre a compressibilidade das rochas evidencia a preocupação com o entendimento dessa propriedade;
- Houve alguns trabalhos que trataram da verificação e avaliação de outras propriedades tais como: tensão de ruptura, módulo de Young, coeficiente de Poisson, velocidades de ondas ultrassônicas, índice de fratura, coeficiente de dilatação térmica, etc, para vários tipos de rochas como: arenitos, mármore, granito, siltito, carbonato, etc.
- Normalmente, a tarefa de caracterização das rochas de um maciço qualquer através das suas propriedades físicas, é uma tarefa difícil devido às variáveis que tem de ser consideradas. A rocha não é um material homogêneo e isotrópico e a utilização de um parâmetro obtido a partir de um fragmento do material (corpo de prova) deve ser efetuada com cuidado.

A relação a seguir é um resumo das propriedades que foram estudadas nos trabalhos pesquisados. O objetivo destas é o de reunir um bom número de informações capazes de caracterizar um produto gerado pela natureza. São elas:

- Compressibilidade total;
- Compressibilidade do volume poroso;
- Compressibilidade da matriz da rocha;
- Velocidade das ondas compressionais (P) e cisalhantes (S);
- Expansão térmica;
- Expansão volumétrica;
- Tensão de ruptura;
- Módulo de Young;
- Coeficiente de Poisson;
- Permeabilidade;
- Condutividade térmica;

- Calor específico;
- Difusividade térmica;
- Reação térmica.

O conhecimento do comportamento das rochas sob as condições mais adversas foi justificado pelos pesquisadores ao apresentarem os objetivos das suas pesquisas. A relação dessas justificativas dá uma idéia da importância destes estudos:

- Utilização da energia dos reservatórios geotérmicos na produção de eletricidade;
- Melhoramento do fator de recuperação do petróleo a partir da utilização de métodos térmicos (injeção de vapor e combustão *in-situ*), fraturamento, etc.
- Aproveitamento de cavernas naturais ou galerias de minas subterrâneas como depósitos para petróleo e resíduos radioativos;
- Abertura de condutos em maciços rochosos para passagem de fluidos a altas temperaturas;
- Melhoramento do processo de refrigeração das galerias de minas através do conhecimento da difusão térmica e transmissão de calor do maciço rochoso;
- Conhecimento dos efeitos de explosões atômicas no subsolo sobre os constituintes minerais das camadas das rochas atingidas, etc.

Os custos envolvidos em pesquisas que atendam tais exigências são normalmente elevados, limitando sua execução. Outro fator limitante é o tempo demandado até que se obtenha um resultado satisfatório com relação ao fenômeno que se quer avaliar. O trabalho experimental demanda bastante tempo pois é comum a correção de rota e a repetição de ensaios, até que um resultado confiável e representativo de um fenômeno seja obtido.

Os trabalhos experimentais aplicados à mecânica das rochas partem da utilização de pequenas amostras de rocha (corpos de prova) que

ao serem submetidos a condições previamente estabelecidas, fornecem as respostas necessárias a compreensão dos fenômenos que se deseja estudar. O CENPES utiliza cilindros de rocha cujos diâmetro e altura situam-se próximos a 50 mm e 120 mm respectivamente. Para determinar as condições de ensaio, é necessário o conhecimento prévio das condições originais de temperatura, pressão intra-poros, características dos fluidos contidos nos poros da rocha e tensões atuantes sobre aquela pequena amostra de antes de sua remoção do maciço (tensões *in-situ*). É por isso que pressão, temperatura, fluidos e tensões, são as variáveis normalmente manipuladas a fim de procurar criar as condições ideais de ensaio^{2.5}.

Um dos aspectos negativos verificados nos trabalhos apresentados e discutidos nos parágrafos anteriores, é a utilização em larga escala de corpos de prova que pertencem a um grupo padrão de laboratório. Para quem tem um interesse particular no estudo das rochas sedimentares, é possível perceber a utilização freqüente dos arenitos BEREA, BOISE e BANDERA com características distintas e bem definidas para descrever uma série de fenômenos e obter parâmetros. Estes resultados tem servido como base a outras pesquisas.

Somerton (1992), ao utilizar amostras dos arenitos BEREA e BANDERA para avaliar o comportamento da tensão de ruptura, permeabilidade e velocidade da onda ultra-sônica, em função da temperatura, argumenta que são materiais bem conhecidos e com um amplo intervalo de propriedades físicas (porosidade, permeabilidade, granulometria, tipo de cimento, composição mineralógica, etc.) se comparados a outras rochas sedimentares. Observando-se as conclusões apresentadas na literatura, percebe-se a dificuldade de obtenção de um comportamento que de aplique a uma gama muito ampla de materiais. Ao buscar generalizações desse tipo, é necessário cuidado na caracterização do material: minerais constituintes, tipos de cimento, dimensões dos grãos dos diferentes componentes, porosidade, densidade, grau de compactação, etc.

Não se pode esquecer que a obtenção destes materiais para uso como padrão é bem mais fácil e de menor custo, se comparado com as condições necessárias à extração de corpos de prova de rochas provenien-

^{2.5} A condição ideal de ensaio é aquela que consegue representar com fidelidade as condições originais em que se encontrava a amostra de rocha antes de sua retirada do maciço rochoso.

tes das camadas mais profundas do subsolo. Um método bastante empregado na indústria do petróleo é a testemunhagem dos poços, que é uma operação bastante onerosa.

Um outro aspecto que chamou a atenção foram as condições criadas na maioria dos ensaios. Em muitos casos tais condições foram extremamente severas, com ênfase à utilização de pressões efetivas e temperaturas muito elevadas, acima de 20 MPa e acima de 250°C (em alguns casos chegou-se até a 1000°C). Nestas condições, principalmente no caso de temperaturas elevadas, é comum a ocorrência de outros fenômenos como as reações termo-químicas que provocam alterações normalmente irreversíveis. Ou então a potencialização de fenômenos mecânicos como plastificação, fissuras por tensões térmicas, permeabilidade, etc. Estas condições dificilmente serão encontradas quando se estudam fenômenos relacionados a rochas reservatórios de petróleo em seu estado natural.

Por outro lado, os vários trabalhos que tratam da mecânica das rochas o fazem de uma bastante ampla, procurando atender as atividades de mineração, estudo de fundações e outra obras de Engenharia Civil. Porém, o estudo dos reservatórios de petróleo sob a ótica da mecânica das rochas vem evoluindo para se adaptar a esta área da ciência. Um exemplo pode ser dado a partir do trabalho realizado por Bloch (1993), onde foram utilizados os critérios de ruptura de Mohr-Coulomb, Bieniawski e Hoek-Brown, na análise das envoltórias de ruptura para rocha reservatório. O autor conseguiu mostrar que estes critérios também podem ser utilizados com êxito na indústria do petróleo.

Em resumo, o levantamento bibliográfico teve como objetivo verificar o estágio de evolução atual das pesquisas abordando as influências exercidas pela temperatura sobre os parâmetros elásticos e de resistência em rochas reservatório de petróleo. O resultado da pesquisa mostrou que existe a necessidade em aprimorar os conhecimentos neste assunto.

A razão do interesse sobre o tema parte de uma necessidade da Petrobras em obter valores de parâmetros mais realistas para as bacias sedimentares brasileiras para atender principalmente os projetos de estabilidade de poços de petróleo, com ênfase à perfuração de poços horizontais, que atualmente se revelam como uma solução interessante na exploração das reservas de petróleo e de outros hidrocarbonetos.

Um outro aspecto levado em consideração foi o fato de que estes parâmetros são atualmente determinados à temperatura ambiente, representando uma distorção considerável da situação real, pois as temperaturas nos reservatórios podem atingir, em condições normais, valores da ordem de 150°C. Além disso, devido as diferentes características dos tipos de rochas sedimentares (arenitos, carbonatos, siltitos, etc.), não é possível extrapolar resultados para uso generalizado. Muitos dos trabalhos pesquisados dão conta de resultados diferenciados em função do tipo da rocha estudada. Tais conclusões apontam ainda para a necessidade de avaliar não apenas um tipo de rocha, mas de preferência, as mais importantes do ponto de vista de interesse comercial.

Neste projeto buscou-se avaliar o comportamento dos parâmetros elásticos e de resistência em rochas reservatórios para várias temperaturas. Porém, o estudo deteve-se a reservatórios de petróleo formado por arenitos pouco consolidados (friáveis), existentes na bacia sedimentar Potiguar, situada nos estados brasileiros de Rio Grande do Norte e Ceará e que atualmente responde pela segunda maior produção de petróleo do país.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA DE TRABALHO

Este capítulo tem por finalidade apresentar os procedimentos experimentais utilizados na presente pesquisa. A seção inicial está reservada à descrição da metodologia adotada nos trabalhos de laboratório. A seção seguinte refere-se à descrição pormenorizada dos equipamentos utilizados. E ao final, são listados alguns dos procedimentos mais importantes utilizados na condução dos ensaios.

Metodologia

A determinação do comportamento das rochas reservatório é de vital importância às atividades de prospecção de petróleo. Na obtenção dos parâmetros mecânicos é fundamental a utilização de boas técnicas de laboratório aliadas a mão de obra especializada e equipamentos de boa desempenho

Neste trabalho, a fase inicial e que requereu uma atenção especial, foi a estratégia para a realização dos ensaios. Os procedimentos foram elaborados em conjunto com a equipe do Laboratório de Mecânica das Rochas (LMR) do CENPES (LMR/CENPES) por serem estes os responsáveis pela operação dos equipamentos.

Antes do início dos trabalhos foi necessário definir os objetivos do projeto em uma forma mais refinada. A necessidade de verificar que influência a temperatura exercia sobre os parâmetros elásticos e de resistência das rochas reservatório visava atender principalmente aos rigores dos projetos para poços horizontais desenvolvidos pela PETROBRAS S.A.

O LMR/CENPES em seu Laboratório de Mecânica das Rochas dispunha de equipamentos capazes de conduzir uma pesquisa desta natureza até 200°C. Portanto, a temperatura máxima para ensaio estava limitada a este valor. Porém, atentou-se para a faixa de profundidade na qual estão inseridos mais de 90% dos poços perfurados nas bacias produtoras

brasileiras, entre 150 e 3000m. Para estas profundidades, as temperaturas não devem ultrapassar 150°C em condições normais. Mesmo os poços rasos da bacia Potiguar (em torno de 250m), que está situada nos estados de Rio Grande do Norte e Ceará, atingem valores de temperatura na rocha produtora de petróleo próximo e este valor limite, podendo inclusive ultrapassá-lo, em virtude da injeção de vapor, utilizado na melhoria da recuperação dos óleos de densidade mais alta (da ordem de $966\text{kg/m}^3 = 15^\circ\text{API}$).

Esta discussão permitiu estabelecer como limite para ensaios a temperatura de 150°C. Porém, necessitava-se de valores intermediários de temperatura entre a ambiente e 150°C para permitir a observação das tendências de comportamento dos parâmetros avaliados. Optou-se por apenas mais um valor de temperatura como sendo o de 80°C. Desta forma ficou estabelecido que as temperaturas utilizadas nos experimentos seriam a ambiente (entre 22° e 26°C), 80° e 150°C. Os ensaios conduzidos a temperatura ambiente serviram de parâmetro para os demais pois normalmente nesta condição são realizados os ensaios para determinação dos parâmetros elásticos e de resistência.

Os ensaios foram do tipo drenados, ou seja, sem permitir o acúmulo de pressão dentro dos poros das amostras. Utilizou-se como fluido saturante, óleo **LUBRAX OB-9**^{3.1}. Segundo Fjær et al. (1992), a utilização de um óleo inerte é recomendada quando os fluidos originais não podem ser reconstituídos e portanto, utilizados na saturação dos corpos de prova.

Ensaio Drenado

Um ensaio é considerado drenado quando as taxas de carregamento ou deformação impostas são suficientemente pequenas para garantir que os fluidos contidos nos poros da amostra sejam drenados sem permitir o acúmulo de pressão de poro. Porém, esta taxa não pode ser muito pequena, para evitar que o corpo de prova apresente um outro tipo de deformação em função do tempo durante o ensaio. Segundo Nunes (1989) apud CENPES (1994), uma taxa de $5 \times 10^{-6}/\text{s}$ é suficiente para

^{3.1} CARACTERÍSTICAS DO ÓLEO LUBRAX OB-9:

Ponto de fulgor: superior a 160°C;

Ponto de anilina: superior a 140°C (para verificação da presença de aromáticos);

Viscosidade cinemática: 10,3 CST a 37,8°C;

Densidade: 0,8539 a 20°C e 4°C da água.

garantir as condições estabelecidas acima para ensaios com amostras de arenitos, motivo pelo qual este valor foi adotado neste projeto como um padrão.

O procedimento para garantir um ensaio drenado consiste em determinar a taxa de deformação crítica como sendo aquela acima da qual ocorre acréscimo de pressão de poro. Segundo Gibson e Henkel (1954) apud CENPES (1994), a taxa de deformação crítica (ε_c), pode ser determinada a partir do cálculo do tempo necessário para 95% de adensamento (t_{95}), e uma estimativa da deformação axial no momento da ruptura (ε_{est}), de acordo com as expressões:

$$t_{95} = \frac{80h^2}{3C_v} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_{est}}{t_{95}} \quad (3.2)$$

onde:

h é a altura do corpo de prova para uma face drenante (m);

$C_v^{3.2}$ é o coeficiente de adensamento do corpo de prova (m^2/s);

t_{95} medido em segundos (s).

Convenções

Foram adotados neste trabalho as seguintes convenções:

- 1- Tensões de compressão → positiva (+);
- 2- Tensões de tração → negativa (-);
- 3- Redução na dimensão → deformação positiva (+);
- 4- Aumento da dimensão (alongação) → deformação negativa (-)

$^{3.2}C_v = \frac{0,848h^2}{t_{90}}$, onde t_{90} é o tempo para que ocorra 90% de adensamento da amostra. O valor de t_{90} é obtido a partir da curva de deformação volumétrica *versus* (tempo (s))^{1/2} (método de Taylor, apud Bloch (1993)).

Tipos de Ensaios

Foram adotados no decurso dos trabalhos de laboratório deste projeto dois métodos distintos para os ensaios de compressão simples e triaxial:

1- O método (1), que foi denominado neste trabalho método convencional, e que consiste em levar a ruptura uma amostra, obtendo um único conjunto de curvas de tensão-deformação para cada valor de pressão de confinamento adotada. Assim, após uma série completa de ensaios, é possível construir a envoltória de ruptura para o material desejado. A figura 3.1, apresenta um exemplo típico de resultados obtidos para cada amostra ensaiada.

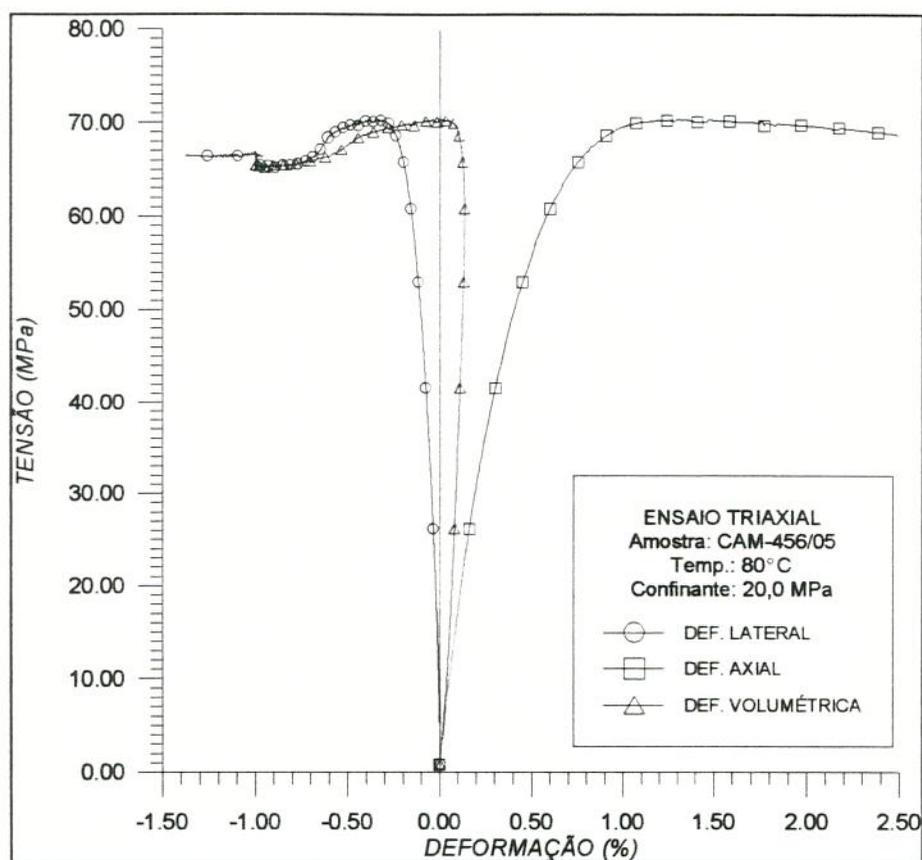


Figura 3.1 - Curvas típicas obtidas em um ensaio triaxial pelo método convencional.

2- O método (2) denominado Estado de Falha Múltipla (Multiple Failure State Triaxial Tests), que permite construir a envoltória de ruptura a partir de uma única amostra. Neste caso, submete-se o corpo de prova a um dado valor inicial de pressão de confinamento. Em seguida prossegue-se

com o carregamento axial até bem próximo da ruptura. Neste momento, detectado visualmente pela inclinação da curva de tensão *versus* deformação axial ou deformação lateral, eleva-se o valor da pressão de confinamento até o nível seguinte, e assim sucessivamente até completar a série de ensaios com todas as pressões de confinamento previstas. A figura 3.2 exemplifica com um modelo de curva obtido. Este método foi desenvolvido por Kovari e Tisa (1976), e teve como um dos objetivos compensar o número, em geral, reduzido de corpos de prova em ensaio destrutivos de rocha.

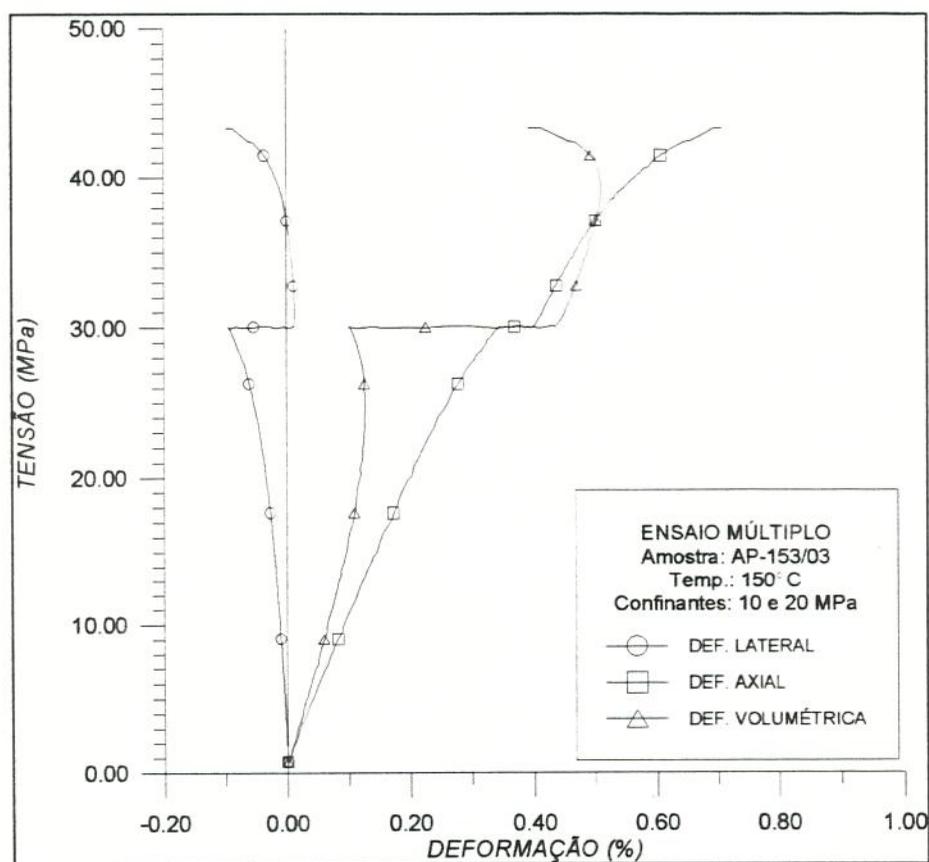


Figura 3.2 - Curvas típicas obtida em um ensaio de múltiplo estado de falha.

Segundo Holt e Fjær (1991), ao compararem o método **convencional** com o método de **múltiplo estado de falha**, em amostras de arenitos de origem fluvial (arenito Red Wildmoor) e de características semelhantes àquelas encontradas em rochas reservatório de petróleo, verificaram que os valores das tensões de ruptura obtidas nos dois casos foram bastante semelhantes. Tais resultados permitiram a obtenção de uma envoltória de

ruptura confiável, a partir de uma única amostra do arenito, com a utilização do ensaio múltiplo.

Crítérios de Ruptura

Os critérios de ruptura são utilizados na determinação do limite de resistência do material quando submetidos a estados de tensões. Na literatura podem ser encontrados vários critérios, alguns deles com maior aplicabilidade para um tipo de material do que outros. Neste trabalho optou-se pela utilização do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, porém analisou-se antes a possibilidade de utilizar outros dois critérios bem conhecidos que são os critérios de Bieniawski e de Hoek-Brown.

O critério de Mohr-Coulomb caracteriza-se por ser simples e bastante utilizado, segundo Goodman (1989). Constitui-se de uma envoltória linear, no plano $\tau - \sigma$, que tangencia os círculos de Mohr construídos a partir dos valores das tensões de principais obtidas nos ensaios de compressão diametral, uniaxial e triaxial. A inclinação desta tangente fornece o ângulo de atrito interno da rocha (ϕ) e o termo constante fornece a coesão (c). O critério de Hoek-Brown, segundo Hoek e Brown (1980) apud Bloch (1993), foi desenvolvido inicialmente para rochas diferentes das encontradas em reservatórios de petróleo (que são normalmente rochas sedimentares). Este critério é bastante utilizado por apresentar um ajuste de 2° grau no plano $\sigma_1 - \sigma_3$, que é um tipo de ajuste mais adequado para rochas. Jaeger e Cook (1979) apud Goodman (1989), indicam que a envoltória de ruptura é uma superfície curva, que representada no plano $\sigma_1 - \sigma_3$, situa-se entre a envoltória linear de Mohr-Coulomb e a de 2° grau de Hoek-Brown. Este tipo de envoltória, que obedece lei de potência, foi proposta por Bieniawski (1974).

No transcorrer dos primeiros ensaios realizados deste trabalho, foram feitas algumas tentativas de utilização dos critérios de Hoek-Brown e Bieniawski. Verificou-se que ao admitir um ajuste dos pares de pontos (σ_3, σ_1) no plano $\sigma_1 - \sigma_3$, por uma curva de potência, para o intervalo de pressões de confinamento utilizado (2,5 MPa a 20 MPa), o coeficiente de correlação (r) apresentou um valor ligeiramente superior do que o obtido no ajuste linear dos pontos. Esse fato mostrou que o critério de Bieniawski seria o mais adequado ao tipo de rocha ensaiada. Porém, a utilização do critério de Bieniawski exige que se tenha a disposição os valor da tensão

de ruptura obtido no ensaio uniaxial. Como estes dados não estavam disponíveis, utilizou-se o valor que se obtém quando se faz o ajuste linear destes pontos.

Logo em seguida, a idéia de adotar tanto o critério de Bieniawski quanto o critério de Hoek-Brown foi abandonada pelas seguintes razões: (a) não existia material suficiente para realizar ensaios uniaxiais; (b) o critério de Mohr-Coulomb é muito bem tolerado quando se trabalha em intervalos pequenos de pressão de confinamento, segundo Fjær et al. (1992); (c) Bloch (1993), ao ensaiar amostras de arenitos, mostrou que os três critérios de ruptura podem ser utilizados e que a escolha de qualquer um deles não leva a diferenças significativas no ajuste dos pontos; (d) o CENPES utiliza os valores de coesão e ângulo de atrito interno, obtidos pelo critério de Mohr-Coulomb, nos trabalhos de simulação numérica para verificação da estabilidade de poços de petróleo; (e) o critério de Mohr-Coulomb é o mais simples.

Definição dos Parâmetros

Como o principal objetivo era fornecer subsídios a projetos de poços horizontais, que requerem especial atenção quanto à verificação da estabilidade das paredes do poço, optou-se pela determinação dos limites de resistência em ensaios de ruptura simples e triaxial, módulos elásticos estáticos e dinâmicos, ângulo de atrito interno (ϕ) e coeficiente de coesão (c), uma vez que estes dois últimos definem a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb. Outro parâmetro verificado foi a compressibilidade volumétrica ou compressibilidade total das amostras (*bulk compressibility*).

As medições das ondas sônicas, para obtenção dos parâmetros elásticos dinâmicos e para a caracterização do material, foram feitas ao mesmo tempo (aquisição simultânea) em que as amostras eram submetidas aos ensaios de compressão axial. Segundo o CENPES em seu relatório Implantação de Bancos de Dados de Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas (1995):

A vantagem da aquisição simultânea é que fica garantida a igualdade de condições em termos dos fatores externos que influenciam o comportamento mecânico da amostra, como o

estado de tensões a que a amostra é submetida, por exemplo. Outra garantia é que a própria amostra se encontra no mesmo estado de preservação quando das medições pelos dois métodos. (p. 21)

Segundo o CENPES (1994), o critério de Mohr-Coulomb é o mais indicado para a determinação das envoltórias de ruptura no LMR por ser um método simples e permitir uma boa aproximação para o formato curvo das envoltórias de Mohr quando se trabalha em faixas de tensão de pequena amplitude. Este critério é o atualmente adotado no simulador bidimensional para análise elastoplástica denominado AEEPECD (Análise Estática Elastoplástica de Estruturas, Cavidades e Descontinuidades) desenvolvido pelo Dr. Álvaro Maia da Costa^{3.3} e utilizado pelo CENPES para as análises de estabilidade de poços de petróleo. Segundo Fjær et al. (1992), a envoltória de ruptura tem um formato curvo, com concavidade voltada para baixo para a maioria das rochas, porém, a envoltória linear de Mohr-Coulomb é aceitável para pequenos intervalos de tensão.

Para os ensaios triaxiais, adotaram-se as pressões de confinamento iguais a 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5; 15,0 e 20,0 MPa. O valor máximo de 20,0 MPa é coerente com as tensões principais presentes nas formações de onde se obtiveram as amostras dos arenitos que foram ensaiadas. Para se chegar a este valor, tomou-se como base um ponto do maciço rochoso situado a uma profundidade de 1000 m e tendo sobre ele várias camadas de rocha com um peso específico médio de 23,1 kN/m³ (1 psi/pé). Estas condições fornecem uma tensão vertical (σ_v) igual a 22,6 MPa. As tensões horizontais foram calculadas a partir de um gradiente de fratura de 20,8kN/m³ (0,9 psi/pé), obtido em operações de minifraturamento hidráulico. Este valor fornece uma tensão horizontal mínima (σ_h) igual a 20,3 MPa. O outro valor da tensão horizontal (σ_H), situa-se entre σ_v e σ_h .

Para a realização dos ensaios de compressão diametral, não foi possível a adoção de temperaturas além da ambiente pois o sistema utilizado pelo LMR do CENPES não permite a utilização das conexões existentes na base da célula triaxial (figura 3.3). Desta forma, a célula deve ser mantida aberta para que os cabos que enviam as leituras realizadas pelos transdutores de deformação cheguem até o módulo de aquisição de dados.

^{3.3} O Dr. Alvaro Maia da Costa é engenheiro da PETROBRAS S.A./CENPES.

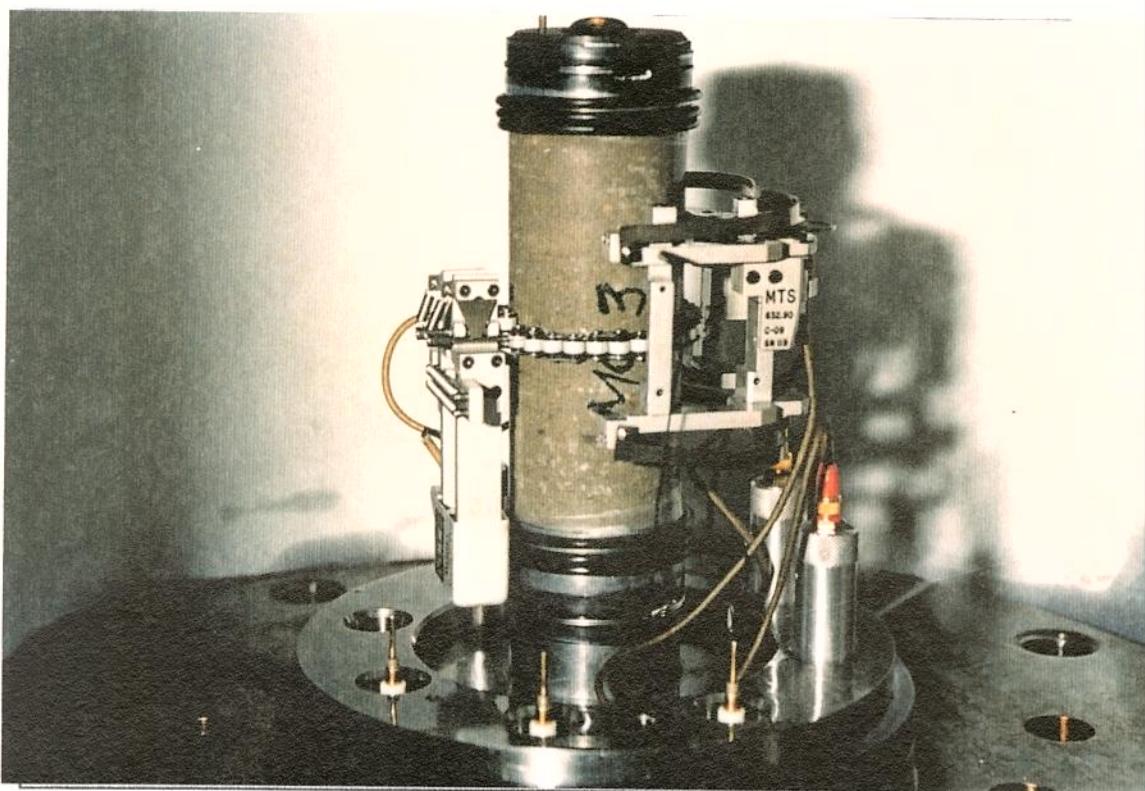


Figura 3.3 - CP parcialmente montado sobre a base da célula de ensaio. Atentar para o detalhe das conexões elétricas na base da célula, onde são ligados os extensômetros e os termopares.

Descrição dos Equipamentos Utilizados

As propriedades mecânicas e de resistência dos arenitos utilizados neste projeto foram determinados através dos ensaios de compressão triaxial, uniaxial, diametral e das ondas compressoriais (P) e cisalhantes (S).

Nos parágrafos que se seguem são fornecidos alguns detalhes dos equipamentos dos laboratórios do CENPES que foram utilizados.

Sistema de Testes Geomecânico

O Laboratório de Mecânica das Rochas (LMR) do CENPES está equipado com um Sistema de Testes Geomecânicos, STG, composto basicamente de um quadro de reação e de uma célula triaxial, ambos de fabricação MTS e de um sistema intensificador de pressão confinante. A célula

triaxial está dotada de duas resistências elétricas em forma de cinta e instaladas na parte externa que são utilizadas nos ensaios a temperatura elevada. O quadro de reação, modelo 315.02S, possui capacidade máxima de 2700 kN em compressão e rigidez de 9.0 GN/m. A célula triaxial, modelo 656.03, permite trabalhos com pressões até 80 MPa e temperaturas até 200°C.

O atuador do STG é hidráulico e servocontrolado, permitindo ensaios com controle de carga, de deformação axial ou de deslocamento radial, a partir de programas introduzidos pelo console eletrônico de controle (figura 3.4 e 3.5). O sistema de aplicação de pressão confinante na célula triaxial também é programável e servocontrolado, mantendo a pressão confinante constante durante a fase cisalhante, do ensaio triaxial.

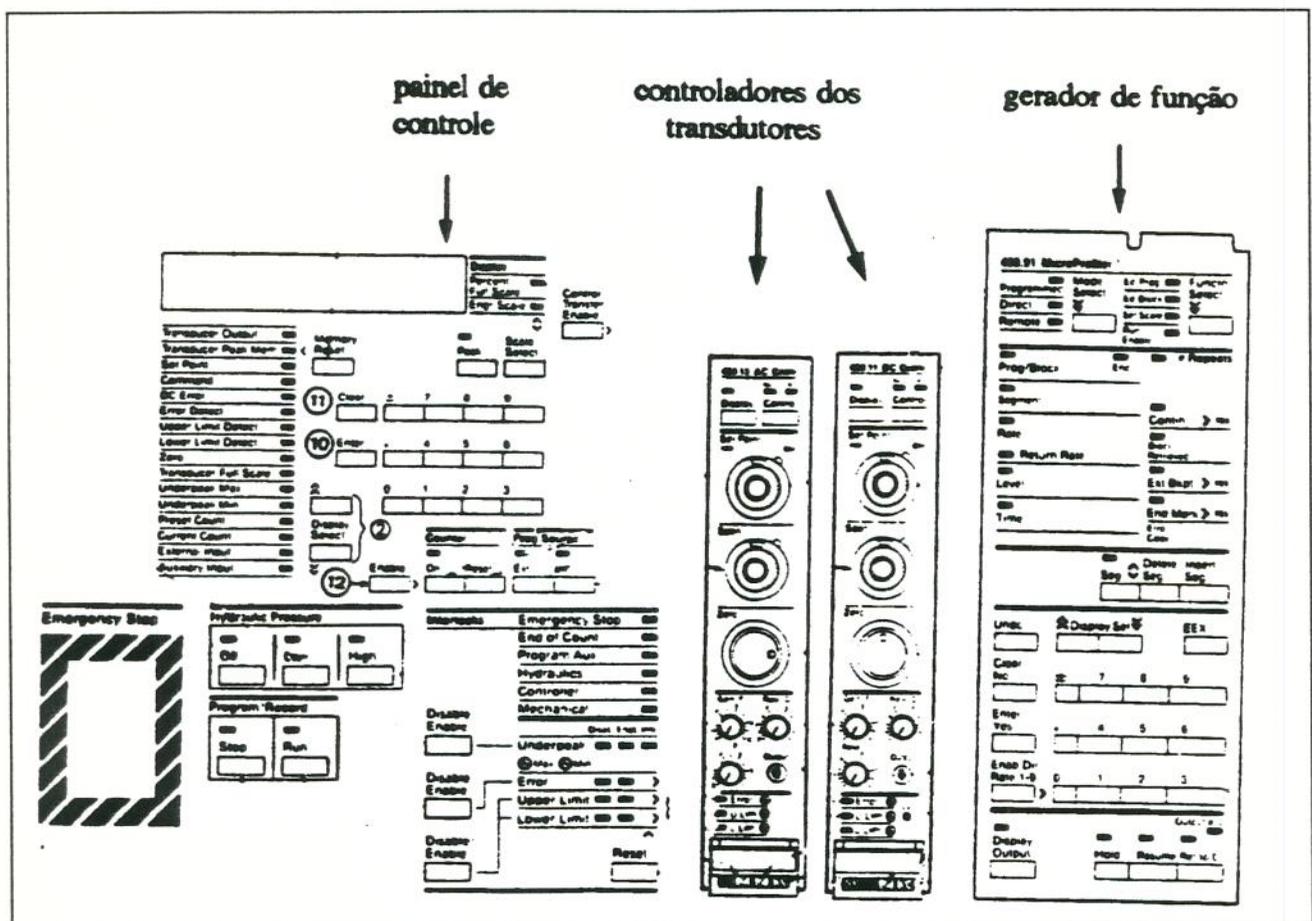


Figura 3.4 - Esquema do painel de controle do STG.

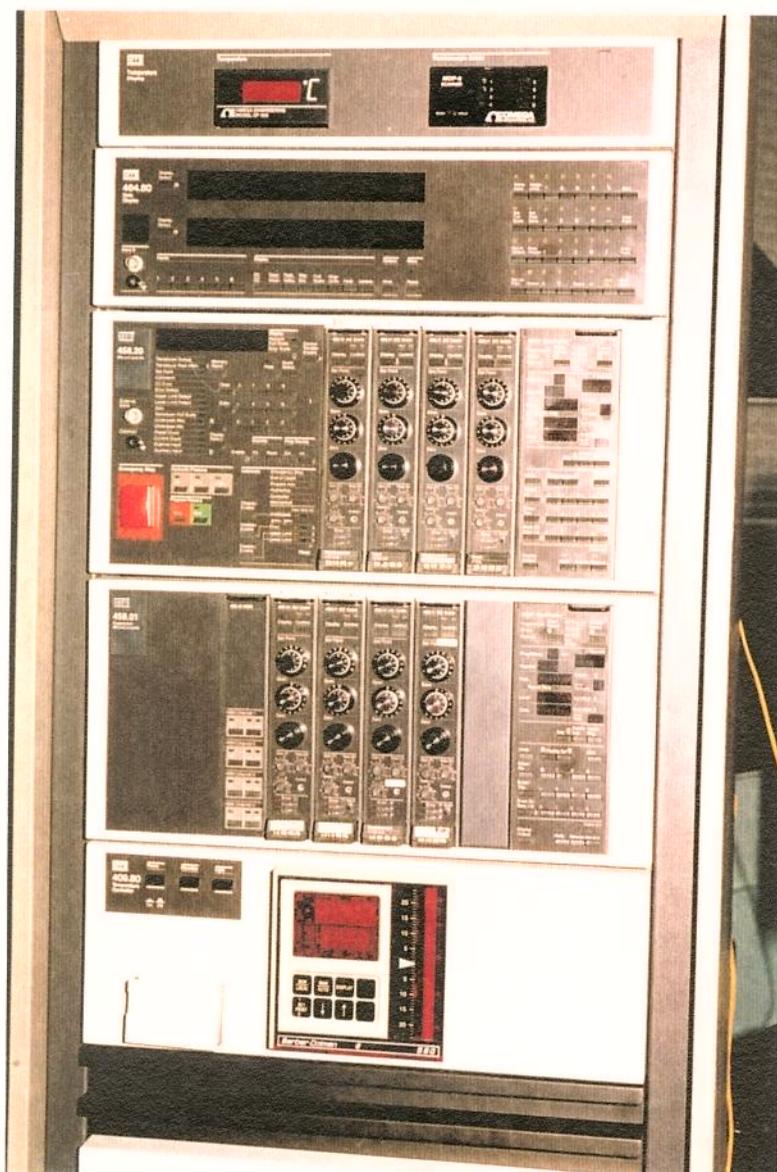


Figura 3.5 - Vista completa do painel de controle do STG.

Os transdutores de carga, pressão, deslocamento radial e deformação axial utilizam cartuchos eletrônicos (figura 3.6) para converter o sinal elétrico de saída de cada transdutor em kN, MPa, mm de deslocamento ou porcentagem de deformação, respectivamente. Cada transdutor tem 4 cartuchos com diferentes faixas de conversão. Este sinal varia entre 0 (zero) e 10 V, apresentando resolução de leitura de 1,0 mV, qualquer que seja o transdutor utilizado.

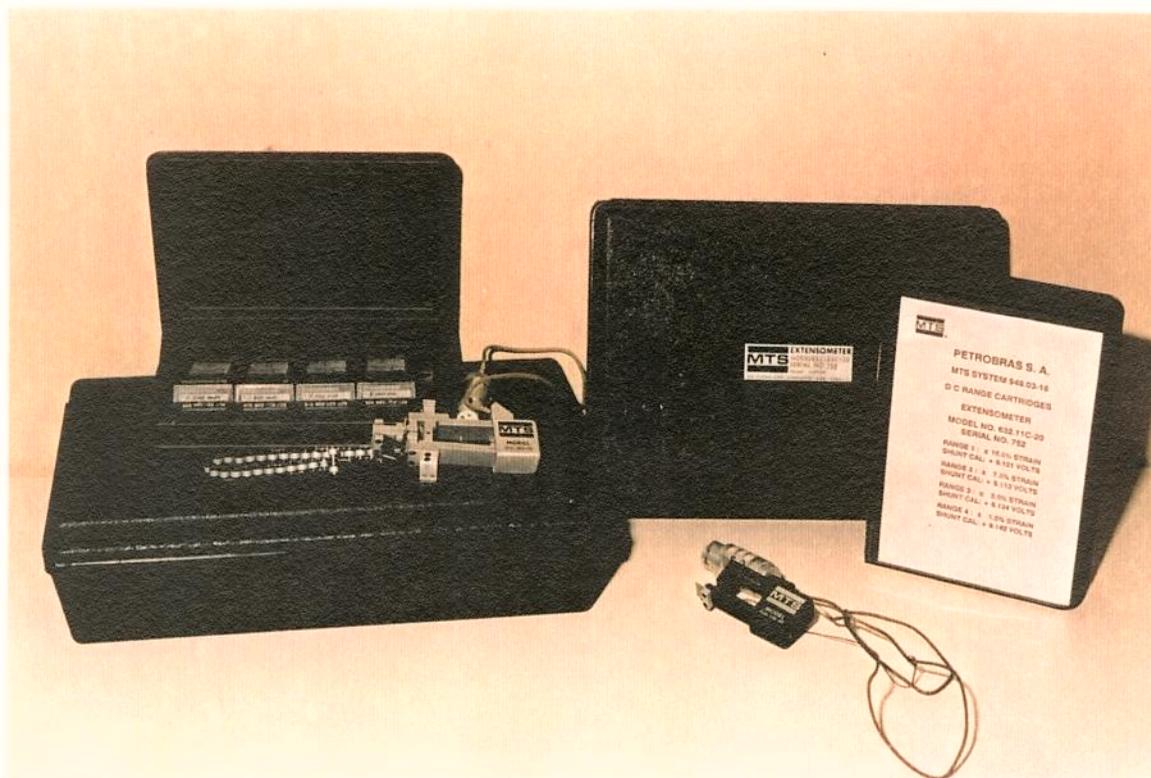


Figura 3.6 - Cartuchos utilizados na conversão das leituras dos transdutores.

Processo de Medição da Carga Axial e da Pressão Confinante. A célula de carga MTS, modelo 661.93B-02, tem capacidade para 2500 kN e foi empregada em todos os ensaios de compressão. Os ensaios de compressão triaxial e uniaxial utilizaram o cartucho de 0 a 500 kN, que associado a saída máxima de 10 V, e resolução do sistema de 1 mV, conferiu a resolução de 0,05 kN a estas medidas. A precisão das medidas para cartuchos utilizados é superior a 99,4% de fundo de escala, conforme o Certificado de Calibração da MTS.

A pressão confinante foi obtida através de um transdutor SENSOTEC, modelo A-5/1108-04, com precisão de 0,5% de fundo de escala (200 MPa) e resolução de 0,008 MPa para o cartucho de 80 MPa utilizado.

Processo de Medição das Deformações. As deformações dos corpos de prova (CP) foram medidas com extensômetros de fabricação MTS. Os extensômetros axiais fornecem diretamente a deformação percentual, $\Delta l/l \times 100$, onde l é a distância inicial entre os sensores do transdutor. O extensômetro radial mede a variação do perímetro do CP, $\Delta(\pi D)$,

convertido em deformação radial através de $\Delta(\pi D)/\pi D$ e também foi utilizado nos ensaios de compressão uniaxial.

Na tabela 3.1 estão especificadas a faixa dos cartuchos utilizados, a resolução intrínseca do sistema MTS e a precisão com relação ao fundo de escala de cada extensômetro, segundo Nunes (1992) apud CENPES (1994).

A figura 3.7 apresenta o extensômetro axial, modelo 632.90C-09 e o radial, modelo 632.92C-03, utilizados para ensaios confinados no interior da célula triaxial. A figura 3.8 mostra o extensômetro axial, modelo 632.11C-20 utilizado no ensaio diametral. Este tipo de equipamento é o mesmo adotado para ensaios uniaxiais não confinados.

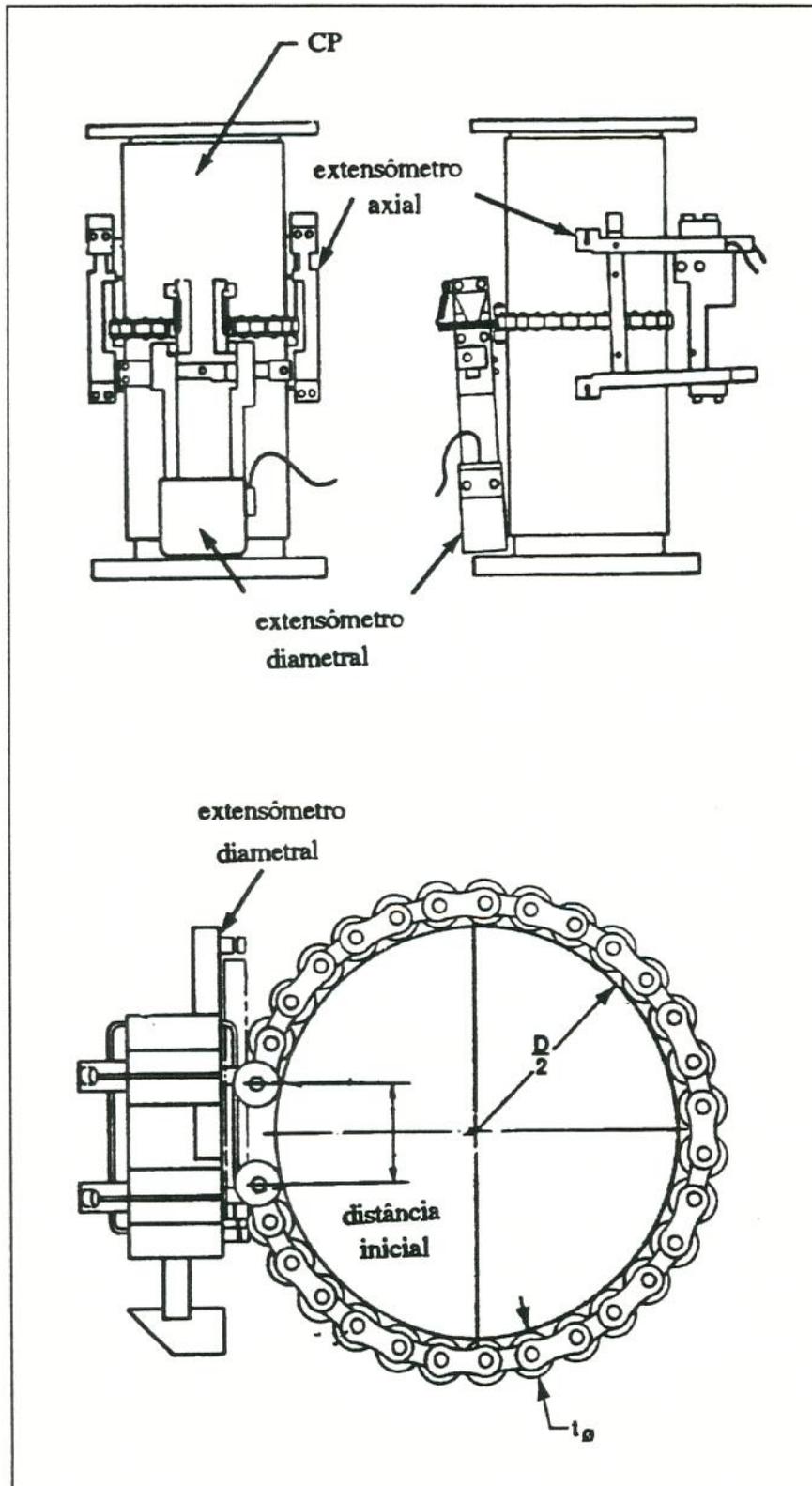


Figura 3.7 - Extensômetros axial e radial utilizados em ensaios triaxiais ou confinados.

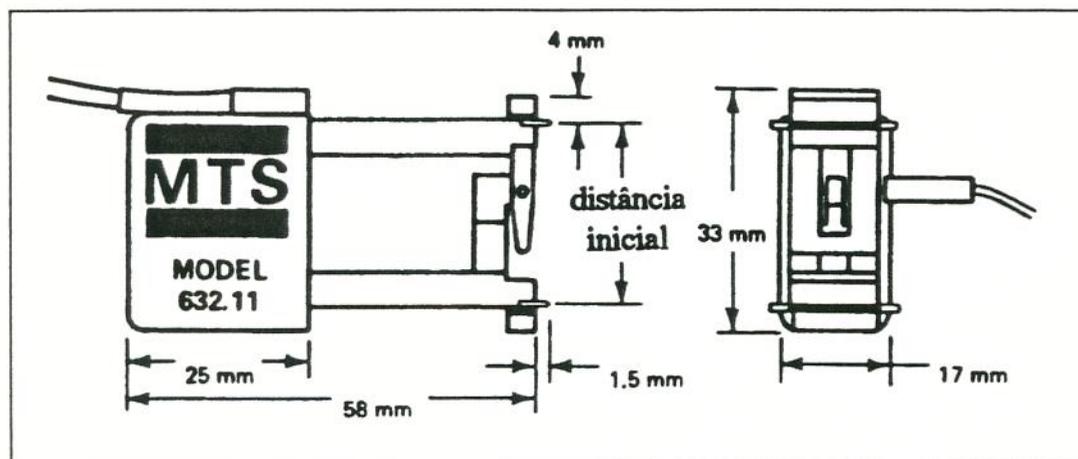


Figura 3.8 - Extensômetro axial para ensaio diametral e ensaio uniaxial não confinado.

Tabela 3.1 - Características dos extensômetros utilizados.

ENSAIO	EXTENSÔMETRO			
	AXIAL		RADIAL	
	MODELO	FAIXA (resolução) (precisão)	MODELO	FAIXA (resolução) (precisão)
uniaxial e triaxial	632.90C-09 l= 25 mm	0 - 5% ($5 \times 10^{-4}\%$) 0,09%	63229C-03	0 - 1,6 mm ($1,6 \times 10^{-4}$) (0,2%)
diametral	632.11C-20 l= 50 mm	0 - 1,5% ($1,5 \times 10^{-4}\%$) (0,13%)	xxx	xxx

Processo de Medição e Controle da Temperatura. A temperatura do CP foi medida com a utilização de dois termopares do tipo K-Cromel(+) - alumel(-) cujas extremidades responsáveis pela leitura ficavam próximos à metade da altura do CP e em posições diametralmente opostas. Assim, a temperatura do corpo de prova era estimada a partir da média aritmética das leituras fornecidas pelos termopares. A figura 3.9 mostra um CP pronto para ser ensaiado, inclusive já com os termopares posicionados.

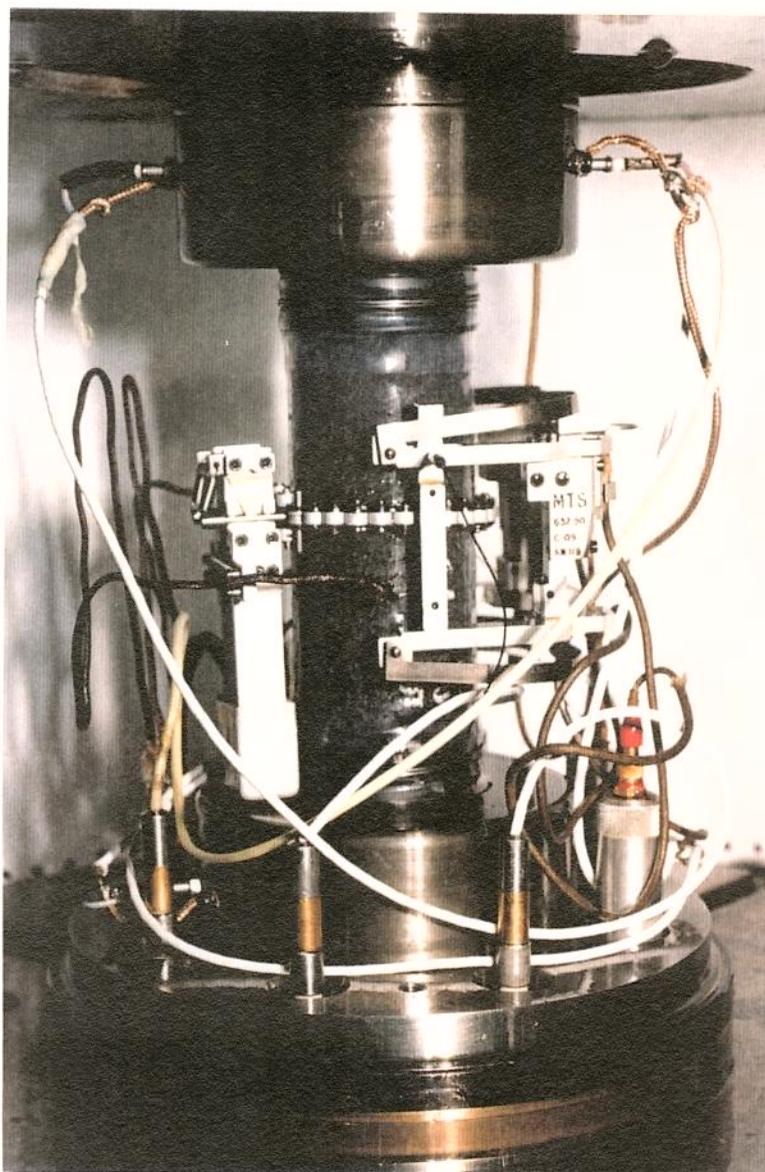


Figura 3.9 - CP pronto para ser ensaiado, inclusive com os termopares instalados.

Os sinais elétricos gerados nos termopares, em função da temperatura a que estão instantaneamente submetidos, são transmitidos através de terminais instalados na base da célula triaxial para dois pontos distintos:

- 1- Um dos termopares, envia seu impulso elétrico a um termômetro ECB modelo MDT-2000 com precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ e daí a uma interface que leva o mesmo sinal para ser armazenada em um computador COMPAQ modelo 386 destinado a aquisição de dados dos ensaios.

2- O outro termopar envia seu impulso elétrico até um controlador de temperatura fabricado pela BARBER COLMAN COMPANY modelo Standart 560, instalado no console do painel de controle (figura 3.6 e 3.10). Este controlador é dotado de dois mostradores digitais que permitem a leitura da temperatura da amostra e a potência elétrica enviada as resistências que aqueciam a célula triaxial. O controlador pode ser programado com o valor da temperatura que se deseja utilizar no ensaio e portanto, se encarrega de controlar a emissão de potência para as resistências elétricas.

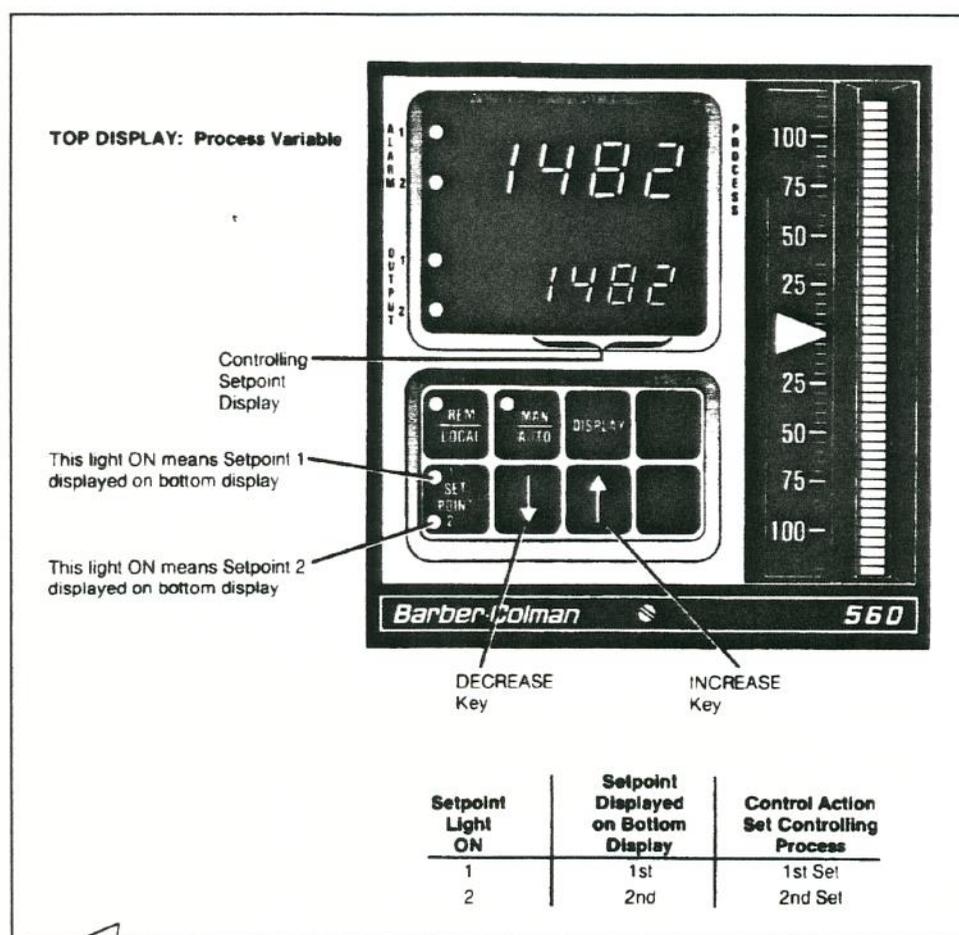


Figura 3.10 - Painel do controlador de temperatura BARBER-COLMAN modelo 560.

O controlador não apresentou um funcionamento satisfatório durante todo o trabalho. Era necessário a interferência manual para que se atingisse a temperatura estabelecida para o ensaio, de forma mais rápida (porém, dentro do limite de $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$) pois, a medida que se aproxi-

mava deste valor, a potência enviada era reduzida automaticamente provocando um aumento exponencial no tempo.

O artifício adotado foi o de estabelecer inicialmente uma temperatura maior que a necessária (por exemplo: se o desejado eram 80°C, ajustava-se o controlador para 120°C). Quando faltavam aproximadamente 20°C para atingir a temperatura de ensaio, desligava-se manualmente a chave interruptora de corrente e se aguardava até que a temperatura de ensaio fosse atingida (o aumento de temperatura da amostra a partir deste instante, ocorria devido a dissipação do calor acumulado nas paredes de aço da célula triaxial). Neste momento, o controlador era novamente ajustado para um valor de temperatura entre 5° e 10°C acima daquela de ensaio, e a chave interruptora novamente ligada. Esta manobra permitia uma emissão mínima de potência para manter a temperatura constante dentro da célula triaxial durante a realização do ensaio.

Um terceiro termopar do mesmo tipo dos anteriores, estava instalado em uma das resistências elétricas e era responsável por evitar o superaquecimento desta. Toda vez que a temperatura se aproximava de 300°C, uma chave cortava a corrente elétrica enviada, até que a temperatura da resistência caísse para um certo valor (que não foi precisamente identificado). Só então, o sistema automaticamente voltava a permitir a passagem de corrente. Este processo se repetia tantas vezes quanto necessário e funcionava como um dispositivo de segurança.

Sistema de Ensaio Dinâmico com Aquisição Simultânea

No ensaio dinâmico com aquisição simultânea, o Laboratório de Geofísica do CENPES utilizou o método de emissão ultra-sônica pulsada que consiste na obtenção do tempo de trânsito de propagação de ondas ultra-sônicas (entre 300 e 800 Hz), através da amostra de rocha, com polarizações paralelas e transversais (compressional - V_p e cisalhante - V_s) à referida direção de propagação. O sistema de emissão e recepção das ondas é composto por cabeçotes também denominados genericamente como *caps* porém, diferem dos demais por possuírem câmaras hermeticamente vedadas onde estão alojados os transdutores de emissão e recepção (figura 3.11). Os referidos transdutores compõem-se de cerâmicas especiais denominadas PZT (Zirconato Titanato de Chumbo) que tem características piezoelétricas.

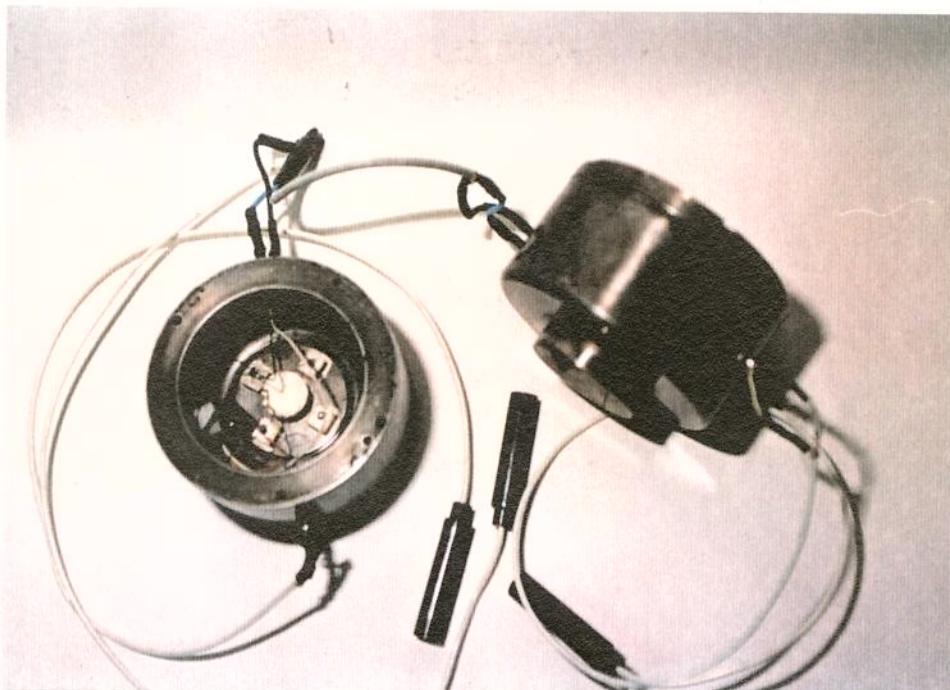


Figura 3.11 - Cabeçotes metálicos (*caps*) utilizados no processo de emissão e recepção das ondas sonoras para determinação das constantes elásticas dinâmicas.

Processo de Medição das Velocidades das Ondas. O procedimento experimental para medição das velocidades V_p e V_s , consiste em excitar os transdutores cerâmicos de emissão com um sinal elétrico gerado por uma fonte de funções programável Tektronix modelo AFG 5101, que é em seguida amplificado por um amplificador Krohn Hite modelo DCA 10 e enviado pelo sistema aos referidos transdutores. As cerâmicas convertem o sinal elétrico em vibração mecânica, que viajam através da amostra de rocha (corpo de prova) acoplada aos transdutores de emissão devido ao esforço aplicado pelo STG sobre o *cap*. Na outra extremidade da amostra os transdutores cerâmicos de recepção, acoplados pelo mesmo mecanismo descrito anteriormente, fazem a conversão inversa, ou seja, transformam a vibração mecânica captada em um sinal elétrico. Este sinal fica atenuado devido a perda de energia durante a passagem pela amostra de rocha e portanto, é novamente amplificada por um amplificador Instruments modelo M2 e em seguida plotado na tela de um osciloscópio digital HP modelo 54500 A. E por fim, os sinais recebidos eram coletados e armazenados em um microcomputador para análise posterior dos dados.

Na figura 3.12 é possível observar o esquema do aparato de medição das velocidades de propagação das ondas compressoriais e cisalhantes.

Um canal de comunicação aberto (trigger) entre a fonte geradora do sinal elétrico e o osciloscópio informa o momento exato da partida do sinal, permitindo a medição do tempo de trânsito da onda. Uma pequena parcela de tempo precisa ser descontada do tempo de trânsito medido pois refere-se ao tempo que a onda gasta para percorrer o aparato de medição e é denominado de *tempo do sistema*. Para se obter esta variável, determina-se o tempo de transito com o aparato de medição montado sem a amostra.

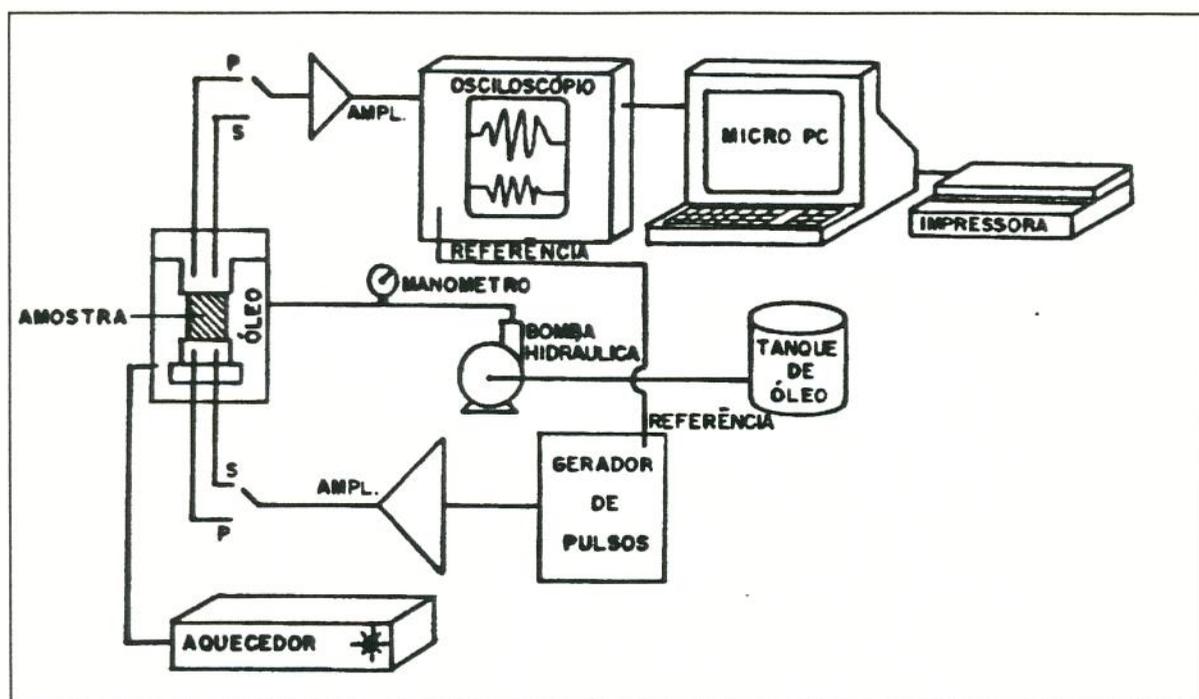


Figura 3.12 - Esquema do aparato de medição de velocidades de propagação das ondas P e S em amostras de rochas.

Determinação do Tempo para o Equilíbrio entre a Temperatura do CP e do Óleo Confinante

Antes do início do trabalho experimental para a verificação da influência da temperatura nos parâmetros desejados, um outro teve de ser conduzido para a determinação do tempo mínimo necessário para que o óleo confinante e a amostra de rocha atingissem o equilíbrio térmico. O experimento foi relativamente simples, e transcorreu utilizando-se uma amostra de arenito com características semelhantes aquelas do grupo que seria ensaiado. A amostra com formato cilíndrico e dimensões aproximadas de 50mm de diâmetro por 100mm de altura e saturada com óleo mineral, recebeu um furo no ponto médio do seu topo cuja profundidade era suficiente para atingir o seu centro. Este furo era suficiente apenas para permitir a passagem de um termopar, que foi fixado ao corpo de prova com cola à base de prata para permitir um bom contato térmico. O termopar estava ligado a um termômetro digital com precisão de leitura de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$

As extremidades do cilindro receberam *caps* metálicos, sendo que o superior possuía um furo para permitir a passagem do termopar. Este sistema foi então revestido com uma membrana termoretrátil de teflon para isolá-la e impedindo a entrada de fluidos externos durante o aquecimento.

A amostra devidamente preparada foi colocada em um recipiente cheio de água. Um termômetro de mercúrio com precisão de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ foi utilizado para registrar a temperatura da água durante o aquecimento. Antes de iniciar o aquecimento do sistema, as temperaturas da água e do corpo de prova foram conferidos e anotados (apresentavam o mesmo valor inicial em torno de 24°C). O aquecedor foi ligado e a corrente elétrica ajustada para permitir que a elevação da temperatura da água ocorresse a uma taxa entre $1,5^{\circ}$ e $2,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$. A cada 5 min. tanto a temperatura da água como a do corpo de prova eram anotados (tabela 3.2). No momento em que a água atingiu seu ponto de ebulição, sua temperatura era de 99°C e o da amostra $94,5^{\circ}\text{C}$. A partir deste momento cronometrou-se o tempo necessário para que a temperatura da amostra atingisse o mesmo valor. Isto ocorreu após 10 min, e este tempo foi adotado no ensaio propriamente dito, como sendo o necessário para que tanto a amostra quanto o óleo confinante alcançassem a mesma temperatura.

Todo este cuidado deve-se ao fato de que os termopares que definiriam a temperatura do corpo de prova não poderiam ser instalados no interior deste quando os ensaios para determinação da influência da temperatura fossem conduzidos.

Tabela 3. 2 - Evolução das temperaturas fora e dentro do CP durante ensaio para determinação do tempo necessário para o equilíbrio entre estas.

TEMPO (min)	TEMPERATURA DA ÁGUA (°C)	TEMPERATURA INTERIOR DA AMOSTRA (°C)
5	40	36,1
10	47	41,5
20	63	55,0
25	71	64,0
30	81	69,8
35	88	79,0
40	96	88,7
44	99	94,5
53	99	99,2

Ensaio Triaxiais

Modo de Controle dos Ensaio Triaxiais

O modo de controle dos ensaios triaxiais foi definido para a obtenção da curva de tensão-deformação completa. Estas curvas foram classificadas por Wawersik (1968), apud Vutukuri, Lama e Saluja (1974), em: classe I - quando a deformação axial é crescente após a ruptura do CP; classe II - quando a deformação axial é decrescente após a ruptura do CP. A figura 3.13 apresenta a curva acima.

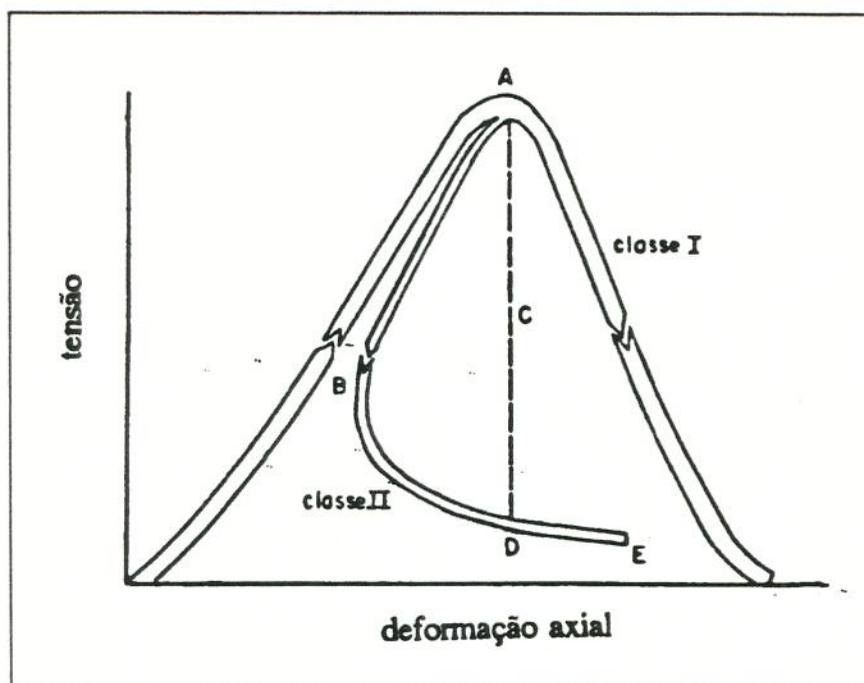


Figura 3.13- Classificação do tipo de curva tensão versus deformação axial em ensaio de compressão.

A configuração do tipo de curva depende do modo de controle do ensaio. Quando o controle é feito pela taxa da tensão axial, não se consegue atingir a fase pós-ruptura pois o súbito alívio de resistência do CP, no momento em que ocorre a ruptura, provoca uma explosão que interrompe o desenvolvimento da curva tensão-deformação axial.

Ao se adotar o controle pela deformação axial para rochas classe II, também pode haver a ruptura explosiva pois, o servocontrole da máquina de ensaio tende a manter a taxa de deformação constante. Isto ocorre como uma forma de responder a redução da taxa de deformação axial ocorrida no momento da ruptura, quando a máquina aumenta a taxa de tensão axial.

Desta forma optou-se pelo controle de deformação lateral que permite ao arenito apresentar curvas classe I ou II.

O tipo de controle acima é válido quando o ensaio é feito pelo método **convencional**. Para ensaios pelo método de estado de falha múltipla, torna-se recomendável a utilização do controle pela taxa de tensão axial. Em um dos ensaios piloto, realizado para permitir o ajuste do equi-

pamento e da equipe de laboratório a esta metodologia, utilizando-se o controle pela deformação lateral, verificou-se que no momento da mudança da pressão de confinamento, ocorria um aumento brusco na carga axial que estava sendo aplicada sobre o CP. Este fenômeno ocorre porque o aumento da pressão de confinamento (hidrostática), provoca uma redução em todas as dimensões do CP. Como a máquina está programada para manter uma taxa constante na deformação lateral do CP, esta reage elevando rapidamente a carga axial para obrigar o CP a assumir suas dimensões originais. Este processo ficou registrado nas curvas de tensão-deformação apresentadas na figura 3.14. Este fenômeno pode comprometer o resultado do ensaio pois, a taxa com a qual se carrega o corpo de prova influencia na resistência do mesmo, conforme Vutukuri, Lama e Saluja (1976).

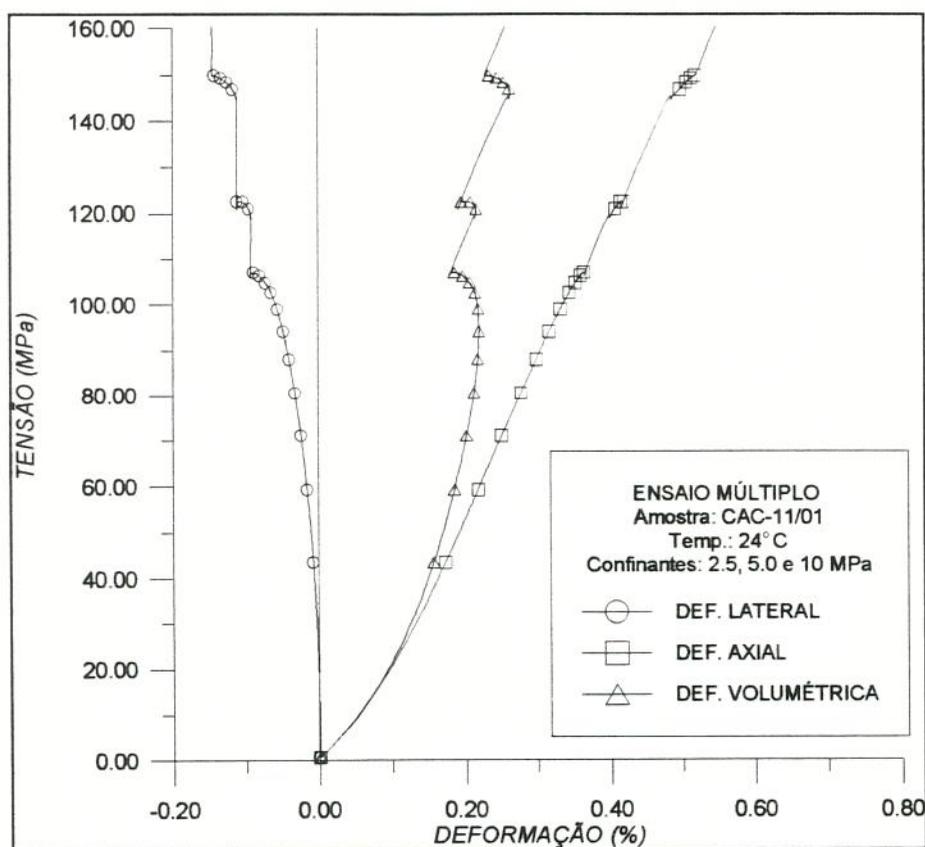


Figura 3.14 - Ensaio múltiplo piloto com controle de deformação lateral.

O fenômeno de aumento brusco na carga axial não se verifica quando é feito o controle pela carga. A explicação encontrada foi que o aumento da pressão de confinamento provoca uma redução proporcional

da carga axial para manter a taxa de carregamento previamente estabelecida.

Fases do Ensaio Triaxial

Os ensaios de compressão triaxial podem ser divididos em duas fases: (1) fase hidrostática - que consiste na elevação da pressão no interior da célula triaxial (nesta fase, $\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_2 = \Delta\sigma_3$) até ser atingido o nível preestabelecido para o ensaio; (2) fase cisalhante - também denominada desviadora, nesta fase que ocorre após atingida a pressão de confinamento desejada (fase 1), mantém-se constante a pressão hidrostática ($\sigma_2 = \sigma_3$) e aumenta-se a tensão axial (σ_1), até que ocorra a ruptura do CP.

Estas duas fases estão bem definidas, tanto no ensaio convencional quanto no ensaio de estado de falha múltipla. Foi a partir da fase hidrostática que obteve-se o valor da compressibilidade volumétrica (bulk compressibility).

A compressibilidade volumétrica é obtida a partir da curva de deformação volumétrica e é definida como:

$$C = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP_c} \quad (3.3)$$

onde:

$dV/V = \varepsilon_v$ é a deformação volumétrica do CP e
 P_c é a pressão de confinamento

A curva que representa a variação da deformação volumétrica em função da pressão de confinamento (P_c), foi obtido em ensaio de compressão isotrópico drenado. O gradiente $d\varepsilon_v/dP_c$, foi calculado pelo inverso da tangente à curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica.

Ensaio de Compressão Diametral

Foram verificadas a resistência a tração dos arenitos dos poços de Canto do Amaro (CAM) e Lorena (LOR), através do ensaio de compressão diametral, também denominado ensaio brasileiro.

Os ensaios foram conduzidos conforme as sugestões da American Society for Testing and Materials -ASTM (1983) e da International Society for Rock Mechanics - ISRM (1978) utilizando-se o dispositivo curvo apresentado na figura 3.15 para aplicação e distribuição sobre o CP, da carga axial.

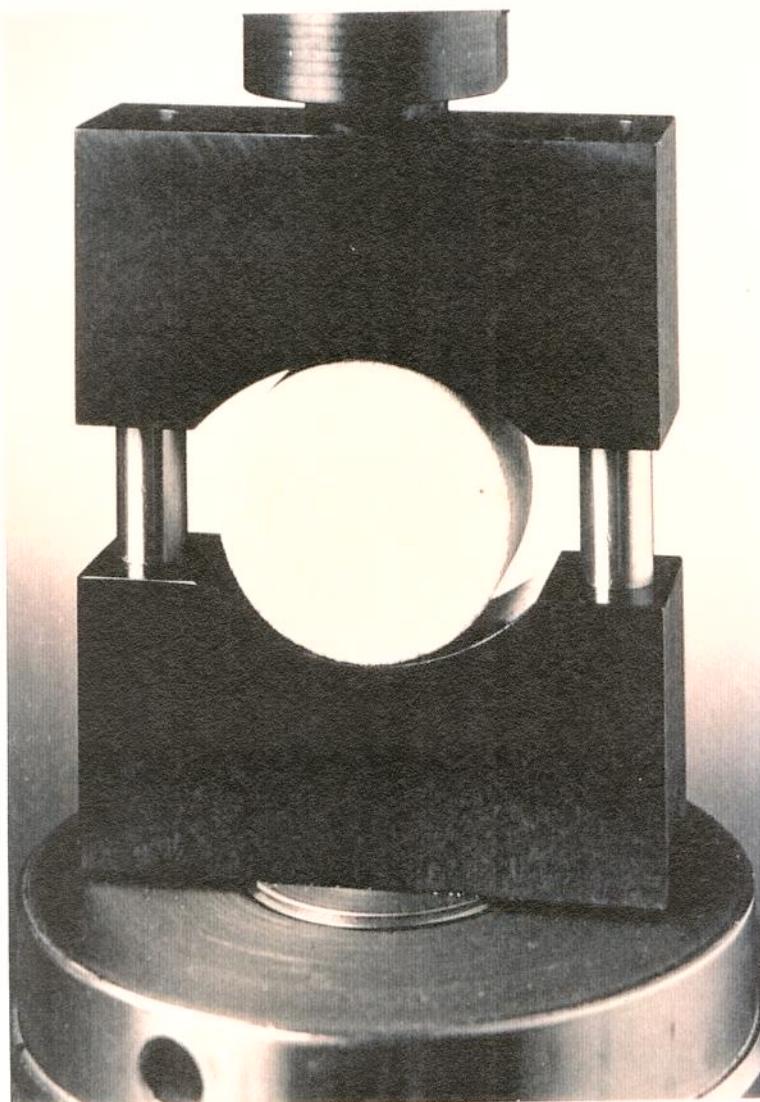


Figura 3.15 - Dispositivo utilizado no ensaio de compressão diametral.

Em função da baixa resistência esperada para a ruptura das amostras, neste tipo de ensaio, optou-se pela substituição do cartucho de carga de 500 kN para 250 kN, permitindo um aumento na precisão das leituras de carga. Para verificar a deformação lateral, utilizou-se o exten-

sômetro para ensaios de compressão simples instalado perpendicularmente à linha de carga.

A deformação axial foi obtida a partir da fórmula:

$$\varepsilon_{ax} = \frac{\Delta L}{D} \quad (3.4)$$

onde: ΔL é o deslocamento do atuador da máquina, medido através de um LVDT interno do equipamento, instalado no próprio atuador:

D é o diâmetro do disco de rocha utilizado no ensaio.

O valor da tensão de tração é obtido neste ensaio através da fórmula:

$$\sigma_t = -\frac{2T}{\pi D \cdot t} \quad (3.5)$$

onde: σ_t é a tensão de tração;

T é a carga axial aplicada;

t é a espessura da amostra e

D é o diâmetro da amostra.

Procedimentos para o Ensaio de Compressão Axial

Uma vez estabelecidas as pressões de confinamento e as temperaturas, passou-se para a descrição dos procedimentos de ensaio propriamente ditos, os quais serão descritos a seguir:

1- Efetuar a montagem do corpo de prova obedecendo a seguinte seqüência:

1.1- Encamisar a amostra com membrana termo-retrátil de teflon (figura 3.16);

1.2- Efetuar a vedação das extremidades da membrana utilizando um arame para pressioná-la contra uma fita de borracha colocada em volta dos *caps* ;

- 1.3- Efetuar a montagem dos extensômetros para medição das deformações axial e radial sofridas pelo corpo de prova durante o ensaio (figura 3.17)
- 2- Colocar a amostra devidamente instrumentada na célula de ensaio e em seguida instalar dois termopares próximos a superfície externa do corpo de prova, em sua região central e em posições diametralmente opostas (figura 3.17);
- 3- Aplicar sobre a amostra uma pré-carga entre 1.0 e 1.5 kN para comprimir os “*o’rings*” de vedação entre a rótula da célula de ensaio e o seu assento esférico, entre o *cap* superior e a referida rótula e entre o *cap* inferior e a base da célula (figura 3.18);
- 4- Após a aplicação da pré-carga, abaixar a célula triaxial, parafusá-la na base e efetuar o preenchimento com óleo confinante;
- 5- Efetuar o aquecimento da célula (figura 3.19) mantendo uma taxa constante entre 1° e 2°C/min. Segundo Homand-Etienne (1989) ao realizar ensaios utilizando amostras de granito, mármore e arenitos para observar o processo de formação de fissuras provocadas por um tratamento térmico, verificou que taxas de aquecimento até 2°C/min e temperaturas máximas inferiores a 350°C evitam a formação de novas microfissuras que alterariam o comportamento mecânico original da rocha;
- 6- Após alcançada a temperatura prevista para a realização do ensaio, aguardar pelo menos 30 min para que o sistema corpo de prova/célula de ensaio atinjam o equilíbrio. Isto significa que a variação da temperatura média do corpo de prova, obtida pela média aritmética das leituras fornecidas pelos termopares, não deve exceder $\pm 2\%$ do valor especificado para o ensaio, em graus celsius (ASTM designation: D4341-84). Este tempo é suficiente também para que a temperatura no centro do corpo de prova se iguale à temperatura externa;
- 7- Aplicar a pressão de confinamento prevista para o ensaio (fase hidrostática). No caso de ensaio uniaxial, o valor desta pressão é igual a zero;

- 8- Na fase hidrostática, efetuar a determinação da compressibilidade volumétrica conforme descrito no sub-item **Fases do Ensaio Triaxial** deste capítulo;
- 9- Efetuar o carregamento axial do corpo de prova (fase cisalhante) imediatamente após a fase hidrostática, mantendo constante a pressão de confinamento, até que seja atingida a ruptura. Fazer o controle do ensaio através da deformação lateral do corpo de prova para o caso do ensaio convencional, pois isto permitir a obtenção da curva tensão-deformação completa. No caso do ensaio múltiplo, deve-se adotar o controle de carga, pois esta modalidade permite a verificação com maior facilidade do momento em que a amostra atinge a ruptura, para que se possa elevar o valor da pressão de confinamento para o nível seguinte.

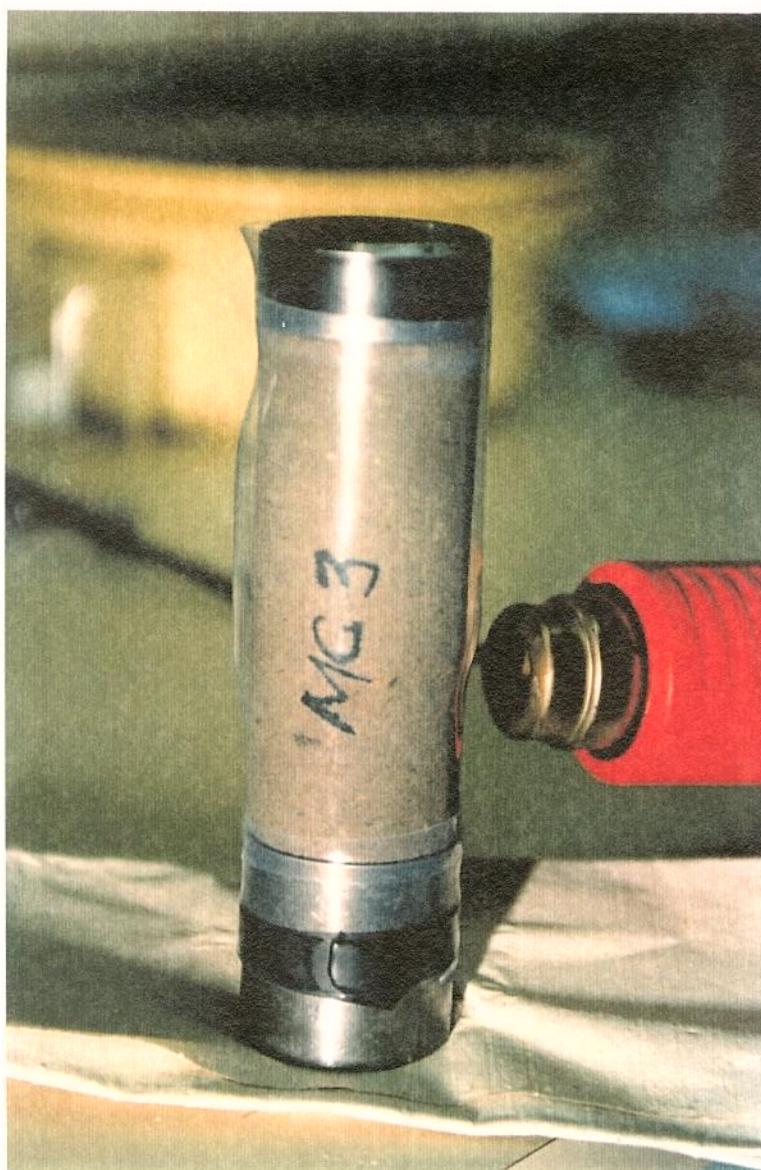


Figura 3.16 - Instalação da membrana termo-retrátil com pistola térmica.

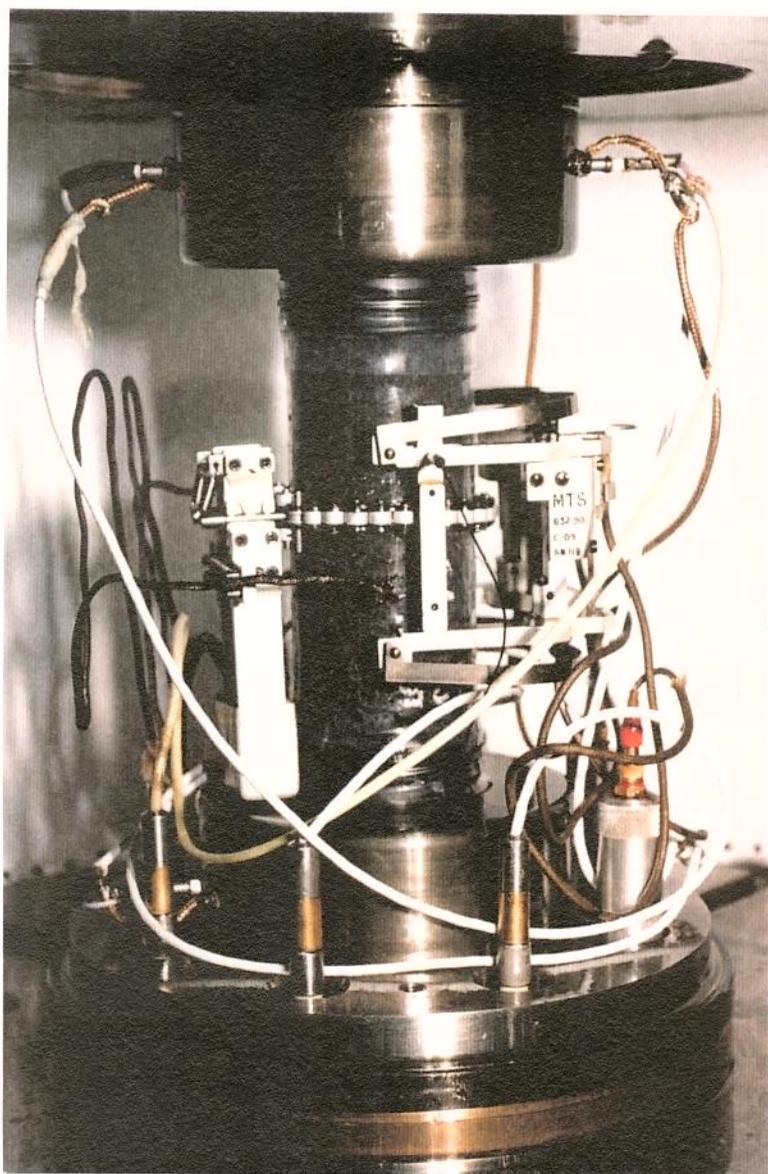


Figura 3.17 - CP montado com os extensômetros e termopares, em condição de ser ensaiado.

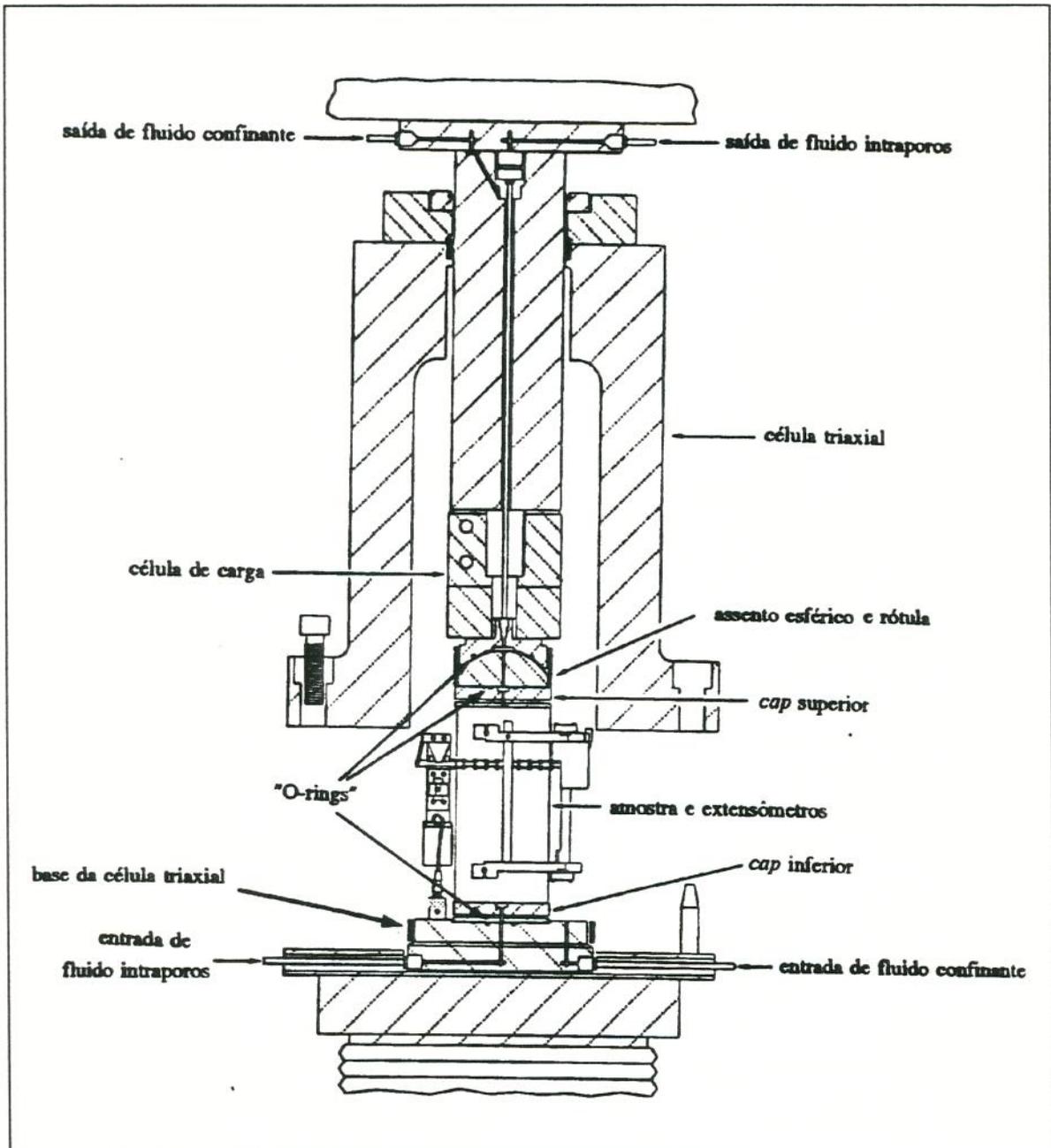


Figura 3.18 - Desenho esquemático da célula triaxial mostrando o posicionamento dos *o'rings* que devem ser comprimidos na pré-carga.

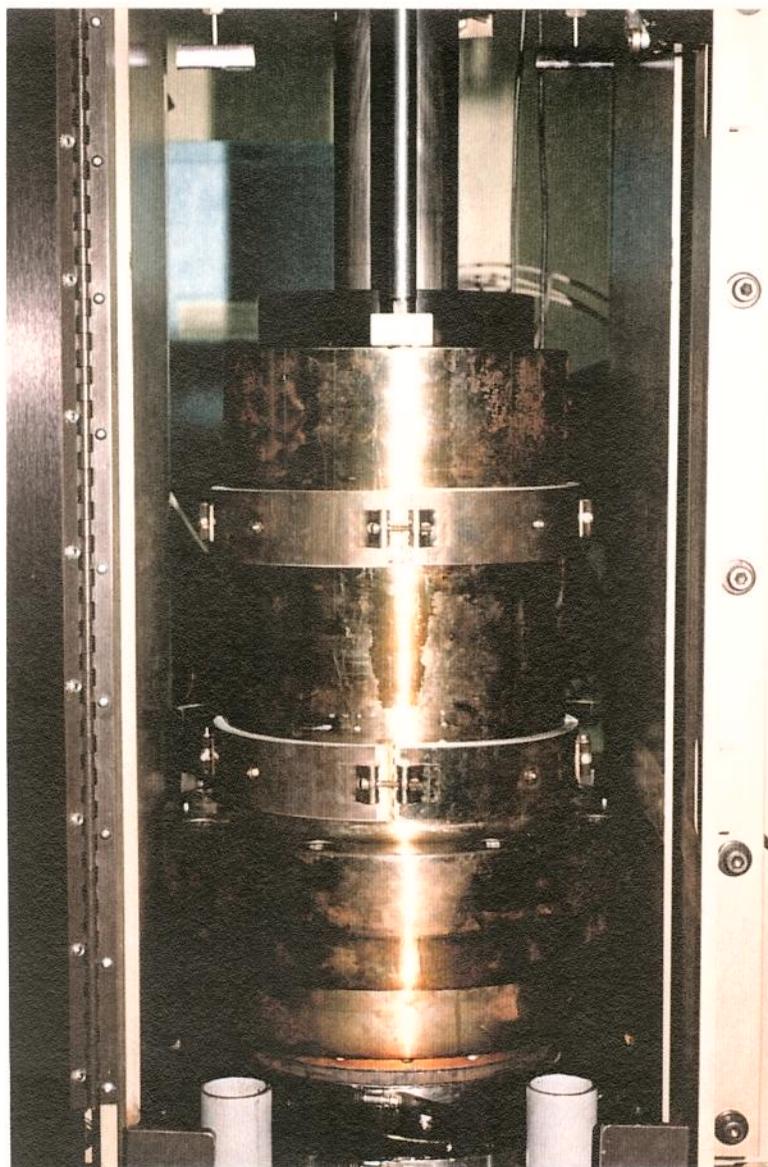


Figura 3.19 - Vista da parte externa da célula triaxial, onde estão localizadas as resistências elétricas destinadas ao aquecimento do sistema.

CAPÍTULO IV

SELEÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ENSAIO E PROCESSO DE PREPARAÇÃO

A seleção de uma rocha adequada aos objetivos deste projeto tornou-se uma tarefa complexa em virtude principalmente da identificação da fonte desta e da disposição das quantidades necessárias. Este tipo de dificuldade é bastante ressaltada por outros pesquisadores.

Este capítulo apresenta um breve histórico a respeito da seleção do material bem como dos processos necessários à preparação dos corpos de prova.

Seleção do Material para Ensaio

O estudo das influências que a temperatura exerce sobre os parâmetros elásticos e de resistência das rochas, tem uma abrangência bastante ampla. Este fato está justificado pela necessidade da PETROBRAS S.A. de avaliar pelo menos os tipos de rochas reservatório de petróleo presentes nas bacias sedimentares brasileiras. Porém, não seria possível em um único projeto com um prazo de apenas doze meses (prazo destinado pelo CENPES a execução deste projeto), executar todo o trabalho de pesquisa necessário para avaliar as rochas destas bacias.

Portanto, optou-se por escolher um tipo de rocha e em função dos resultados dar prosseguimento ao trabalhos com o restante das bacias. O objetivo inicial consistia em utilizar amostras de arenitos homogêneos e bem consolidados, presentes em algumas bacias sedimentares brasileiras. A escolha se justificava pelo fato de que tratava-se de um projeto pioneiro para a PETROBRAS S.A., e já se tinha uma idéia de que a maioria dos estudos de laboratório com quaisquer finalidades ligadas à indústria do petróleo partiam de materiais semelhantes, como por exemplo o arenito BEREA. Os materiais homogêneos permitem, com maior facilidade, a comparação entre resultados obtidos sob condições distintas.

Um outro aspecto relevante do trabalho, foi a possibilidade de utilizar corpos de prova retirados de um reservatório de petróleo. Os resultados da pesquisa bibliográfica mostrou que esta prática não é muito comum, preferindo-se materiais alternativos em função dos custos elevados e da dificuldade de obtenção de amostras de rochas reservatório.

Quando se desejam amostras de rochas reservatório, o processo normalmente adotado é a testemunhagem dos poços, que em geral não fornece um número de amostras considerado adequado. Outro fato é que a finalidade de uma testemunhagem não é apenas fornecer corpos de prova para ensaios de laboratório de mecânica de rochas. O material recuperado é bastante disputado por outras atividades como: o estudo de reservatório e o estudo geológico, que são atividades prioritárias por fornecerem os subsídios necessários ao desenvolvimento dos campos produtores.

Segundo Holt e Fjær (1991), são precisos pelo menos 20 corpos de prova para gerar, com confiança estatística, uma completa envoltória de ruptura. Como este projeto previa um mínimo de três envoltórias, uma para cada temperatura, seriam necessários por este critério pelo menos 60 corpos de prova. Isto sem levar em conta as perdas durante a preparação destes e as eventuais repetições de ensaio por problemas ligados ao processo experimental.

Este critério não foi adotado neste projeto pois com certeza poderia inviabilizá-lo tanto pela escassez do material quanto pelo tempo demasiado longo para a realização dos ensaios de laboratório. O cronograma inicial previa que a fase de laboratório seria cumprida nos meses de janeiro, fevereiro e metade de março de 1995, em aproximadamente 30 dias distribuídos neste período, pois haveriam mais atividades referentes a outros projetos que seriam desenvolvidas nos dias restantes.

Baseado nestes fatos, idealizou-se o trabalho com apenas 20 corpos de prova de arenitos homogêneos e bem consolidados (sendo aproximadamente 6 para cada temperatura). Este número foi posteriormente modificado em função das reais condições e necessidades em que transcorreriam os ensaios.

Origem dos Arenitos Ensaçados

O processo de escolha da fonte que forneceria as amostras, começou em início de novembro de 1994. Após definido o material que seria utilizado, o passo seguinte foi consultar os setores responsáveis pelo estudo da geologia, instalados em cada base regional da PETROBRAS S.A. e que são responsáveis pelo acompanhamento das bacias sedimentares, para saber qual delas dispunha de testemunhos em número suficiente para a retirada dos corpos de prova. O material inicialmente escolhido, foi localizado e pertencia à Bacia Sedimentar do Amazonas. Porém, não pôde ser liberado pois estava reservado para outra finalidade.

Ao final de dezembro do mesmo ano, não fora possível identificar outra fonte com material semelhante. Realmente, tratava-se de uma tarefa difícil. A única alternativa possível até aquele momento, era utilizar arenitos com características bastante diferentes daquelas previamente escolhidas e que foram postos a disposição pelo Setor da Geologia da PETROBRAS S.A. sediada na cidade de Natal, estado do Rio Grande do Norte e responsável pelo estudo da Bacia Potiguar.

A Bacia Potiguar tem cerca de 38.000 Km². Estruturalmente é formada por um *graben* eocretácico^{4.1} com direção sudoeste-nordeste que foi soterrado por sedimentos do Cretáceo e Terciário da fase de basculamento térmico. No *graben* foram depositados sedimentos constituídos por leques aluviais e flúvio deltáicos da formação Pendências. A seção sedimentar aptiana e mais nova é constituída por sedimentos siliciclásticos e transicionais albo-aptianos (Formação Alagamar) truncados por discordâncias. Sobre esta, depositaram-se sedimentos francamente marinhos, com o estabelecimento de duas plataformas carbonáticas cretácicas (Ponta do Mel e Jandaíra) e seus equivalentes siliciclásticos grosseiros, fluviais e flúvio-deltáicos (Formação Açú). Além destes depósitos sedimentares, existiram outros que podem ser identificados na figura 4.1 que trás a coluna estratigráfica da Bacia Potiguar.

Na área terrestre da bacia, diversos campos produzem óleo da Formação Açú, formada por reservatórios arenosos fluviais, depositado diretamente sobre o embasamento raso. Dentre os campos que produzem

^{4.1} A época geológica denominada eocretácico pertence ao período cretáceo da era mezozóica e ocorreu aproximadamente entre 141 e 100 milhões de anos atrás.

a partir da Formação Açu, citam-se: Alto do Rodrigues, Estreito, Fazenda Belém, Canto do Amaro, etc. Uma outra formação com menor grau de importância como produtora de óleo dentro da Bacia Potiguar, é a Formação Pendências. Nesta destacam-se alguns campos com pequenas acumulações como é o caso do campo de Serraria, Livramento, Lorena, etc. Este último fica na porção mais ao sul da Bacia.

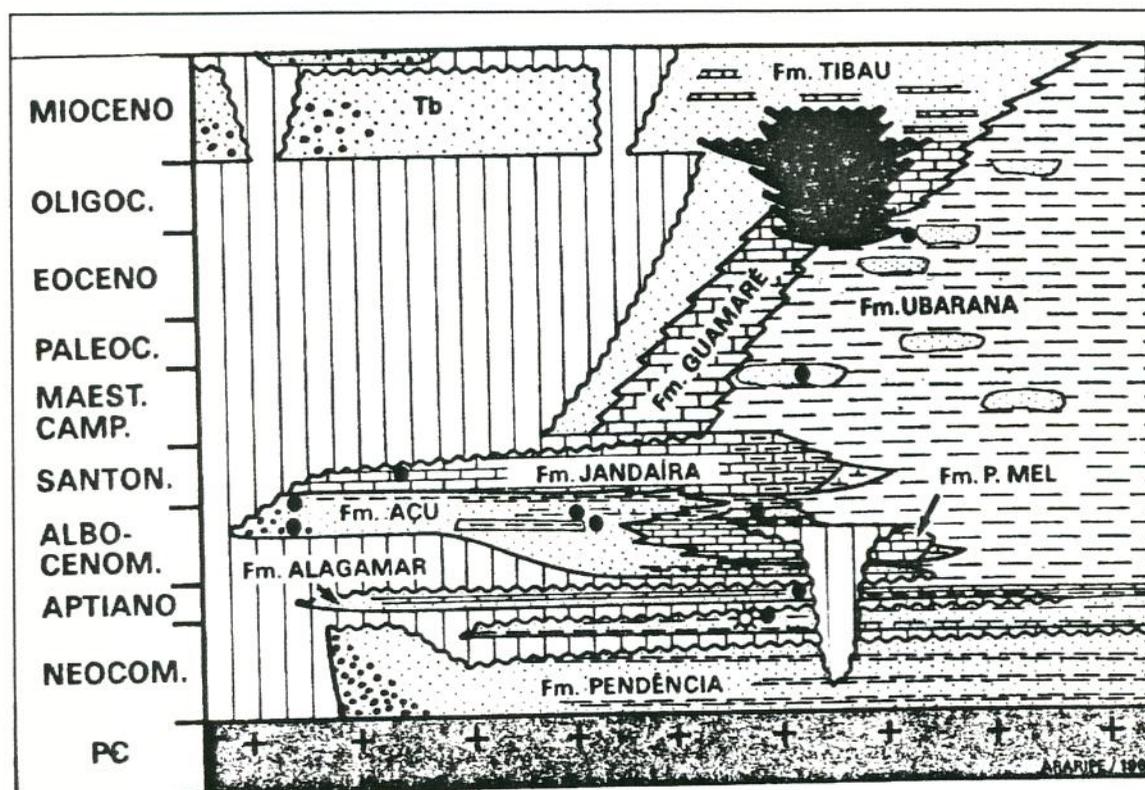


Figura 4.1 - Coluna estratigráfica da Bacia Potiguar.

Material Escolhido

O material inicialmente escolhido, pertence ao Campo de Canto do Amaro, o qual responde atualmente por 35% da produção de petróleo da Bacia Potiguar, hoje na faixa dos 16500 m³/dia, além de ser considerado o maior campo brasileiro de petróleo produzindo em terra. O Campo de Canto do Amaro está situado na região oeste do estado do Rio Grande do Norte, entre as cidades de Mossoró e Areia Branca, e a aproximadamente 25 Km da primeira.

Os possíveis resultados deste projeto poderiam ainda ser utilizados como dados de entrada para outros projetos de desenvolvimento do

campo como: injeção de água, fraturamento hidráulico, acidificação de matriz, perfuração de poços com elevada inclinação, etc.

Com a escolha dos arenitos do Campo de Canto do Amaro, surgiram outros problemas que com certeza aumentaram o grau de desafio: os arenitos do reservatório produtor deste campo são rasos (entre 500 e 700m) e de pouca compactação, além de serem em geral de granulometria fina a grossa (pouco uniforme) e de mal a moderadamente selecionados. Na literatura pesquisada não foram detectados trabalhos significativos com este tipo de material. Além destes fatores, para que fosse possível contar com um número razoável de amostras, foi necessário utilizar testemunhos de vários poços do campo. Tal prática obrigou a um processo de seleção bem mais rigoroso com o objetivo de garantir o máximo em homogeneidade entre os corpos de prova.

Esta seleção inicial foi realizada pelos geólogos responsáveis pelo estudo do campo de Canto do Amaro, ao efetuaram a escolha do material que seria enviado. Depois, a seleção foi complementada no CENPES, a partir de uma análise mais criteriosa das características, obtidas pelas descrições macro e microscópica e da Difratomia de Raio-X (DRX).

Este processo terminou ocasionando atrasos no cronograma e somente no início de fevereiro de 1995 as atividades de laboratório puderam ser iniciadas, e meados de junho do mesmo ano foram concluídas.

A escolha de amostras dos arenitos do Campo de Canto do Amaro, reforçou a meta inicial de avaliar o comportamento de arenitos mais homogêneos e bem consolidados para a obtenção de um parâmetro. Em março de 1995 foram providenciadas amostras de arenitos do campo produtor de petróleo de Lorena, que pertence a mesma Bacia e atendiam estes pré-requisitos básicos. Porém, a quantidade de amostra disponível era de apenas 8 seções de testemunhos. Este fato obrigou a utilização do método denominado ensaio de estado de falha múltiplo para permitir a obtenção das 3 envoltórias de ruptura, uma para cada temperatura estabelecida.

O campo de Lorena está situado na área sul da Bacia Sedimentar e produz a partir dos arenitos da formação Pendências. Trata-se de um campo pequeno (aproximadamente 40 poços perfurados) e que constan-

temente enfrenta problemas com a alta RGO (razão gás-óleo). Os testemunhos que forneceram as amostras para este trabalho foram retirados de profundidades entre 800 e 1100 m. Os arenitos provenientes deste campo caracterizam-se por serem mais compactos e homogêneos que os arenitos do Campo de Canto do Amaro. A tabela 4.1 apresenta a relação de amostras e as respectivas profundidades em que foram testemunhados.

Ao final da fase de coleta e preparação do material que seria ensaiado, dispunham-se de 40 corpos de prova em condições de serem utilizados. A tabela 4.2 apresenta a relação dos poços com o respectivo número de amostras fornecidas.

Tabela 4.1 - Relação dos poços e as profundidades em que foram retirados os corpos de prova.

POÇO	Nº do CP	PROFUNDIDADE VERTICAL (m)
7-AP-98 RN	01	639,35
	02	645,30
	03	647,20
7-AP-125 RN	02	651,05
	03	651,50
7-AP-128 RN	02	640,10
7-AP-153 RN	01	670,75
	02	696,90
	03	697,90
7-CAM-373 RN	01	679,25
	04	681,55
	05	687,05
	06	687,70
	07	691,05
	08	691,20
7-CAM-456 RN	01	587,40
	02	591,50
	03	594,10
	04	597,74
	05	612,45
	06	615,10
	07	620,20
	08	628,77
	09	629,50
	10	644,95
	11	652,65
	12	652,83

Tabela 4.1-continuação - Relação dos poços e as profundidades em que foram retirados os corpos de prova.

POÇO	Nº do CP	PROFUNDIDADE VERTICAL (m)
7-CAM-510 RN	01	666,40
7-CAM-519 RN	01	539,60
	02	545,25
7-CAM-529 RN	01	497,20
7-CAM-615 RN	01	516,30
7-LOR-30 RN	01	1080,80
	02	1090,70
7-LOR-34 RN	01	817,50
	02	830,95
	03	832,40
	04	839,90
	05	844,50
	06	847,35

Tabela 4.2 - Relação resumida dos poço que forneceram os testemunhos para este projeto seguido do respectivo nº de amostras fornecidas.

POÇO	Nº DE AMOSTRAS
7-AP-98 RN	03
7-AP-125 RN	02
7-AP-128 RN	01
7-AP-153 RN	03
7-CAM-373 RN	06
7-CAM-456 RN	12
7-CAM-510 RN	01
7-CAM-519 RN	02
7-CAM-529 RN	01
7-CAM-615 RN	01
7-LOR-30 RN	02
7-LOR-34 RN	06

Caracterização dos Arenitos Ensaaiados

Esta etapa normalmente antecede as demais e demandou bastante tempo, em virtude não apenas do processo de preparação do material como também devido ao volume de trabalhos em andamento no CENPES.

Os arenitos foram caracterizados pelos seus índices físicos, pela descrição petrográfica (macro e microscópica), pela descrição mineralógica e pelas velocidades das ondas acústicas (onda compressional, P, onda cisalhante, S). A descrição macroscópica foi obtida a partir dos CP preparados para os ensaios de compressão, com diâmetro aproximado de 2 pol.

As lâminas delgadas, empregadas na descrição microscópica, assim como as lâminas preparadas para ensaios de DRX, foram confeccionadas a partir de fragmentos de rocha com sobras da amostragem dos CP para ensaio de compressão.

A propagação das ondas ultra-sônicas foi realizada dentro da célula triaxial, antes e durante a compressão da amostra, e serviu para a verificação da homogeneidade e para a determinação dos parâmetros elásticos dinâmicos. Não foi possível a verificação em todas as amostras pois na metade final dos ensaios, o amplificador utilizado para as ondas emitidas, apresentou pane elétrica que não foi reparada em tempo hábil.

O quadro 4.1 apresenta os ensaios realizados e os parâmetros obtidos na etapa de caracterização dos arenitos.

Quadro 4.1 - Ensaios para caracterização dos arenitos e parâmetros obtidos.

ETAPA	ENSAIO	PARÂMETRO
descrição petrográfica	descrição macroscópica	análise mineralógica
	descrição microscópica	análise de lâmina delgada cimentação
descrição mineralógica	difratometria de raio X (DRX)	% de minerais constituintes % de minerais de argila
geofísica	propagação de ondas elásticas	V_p e V_s

Descrição Petrográfica

A descrição dos arenitos foi feita de duas formas: (a) macroscopicamente, pela análise a olho nú; (b) microscopicamente, através de lâminas delgadas preparadas com esta finalidade, que foram observadas em microscópio.

Descrição Macroscópica. Esta etapa consistiu em uma descrição visual das amostras de rocha, onde são observados as fraturas naturais, falhamentos, porosidade, granulometria, seleção natural dos grãos, estrutura, tipo de cimento e a reação ao ácido clorídrico que destina-se a verificação da presença de calcita.

O quadro 4.2 apresenta a legenda utilizada da descrição macroscópica dos CP o o quadro 4.3 apresenta o resultado da descrição.

Quadro 4.2 - Legenda utilizada na descrição macrocópica.

GRANULOMETRIA	COR
arn, ar - arenito med - médio sup - superior fno - fino gr - grosseiro inf - inferior	cast - castanho cl - claro cnz - cinza
COMPOSIÇÃO	SELEÇÃO
qt - quartzo kf - feldspato bi - biotita mus - muscovita	mod - moderada sel - selecionado p.sel - pobremente sel b.sel - bem sel
CIMENTO	OBSERVAÇÃO
mod - moderadamente ciment - cimentado	go - grão int arg vd - interclastos argilosos esverdeados
POROSIDADE	
reg - regular	

Quadro 4.3 - Descrição visual dos corpos de prova.

CP	GRANUL.	COR	COMPOS.	SELEÇÃO	CIMENTO	POROSID.	ESTRUT.	OBS.
5	arn,md,sp	cinza	qt, kf, bi	CAM-373 moderada	calcita	reg baixa	maciça	go gr/mg
6	"	cnz cl	"	"	"	"	"	"
7	arn fn	"	"	mal	"	"	"	"
8	ar,md,mg	cnz cl/cst	","mus	"	"	"	"	"
1	arn,md,sp	cinza cl	qt, kf, bi	AP-98 mod/p.sel	calcita	reg	maciça	int arg vd
2	arn md	cinza	"	mod/b.sel	mod/cimet	"	"	"
3	arn,md,sp	cinza	qt,kf,mus	"	"	"	"	bi/mus
2	arn med	cinza	qt, kf	AP-125 mod/sel	mod/cimet	reg	maciça	int arg
3	arn,gr,inf	"	qt,kf,mus	"	"	"	"	"

Deve ser observado que no quadro 4.3 não constam todos os CP utilizados neste trabalho. O motivo que levou a esta descrição parcial do material, foi que as amostras do poço CAM-456 já haviam sido saturadas antes do processo de descrição macroscópica, com o objetivo de acelerar os trabalhos de ensaio.

Posteriormente, na descrição microscópica e na análise de DRX, constatou-se que não haviam diferenças significativas entre todas as amostras provenientes dos arenitos da Formação Açú. As maiores diferenças, no entanto, referiram-se a composição mineralógica, onde constataram-se maiores ou menores quantidades de determinados minerais. Deve ser lembrado mais uma vez, que o material já havia sofrido um processo previo de seleção antes de ser enviado ao CENPES, para atender ao máximo uma das características exigidas, que era a homogeneidade

Porém, este não é o procedimento mais adequado a trabalhos desta natureza; vários são os pesquisadores (Vutukuri e Lama, 1978 e Goodman, 1989 por exemplo) que recomendam analisar e identificar todas as amostras. O CENPES também adota esta prática como procedimento padrão, no entanto o tempo disponível para este trabalho não seria suficiente para cumprir na íntegra esta etapa. Porém, a análise resumida do material não levou a maiores prejuízos para o projeto.

Descrição Microscópica. Para cumprir esta etapa, utilizaram-se fatias retiradas do topo das amostras. Estas fatias de rocha foram coladas com resina epoxi em lâminas de vidro apropriadas e impregnadas com resina e corante para permitir a observação dos espaços porosos. Após o endurecimento da resina, a pequena fatia de rocha tem sua espessura reduzida a menos de 0,1 mm para permitir a passagem da luz do microscópio, utilizado no processo de descrição.

Da análise microscópica identificaram-se os seguintes aspectos:

1- Arenitos da formação Pendências (amostras dos poços de Lorena):

- a) **Textura-** Granulometria muito fina a grossa; gama diversificada de granulometria; contatos pontuais entre os grãos; grãos mal selecionados.
- b) **Composição-** Os grãos do arcabouço são compostos por quartzo, plagioclásio, k-feldspato, biotita, muscovita e materiais

opacos compostos por fragmentos de rocha e quartzo policristalino.

c) **Cimento**- Poiquitrópico isolado - calcita; pouca cimentação com biotita e anidrita localizadamente.

d) **Pseudo-matriz**- Argila intersticial cloritizada.

e) **Observações Complementares**- Contatos potuais; dissolução de feldspato; feldspatos alveolados.

2- Arenitos da formação Açú (amostras dos poços de Canto do Amaro):

a) **Textura**- Granulometria de fina a muito grossa; seleção de mal a moderada e bem selecionada; presença de argilas intersticiais.

b) **Composição**- Os grãos do arcabouço são compostos por quartzo mono e poli-cristalino, plagioclásio, k-feldspato, biotita, muscovita e em algumas amostras, intraclastos argilosos.

c) **Cimento**- Crescimento secundário de feldspato, calcita, anidrita e em alguns casos, presença de pirita.

d) **Matriz**- Intraclastos de argilas e argilas infiltradas (cutículas e preenchendo os poros).

e) **Observações Complementares**- Presença de intraclátos de argilas na maioria das amostras.

Análise Mineralógica. Esta etapa foi realizada pelo CENPES/DIGER, através da Difratometria de Raio-X (DRX), utilizando o método do pó e o método da fração de argila.

Pelo método do pó obtém-se a composição percentual dos minerais constituintes da rocha. Os fragmentos de rocha foram transformados em pó por esmagamento com martelo e posterior moagem; em seguida, foram confeccionadas lâminas com este material, para varredura por DRX. O método da fração de argila fornece o percentual de cada mineral de ar-

gila presente, após a desagregação por ultra-som, separação por centrifugação e três varreduras em lâminas orientadas, segundo Jochimek apud Bloch (1993).

A análise mineralógica das amostras dos arenitos da formação Açú, mostrou pouca variação entre os componentes da rocha porém, com predominância marcante para o quartzo (entre 30 e 75%) e o feldspato (entre 20 e 45%). Os minerais de feldspato encontrados, foram ainda de dois tipos: k-feldspato, cuja composição variou entre 10 e 40% do total e o plagioclásio que apresentou índices entre traços do mineral e 25% do total. Verificou-se que as menores concentrações de quartzo foram compensadas pela maior presença de feldspato e vice-versa.

As argilas apresentaram composição variando entre traços deste mineral e 30% do total. A calcita esteve presente com concentração entre traços do mineral e 40%. As amostras do poço CAM-373 destacaram-se por apresentarem no geral as menores concentrações de argilas (entre traços do mineral e 5%) e as maiores concentrações de calcita (entre 10 e 40%). Em algumas amostras, foram detectadas a presença de pirita e dolomita.

As amostras dos arenitos da Formação Pendências também mostraram pouca variação na composição mineral. Os minerais mais abundantes foram o quartzo e o feldspato, representando, respectivamente, de 25 a 55% e de 40 a 70% da mineralogia total. As quantidades de feldspato foram inclusive maiores do que as encontradas nos arenitos da Formação Açú e também foram de dois tipos, o k-feldspato e o plagioclásio. Este último representou, em alguns casos, maior percentual até que o quartzo.

As argilas apresentaram baixa concentração nos arenitos da Formação Pendências, não representando mais do que 10% da mineralogia total. Quanto a calcita, a presença foi ainda menor, não passando de 5% do total.

A tabela 4.3 mostra o resultado da análise mineralógica realizada nas amostras.

Tabela 4.3 - Resultado da análise mineralógica das amostras.

POÇO	Nº do CP	PROF. (m)	FM	ARG (%)	QTZ (%)	CAL (%)	KFD (%)	PLG (%)	PIR (%)	DOL (%)
CAM-456	01	587,40	AÇU	15	45	5	25	10	-	
	02	591,50		5	30	20	40	5	-	
	03	594,10		15	40	5	30	10	-	
	04	597,74		10	55	5	20	10	-	
	05	612,45		TR	65	15	20	TR	-	
	06	615,10		5	30	15	40	5	5	
	07	620,20		15	45	5	30	5	-	
	08	628,77		5	40	20	30	5	-	
	09	629,50		20	35	5	25	15	TR	
	10	664,95		30	40	5	10	-	15	
	11	652,65		15	60	5	20	-	-	
	12	652,83		5	40	10	35	10	-	
CAM-373	04	681,55	TR	65	5	25	5	-		
	05	687,05	5	45	15	10	25	-		
	06	687,70	5	65	10	15	5	-		
	07	691,05	-	35	40	20	5	-		
	08	691,20	-	50	35	15	-	-		
AP-98	01	639,35	5	60	5	15	10	5		
	02	645,30	TR	70	5	15	5	5		
	03	647,20	TR	55	5	35	5	-		
AP-125	02	651,05	15	70	TR	15	-	-		
	03	651,50	TR	70	5	25	-	-		

LEGENDA: ARG=ARGILIMINERAIS; QTZ=QUARTZO; CAL=CALCITA; KFD=K-FELDSPATO; PLG=PLAGIOCLÁSIO;
 PIR=PIRITA; DOL=DOLOMITA.
 PEN= FORMAÇÃO PENDÊNCIAS
 TR= TRAÇOS

Tabela 4.3-continuação - Resultado da análise mineralógica das amostras.

POÇO	Nº do CP	PROF. (m)	FM	ARG (%)	QTZ (%)	CAL (%)	KFD (%)	PLG (%)	PIR (%)	DOL (%)
AP-153	01	670,75	AÇU	10	30	5	5	50	-	-
	02	696,90		-	-	-	-	-	-	-
	03	697,90		10	65	5	20			
CAM-510	01	666,40		5	40	10	20	-	10	15
CAM-519	01	539,60		15	45	TR	40	-	-	-
CAM-529	01	497,20		15	35	10	25	10	-	5
LOR-34	01	817,50	PEN	TR	30	TR	20	50	TR	-
	03	832,40		5	40	TR	25	30	-	-
	04	839,90		5	55	TR	10	30	-	-
	05	844,50		10	25	TR	5	55	5	-
	06	847,35		5	40	TR	15	40	-	-

LEGENDA: ARG=ARGILIMINERAIS; QTZ=QUARTZO; CAL=CALCITA; KFD=K-FELDSPATO; PLG=PLAGIOCLÁSIO; PIR=PIRITA; DOL=DOLOMITA.
PEN= FORMAÇÃO PENDÊNCIAS
TR= TRAÇOS

Os argilimineriais mais abundantes na fração argila, para as amostras dos arenitos da Formação Açu, foram as interestratificações de illita-esmectita, que na maioria dos casos contribuiu com mais de 90% da composição total. Apenas as amostras AP-153/01, CAM-519/01 e CAM-529/01 apresentaram, na fração argila, um único tipo de argilomineral que foi a esmectita, o restante das amostras apresentaram, distribuídos em frações menores, caulinita, clorita, e illita.

Para os arenitos da Formação Pendências, houve predominância da presença do argilomineral clorita (entre 60 e 80%), seguido pela illita (entre 10 e 30%). Nas interestratificações de illita-esmectita, a illita predomina representando, neste caso, mais de 75% do total.

A tabela 4.4 apresenta o resultado das análises de mineralogia de argilas.

Tabela 4.4 - Resultados das análises de mineralogia de argilas.

POÇO	Nº do CP	CAU (%)	ILI (%)	ESM (%)	CLO (%)	I/S (%)	% I - I/S ORD	% I - I/S IRR
CAM-456	01	-	-	-	-	100	90	25 - 30
	02	TR	-	-	-	100	-	5 - 10
	03	-	-	-	-	100	90	20 - 25
	04	TR	-	-	-	100	-	5 - 10
	05	10	TR	-	-	90	-	15 - 20
	06	-	-	-	-	100	-	10 - 15
	07	-	-	-	-	100	-	10 - 15
	08	5	-	-	-	95	-	5 - 10
	09	TR	-	-	-	100	-	10 - 15
	10	TR	TR	-	-	100	-	15 - 20
	11	TR	-	-	-	100	-	20 - 25
	12	-	-	-	-	100	-	10 - 15
CAM-373	04	TR	-	-	-	100	-	15 - 20
	05	5	-	-	-	95	-	10 - 15
	06	TR	-	-	-	100	-	5 - 10
	07	5	-	-	-	95	-	30 - 35
	08	5	10	-	-	85	-	45 - 50
AP-98	01	-	TR	-	-	100	-	30 - 35
	02	TR	5	-	-	95	-	40 - 45
	03	-	-	-	-	100	-	25 - 30
AP-125	02	-	-	-	-	100	85 - 95	25 - 30
	03	-	TR	-	-	100	-	25 - 30
AP-153	01	TR	-	100	-	-	-	-
	02	5	-	-	-	95	-	20 - 25
	03	TR	-	-	-	100	-	10 - 15
CAM-510	01	-	-	-	-	100	-	5 - 10
CAM-519	01	TR	-	-	-	-	-	-
CAM-529	01	-	-	100	-	-	-	-
LOR-34	01	-	15	-	70	15	75 - 85	-
	03	-	20	-	60	20	75 - 85	-
	04	-	15	-	65	20	80 - 90	-
	05	-	10	-	80	10	80 - 90	-
	06	-	30	-	60	10	75 - 85	-

LEGENDA: CAU = CAULINITA; ILI = ILITA; ESM = ESMECTITA; CLO = CLORITA;
 I/S = INTERESTRATIFICADO ILITA-ESMECTITA; I/S ORD = I/S DO TIPO ORDENADO;
 I/S IRR = I/S DO TIPO IRREGULAR;
 TR = TRAÇOS DO MINERAL.

Preparação dos Corpos de Prova para Ensaio de Compressão

Os CP foram confeccionados a partir de testemunhos com diâmetro de 4 pol. O ponto de amostragem para cada CP foi escolhido em função da integridade e homogeneidade aparente dos testemunhos. O quadro 4.4 detalha as etapas seguidas na fase de preparação. Os testemunhos foram retirados dos poços da bacia Potiguar durante a perfuração destes para produção de petróleo. Os testemunhos não foram enviados em uma única remessa para o laboratório do CENPES mas, em 3 lotes distintos. Estes fatos ocorreram para atender necessidades que foram surgindo a medida que os ensaios iam sendo conduzidos. A observação de detalhes na preparação de um determinado lote de amostras serviu, em alguns casos, para alterar os procedimentos que seriam adotados no lote seguinte.

Quadro 4.4 - Etapas do processo de preparação dos corpos de prova.

FASE	OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO
1	amostragem	extração do CP com diâmetro de 2 pol.
2	corte	corte das faces do CP deixando-o com altura superior a 4 pol. (se possível)
3	faceamento	desbaste do topo e da base dos CP para obtenção de superfícies planas, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo longitudinal da amostra
4	medição	efetuar o controle das dimensões geométricas dos CP
5	secagem	secagem em estufa a 60°C por 4 horas
6	saturação	submersão dos CP em óleo com aplicação de vácuo

Manuseio e Amostragem dos CP

A figura 4.2 mostra o equipamento utilizado na plugagem dos CP. A operação foi inicialmente realizada com fluxo de água por dentro da coroa de extração para resfriar o equipamento. Esta medida foi adotada na preparação dos 12 CP do poço 7-CAM-456 RN correspondentes ao primeiro lote de testemunhos, as demais amostras (no total de 28) que compunham os lotes 2 e 3, foram cortadas com utilização de ar para refrigeração. A base da amostradeira foi projetada para permitir o escoamento da lama formada pela água de refrigeração juntamente com os resíduos de rocha. O corte com ar ocorre com a amostradeira inserida numa campânula apropriada para permitir, através de tubo exaustor, a remoção da poeira produzida.

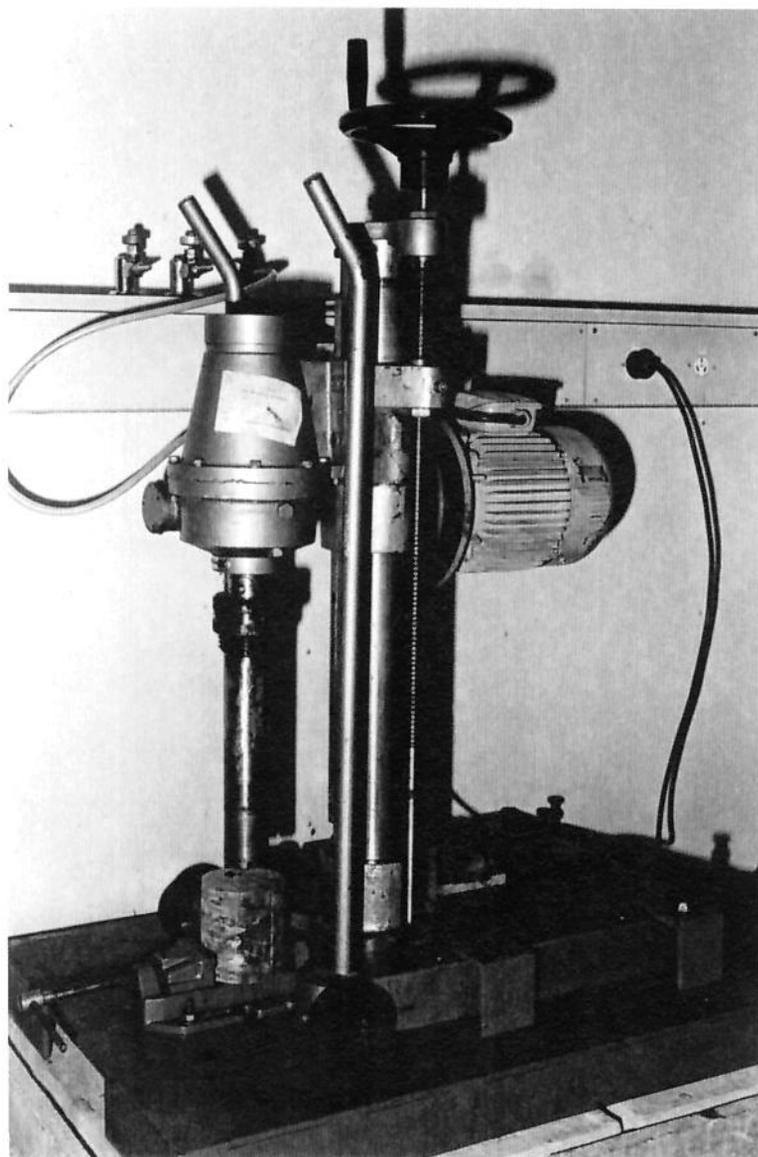


Figura 4.2 - Amostrador utilizado no processo de extração dos CP de 2 pol. de diâmetro.

Durante a preparação das primeiras 12 amostras provenientes do poço 7-CAM-456 RN, verificou-se que o processo de corte com água estava levando a uma desagregação da superfície externa do CP além de provocar perdas por quebra, em virtude do aumento da velocidade de corte, que foi adotada para minimizar o primeiro problema. Porém, não foram observadas maiores alterações por possível incompatibilidade da água com as argilas presentes na rocha. Das 21 seções de testemunhos do poço CAM-456, enviados já no tamanho apropriado (em torno de 150 mm), 9 não foram aproveitadas. Alguns apresentavam falhas naturais e quebraram durante a amostragem, outros não suportaram o esforço provocado

pelo corte, e alguns já estavam quebrados antes mesmo de serem manuseados.

Segundo Fjær et al. (1992), a presença de argilas nos arenitos podem ser responsáveis pela reação contra a presença de água não quimicamente compatível àquela existente nos poros da rocha. As reações mais comuns são o inchamento ou retração de certos tipos de argilas, como as autigênicas. As rochas sedimentares podem ser consideradas, em muitos casos, como mecanicamente fracas. Os arenitos de CANTO DO AMARO são um exemplo de rochas fracas. Estas situações recomendam por precaução a utilização de ar sob pressão como fluido refrigerante, para atender as etapas de corte adotados na preparação das amostras.

Verificou-se também que parte dos testemunhos não suportaram o manuseio, presumivelmente descuidado, durante a viagem entre a cidade de Natal (sede da base da PETROBRAS S.A. responsável pela exploração da Bacia Potiguar) e Rio de Janeiro (CENPES), apesar de estarem adequadamente embalados. O material estava envolto em folha de alumínio e recoberto com uma camada de parafina para preservar suas características e umidade, e depois, foram acondicionados em caixas plásticas apropriadas e despachados via aérea para o local de destino. Todos estes cuidados não evitaram a perda observada durante o transporte.

A segunda remessa de amostras (lote 2), compunha-se de 8 seções de testemunhos do poço 7-CAM-373 RN, 3 do poço 7-AP-98 RN e 3 do poço 7-AP-125 RN, foram condicionadas, após revestidas com folha de alumínio e parafina, desta vez em um caixote de madeira forrado internamente com espuma e recheado de isopor pulverizado. Este sistema permitiu a preservação total durante a viagem. Este mesmo procedimento foi adotado quando do envio da terceira e última remessa composta de 2 testemunhos do poço 7-LOR-30 RN, 6 do poço 7-LOR-34 RN do campo de LORENA e 9 testemunhos de mais 6 poços do campo de CANTO DO AMARO.

Materiais pouco consolidados (como os arenitos do campo de CANTO DO AMARO), a rigor deveriam ser congelados antes do processo de amostragem porém, optou-se por não adotar esta técnica pois pode provocar alterações permanentes no material, em particular nos casos em que a água está presente: *"...Uma vez que minerais de argila contém água na sua*

estrutura, o congelamento pode causar desintegração e redistribuição destes minerais. Se os minerais de argila estão agindo como cimento isto claramente afetará as propriedades mecânicas..." (Fjær et al., 1992, p.187).

Diante do que foi comentado nos parágrafos anteriores, como resultado da amostragem dos corpos de prova da primeira remessa, obteve-se um número significativo destes com dimensões que não atenderam a relação altura/diâmetro entre 2,0 e 2,5 de acordo com o que recomenda a American Society for Testing and Materials (ASTM) em sua Designation: D4543-85.

Na amostragem do material das segunda e terceira remessas (lote 2 e 3), que foram tratadas com maiores cuidados durante o transporte e manuseio, obteve-se um número relativamente maior de CP com dimensões mais próximas dos desejáveis. As perdas por quebra durante a plugagem ocorreram por razões adversas ao processo. Os arenitos da formação Açú que compunham estes poços, aparentemente, eram mais grosseiros e com pior seleção dos grãos do que os arenitos do 7-CAM-456 RN além de mal cimentados, e isto com certeza influenciou nas perdas e no aspecto rugoso das superfícies externas das amostras. Vide figuras 4.3 a 4.5.



Figura 4.3 - CP do poço CAM-373 (lote 2) que não chegou a ser ensaiado por ter quebrado durante a amostragem. Atentar para a má seleção dos grãos da rocha.

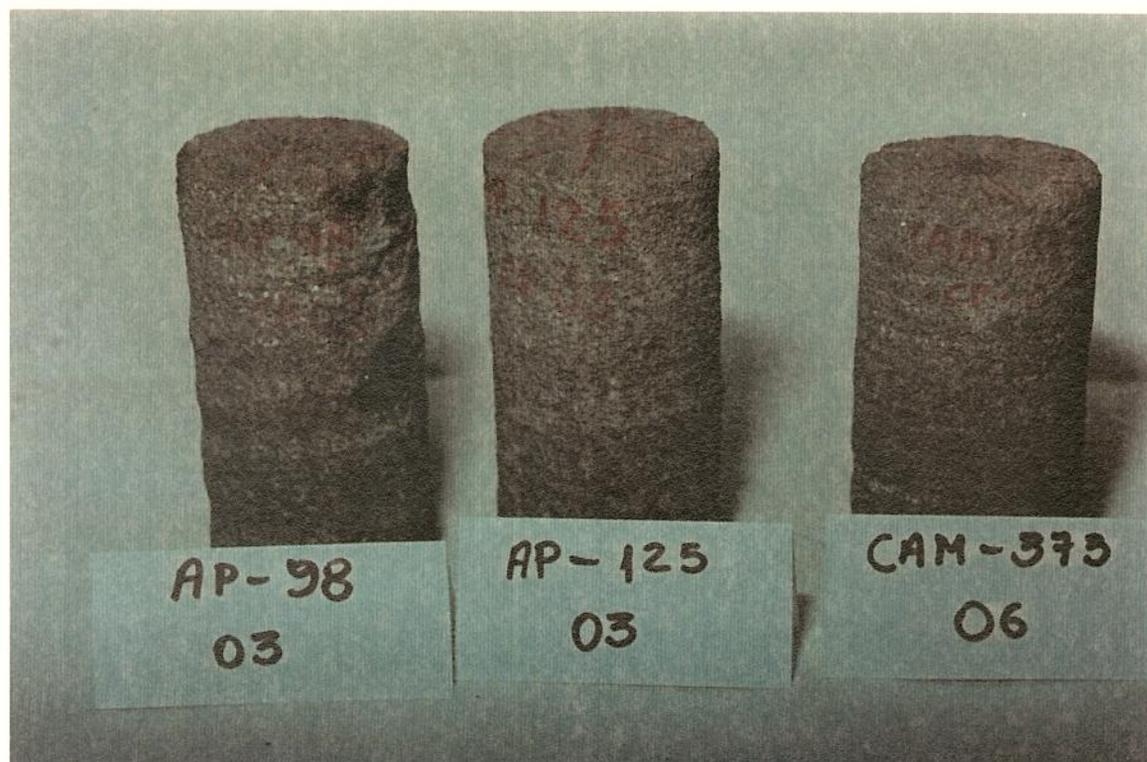


Figura 4.4 - CP dos poços de Canto do Amaro (lote 2). Atentar para o aspecto das superfícies externas das amostras.

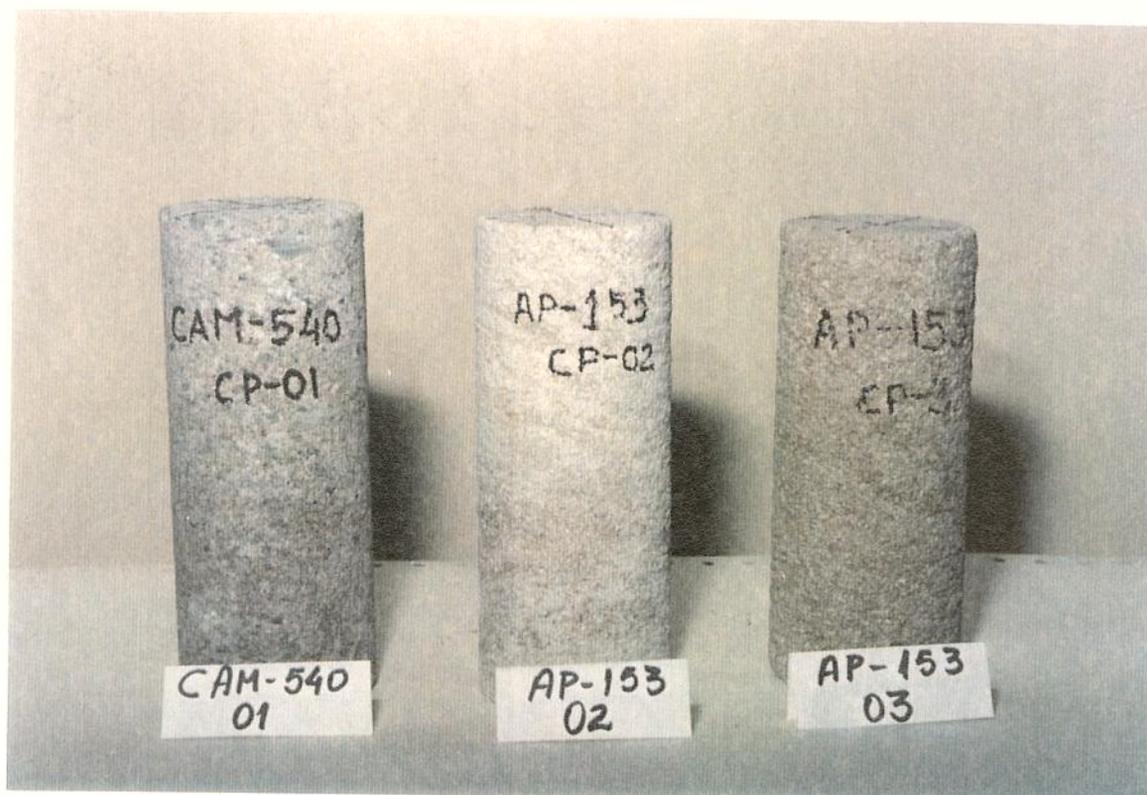


Figura 4.5 - CP dos poços de Canto do amaro (lote 3). Apresentaram melhor aspecto após a amostragem. A amostra CAM-540/01 não chegou a ser ensaiada. Atentar para a seleção dos grãos da rocha e para o aspecto rugoso.

Destaque deve ser conferido às amostras dos poços do campo de Lorena, 7-LOR-30 RN e 7-LOR-34 RN. Os arenitos destes poços caracterizaram-se como mais homogêneos e bem consolidados. Os benefícios que estas características representaram no processo de plugagem podem ser conferidos na figura 4.6. Apenas um CP obtido destes poços sofreu um desvio acentuado do eixo logitudinal e precisou ser retificado (figura 4.6). Como consequência, o diâmetro desta amostra ficou em 45,26 mm porém, a relação final de altura/diâmetro atendeu ao especificado, ficando em 2,33.

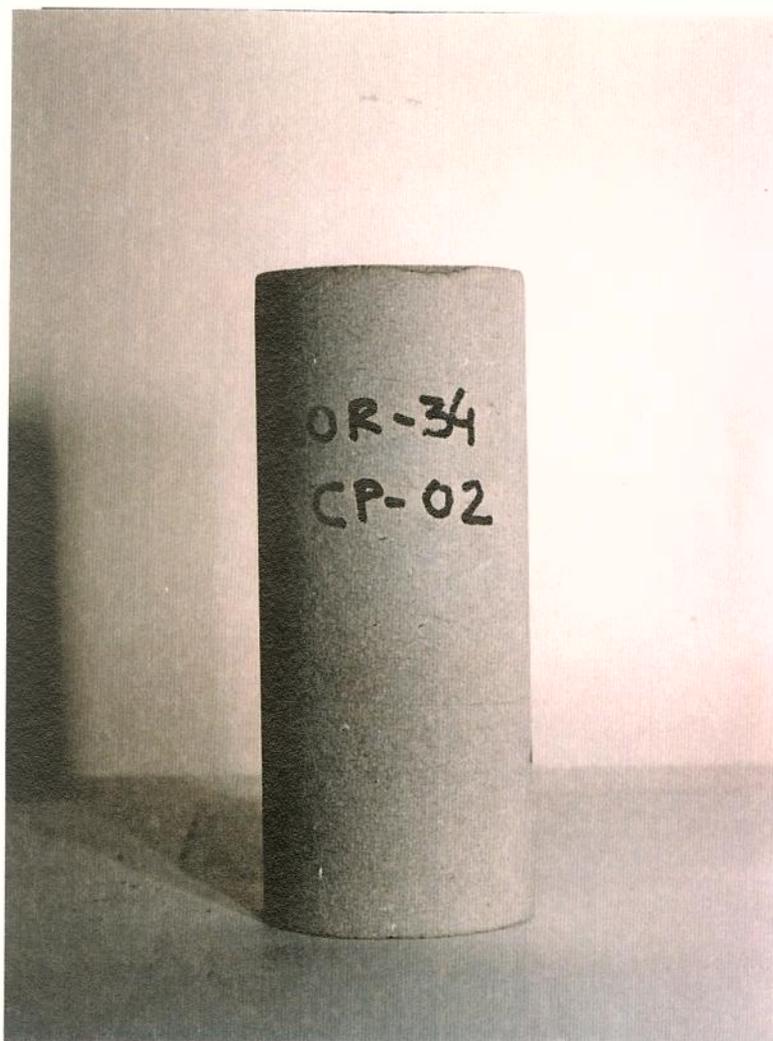


Figura 4.6 - CP LOR-34/02 após ser retificado para corrigir defeitos de amostragem. Atentar para a superfície externa bastante regular.

A ASTM em sua Designation D4543-85 de 1985, recomenda que o diâmetro de corpos de prova para ensaio de compressão seja no mínimo de 47 mm porém, dimensões menores são aceitas desde que a relação entre o diâmetro do CP e do maior grão da rocha seja maior que dez.

Corte com Serra

Após a amostragem, os CP foram serrados com altura superior a 4 pol. Desta forma, mesmo com o acerto do topo e da base seria possível garantir a relação altura/diâmetro entre 2,0 e 2,5. No caso dos CP em que se observava que esta relação estava comprometida, ou seja, a relação era

menor que 2, foi feito o corte apenas para reduzir as irregularidades das superfícies. A figura 4.7 mostra o processo de corte.



Figura 4.7 - Processo de corte das extremidades do CP.

Faceamento do Topo e da Base dos CP

Nesta etapa (figura 4.8), a primeira face a ser desbastada tomava como referência o eixo longitudinal da amostra, centralizada pelo ajuste das castanhas da placa do torno. A outra face era desbastada invertendo-se o CP e usando a face inicial como guia, encostada na placa da castanha.

O processo de faceamento utilizando ferramenta de desbaste muitas vezes arranca grãos dos minerais constituintes que estejam pouco cimentados, ao invés de cortá-lo. Conseqüentemente, aparecem lacunas nas superfícies dos CP cujas dimensões se assemelham às dos grãos removidos. Isto confere um aspecto rugoso à amostra (figura 4.5). Este tipo de problema foi bastante verificado no material utilizado neste projeto. Porém, não ficou evidente que este tipo de ocorrência, que está relacionada ao tipo de material ensaiado, tenha influenciado nos resultados dos en-

saos. As superfícies apesar de rugosas permitiram um perfeito apoio aos caps metálicos garantindo uma boa distribuição das cargas axiais durante a fase cisalhante.

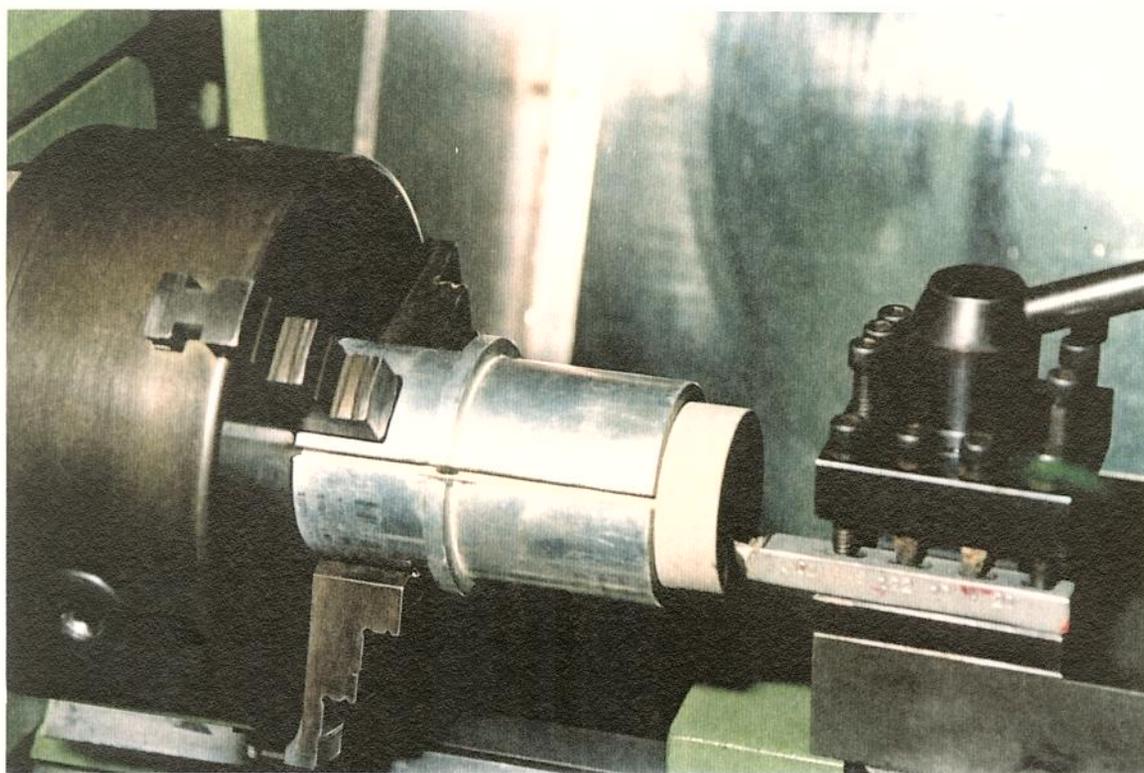


Figura 4.8 - Processo de faceamento do CP em torno mecânico.

Controle das Dimensões Geométricas

Foram realizadas três medições de altura e diâmetro nas amostras com o auxílio de um paquímetro, com precisão de leitura de 0,02 mm, para a obtenção de um valor médio.

A inclinação relativa topo/base foi medida em 4 direções radiais defasadas de 45°, numa mesa niveladora com micrômetro comparador (precisão de 10^{-4} pol.) para verificar a inclinação máxima das superfícies (figura 4.9). De acordo com a ASTM, Designation:4543-85, 1985, admite-se um valor máximo de 0,25°. Porém, este valor foi ultrapassado na maioria das amostras.

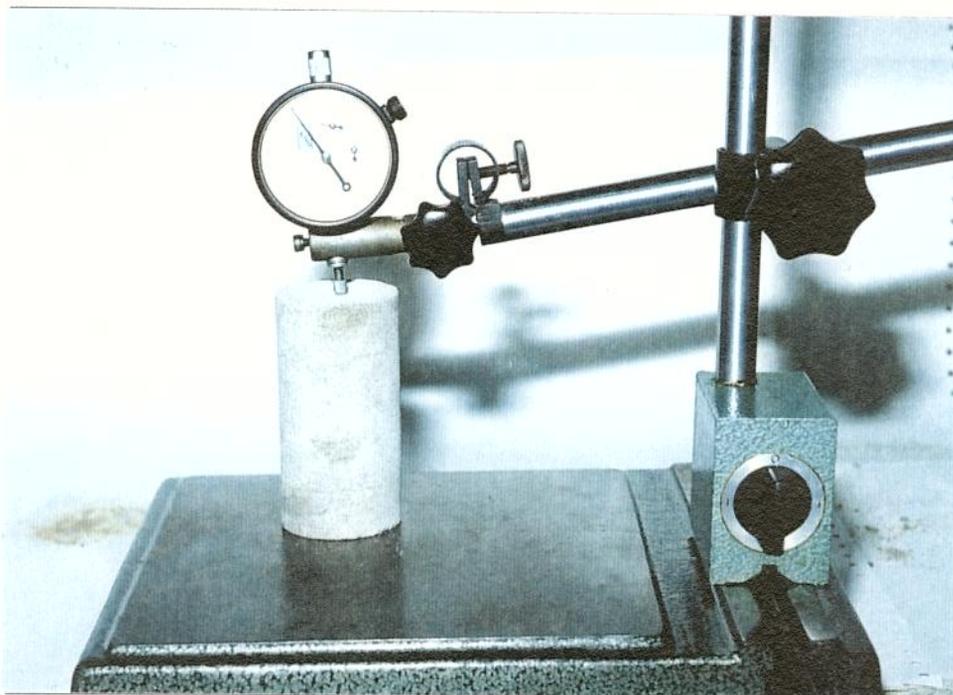


Figura 4.9 - Processo de controle da inclinação relativa topo/base do CP.

As tabelas 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam as dimensões dos CP e as respectivas inclinações relativas para cada lote preparado. Para efeito de simplificação, as amostras foram identificadas pelas letras iniciais do nome do campo, seguidas pelo número do poço e finalmente o número do corpo de prova. Por exemplo: o CP de número 10 do poço 7-CAM-456 RN foi identificado como CAM-456/10. Esta forma de identificação foi utilizada ao longo do desenrolar deste trabalho.

De acordo com Peels e Ferry (1983) apud Bloch (1993), os valores obtidos neste projeto podem ser considerados satisfatórios. Nos estudos desenvolvidos por estes pesquisadores com várias amostras de arenitos, verificaram que os resultados dos ensaios de compressão não apresentavam diferenças significativas quando a inclinação relativa topo/base era inferior a 2° , para amostras com resistência a compressão simples abaixo de 50 MPa.

Tabela 4.5 - Relação dos CP do lote 1 com respectivas características geométricas.

POÇO	Nº do CP	ALTURA (mm)	DIÂMETRO (mm)	RELAÇÃO altura/diâm.	INCLINAÇÃO RELATIVA
CAM-456	01	89,77	49,64	1,81	0,19°
	02	92,42	49,67	1,86	0,73°
	03	108,87	49,68	2,19	0,21°
	04	100,72	49,42	2,04	0,55°
	05	87,70	49,07	1,79	0,33°
	06	102,42	49,72	2,06	0,23°
	07	109,35	49,36	2,22	0,24°
	08	94,66	47,96	1,97	0,82°
	09	111,11	49,69	2,24	0,32°
	10	92,85	49,66	1,87	0,29°
	11	112,04	49,67	2,26	0,29°
	12	93,64	48,63	1,93	0,38°

Tabela 4.6 - Relação dos CP do lote 2 com respectivas características geométricas

POÇO	Nº do CP	ALTURA (mm)	DIÂMETRO (mm)	RELAÇÃO altura/diâm.	INCLINAÇÃO RELATIVA
AP-98	01	102,63	49,48	2,07	0,72°
	02	103,66	49,19	2,11	0,95°
	03	103,24	49,25	2,10	0,81°
AP-125	02	103,45	49,62	2,08	0,62°
	03	104,31	49,47	2,11	0,53°
CAM-373	01	100,62	49,27	2,04	0,80°
	04	104,92	49,85	2,10	0,74°
	05	103,28	49,77	2,08	0,29°
	06	97,32	49,62	1,96	0,39°
	07	104,96	49,74	2,11	0,47°
	08	96,70	49,86	1,94	0,34°

Tabela 4.7 - Relação dos CP do lote 3 com respectivas características geométricas.

POÇO	Nº do CP	ALTURA (mm)	DIÂMETRO (mm)	RELAÇÃO altura/diâm	INCLINAÇÃO RELATIVA
AP-128	02	118,78	49,09	2,42	-
AP-153	01	116,19	49,34	2,36	0,59°
	02	120,36	49,28	2,44	0,87°
	03	119,66	48,87	2,45	1,29°
CAM-510	01	119,47	49,37	2,42	0,47°
CAM-519	01	119,70	49,32	2,43	0,42°
	02	121,98	48,99	2,49	0,56°
CAM-529	01	119,49	49,38	2,42	0,57°
CAM-615	01	118,54	49,05	2,42	0,65°
LOR-30	01	118,03	49,53	2,38	0,86°
	02	115,80	49,48	2,34	0,52°
LOR-34	01	117,99	49,66	2,38	0,22°
	02	105,37	45,26	2,33	0,26°
	03	121,80	49,55	2,46	0,48°
	04	118,29	49,63	2,38	0,52°
	05	118,48	49,65	2,39	0,37°
	06	117,68	49,64	2,37	0,15°

Secagem em Estufa

A etapa de secagem em estufa não foi adotada para todas as amostras. Os 23 corpos de prova obtidos a partir da primeira e segunda remessas de testemunhos não receberam este tratamento porém os 17 restantes oriundos da terceira remessa passaram pela estufa antes da etapa seguinte que era a saturação com óleo.

Antes de entrarem na estufa, as amostras eram pesadas em balança eletrônica com precisão de 0,01g. A partir daí passavam pelo menos 4 horas na estufa à temperatura de 60°C (algumas chegaram a permanecer 20 horas). A etapa seguinte foi o dessecador, onde eram submetidas a vácuo até retornarem a temperatura ambiente. A nova pesagem das amostras verificou o baixo nível de umidade destas pois, a variação no peso devido a secagem em estufa ficou, em mais de 90% dos casos, abaixo de

2%. Como a origem e a forma de armazenamento de todos os testemunhos foi a mesma, tanto na base da PETROBRAS S.A. em Natal (neste caso os testemunhos são acondicionados em caixas plásticas e armazenados em barracões) quanto no laboratório do CENPES (neste caso ou as amostras eram armazenadas em sacos plásticos ou simplesmente ficavam sobre a bancada enquanto aguardava a preparação para o ensaio), o valor máximo de umidade inicial de 2% pode ser extrapolado para as amostras que não foram levadas à estufa.

Segundo Obert e Duvall (1967), pequenas variações no teor de umidade de amostras secas não devem afetar de forma significativa as propriedades das rochas. Portanto, as amostras ensaiadas por muitos laboratórios sofrem um processo de secagem de duas semanas a temperatura ambiente. E no caso de necessidade, o processo de secagem pode ser complementado com a utilização de dessecadores a vácuo.

Todas as amostras recebidas para este projeto podem ser consideradas como estando secas, em virtude do baixo teor de umidade registrada (2%). A secagem ocorre devido ao processo de estocagem adotado pela PETROBRAS S.A. para os testemunhos, que é feita em galpões cobertos e ventilados, à temperatura ambiente (25° a 28°C). Os testemunhos utilizados neste projeto estiveram nesta condição por pelo menos dois meses. Esta condição permite a perda da umidade natural em um intervalo de tempo relativamente curto. Chiu et al. apud Goodman (1989), verificaram que uma amostra de argila com 28% de porosidade e 100% saturada com água, teve ao final de 100 horas (aproximadamente 4 dias), a saturação reduzida a pouco mais de 15%, quando armazenada em um ambiente com 50 a 55% de umidade relativa e temperatura de 22°C.

Saturação

As amostras foram pesadas em balança com precisão de 0,01g e depois imersas em dessecadores contendo óleo mineral **LUBRAX OB-9**. Depois, o vácuo era aplicado para forçar a saída do ar contido nos poros interconectados e permitir o seu preenchimento pelo óleo (figuras 4.10 e 4.11). Após pelo menos 16 horas nesta condição, as amostras eram pesadas e novamente imersas no óleo e aplicado o vácuo por mais uma hora. O processo de pesagem era repetido e, caso não fosse verificada variação no peso, eram consideradas saturadas e em condições de serem submetidas

aos ensaios. Este procedimento garantiu a total saturação das amostras, porque estas permaneciam imersas no óleo até o momento de serem utilizadas (em muitos casos a permanência foi superior a 60 horas).

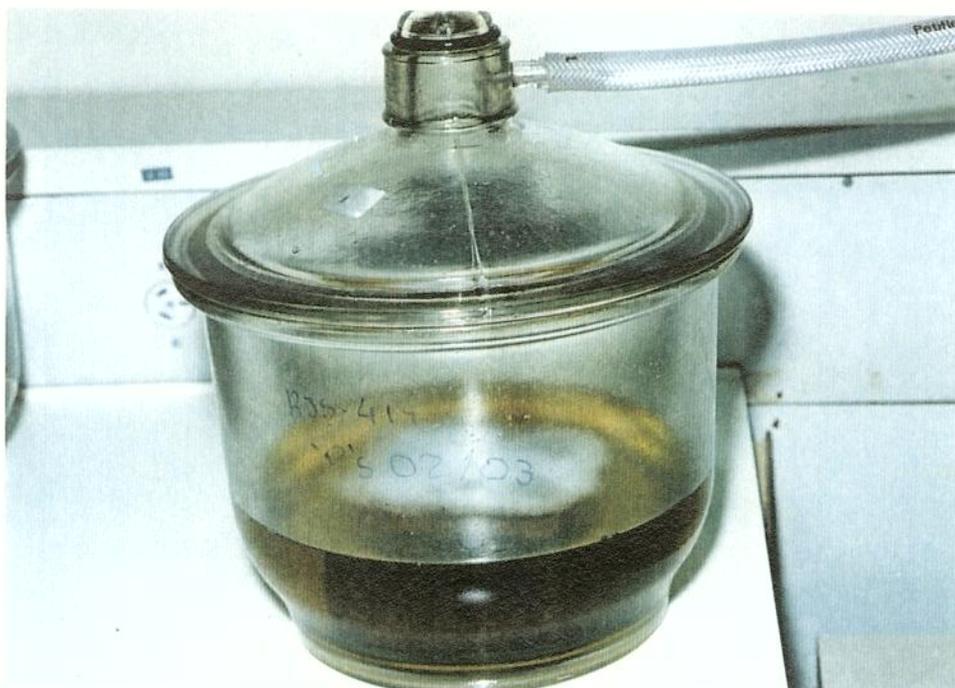


Figura 4.10 - CP imersos no óleo em dessecador a vácuo. Atentar para o detalhe do ar sendo expulso dos poros da rocha.

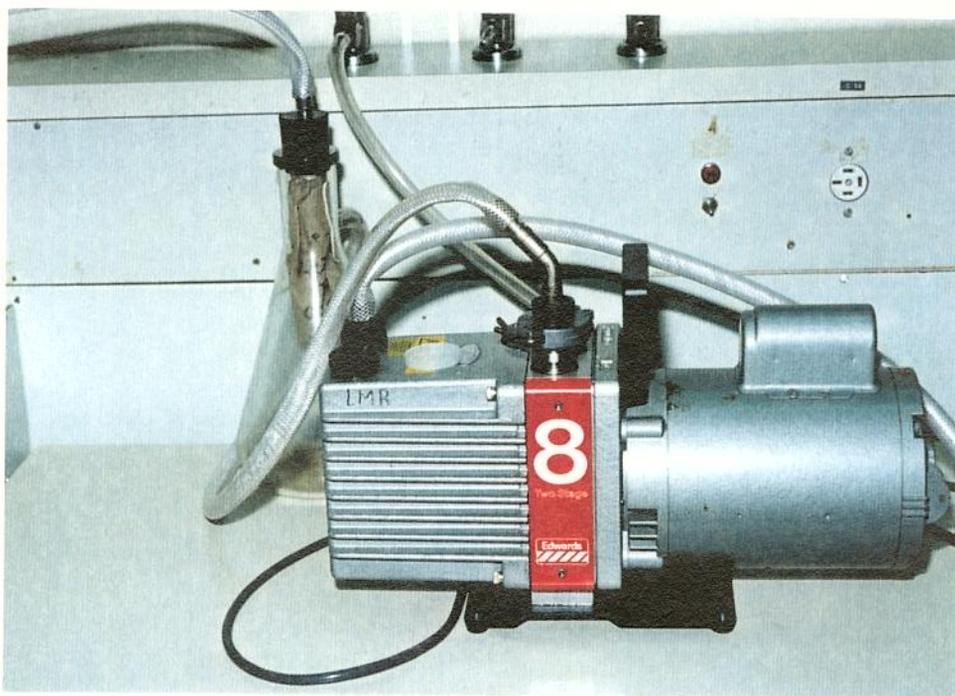


Figura 4.11 - Bomba de vácuo utilizada no processo de saturação dos CP no dessecador.

As tabelas 4.8 e 4.9 apresentam os pesos das amostras antes e após a saturação com óleo. A tabela 4.10 apresenta os valores dos pesos das amostras antes e após secagem em estufa e finalmente após a saturação com óleo. Atentar para as pequenas diferenças nos pesos antes e após a secagem.

Tabela 4.8 - Demonstrativo da saturação das amostras do lote 1 com óleo LUBRAX OB-9 e sob vácuo.

POÇO	Nº do CP	PESO ESTABILIZADO (g)	
		SECO	SATURADO SOB VÁCUO
7-CAM-456 RN	01	391,93	403,04
	02	389,88	399,41
	03	500,44	508,65
	04	411,27	428,21
	05	397,49	401,04
	06	457,88	466,68
	07	464,49	473,56
	08	381,77	394,27
	09	495,60	504,62
	10	425,05	431,66
	11	502,93	512,20
	12	373,89	383,12

Tabela 4.9 - Demonstrativo da saturação das amostras do lote 2 com óleo LUBRAX OB-9 e sob vácuo.

POÇO	Nº do CP	PESO ESTABILIZADO (g)	
		SECO	SATURADO SOB VÁCUO
7-AP-98 RN	01	401,84	426,85
	02	386,24	413,76
	03	386,70	414,03
7-AP-125 RN	02	384,61	414,62
	03	388,32	419,70
7-CAM-373 RN	01	400,76	423,85
	04	446,34	467,45
	05	483,86	491,55
	06	414,81	430,80
	07	502,46	509,41
	08	478,03	478,52

Tabela 4.10 - Demonstrativo da saturação das amostras do lote 3 com óleo LUBRAX OB-9 sob vácuo, depois de terem passado pela estufa.

POÇO	Nº do CP	PESO ESTABILIZADO (g)		
		ANTES DA ESTUFA	APÓS SECAGEM EM ESTUFA	SATURADO SOB VÁCUO
AP-128	02	433,10	425,43	468,36
AP-153	01	455,91	429,41	470,71
	02	465,84	457,33	497,12
	03	448,17	440,87	498,02
CAM-510	01	523,88	516,81	543,31
CAM-519	01	445,20	437,80	484,54
	02	459,60	452,67	488,91
CAM-529	01	475,04	-	500,69
CAM-615	01	440,84	435,85	468,04
LOR-30	01	519,55	517,61	544,29
	02	512,42	509,44	530,42
LOR-34	01	487,38	484,67	519,09
	02	383,69	382,23	399,56
	03	505,35	502,46	536,94
	04	491,05	487,71	521,20
	05	493,84	490,38	523,62
	06	486,10	-	517,45

Índices Físicos

O peso específico seco (γ_{seco}) de cada CP foi determinado a partir do peso seco (tabelas 4.8 a 4.10) dividido pelo volume total, obtido pelas dimensões geométricas médias da amostra apresentadas na tabela 4.5 a 4.7. O peso específico saturado (γ_{sat}), foi calculado da mesma forma, considerando-se o peso da amostra saturada.

A porosidade foi calculada admitindo-se uma saturação das amostras de 100% e utilizando-se a equação:

$$n = \frac{(P_t - P_s)}{V_t \times d_o} \times 100 \quad (4.1)$$

onde:

n é a porosidade da amostra (%);

P_i é o peso da amostra saturada (g);

P_s é o peso da amostra antes da saturação (g);

V_t é o volume total da amostra (cm³);

$d_o = 0,8539$, é a densidade do óleo saturante a 20°C.

A tabela 4.11 traz os índices físicos das amostras.

Tabela 4.11 - Peso específico e porosidade das amostras.

POÇO	Nº do CP	γ_{SECO} (kg/m ³)	γ_{SAT} (kg/m ³)	n (%)
CAM-456	01	2,26	2,32	7,5
	02	2,18	2,23	6,2
	03	2,37	2,41	4,6
	04	2,13	2,22	10,3
	05	2,40	2,42	2,5
	06	2,30	2,35	5,2
	07	2,22	2,26	5,1
	08	2,23	2,31	8,6
	09	2,30	2,34	4,9
	10	2,36	2,40	4,3
	11	2,32	2,36	5,0
	12	2,15	2,20	6,2
CAM-373	04	2,18	2,28	12,1
	05	2,41	2,45	4,5
	06	2,20	2,29	10,0
	07	2,46	2,50	4,0
	08	2,53	2,53	0,3
AP-98	01	2,04	2,16	14,8
	02	1,96	2,10	16,4
	03	1,97	2,11	16,3
AP-125	02	1,92	2,07	17,6
	03	2,00	2,09	18,3

Tabela 4.11-continuação - Peso específico e porosidade das amostras

POÇO	Nº do CP	γ_{SECO} (kg/m ³)	γ_{SAT} (kg/m ³)	n (%)
AP-128	02	1,89	2,08	22,4
AP-153	01	1,93	2,12	21,8
	02	1,99	2,17	20,3
	03	1,96	2,22	29,8
CAM-510	01	2,26	2,38	13,6
CAM-519	01	1,91	2,12	23,9
	02	1,97	2,13	18,5
CAM-529	01	2,08	2,19	13,1
CAM-615	01	1,95	2,09	16,8
LOR-30	01	2,28	2,39	13,7
	02	2,29	2,38	11,0
LOR-34	01	2,12	2,27	17,6
	02	2,25	2,36	12,0
	03	2,14	2,27	17,2
	04	2,13	2,28	17,1
	05	2,14	2,28	17,0
	06	2,13	2,27	16,1

Os resultados da tabela 4.10 mostram pouca homogeneidade entre as amostras da Formação Açú. Estas diferenças sugerem, a princípio, um tratamento por grupos de amostras. Enquanto os CP do poço CAM-456 apresentaram, na maioria dos casos, porosidades semelhantes (a exceção para os CP 04 e 05), o poço CAM-373 não apresentou a mesma característica, mostrando maior heterogeneidade. As demais amostras apresentaram porosidades mais altas, podendo ser consideradas como um outro grupo, em que também foram verificados valores discrepantes. Este foi o caso das amostras AP-153/03 com porosidade de 29,8% e CAM-529/01 com porosidade de 13,1%.

Neste aspecto, as amostras do poço LOR-34, Formação Pendências, mostraram homogeneidade bem maior. Apenas o CP 02 apresentou um resultado que foge significativamente dos demais.

Preparação das Amostras para Ensaio de Compressão Diametral

As amostras para os ensaios de compressão diametral passaram por processos de preparação muito semelhantes aos adotados para os ensaios de compressão axial.

Os CP para ensaio de compressão axial foram amostrados com um comprimento bem superior a 104 mm. Ao efetuar o corte destes CP com serra, a sobra em forma de disco ficou com comprimento próximo a 25,4mm e diâmetro igual ao do CP, que era o necessário para efetuar o ensaio diametral. Os CP para ensaio diametral devem ter uma relação altura/diâmetro entre 0,5 e 1,0.

Após o corte das amostras para ensaio diametral, estas tinham suas faces acertadas. Depois desta fase, os CP passaram pelas etapas de medição e controle das dimensões geométricas, pesagem, secagem em estufa e saturação com óleo **LUBRAX OB-9**. Os resultados do processo são apresentados nas tabelas 4.12 e 4.13.

Tabela 4.12 - Demonstrativo das características geométricas das amostras para ensaio de compressão diametral.

POÇO	Nº do CP	ALTURA (mm)	DIÂMETRO (mm)	RELAÇÃO altura/diâmetro
AP-128	02	30,03	49,24	0,61
AP-153	01	23,64	49,31	0,48
	02	25,33	49,09	0,52
	03	23,29	49,41	0,47
CAM-510	01	25,61	49,49	0,52
CAM-519	01	28,46	49,38	0,58
	02	27,49	49,17	0,56
CAM-529	01	25,77	49,49	0,52
CAM-615	01	25,30	49,13	0,51
LOR-34	01	16,50	49,42	0,33
	03	25,19	49,64	0,51
	04	23,07	49,78	0,46
	05	16,63	49,57	0,34
	06	28,77	49,57	0,58

Tabela 4.13 - Demonstrativo da saturação das amostras para ensaio de compressão diametral, com óleo LUBRAX OB-9 sob vácuo, depois de terem passado pela estufa.

POÇO	Nº do CP	PESO ESTABILIZADO (g)		
		ANTES DA ESTUFA	APÓS SECAGEM EM ESTUFA	SATURADO SOB VÁCUO
AP-128	02	113,21	110,27	115,51
AP-153	01	90,07	87,94	95,61
AP-153	02	94,35	92,17	100,80
AP-153	03	xxx	79,96	88,43
CAM-510	01	107,19	105,82	111,03
CAM-519	01	109,17	106,81	116,42
CAM-519	02	101,69	99,93	108,06
CAM-529	01	101,29	98,78	105,01
CAM-615	01	92,96	91,64	98,50
LOR-34	01	67,08	66,67	71,52
LOR-34	03	105,22	104,48	111,30
LOR-34	04	91,44	90,68	96,40
LOR-34	05	67,91	67,34	71,87
LOR-34	06	118,07	117,30	125,01

CAPÍTULO V

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo foi reservado à apresentação dos resultados obtidos experimentalmente, bem como a sua análise e comparação com resultados disponíveis na literatura.

Durante a fase inicial dos ensaios triaxiais, em que a pressão hidrostática cresceu de zero até a pressão confinante especificada, obtiveram-se os valores das compressibilidades volumétricas das amostras. Na fase seguinte, a pressão confinante foi mantida constante enquanto a tensão axial foi aumentada continuamente até ocorrer a ruptura do corpo de prova, com o que obtiveram-se os parâmetros elásticos. Os parâmetros de resistência, ângulo de atrito (ϕ) e coeficiente de coesão (**c**), foram calculados a partir das curvas de tensão de ruptura *versus* pressão de confinamento, admitindo-se o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Ensaio Triaxiais

Fase Hidrostática

Compressibilidade volumétrica (C). As amostras dos lotes 1 e 2 (tabelas 5.1 e 5.2), provenientes dos poços do Campo de Canto do Amaro, Formação Açu, foram ensaiadas pelo método denominado de convencional (vide descrição no capítulo III, na seção **Tipos de Ensaio**) e, a partir da fase hidrostática, obtiveram-se os valores das compressibilidades volumétricas para cada CP.

O ensaio para determinação da compressibilidade volumétrica, foi realizado a uma taxa de 0,2 MPa/s, que é a adotada pelo LMR do CENPES em ensaios desta natureza, atendendo porém, a condição de ensaio drenado.

Os valores de C foram calculados a partir das curvas de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica, utilizando-se a expressão 3.3.

As expressões gerais que fornecem o valor da deformação ou variação volumétrica, ε_v , sem a linearização usual que resulta da hipótese de pequenas deformações, são dadas por:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_3 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_3 \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{l_i - l_{0i}}{l_{0i}} \times 100, \quad (i = 1, 2 \text{ e } 3) \quad (5.2)$$

onde:

ε_v é a deformação volumétrica da amostra em função da pressão de confinamento aplicada;

ε_1 , ε_2 e ε_3 são os valores das deformações sofridas pelo corpo nas três direções principais, em valor percentual (ε_i);

l_0 e l_i são as respectivas dimensões original e deformada da amostra em uma das três direções principais.

A expressão 5.1, não linearizada, toma a forma dada pela expressão 5.3, quando a amostra ensaiada tem formato cilíndrico.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_h + 2 \cdot \varepsilon_r + 2 \cdot \varepsilon_h \cdot \varepsilon_r + \varepsilon_r^2 + \varepsilon_r^2 \cdot \varepsilon_h \quad (5.3)$$

onde:

ε_r e ε_h são as respectivas deformações nas direções radial e axial da amostra, cujas expressões são dadas por,

$$\varepsilon_r = \frac{r - r_0}{r_0} \times 100 \text{ (\%)} \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_h = \frac{h - h_0}{h_0} \times 100 \text{ (\%)} \quad (5.5)$$

As expressões 5.2 e 5.3 são denominadas não linearizadas por apresentarem todos os termos, ou seja, não sofreram nenhum tipo de simplificação. Porém, para a grande maioria das rochas como granito, mármore, certos arenitos, etc. estas equações podem assumir uma forma mais simplificada, ou linearizada, desprezando-se os termos de segunda e terceira ordens. Esta simplificação pode ser feita em virtude de estes materiais apresentarem pequenas deformações quando submetidos a um estado de tensão. Sendo assim, as equações tomam as formas:

$$\varepsilon_v = \Delta v/v_0 = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (5.6)$$

$$\varepsilon_v = \Delta v/v_0 = \varepsilon_h + 2.\varepsilon_r \quad (5.7)$$

O LMR do CENPES admite a forma linearizada na determinação da variação volumétrica dos corpos de prova durante os ensaios.

Na determinação da compressibilidade volumétrica (C) das amostras deste projeto, resolveu-se verificar o erro cometido ao se utilizar a forma linearizada. Constataram-se diferenças da ordem de 65% no valor da compressibilidade de algumas amostras (vide tabelas 5.1 e 5.2). A justificativa para tais diferenças pode ser atribuída as características do material ensaiado. Os arenitos rasos da Formação Açu são pouco consolidados (pouco compactados), mal cimentados e apresentaram valores relativamente altos de compressibilidade volumétrica (C), ou seja, as amostras se deformaram bastante sob o efeito das pressões hidrostáticas aplicadas. Como conseqüência, os termos de segunda e terceira ordens da equação 5.3 não podem ser desprezados sob pena de erros consideráveis.

As tabelas 5.1 e 5.2 apresentam os valores de compressibilidade volumétrica (C) a partir das deformações volumétricas linearizadas e não linearizadas e os respectivos erros cometidos em virtude da linearização. Os erros relativos (E_r) foram calculados utilizando-se a equação:

$$E_r = \frac{C_n - C_l}{C_n} \times 100 \quad (5.8)$$

onde:

C_n é o valor da compressibilidade volumétrica obtido a partir da deformação volumétrica não linearizada.

C_l é o valor da compressibilidade volumétrica obtido a partir da deformação volumétrica linearizada

Segundo Goodman (1989), ao se aplicar uma pressão hidrostática sobre uma rocha, ocorre uma redução do volume e eventualmente colapso de poros. Porém, não surge um pico de carga ou seja, a rocha aparentemente pode receber acréscimos de carga sem se romper. A curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica, apresenta em geral a concavidade voltada para cima (figura 5.1) e pode ser dividida em quatro regiões distintas: a primeira, a níveis mais baixos de pressão, é onde ocorre o fechamento de microfissuras e uma pequena compressão dos grãos da rocha; a segunda região, com níveis de pressão maiores, é onde ocorre a compressão propriamente dita da rocha. Isto corresponde a deformação dos poros e à compressão dos grãos. A curva neste trecho é aproximadamente linear cuja inclinação fornece o módulo de deformação volumétrica (*bulk modulus*, K) que é o inverso da compressibilidade volumétrica ou compressibilidade total ($C=1/K$). O colapso dos poros (terceira região), em arenito bem cimentados, só ocorre a pressões superiores a 100MPa porém, para rochas mal cimentadas, este fenômeno pode ocorrer em níveis bem mais baixos. Na quarta e última região, como os poros da rocha estão totalmente colapsados, ocorre apenas a compressão dos grãos e neste caso, a inclinação da curva torna-se progressivamente maior.

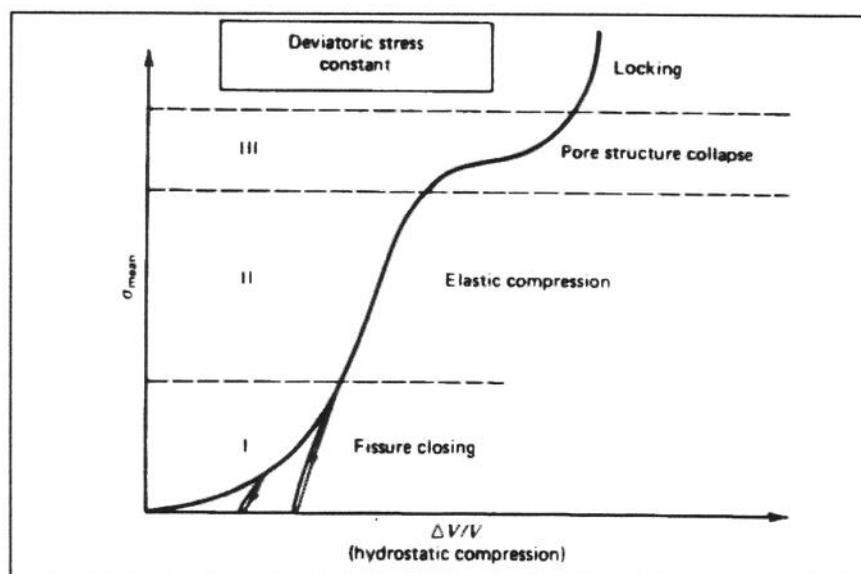


Figura 5.1 - Curva de tensão hidrostática versus deformação volumétrica (segundo Goodman, 1989).

Os valores das compressibilidades volumétricas (C) apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2, foram obtidos em vários pontos das curvas de pressão de confinamento versus deformação volumétrica linearizada e não linearizada, mesmo sabendo que muito destes pontos estão fora da segunda região definida por Goodman (1989). O objetivo, entre outros, foi o de mostrar a influência que este parâmetro pode sofrer pela existência de microfissuras e pelo baixo nível de compactação original das amostras. A compressibilidade foi obtida graficamente a partir do inverso da tangente à curva de pressão de confinamento versus deformação volumétrica, para cada pressão escolhida.

Tendo como base as análises feitas sobre as formas disponíveis para a medição da variação volumétrica, foi possível verificar que o valor da compressibilidade volumétrica obtidas através das curvas não linearizadas (C_n) são mais representativos, pois baseia-se em uma equação mais exata. Em função destes resultados, todos os cálculos e curvas envolvendo deformações volumétricas neste projeto passaram a ser feitos utilizando-se a equação não linearizada (equação 5.3).

Tabela 5.1 - Compressibilidades volumétricas das amostras do primeiro lote, obtidas a partir das curvas de pressão de confinamento versus deformação volumétrica linearizadas e não linearizadas e os respectivos erros relativos.

POÇO	Nº do CP	TEMPER. DE ENSAIO (°C)	PRESSÃO DE CONFINAM. (MPa)	COMPRESSIBILIDADE (C) (MPa ⁻¹)		ERRO RELATIVO (%)
				LINEARIZADA	NÃO LINEARIZADA	
CAM-456	06	24	2,5	1,52E-3	1,83E-3	16,9
			5,0	5,87E-4	7,97E-4	26,3
			7,5	4,19E-4	5,97E-4	29,8
			10,0	3,80E-4	5,35E-4	29,0
	10		2,5	1,91E-3	2,46E-3	22,4
			5,0	6,26E-4	8,41E-4	25,6
			7,5	4,25E-4	6,34E-4	33,0
			10,0	3,25E-4	5,04E-4	35,5
		15,0	2,47E-4	4,18E-4	40,9	
		20,0	2,02E-4	3,68E-4	45,1	
	08	80	2,5	2,10E-3	2,36E-3	11,0
			5,0	1,21E-3	1,89E-3	36,0
			7,5	5,15E-4	8,73E-4	41,0
			10,0	4,11E-4	7,62E-4	46,1
	05		2,5	1,23E-3	1,47E-3	16,3
			5,0	4,96E-4	6,40E-4	22,5
			7,5	2,34E-4	3,15E-4	25,7
			10,0	1,37E-4	2,01E-4	31,8
		15,0	1,07E-4	1,60E-4	33,1	
		20,0	1,07E-4	1,60E-4	33,1	

Tabela 5.2 - Compressibilidades volumétricas das amostras do segundo lote, obtidas a partir das curvas de pressão de confinamento versus deformação volumétrica linearizadas e não linearizadas e os respectivos erros relativos.

POÇO	Nº do CP	TEMPER. DE ENSAIO (°C)	PRESSÃO DE CONFINAM. (MPa)	COMPRESSIBILIDADE (C) (MPa ⁻¹)		ERRO RELATIVO (%)
				LINEARIZADA	NÃO LINEARIZADA	
CAM-373	06	80	2,5	1,61E-3	2,03E-3	20,7
			5,0	7,11E-4	9,80E-4	26,9
			7,5	4,46E-4	6,49E-4	31,3
			10,0	3,22E-4	4,86E-4	33,7
			15,0	2,59E-4	3,72E-4	30,4
	07	80	2,5	7,65E-4	8,34E-4	8,3
			5,0	4,62E-4	5,38E-4	14,1
			7,5	3,26E-4	4,39E-4	25,7
	08	150	2,5	3,88E-4	4,15E-4	6,5
			5,0	2,90E-4	3,19E-4	9,1
			7,5	2,25E-4	2,56E-4	12,1
			10,0	1,67E-4	2,04E-4	18,1
			15,0	1,27E-4	1,63E-4	22,1
	04	150	2,5	1,40E-3	1,78E-3	21,3
			5,0	6,13E-4	6,13E-4	38,1
AP-98	01	24	2,5	2,28E-3	3,56E-3	36,0
			5,0	1,35E-3	2,47E-3	45,3
			7,5	1,00E-3	2,16E-3	53,7
			10,0	8,23E-4	1,93E-3	57,4
			15,0	4,72E-4	1,38E-3	65,8
	02	150	2,5	1,73E-3	2,18E-3	20,6
			5,0	8,80E-4	1,35E-3	34,8
			7,5	6,07E-4	1,04E-3	41,9
			2,5	1,28E-3	1,55E-3	17,4
			5,0	6,47E-4	8,88E-4	27,1
AP-125	02	150	7,5	4,93E-4	6,80E-4	27,5
			2,5	1,34E-3	1,65E-3	18,8
			5,0	7,81E-4	1,05E-3	25,6
	03	150	7,5	5,56E-4	7,98E-4	30,3
			10,0	4,28E-4	6,50E-4	34,2
			15,0	3,26E-4	5,25E-4	37,9
			20,0	2,97E-4	5,21E-4	43,0

Para os níveis da pressões de confinamento adotados neste projeto (até 20 MPa), só foi possível identificar as duas primeiras regiões, comprovando com isto que não houve colapso de poros nas amostras. As figura 5.2, 5.3 e 5.4 apresentam alguns dos resultados obtidos em ensaios hidrostáticos, onde podem ser verificadas as diferenças entre as curvas de deformação volumétrica linearizada e não linearizada. O anexo 1 deste trabalho, traz todas as curvas de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica linearizada e não linearizada obtidas a partir das amostras de rocha.

É possível perceber que as diferenças entre uma curva e outra varia de amostra para amostra e este comportamento está relacionado a capacidade de o material se deformar sob o efeito da pressão hidrostática. Por exemplo, a figura 5.2 refere-se ao ensaio de compressibilidade feito com a amostra AP-98/01 que no ensaio de compressão triaxial a 24°C, apresentou um comportamento dúctil e uma tensão de ruptura (σ_1) de 47,5 MPa, para tensão de confinamento $\sigma_2=\sigma_3=15$ MPa. A figura 5.3 refere-se ao ensaio de compressibilidade com a amostra CAM-373/08, que no ensaio de compressão triaxial 150°C, apresentou um comportamento dúctil e uma tensão de ruptura (σ_1) de 114 MPa, para a mesma tensão de confinamento. Concluiu-se então que a amostra CAM-373/08 era mais rígida e portanto, deformou-se menos sob o efeito da hidrostática.

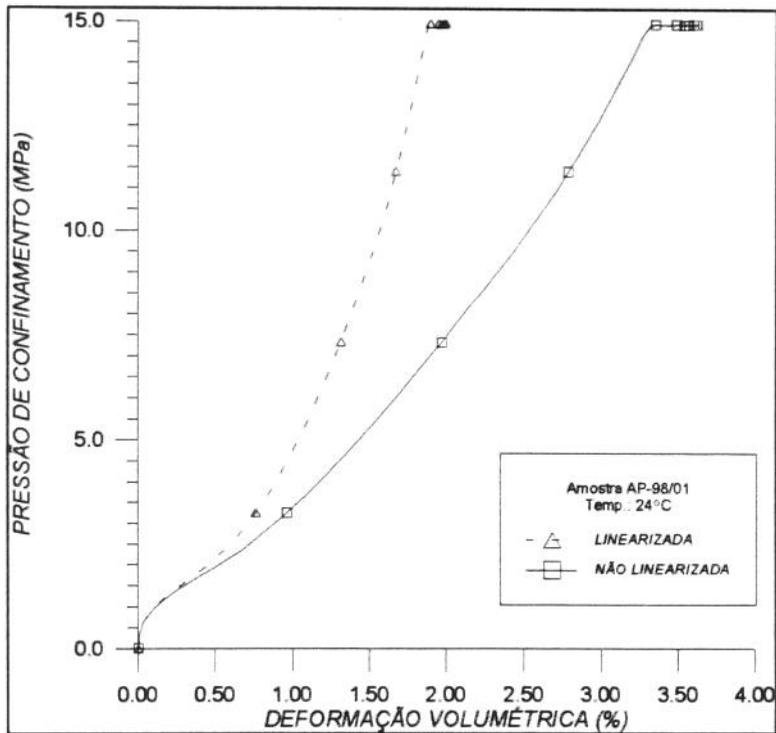


Figura 5.2 - Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a temperatura de 24°C, com a amostra AP-98/01.

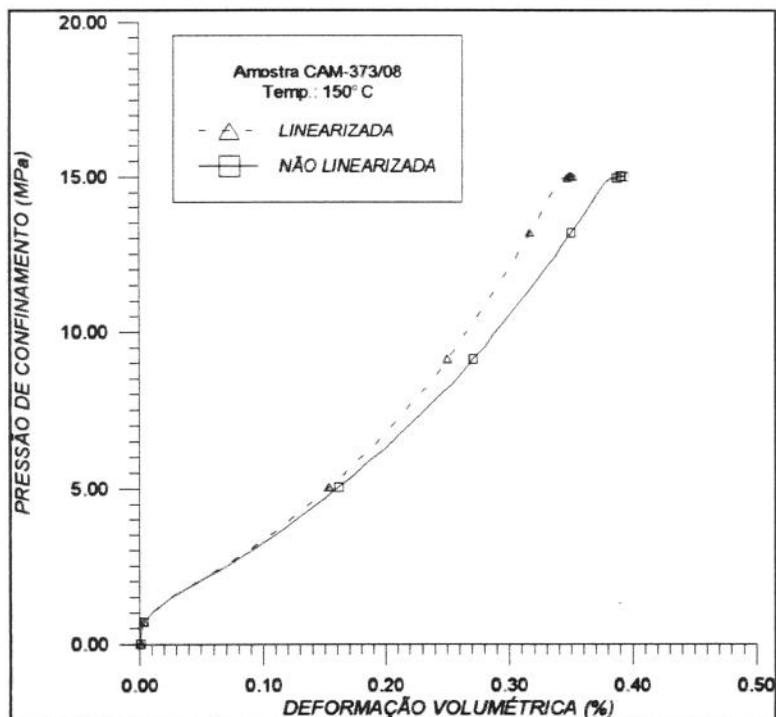


Figura 5.3 - Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a temperatura de 150°C, com a amostra CAM-373/08.

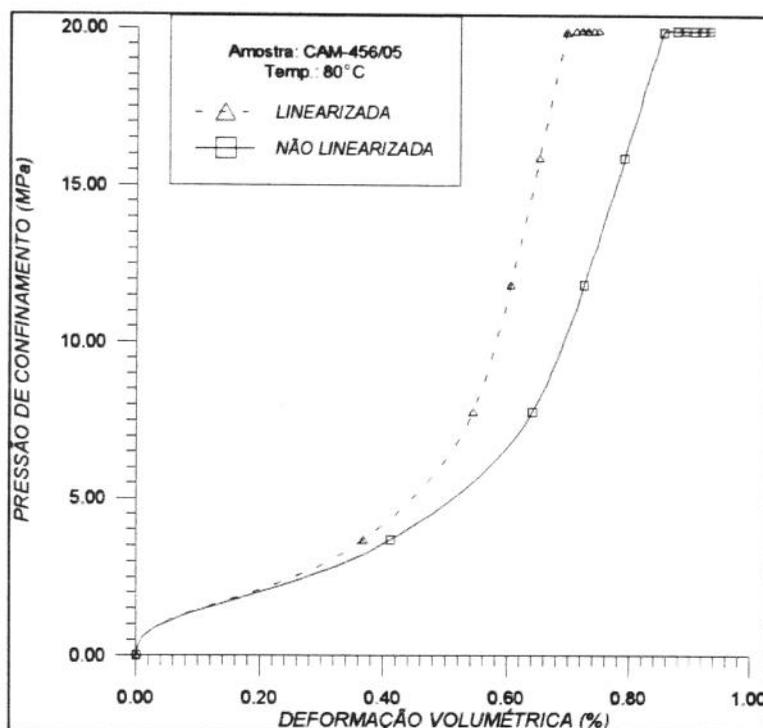


Figura 5.4 - Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a temperatura de 80°C, com a amostra CAM-456/05.

Todas as curvas de pressão *versus* deformação volumétrica apresentaram até aproximadamente 1,5 MPa, pequenos valores de deformação (abaixo de 0,1%), indicando que as amostras foram praticamente insensíveis a este nível de pressão. Porém, não foi possível identificar o motivo pelo qual a curva de deformação volumétrica apresentou neste trecho, concavidade voltada para baixo (vide apêndice 1). Para a maioria das curvas, observa-se que, até 7,5 MPa o material se encontra na primeira região de deformação apresentada e descrita por Goodman (1989) (figura 5.1). A partir daí, as amostras começam a entrar na segunda região, que pode ser identificada pela forma mais suave com que a curva muda de inclinação. Porém, somente para os casos em que foram feitos ensaios com pressões de confinamento ultrapassando 10 MPa, foi possível caracterizar bem a presença da segunda região de deformação na maioria dos casos. Isto sugere que apenas estes valores sejam utilizados, uma vez que, em princípio o material é único. Acontece que abaixo de 10 MPa, o ensaio foi insuficiente para a caracterização.

Os valores das deformações volumétricas alcançados foram considerados altos. Praticamente todas as amostras submetidas ao ensaio

de compressibilidade (ao todo foram feitos ensaios para obtenção de compressibilidade em 16 amostras), variaram em mais de 0,5% no seu volume inicial até ser atingida a pressão de 5 MPa. E nos casos em que a pressão de confinamento ultrapassou 15 MPa, as deformações volumétricas assumiram valores até superiores a 2% - como a amostra AP-98/01 (figura 5.2), cuja deformação atingiu o valor de 3,4% com 15 MPa de pressão de confinamento. Já a amostra CAM-456/03 apresentou um comportamento atípico em sua curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica (figura 5.5), demonstrando baixíssima variação de volume e um formato de curva incomum.

Todas as amostras continuaram a se deformar após a conclusão do ensaio, sob o efeito da pressão hidrostática. Este fenômeno comprovou que o material apresenta deformações dependentes do tempo para um nível de tensão constante. O pequeno intervalo de tempo (entre 1 e 2 minutos) após a conclusão do ensaio hidrostático em que as amostras apresentaram este tipo de deformação, correspondeu ao necessário para as manobras e ajustes que normalmente antecederam a fase seguinte, que é a cisalhante.

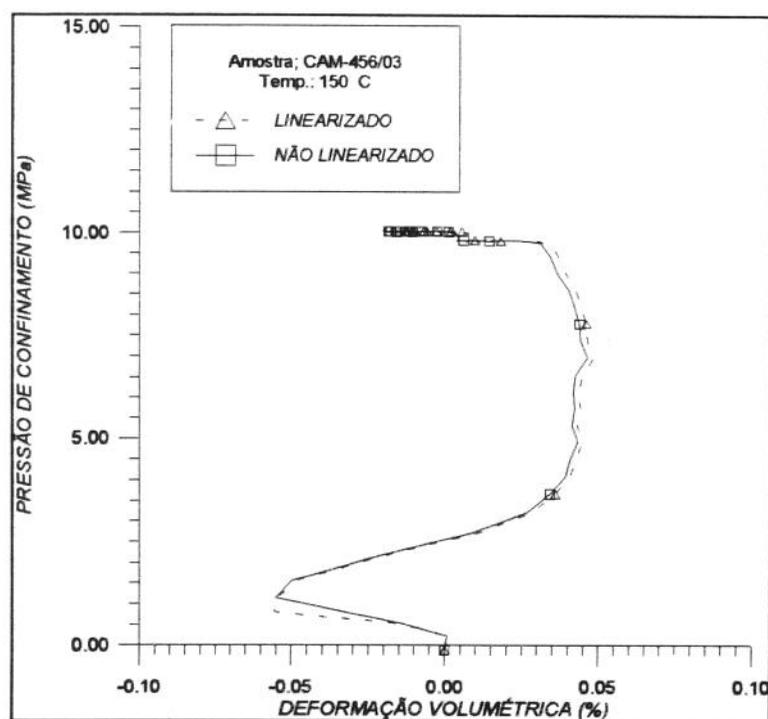


Figura 5.5 - Curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica da amostra CAM-456/03.

Análise da Influência da Temperatura sobre a Compressibilidade Volumétrica (C). Os ensaios para determinação da compressibilidade volumétrica foram conduzidos nas três temperaturas previstas para este projeto. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2. As figuras 5.6, 5.7 e 5.8 demonstram a variação dos valores da compressibilidade volumétrica (C) com a temperatura e a pressão de confinamento. Estas curvas foram traçadas a partir dos dados retirados das tabelas sendo que, os valores de compressibilidade volumétrica utilizados referem-se as curvas de deformação volumétrica não linearizadas, ou seja, $C=C_n$.

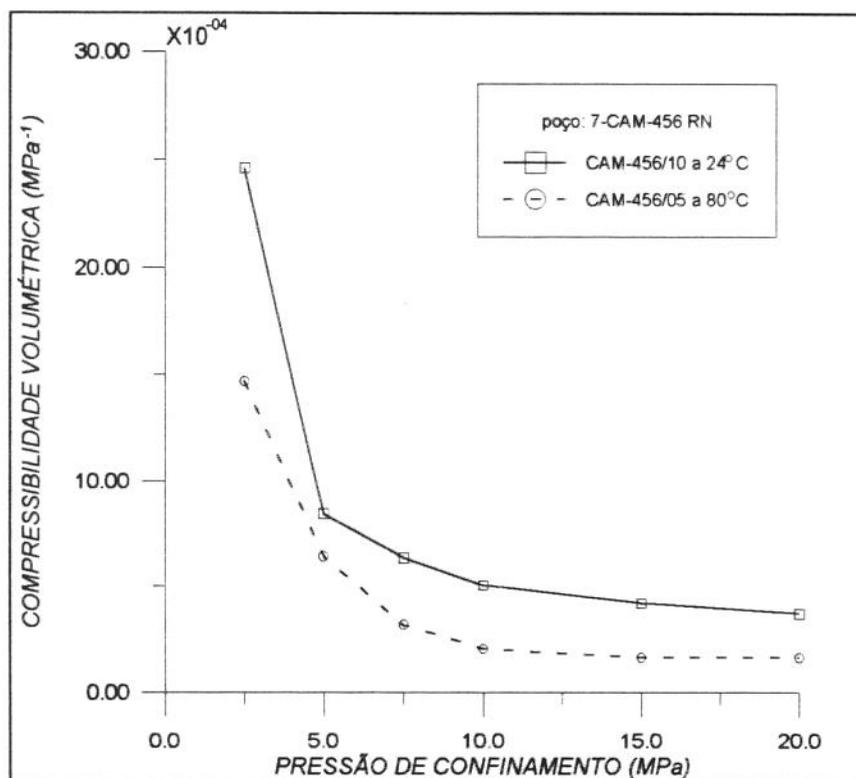


Figura 5.6 - Curvas de compressibilidade volumétrica não linearizada versus pressão de confinamento do poço CAM-456 nas temperaturas de 24° e 80°C.

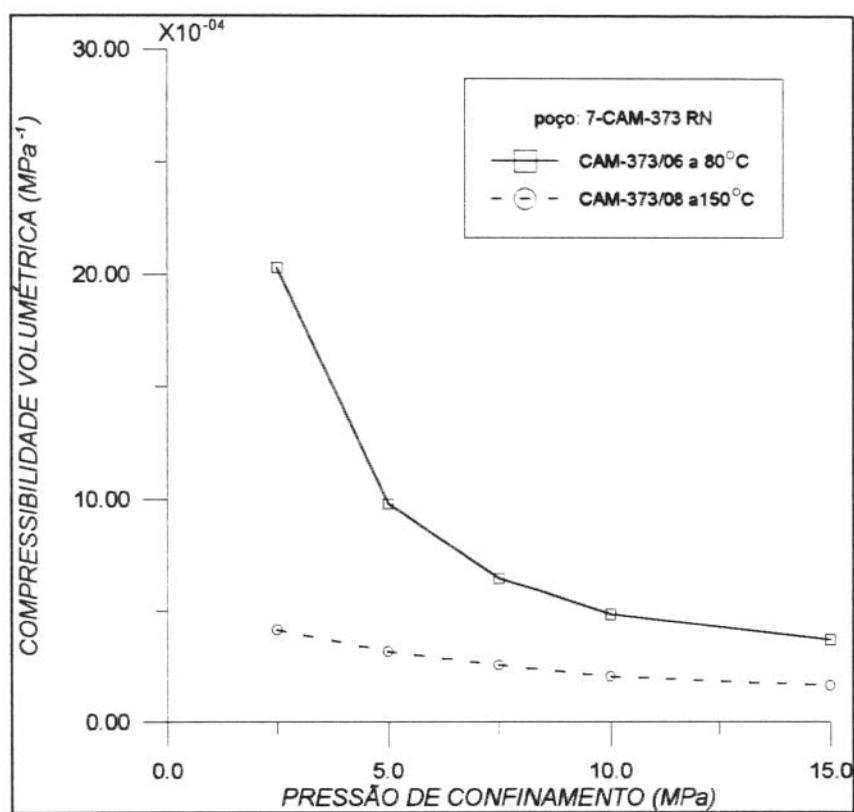


Figura 5.7 - Curvas de compressibilidade volumétrica versus pressão de confinamento não linearizada do poço CAM-373 nas temperaturas de 80° e 150°C.

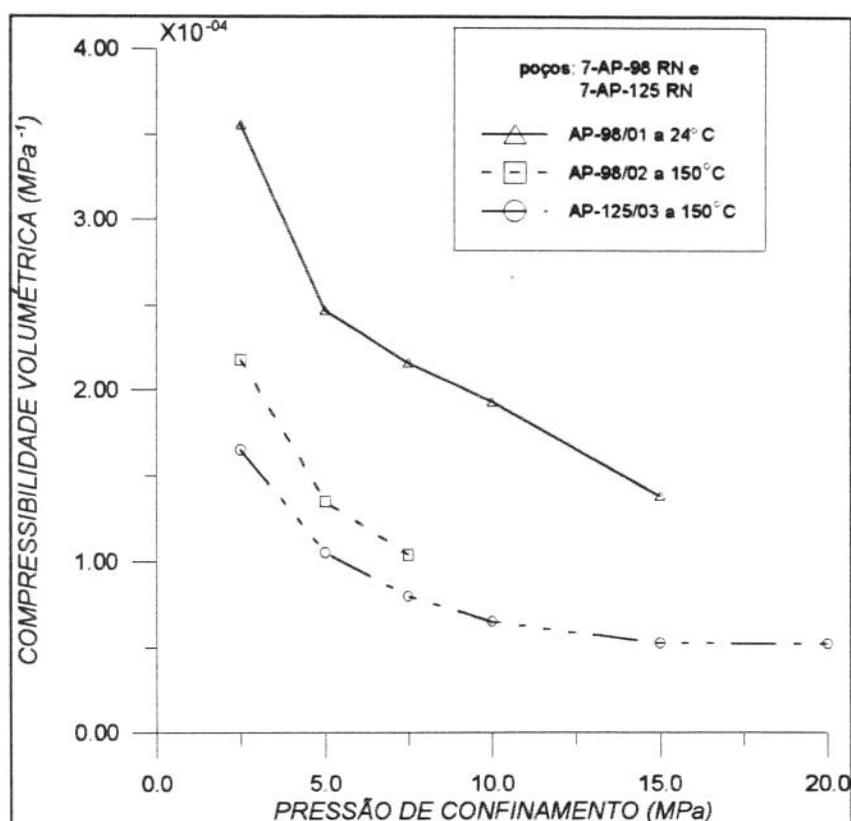


Figura 5.8 - Curvas de compressibilidade volumétrica não linearizada versus pressão de confinamento dos poços AP-98 e AP-125 nas temperaturas de 24° e 150°C.

As figuras 5.6 e 5.7 representam os resultados obtidos a partir dos poços CAM-456 e CAM-373 respectivamente enquanto a figura 5.8 representa os resultados para os poços AP-98 e AP-125. Com a apresentação neste formato, reduziram-se as diferenças naturais existentes entre os CP de poços distintos. Os critérios para escolha das amostras que seriam comparadas entre si foram: poço de origem, composição mineralógica e a descrição macroscópica e microscópica do material. O objetivo foi o de garantir uma maior homogeneidade.

A figura 5.6 apresenta o comportamento de C_n para as temperaturas de 24°C e 80°C do poço CAM-456. As curvas mostraram grande inclinação até 7,5 MPa porém, a partir deste ponto tornaram-se mais suaves. Segundo Goodman (1989) e Adams e Williamson (1923), apud Vutukuri e Lama (1978), este fenômeno corresponde ao fechamento gradual das microfissuras existentes na rocha. Até 7,5 MPa a maior parte das microfissuras foi fechada, reduzindo drasticamente a influência desta variável sobre a compressibilidade do material. Goodman (1989) observa que

somente após o fechamento das microfissuras seria recomendável determinar o módulo de deformação volumétrica (*bulk modulus*).

Após o fechamento das microfissuras, a compressibilidade do material passa a ser mais influenciada pelo comportamento dos minerais constituintes e pela estrutura dos poros aos efeitos da pressão hidrostática aplicada.

Os resultados encontrados nos ensaios, mostraram uma forte influência da temperatura sobre C_n das amostras de arenito do poço CAM-456. Para efeito de comparação, escolheram-se dois pontos das curvas de compressibilidade volumétrica *versus* pressão de confinamento. Os valores de compressibilidade a 10 MPa de pressão de confinamento nas temperaturas de 24°C e 80°C foram respectivamente $5,04 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ e $2,01 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$. Estes valores indicam que houve uma redução em torno de 60% no valor de C_n quando a temperatura subiu de 24°C (temperatura ambiente) para 80°C. Observando-se o que ocorre a 20 MPa, onde praticamente não existe mais influência das microfissuras, os valores das compressibilidades para 24°C e 80°C são respectivamente $3,68 \times 10^{-4}$ e $1,60 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, que demonstram ainda uma diferença de 56,5%.

A partir da tabela 5.1 verifica-se ainda que a amostra CAM-456/08 apresentou valores de compressibilidade volumétrica a 80°C até 10 MPa (pressão de confinamento prevista para esta amostra), maiores do que apresentaram as amostras CAM-456/06 e CAM-456/10, que foram ensaiadas à temperatura ambiente. Este tipo de comportamento também foi verificado em outras dentre as 16 amostras submetidas ao ensaio hidrostático em níveis mais baixos de pressão de confinamento e sempre esteve relacionado a **fase I** da curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica. Este fenômeno pode estar relacionado à influência das microfissuras sob a compressibilidade volumétrica.

Da análise feita sobre o comportamento dos arenitos provenientes do poço CAM-373 a partir da figura 5.7, percebeu-se que a amostra ensaiada a 80°C (CP CAM-373/06) apresentou alta inclinação da curva de compressibilidade volumétrica *versus* pressão de confinamento até 10 MPa, mais alta que a apresentada pela amostra ensaiada a 150°C (CP CAM-373/08). A tabela 4.8 pode fornecer um indicativo importante desta diferença pois a coluna onde aparecem os pesos antes e após a saturação

demonstra que o CP CAM-373/08 praticamente não absorveu óleo. Isto significa que existem poucos espaços vazios a serem preenchidos, ou seja, existem poucos poros e poucas fissuras. Trata-se então de um material bastante compactado.

A partir de 10 MPa, as inclinações das curvas de compressibilidade *versus* pressão de confinamento do poço CAM-373 reduzem significativamente, apresentando um aspecto semelhante aos obtidos com as amostras do poço CAM-456. Mais uma vez, se verificou a forte influência exercida pela temperatura sobre a compressibilidade dos arenitos do poço CAM-373. A 10 MPa os valores de compressibilidades para 80° e 150°C são respectivamente $4,86 \times 10^{-4}$ e $2,04 \times 10^{-4}$ MPa⁻¹, demonstrando que houve uma redução de 58% nesta variável quando a temperatura subiu de um valor para o outro. A 15 MPa, os valores das compressibilidades obtidas a 80° e 150°C são respectivamente $3,72 \times 10^{-4}$ e $1,63 \times 10^{-4}$ MPa⁻¹ que ainda representa uma diferença de 56,2%.

Para a análise do comportamento dos arenitos dos poços AP-98 e AP-125 foram traçadas as curvas de compressibilidade volumétrica *versus* pressão de confinamento obtidas nos ensaios a 24° e 150°C. Na figura 5.8, a curva a 24°C foi originada a partir do comportamento do CP AP-98/01 até atingir 15 MPa; a amostra AP-98/02 forneceu uma curva a 150°C porém, com pressão final de 7,5 MPa; a amostra AP-125/03 forneceu mais uma curva a 150°C porém, com pressão final de 20 MPa. Todas as três curvas demonstraram que, para níveis mais baixos de pressão, os valores de C_n foram bastante afetados pela presença das microfissuras. Inclusive, verificou-se que apenas a amostra AP-125/03 apresentou boa estabilização dos valores de compressibilidades após 10 MPa.

Para verificar qual a influência exercida pela temperatura sobre a compressibilidade dos arenitos do poço AP-98, partiu-se para a comparação dos valores desta variável a 24° e 150°C na pressão de 7,5 MPa (ponto final no ensaio com a amostra AP-98/02). Os valores obtidos são respectivamente $2,16 \times 10^{-4}$ e $1,04 \times 10^{-4}$ MPa⁻¹, que representam uma redução de 52% na compressibilidade volumétrica quando a temperatura variou de 24° para 150°C.

No caso da comparação feita entre os resultados a 24°C com o CP AP-98/01 e a 150°C com o CP AP-125/03, desta vez na pressão de 15

MPa, percebe-se que houve uma redução de 62% no valor de C_n devido ao aumento da temperatura. Neste caso os valores de compressibilidades comparadas foram $1,38 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ a 24°C e $5,25 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ a 150°C .

Ao comparar os resultados acima com outros encontrados na literatura, verificou-se inicialmente que não existe uma quantidade razoável de dados que possam ser utilizados como fontes seguras e bem embasadas. Somerton (1992), apresentou vários resultados de outros pesquisadores e colaboradores seus, que avaliaram a compressibilidade volumétrica e a compressibilidade do volume poroso. Foram eles: Newman (1973), que não conseguiu encontrar uma relação confiável entre a compressibilidade do volume poroso e a temperatura, de 256 amostras de arenitos e carbonatos de diversos poços e reservatórios de sub-superfície; Von Gonten e Choudhary (1969), que verificaram um aumento de 20% na compressibilidade do volume poroso de amostras do arenito Berea, quando a temperatura subiu de 20° para 200°C ; El Shaarani (1973), verificou que a compressibilidade volumétrica (C) de amostras dos arenitos Berea, Bandera e Boise, aumentou quando a temperatura variou de 20° para 200°C , embora esta variação tenha sido pequena. Somerton ainda observa que são poucos os resultados sobre a avaliação do efeito da temperatura sobre a compressibilidade de rochas sedimentares, ou seja, trata-se de um assunto pouco explorado.

Conclusão. A análise global dos resultados apresentados nos parágrafos anteriores, permitiu concluir que a compressibilidade volumétrica (C) dos arenitos friáveis da formação Açú é fortemente influenciada pela temperatura. Esta constatação baseia-se nas variações percentuais obtidas, que foram superiores a 50% em todos os casos analisados. Os resultados apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2, mostraram que houve uma tendência quase unânime de queda nos valores de C a medida que a temperatura aumenta. Porém, não foi possível estabelecer uma correlação entre a compressibilidade volumétrica e a temperatura.

Estes resultados, a que tudo indica, contrariam os poucos dados encontrados na literatura. É bom frisar que os resultados apresentados por Somerton (1992), referiram-se a rochas com características físicas distintas dos materiais utilizadas neste projeto. O arenito BEREA, por exemplo, caracteriza-se pela sua boa homogeneidade, compactação e seleção dos grãos que constituem o arcabouço da rocha, enquanto que estas

características faltam aos arenitos da Formação Açú. Outras diferenças podem ainda ser encontradas a partir da composição mineralógica destas duas rochas. Neste aspecto, o arenito BEREÁ caracteriza-se pela alta concentração de quartzo (85%) e baixa de argilas (7%) e carbonatos (1%) diferindo mais uma vez do arenitos da Formação Açú. Estes fatores sugerem que o comportamento da compressibilidade volumétrica depende bastante das características físicas do material.

Porém, a falta de um comportamento bem definido para a compressibilidade aponta para a necessidade de um estudo mais extenso e completo, utilizando-se um maior número de amostras de diversas litologias.

Fase Cisalhante

Assim como no caso dos ensaios para determinação da compressibilidade, avaliaram-se durante a fase cisalhante as diferenças entre as curvas de deformação volumétrica linearizada e não linearizada das amostras nos ensaios convencional e múltiplo. As figuras de 5.9 a 5.15 apresentam as curvas utilizadas na avaliação da deformação volumétrica, onde se verificam que as diferenças encontradas são menores se comparadas aos ensaios de compressibilidade na fase hidrostática.

As curvas obtidas nos ensaios convencionais (figuras de 5.9 a 5.12), mostram que as maiores diferenças entre as curvas linearizada e não linearizada de cada amostra ocorrem no trecho onde o corpo de prova está em processo de escoamento até atingir a ruptura. Porém, do início das curvas e enquanto a amostra se encontrava na fase elástica, as diferenças são pequenas. Outro detalhe interessante observado foi que, para algumas amostras, a curva linearizada chegou a ter uma trajetória oposta àquela normalmente apresentada na literatura (Vutukuri e Lama, 1978), como por exemplo nas figuras 5.10 e 5.11.

As curvas de deformação volumétrica linearizada e não linearizada obtidas durante a fase cisalhante dos ensaios múltiplos (figuras 5.13 a 5.15), mostraram comportamentos semelhantes, no primeiro estágio, aos encontrados nos ensaios convencionais, ou seja, com diferenças pequenas antes e durante a fase elástica da amostra. No trecho representativo do escoamento do material (logo após a fase elástica), durante o pri-

meiro estágio e durante o(s) estágio(s) seguinte(s), as curvas mostraram que nestes regiões dos gráficos, as amostras tiveram acentuada deformação volumétrica produzindo diferenças mais sensíveis entre as curvas linearizada e não linearizada.

A partir destes resultados, resolveu-se adotar as curvas não linearizadas como representativas de todos os fenômenos relacionados às deformações volumétricas das amostras.

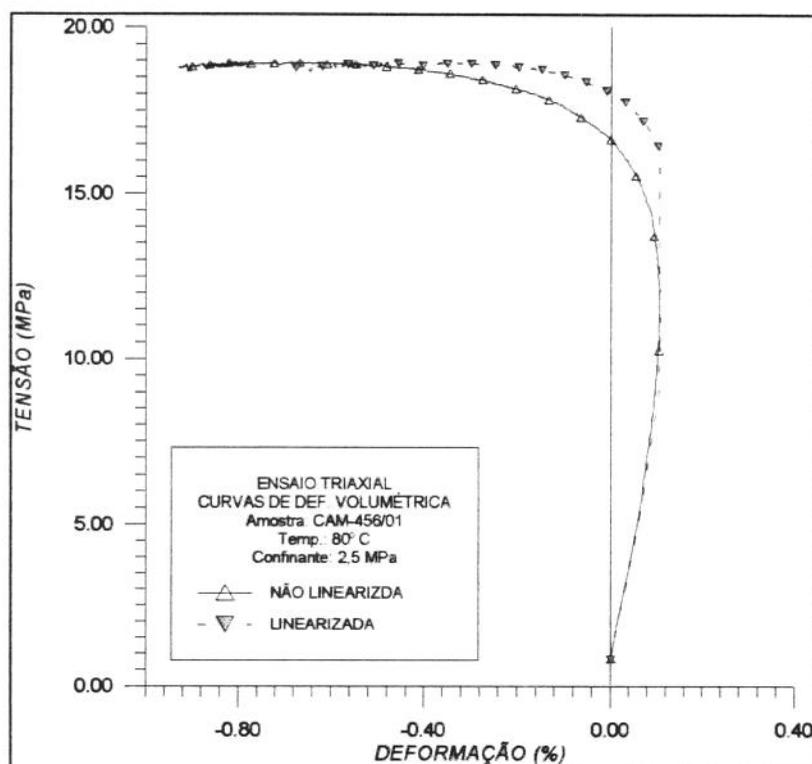


Figura 5.9 - Curvas de tensão versus deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-456/01.

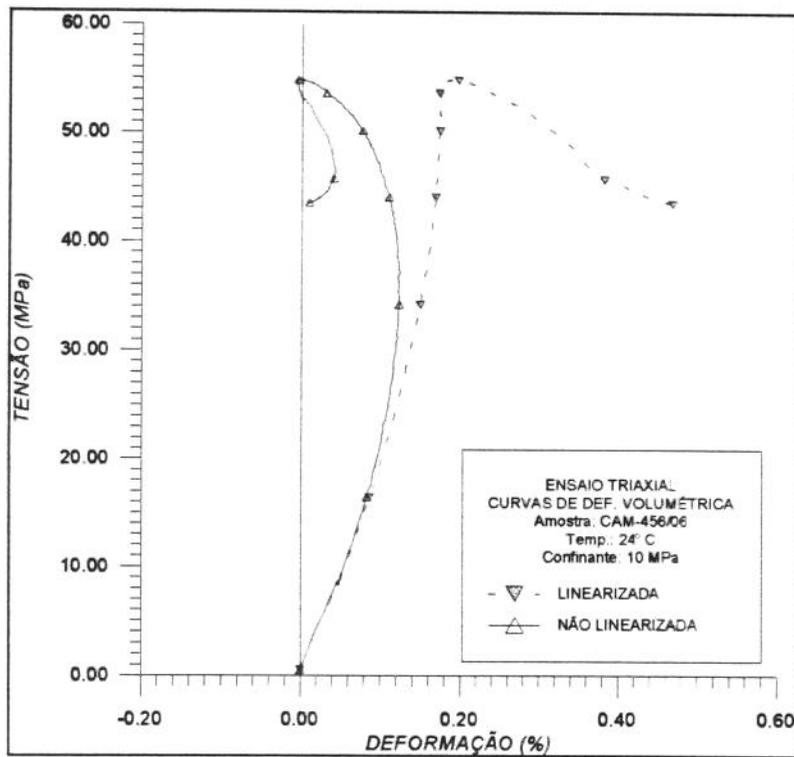


Figura 5.10 - Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-456/06.

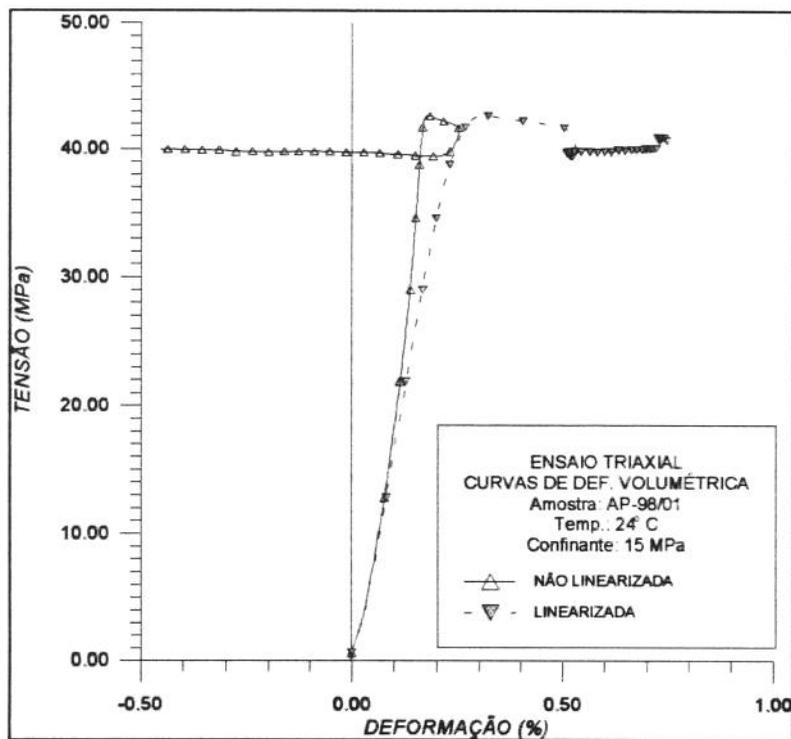


Figura 5.11 - Curvas de tensão *versus* deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-456/01.

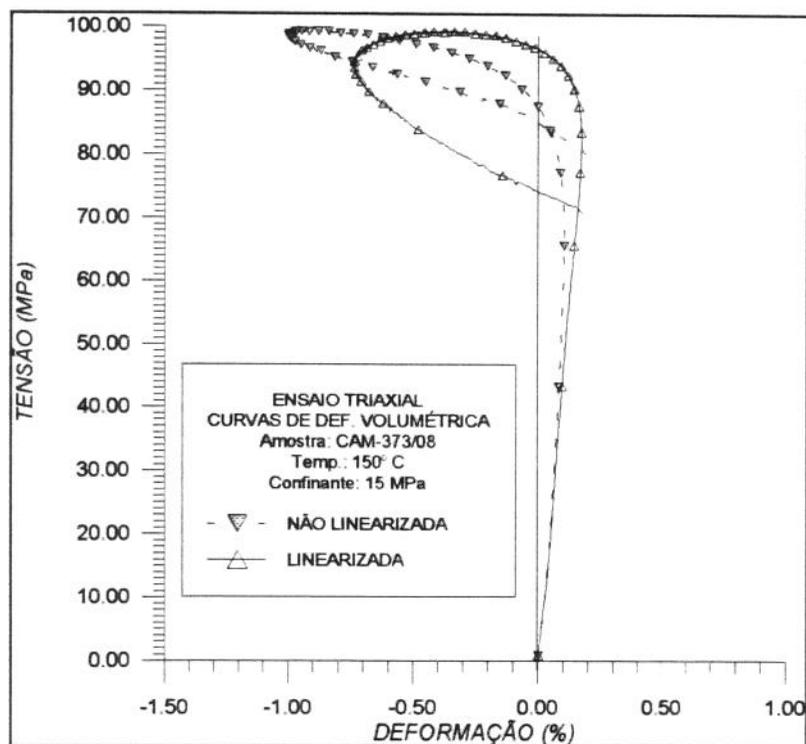


Figura 5.12 - Curvas de tensão versus deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio triaxial da amostra CAM-373/08.

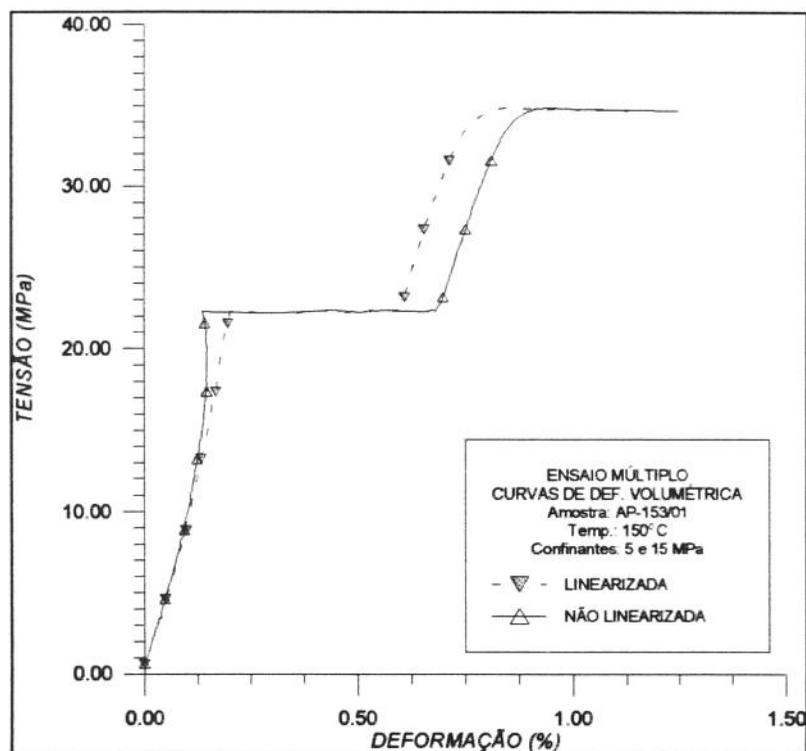


Figura 5.13 - Curvas de tensão versus deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio múltiplo da amostra AP-153/01.

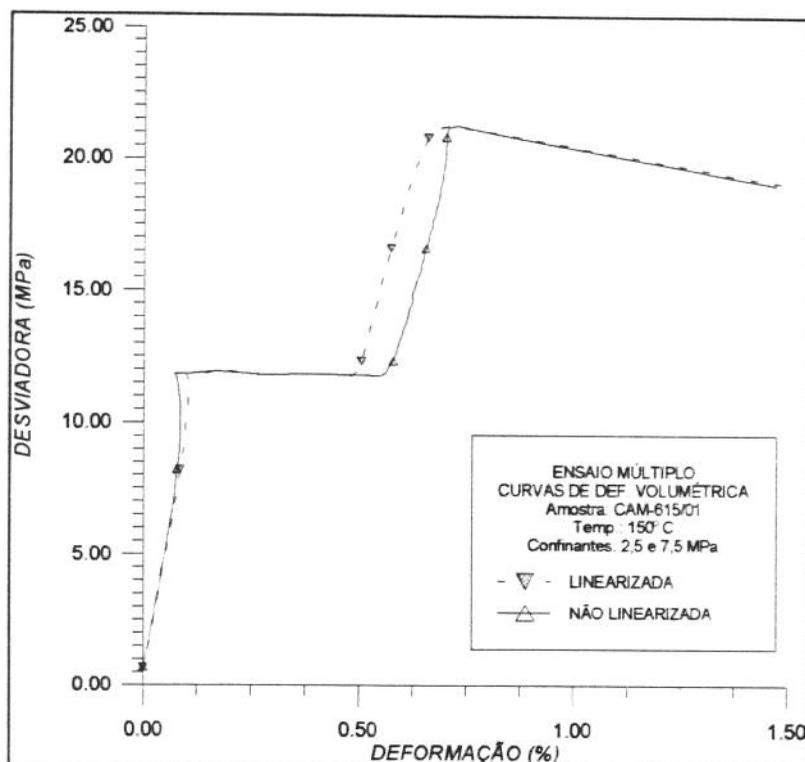


Figura 5.14 - Curvas de tensão versus deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio múltiplo da amostra CAM-615/01.

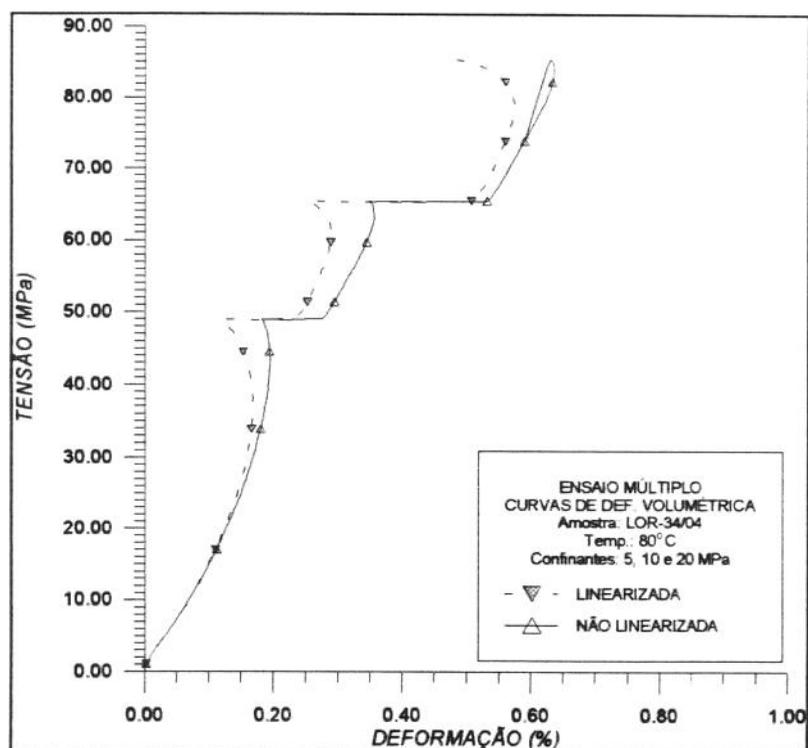


Figura 5.15 - Curvas de tensão versus deformação volumétrica obtidas na fase cisalhante do ensaio múltiplo da amostra LOR-34/04.

Análise das Curvas de Tensão-Deformação Obtidas nos Ensaios Convencionais. Este tipo de ensaio é o mais difundido quando se deseja obter os parâmetros elásticos e de resistência de rochas em laboratório e, portanto, foi adotado nas amostras provenientes dos lotes 1 e 2 deste projeto. As curvas de tensão *versus* deformação obtidas tiveram um formato geral previsto por Vultukuri e Lama (1978), e por Goodman (1989).

As figuras 5.16 a 5.20 apresentam as curvas de tensão-deformação obtidos nos ensaios com as amostras do poço CAM-456 à temperatura ambiente. No conjunto, estes dois primeiros lotes contaram com um número maior de amostras do poço CAM-456 (12 amostras em um total de 22) ensaiados a temperatura ambiente e 80°C. Das 5 amostras do poço CAM-456 ensaiadas a temperatura ambiente (24°C), o CP identificado por CAM-456/07 produziu uma curva de tensão (σ_1 - σ_3) *versus* deformação característica de materiais frágeis: um pico na tensão de ruptura seguida de uma queda acentuada. As amostras CAM-456/10 e CAM-456/11, apresentaram curvas características de material dúctil ou seja, após atingir um valor máximo na tensão de ruptura, a amostra continua a se deformar plasticamente. As demais, CAM-456/04 e CAM-456/06, apresentaram curvas com aspecto intermediária, se comparadas às anteriores.

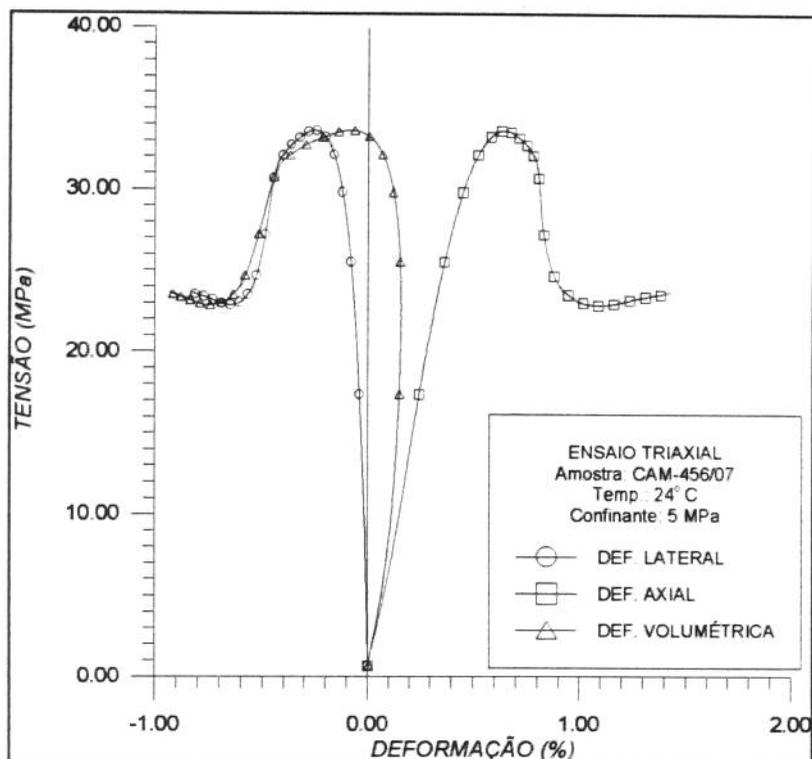


Figura 5.16 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/07

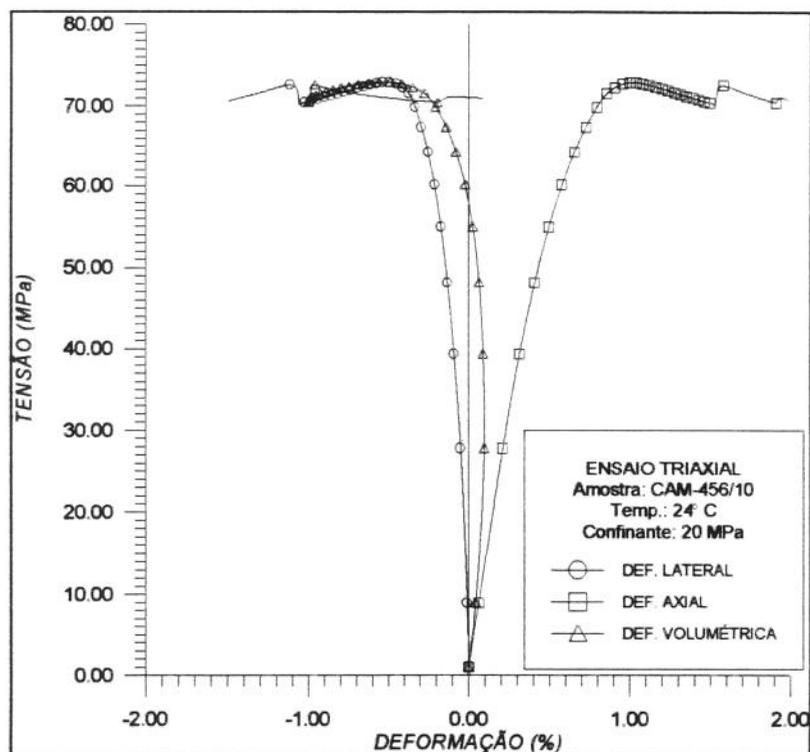


Figura 5.17 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/10.

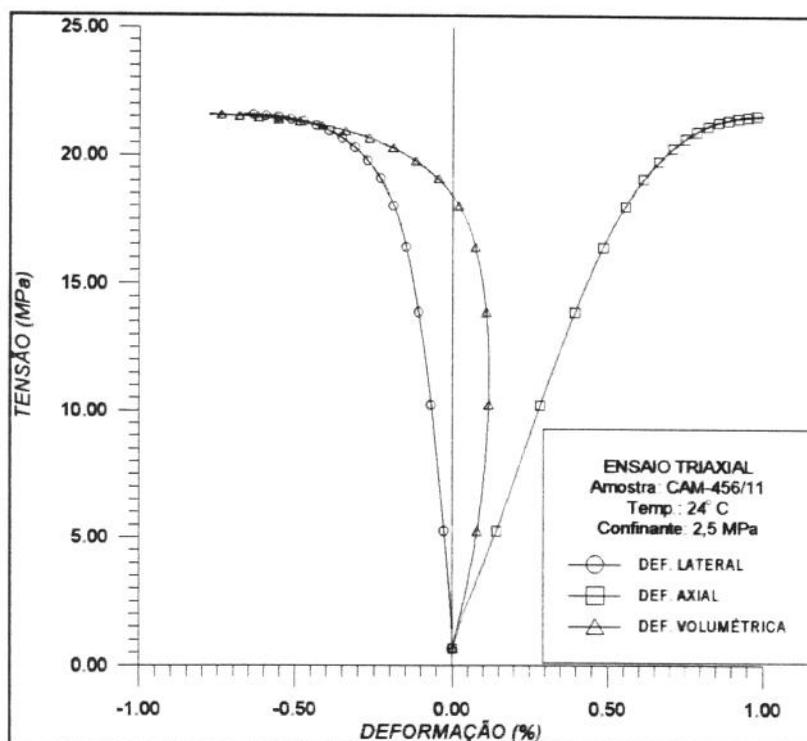


Figura 5.18 - Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/11.

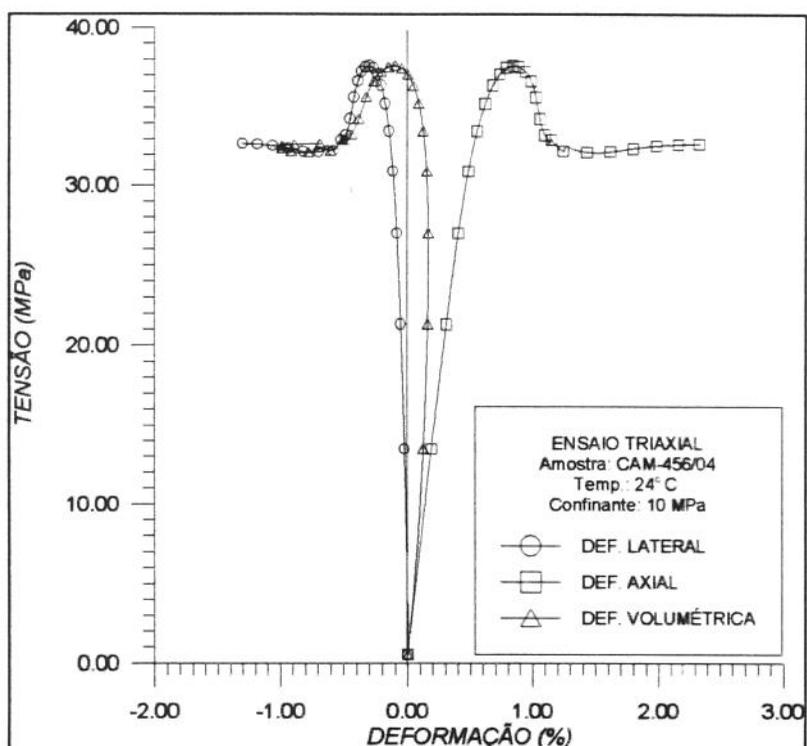


Figura 5.19 - Curva de tensão *versus* deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/04.

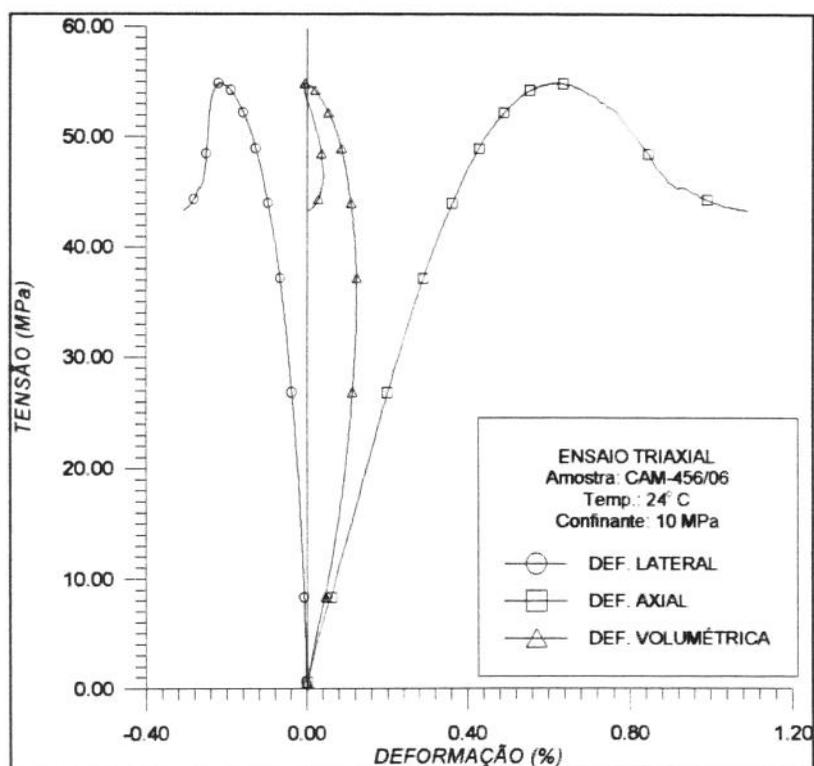


Figura 5.20 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/06.

Uma maneira de justificar o comportamento frágil apresentado pela amostra CAM-456/07 (figura 5.16) pode ser a maior quantidade de calcita, 20% e menor de argila, 5%, enquanto que as demais apresentaram respectivamente 5% de calcita e entre 10 e 30% de argila. A calcita presente nos arenitos, age como cimento, sendo portanto responsável por manter parte dos grãos unidos entre si. A argila também executa este papel, porém se mostra como um cimento mais fraco, além de conferir maior plasticidade à rocha. Um outro fator que exerceu influência, foi a pressão de confinamento relativamente baixa (5 MPa).

Segundo Vutukuri e Lama (1978), tanto pressões de confinamento quanto temperaturas elevadas, alteram as características físicas do material fazendo com que, durante os ensaio de compressão triaxial, apresentem curvas de tensão versus deformação próprias de materiais dúcteis. A composição mineralógica também influencia significativamente. A presença de argilas torna o material menos resistente.

As outras amostras ensaiadas à temperatura ambiente foram a amostra AP-98/01 que apresentou curvas de tensão-deformação típicas de

material ductil, para as condições de ensaio e a amostra CAM-373/04, cujas curvas assemelham-se às curvas do CAM-456/07 (material frágil). Vide figuras 5.21 e 5.22

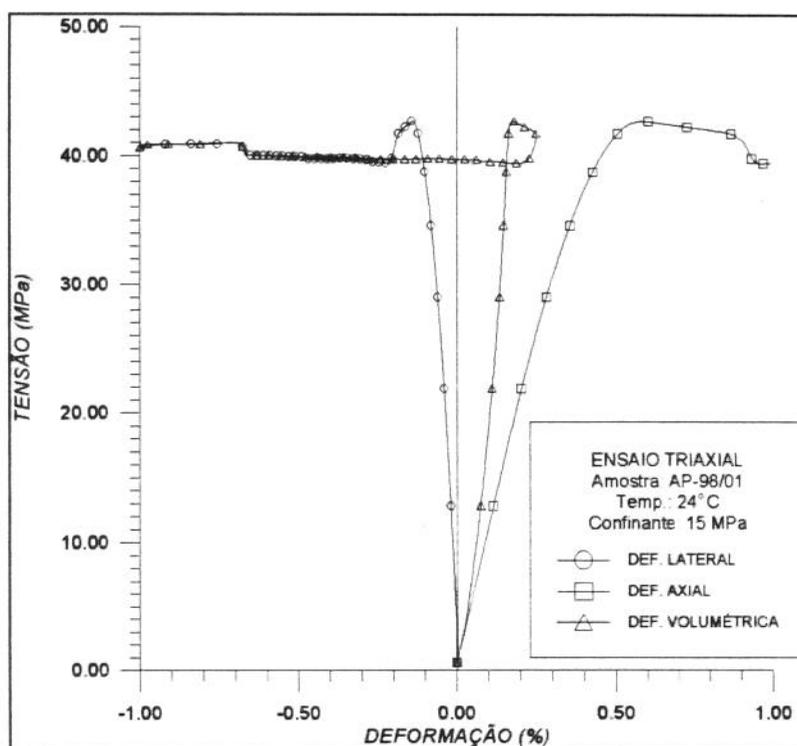


Figura 5.21 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-98/01.

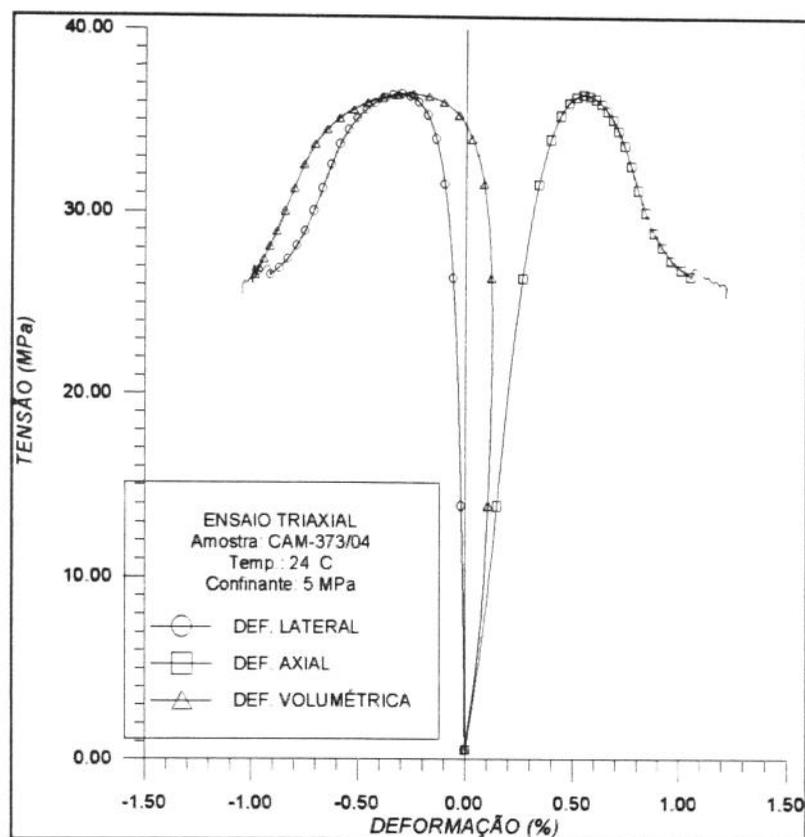


Figura 5.22 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-373/04.

A 80°C prevaleceram as curvas que configuraram a ductilidade do material, ou seja, tanto as amostras dos arenitos do poço CAM-456 quanto as amostras dos poços CAM-373 tornaram-se mais dúcteis em virtude da temperatura mais elevada.

As figuras de 5.23 a 5.30, apresentam as curvas de tensão-deformação obtidas a 80°C.

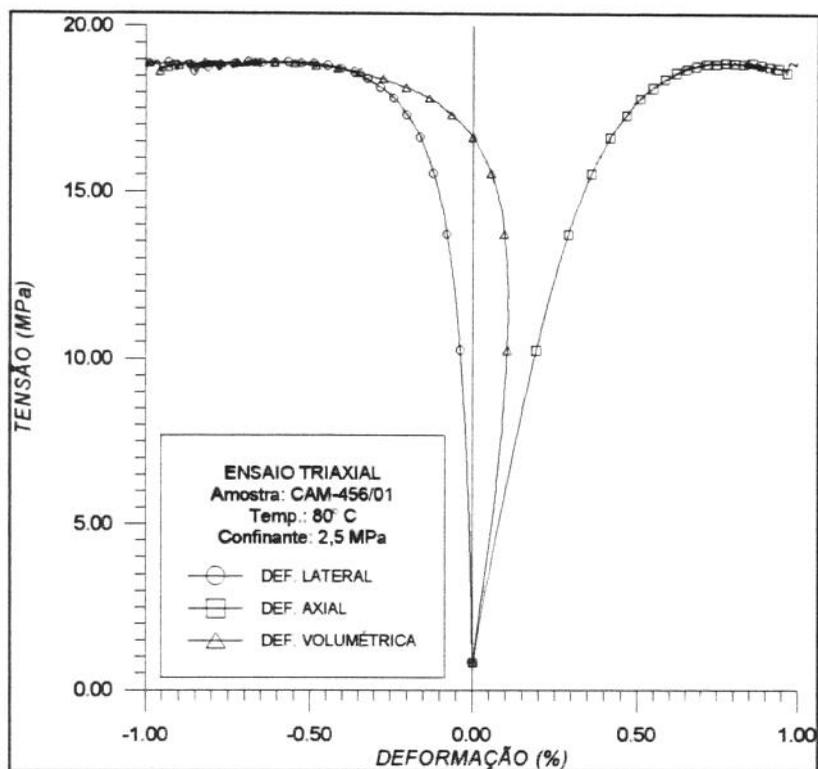


Figura 5.23 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/01.

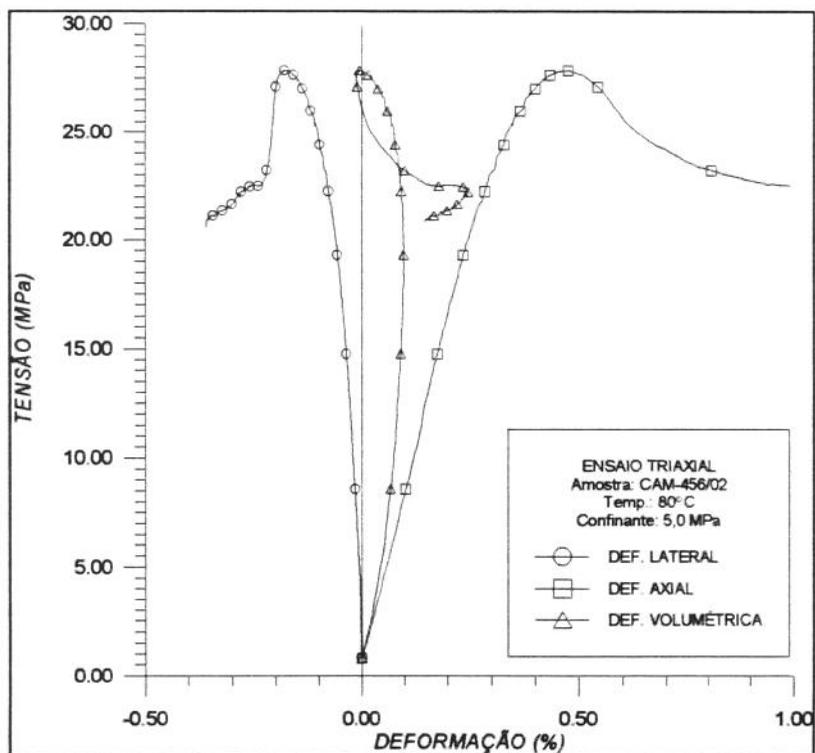


Figura 5.24 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/02.

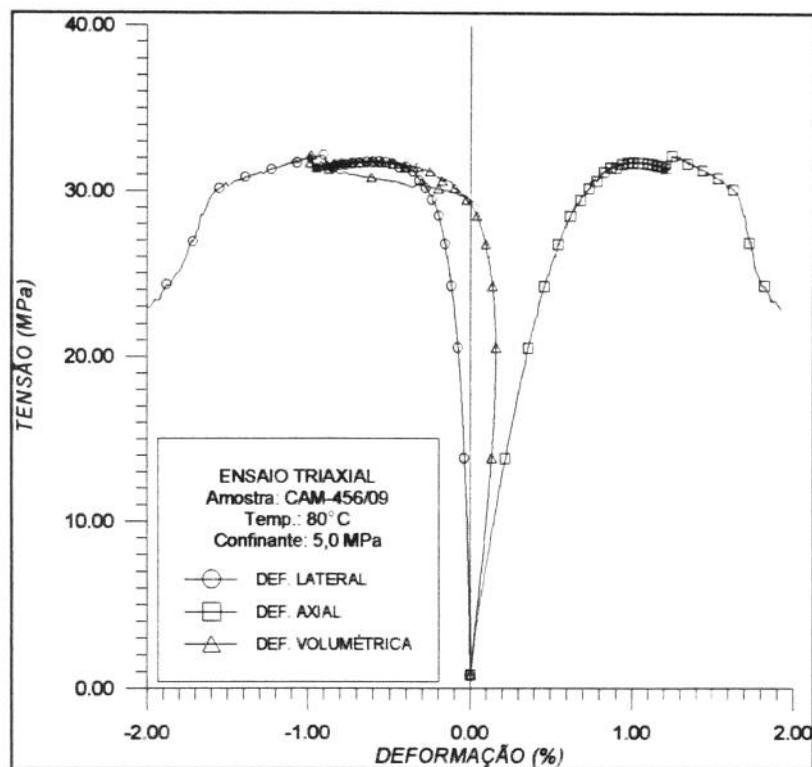


Figura 5.25 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/09.

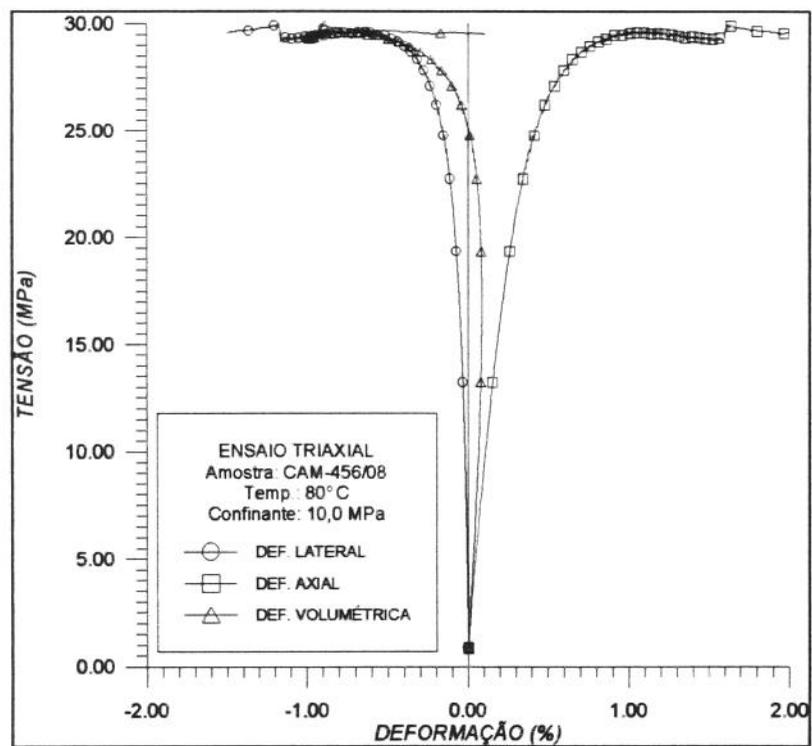


Figura 5.26 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/08.

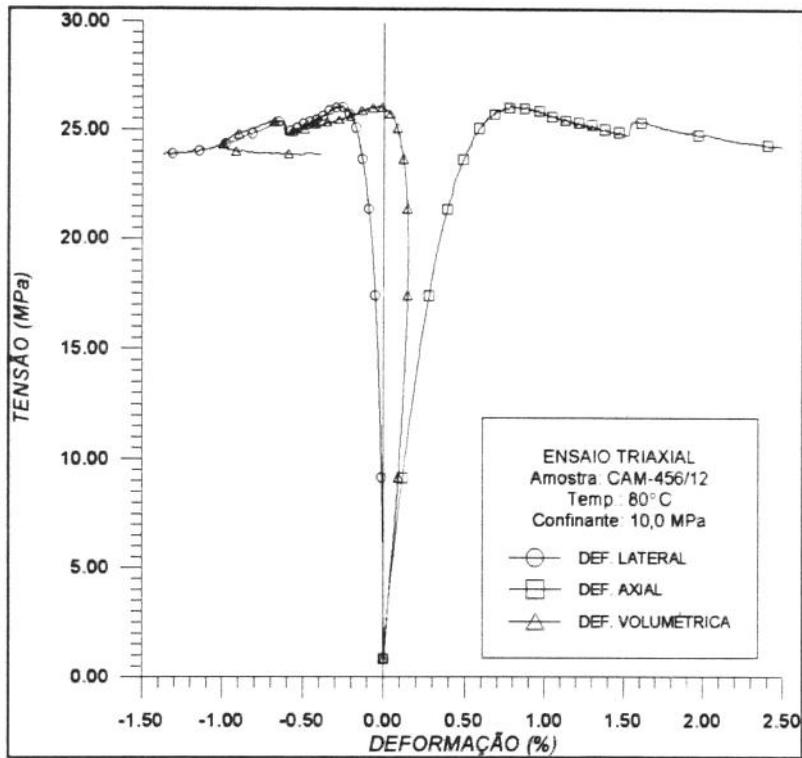


Figura 5.27 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/12.

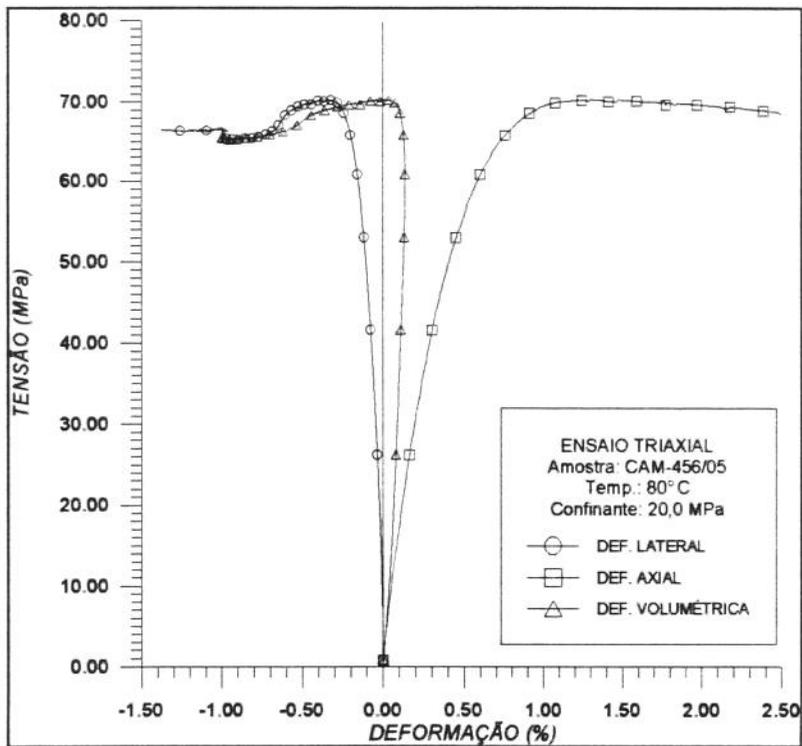


Figura 5.28 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-456/05.

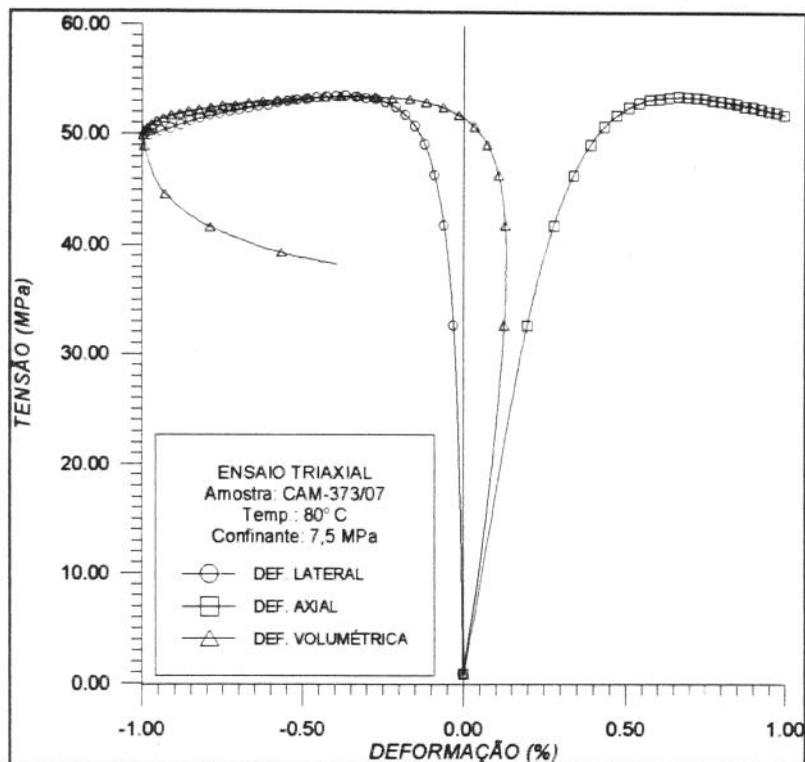


Figura 5.29 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-373/07.

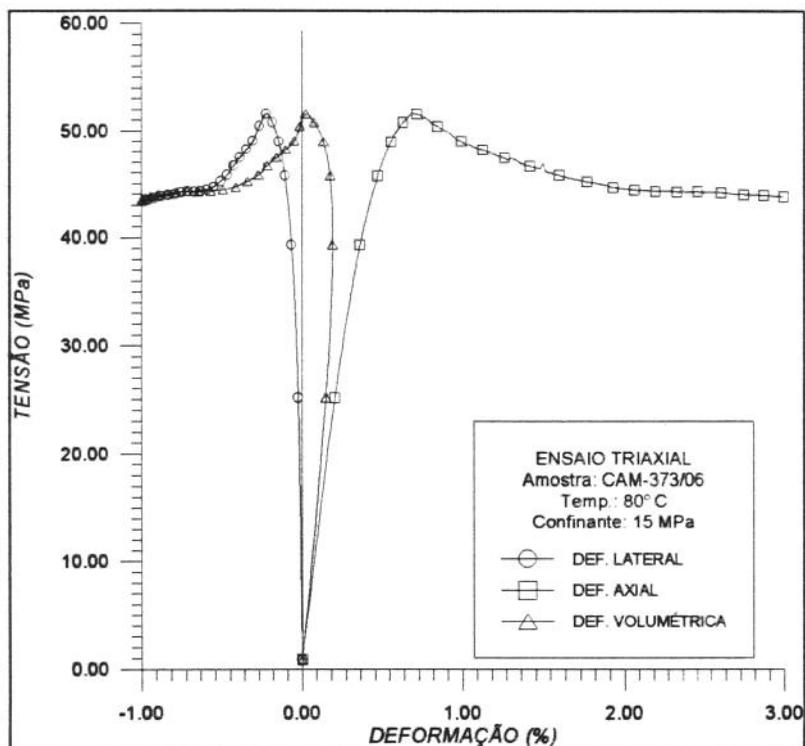


Figura 5.30 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio triaxial da amostra CAM-373/06.

A 150°C, foi ensaiada apenas uma amostra do poço CAM-456, o CP identificado por CAM-456/03 (figura 5.31), que apresentou uma ruptura típica de material frágil, a uma pressão de confinamento de 10 MPa. Para um ensaio nestas condições, esperava-se um tensão de ruptura mais elevada do que o valor obtido para a amostra, além de uma curva caracterizando um comportamento ductil, devido à influência da temperatura e da pressão elevadas.

O comportamento apresentado pela amostra pode ser um indicativo da presença de macro fissuras que tornaram o material mais fraco, provocando sua ruptura prematura. Do ponto de vista de composição mineralógica, a amostra CAM-456/03 não apresentava diferenças significativas das demais amostras do mesmo poço. O comportamento que a referida amostra apresentou durante o ensaio hidrostático (figura 5.5), também fugiu aos padrões.

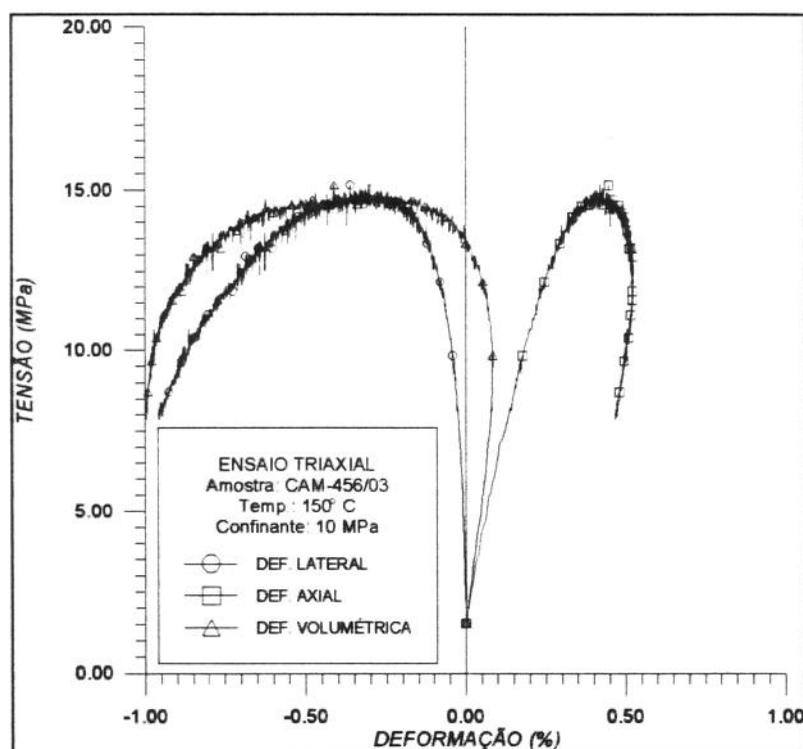


Figura 5.31 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-456/03.

As outras amostras ensaiadas a 150°C foram: AP-98/02 e 03, AP-125/02 e 03 e CAM-373/05 e 08, que embora pertençam a poços do mesmo campo, tinham composição mineralógica diferentes entre si, como

por exemplo, baixíssimo teor de argila em alguns casos (apenas a amostra AP-125/02 apresentou teor de argilas maior, na faixa de 15%), e altas concentrações de calcita em outras. As curvas de tensão-deformação destas amostras, figuras 5.32 a 5.37, apresentaram um aspecto intermediário, entre frágil e dúctil.

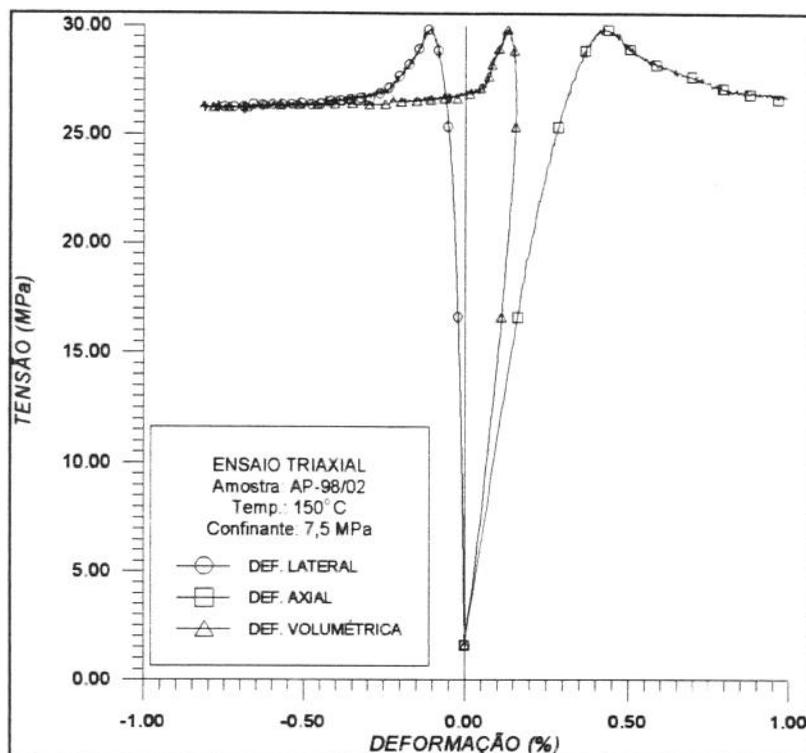


Figura 5.32 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-98/02.

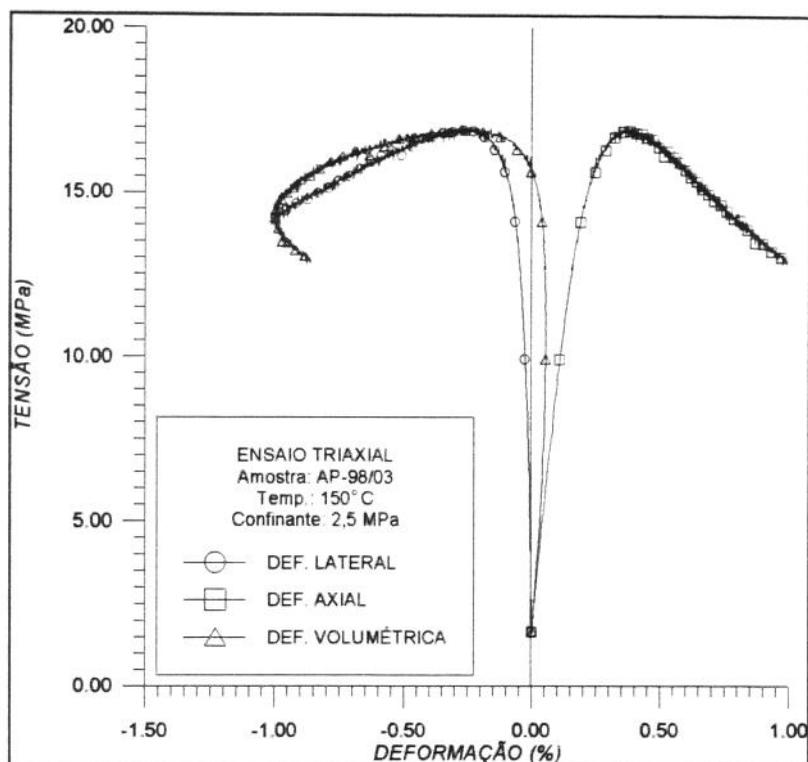


Figura 5.33 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-98/03.

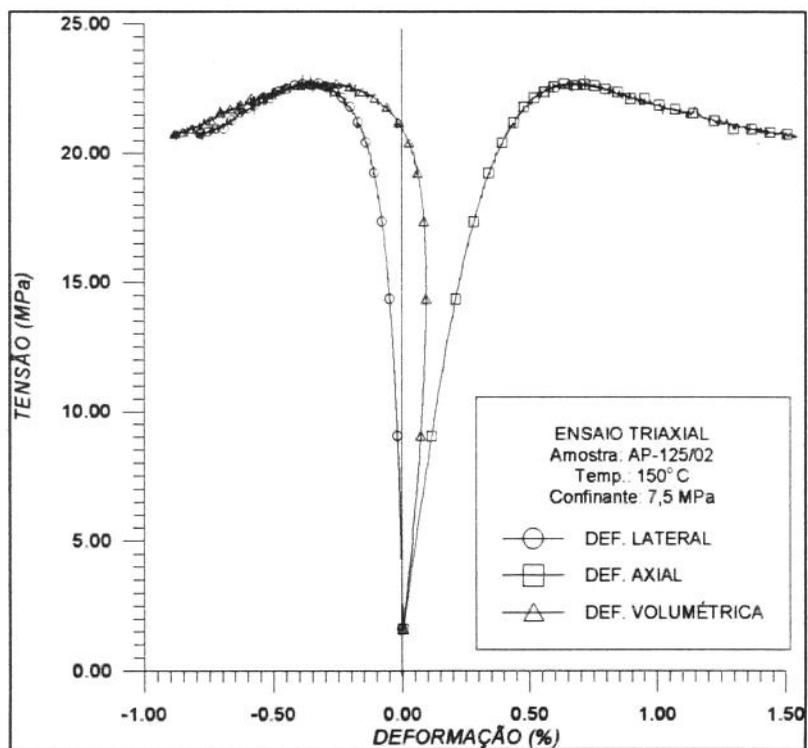


Figura 5.34 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-125/02.

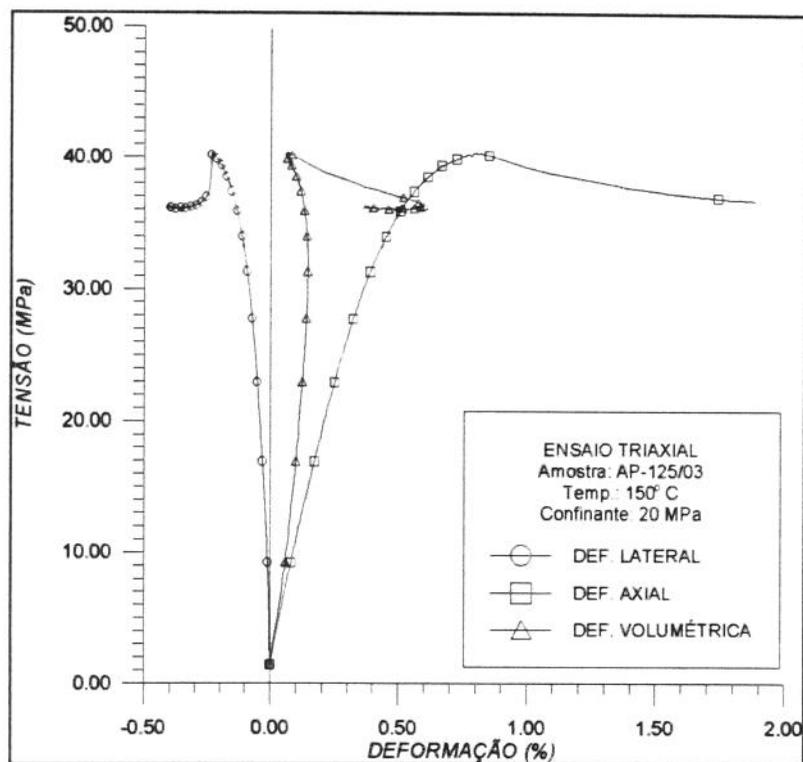


Figura 5.35 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra AP-125/03.

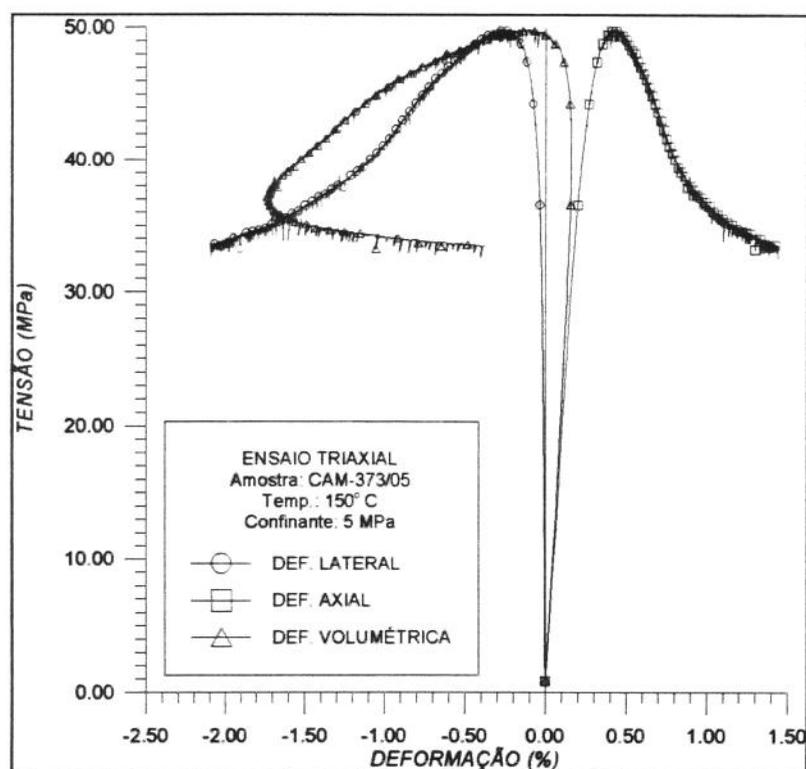


Figura 5.36 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-373/05.

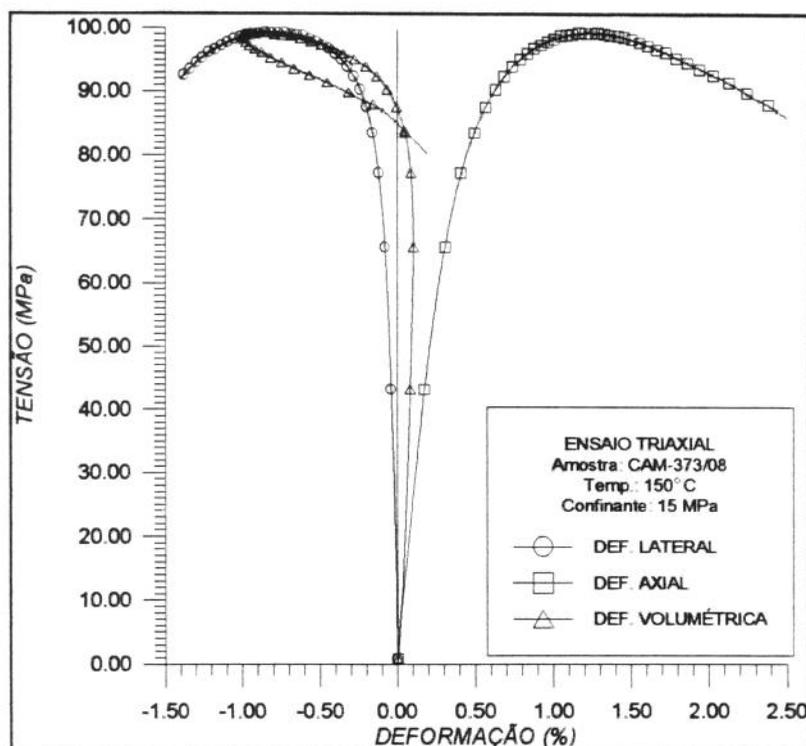


Figura 5.37 - Curva de tensão versus deformação obtido no ensaio triaxial com a amostra CAM-373/08.

As características marcantes dos arenitos do poço CAM-373, foram a baixa concentração de argilas (apenas traços deste mineral) e altas concentrações de calcita (entre 15 e 40% em 3 das 5 amostras efetivamente ensaiadas), que exerceram influência na resistência a compressão das amostras. A calcita compunha o cimento da rocha e a sua maior concentração provocou o aumento da resistência dos arenitos.

A análise de todos os resultados obtidos a 150°C, demonstraram pouca correlação entre a tensão de ruptura e a pressão de confinamento. Isto pode ser verificado pela maneira irregular com que a tensão de ruptura variou. O coeficiente de correlação linear (r) neste caso ficou em 0,61, que é um valor considerado baixo.

Das sete amostras ensaiadas a 150°C, duas pertenciam ao poço CAM-373 e uma ao poço CAM-456 e foram estas as responsáveis pela baixa correlação obtida entre a tensão de ruptura e a pressão de confinamento. Este comportamento indicou que as amostras eram heterogêneas, mesmo sabendo que em escala macroscópica os arenitos dos poços foram considerados pelos geólogos do CENPES/DIGER como homogêneos, baseados na descrição macroscópica do material.

A pouca confiabilidade dos dados obtidos a 150°C forçaram a repetição de uma série completa de ensaios à temperatura ambiente e 150°C, a partir de mais um lote adicional de amostras (o terceiro utilizado neste projeto), para permitir a comparação do comportamento dos parâmetros desejados nestas duas condições.

Outro aspecto interessante a ser observado na totalidade dos ensaios convencionais foi o fato de que, mesmo para pressões de confinamento mais baixas (até 5 MPa), as curvas de tensão-deformação axial apresentaram de forma predominante suave concavidade voltada para cima, na fase inicial do carregamento. Segundo Vutukuri e Lama (1978) e Goodman (1989), esta concavidade está relacionada ao fechamento inicial das microfissuras e poros existentes na rocha. Porém, pela observação das curvas de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica no ensaio hidrostático, foi possível perceber que mesmo nos casos de baixos valores de pressão de confinamento já se obtinha um nível relativamente alto de adensamento e fechamento das fissuras. Portanto, o efeito do carregamento axial da amostra sobre o fechamento das microfissuras, na fase cisalhante, ficou menos pronunciado.

Todas as curvas de tensão-deformação tiveram seu ponto de origem em tensão desviadora não nula, em virtude da pré-carga aplicada no início dos testes, com a finalidade de promover a vedação dos anéis de vedação (*o'rings*) existentes em vários pontos entre a amostra e o sistema de aplicação de carga (figura 3.18) e também para o ajuste entre estas partes. Esta pré-carga atende a uma recomendação da Designation D 2664-86 da ASTM (1986).

Todas as curvas de tensão-deformação axial, apresentaram o trecho linear correspondente a fase de comportamento elástico bem definido, estando em acordo com o previsto por Goodman (1989) para ensaios de compressão com amostras de rochas.

É importante frisar que a escolha dos arenitos da formação Açú acarretaram algumas dificuldades ao projeto. A principal delas estava relacionada a qualidade do material: os arenitos friáveis, pouco consolidados e mal selecionados do ponto de vista da granulometria, conferiram um grau razoável de heterogeneidade as amostras, quando observados nas

dimensões de laboratório. Estes fatores foram comprovados logo no início da interpretação dos resultados, ao se tentar correlacionar os dados de tensão de ruptura (σ_1) com a pressão de confinamento (σ_3).

Segundo Vutukuri, Lama (1978), existe uma relação entre a maior (σ_1) e a menor tensão principal (σ_3) durante o ensaio triaxial. A medida que o valor da pressão de confinamento aumenta, aumenta também de forma proporcional o valor da tensão de ruptura. Este tipo de correlação fornece uma linha reta para algumas rochas. Os resultados obtidos neste projeto comprovaram que isto é verdadeiro, principalmente quando se trabalha dentro de uma faixa pequena de pressões de confinamento.

O coeficiente de correlação linear (r) fornece uma medida que indica se os pontos estão bem correlacionados ou não. Quanto mais próximo de 1, mais alinhados estão os pontos. O coeficiente de correlação linear é dado pela seguinte equação:

$$r = \frac{n \cdot \Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y}{\sqrt{[n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2] \cdot [n \cdot \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2]}} \quad (5.9)$$

onde:

x , é substituído por σ_3 ;

y , é substituído por σ_1 e

n representa o número de pares (σ_3, σ_1) ou seja, o número de ensaios realizados.

À medida que uma série de ensaios completa era obtida em determinada temperatura, os valores de tensões de ruptura e de pressões de confinamento correspondentes, eram representados no plano $\sigma_1 \times \sigma_3$ (vide anexo 2). Foi nesta fase que se constataram os baixos valores de r para os resultados dos ensaios a 150°C, o valor obtido foi 0,61 enquanto que um valor considerado bom para este tipo de correlação está na faixa acima de 0,90. Para as outras temperaturas, as correlações se apresentaram bem melhores (r entre 0,88 e 0,95). A melhor situação foi obtida nos casos em que se analisaram apenas os conjuntos de pontos referentes ao poço CAM-456. É bom lembrar que este poço forneceu o maior número de amostras para as temperaturas ambiente e 80°C, enquanto que a 150°C contavam-se com 7 amostras de 4 poços distintos, mostrando haver hete-

roogeneidade entre elas. A partir desta observação, optou-se por isolar, porém sem desprezar, os resultados obtidos a 150°C e providenciar mais testemunhos do mesmo campo e da mesma formação (Açu), para repetir o trabalho nesta temperatura e nas outras sempre que se configurasse a necessidade de complementar ou substituir dados. O difícil seria reunir um número suficientemente grande de amostras de um único poço, para reduzir as diferenças do material. Segundo Vutukuri, Lama e Saluja (1974), na determinação da tensão de ruptura de arenitos homogêneos, são necessários entre 5 e 10 amostras para se obter um resultado confiável. Se este critério fosse adotado neste projeto, seriam necessário entre 30 e 60 amostras para obter valores da tensão de ruptura confiáveis em cada temperatura (seriam utilizadas entre 5 e 10 amostras para cada pressão de confinamento adotada).

Toda esta dificuldade em avaliar o comportamento das amostras da Formação Açu, reforçou a idéia de tentar conduzir uma série de ensaios de compressão com amostras de arenitos homogêneos e bem consolidados da Bacia Potiguar. Os resultados destes ensaios poderiam ser utilizados como parâmetros para avaliar o comportamento encontrado para os arenitos da Formação Açu. O objetivo era confrontar resultados para facilitar a interpretação.

A tabela 5.3 apresenta a distribuição das amostras do primeiro e segundo lotes para os ensaios convencionais.

Tabela 5.3 - Relação das amostras do primeiro e segundo lotes submetidas aos ensaios convencionais.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DE ENSAIO (°C)	PRESSÃO DE CONFINAMENTO (MPa)
CAM-456	11	24	2,5
	07		5,0
CAM-373	04		5,0
CAM-456	04		10,0
	06		10,0
AP-98	01		15,0
CAM-456	10	20,0	
	01	80	2,5
	02		5,0
09	5,0		
CAM-373	07		7,5
CAM-456	08		10,0
	12		10,0
CAM-373	06	15,0	
CAM-456	05	20,0	
AP-98	03	150	2,5
CAM-373	05		5,0
AP-98	02		7,5
AP-125	02		7,5
CAM-456	03		10,0
CAM-373	08		15,0
AP-125	03		20,0

Após o recebimento dos testemunhos do terceiro lote de amostras no laboratório do CENPES e posterior preparação dos corpos de prova, constatou-se mais uma vez, através de inspeção visual (sempre é a primeira realizada), a heterogeneidade dos arenitos da formação Açu persistia. Confirmou-se então que se tratava de uma característica do material e não de um erro cometido na seleção das amostras. Outro detalhe importante foi o fato de terem sido enviadas amostras de vários poços (entre uma e três amostras por poço, no máximo). Apenas os arenitos bem consolidados da formação Pendências, provenientes do campo de Lorena,

apresentavam maior homogeneidade. Deste campo, foram enviadas apenas 8 testemunhos sendo 6 do poço LOR-34 e 2 do poço LOR-30. Da formação Açú, foram enviados 14 testemunhos que forneceram 14 amostras mas, apenas 9 foram utilizadas as outras 5 amostras foram consideradas muito diferentes na análise visual e portanto foram, a princípio, rejeitadas.

Para contornar o problema do número reduzido de amostras do campo de Lorena e a heterogeneidade das amostras dos arenitos da formação Açú, foi necessário alterar a metodologia dos ensaios. Verificou-se que se fosse reduzido o número de corpos de prova, seria possível reduzir também a diferença entre estes, pois tornava-se mais fácil, neste caso, reunir um número maior de amostras semelhantes, recusando-se assim aquelas de características muito discrepantes.

Na literatura pesquisada, identificou-se um método denominado ensaio de estado de falha múltipla (Multiple Failure State Triaxial Tests) desenvolvido por Kovari e Tisa (1976), que basicamente consiste em utilizar um único CP para obter uma série completa de ensaios, passando por todas as pressões de confinamento previstas e desta forma obtendo uma envoltória de ruptura para o material. Para maiores detalhes a respeito do método ver capítulo III.

Análise das Curvas de Tensão-Deformação Obtidas nos Ensaios de Múltiplo Estado de Falha. Os ensaios de estado de falha múltipla são bem menos difundidos que os ensaios convencionais. Na literatura pesquisada aparecem poucos resultados baseados neste método, porém nenhum deles refere-se à utilização de temperaturas elevadas. Desta forma, no presente projeto é feita uma aplicação inédita do método no estudo da influência da pressão de confinamento associada a temperatura.

Os ensaios foram iniciados a partir das amostras do poço LOR-34. A princípio, não seriam utilizadas as amostras do poço LOR-30 por receio de serem obtidos resultados semelhantes aos dos ensaios com os arenitos da formação Açú, que demonstraram heterogeneidade entre amostras de poços diferentes. As 6 amostras disponíveis foram divididas de modo que fossem ensaiadas duas em cada temperatura. Cada CP seria submetido a três pressões de confinamento.

Posteriormente, foram ensaiadas as duas amostras do poço LOR-30, uma a temperatura ambiente e a outra a 80°C, ambas nas pressões de confinamento 0 (zero) e 12,5 MPa e os resultados comparados aos do LOR-34. Verificou-se que as amostras dos dois poços apresentavam boa semelhança entre si.

No caso dos ensaios múltiplos com as amostras dos poços de Canto do Amaro, a distribuição foi feita de modo que se tivessem três amostras para cada temperatura e duas pressões de confinamento por amostra. O motivo de se adotar este novo critério foi minimizar as deformações sofridas pela amostra devido aos sucessivos estágios de carregamento. Como o método é pouco conhecido, principalmente para ensaios com utilização de temperatura, houve o receio de comprometer demasiadamente os resultados.

Segundo Holt e Fjær (1991), ao efetuarem ensaios com amostras de arenitos de origem fluvial e de baixa resistência, constataram uma pequena redução na tensão de ruptura, para as pressões de confinamento mais altas. Os autores conduziram o experimento em 4 estágios de pressões de confinamento (2,5 MPa, 5 MPa, 7,5 MPa e 10 MPa) e justamente os 2 últimos valores de tensão de ruptura apresentaram este desvio quando comparados a outros ensaios realizados pelo método convencional. Porém, a diferença máxima encontrada foi de 10%. Pela descrição das amostras fornecidas pelos autores e os valores de tensão de ruptura obtidas por estes, é possível identificar certas semelhanças entre este material e os arenitos dos poços de Canto do Amaro.

Nesta etapa do projeto, a utilização de dois ou três corpos de prova para uma série completa de ensaio em cada temperatura, permitiu que se tivesse um menor número de estágios de pressões de confinamento por amostras. Estas pressões foram definidas de modo a se obter uma superposição dos resultados entre as amostras, para reduzir as diferenças observadas por Holt e Fjær, dando assim maior confiabilidade ao método de múltiplo estado de falha.

As tabelas 5.4 e 5.5 apresentam a distribuição das amostras do terceiro lote para os ensaios múltiplos.

Tabela 5.4 - Relação das amostras de Lorena submetidas ao ensaio de múltiplo estado de falha.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DE ENSAIO (°C)	PRESSÃO DE CONFINAMENTO (MPa)
LOR-30	01	24	0,0 (UNIAXIAL) 12,5
LOR-34	06		2,5 7,5 15,0
	01		5,0 10,0 20,0
LOR-30	02	80	0,0 (UNIAXIAL) 12,5
LOR-34	02		2,5 7,5 15,0 20,0
	04		5,0 10,0 20,0
	03		150
05		5,0 10,0 20,0	

Tabela 5.5 - Relação das amostras de Canto do Amaro submetidas ao ensaio de múltiplo estado de falha.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DE ENSAIO (°C)	PRESSÃO DE CONFINAMENTO (MPa)
CAM-519	02	26	0,0 (UNUAXIAL)
			12,5
CAM-529	01		2,5
			7,5
CAM-519	01	150	5,0
			15,0
AP-153	02		10,0
			20,0
AP-128	02	150	0,0 (UNIAXIAL)
CAM-615	01		2,5
			7,5
CAM-510	01		5,0
			15,0
AP-153	01		5,0
		15,0	
	03	10,0	
		20,0	

Os aspectos gerais das curvas, em todas as temperaturas ensaiadas, foram bastante semelhantes entre si. A cada acréscimo da pressão de confinamento, referente a mudança de estágio dentro do ensaio, as curvas apresentavam uma variação instantânea nas deformações axial, lateral e volumétrica, que ficaram registradas nos gráficos em forma de patamares. No caso da deformação axial, esse patamar refere-se à redução da altura do CP devido ao aumento da pressão de confinamento atuando sobre as áreas das extremidades deste. Esta deformação, em geral, é pequena (na maioria dos casos, inferior a 0,1%).

Tanto a curva de deformação lateral quanto a de deformação axial devem ser analisadas separando-se o primeiro estágio dos estágios seguintes. No primeiro estágio de aplicação da pressão de confinamento, ambas apresentaram o mesmo formato encontrado nos ensaios convenci-

onais. Do segundo estágio em diante até o último, as curvas mudam de aspecto devido aos danos estruturais provocados pelo primeiro estágio de aplicação de tensões. A curva de deformação lateral (radial) comporta-se inicialmente como se a amostra estivesse diminuindo de diâmetro; em seguida, registra-se deformação nula e finalmente, assume um comportamento aparentemente normal, se comparada aos obtidos nos ensaios convencionais. Este aspecto esteve presente em todas as curvas registradas, embora a pequena diminuição de diâmetro, que ocorreu no início do estágio, as vezes era imperceptível ou nulo. As curvas de deformação axial, apresentaram inclinações sempre crescentes a cada novo estágio de pressão de confinamento.

A figura 5.38 traz um exemplo do modelo das curvas obtidas nos ensaios múltiplos.

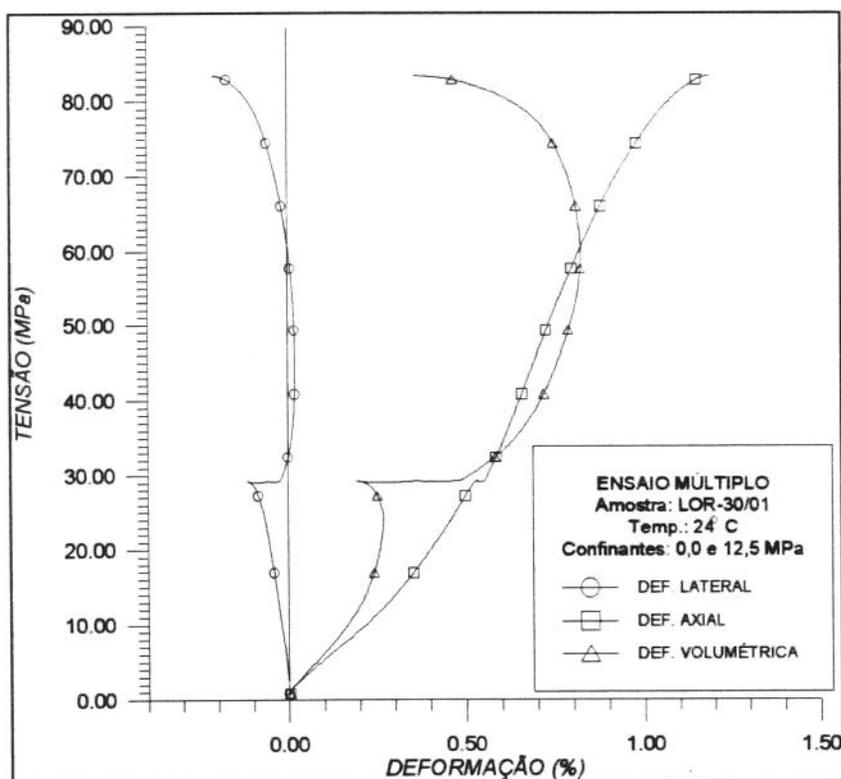


Figura 5.38 - Curva de tensão versus deformação obtido em um ensaio múltiplo. Atentar para o formato das curvas de deformação axial e lateral.

O aspecto da curva de deformação axial (vide exemplo na figura 5.30) pode ser entendido como um enfraquecimento progressivo do material em função dos sucessivos estágios de aplicação de tensões. Este fenômeno é identificado pelos valores decrescentes do módulo de elasticidade à medida em que se aproxima a tensão de ruptura. As curvas obtidas em ensaios convencionais também apresentaram o mesmo aspecto em sua porção final.

Para justificar o aspecto da curva de deformação lateral é necessário que se conheça a metodologia empregada para a realização do ensaio múltiplo: O primeiro estágio ocorre de forma semelhante ao ensaio convencional porém, no instante em que a amostra se aproxima da ruptura, a aplicação da carga axial era interrompida manualmente e a pressão de confinamento aumentada para o valor seguinte programado. A taxa com a qual se alterava a pressão de confinamento situou-se entre 0,4 e 0,5 MPa/s, ou seja, para passar de 5 para 10 MPa, por exemplo, eram necessários em torno de 10 s. No instante em que se atingia o novo valor da pressão de confinamento, a máquina era novamente comandada a prosseguir com o carregamento axial até o final do estágio. Esta seqüência era repetida até o final do ensaio.

O aspecto da curva de deformação lateral pode ser justificado a partir dos fenômenos de equilíbrio das tensões e das deformações que atuam sobre o corpo cilíndrico da amostra. A aplicação quase instantânea da pressão de confinamento gera tensões internas na amostra que requerem um certo tempo para atingir o novo estado de equilíbrio. Além das tensões suportadas pela estrutura da rocha, o fluido contido nos poros (óleo saturante) também fica sob pressão em virtude da diminuição volumétrica provocada pelo aumento da pressão de confinamento. Como o ensaio é drenado, a pressão intraporos tende a diminuir com o tempo em função da expulsão do fluido excedente pelas extremidades do corpo de prova.

Caso se aguardasse algum tempo após atingir o novo valor de pressão de confinamento, antes de prosseguir com a aplicação de carga axial, seria possível verificar a continuidade na redução do diâmetro da amostra através da curva de deformação lateral. É bom lembrar que a deformação radial é registrada pelo extensômetro lateral instalado na metade da altura do corpo de prova, conforme pode ser visto na figura 3.9. Por-

tanto, seria necessário um certo tempo para que este instrumento sentisse o efeito do fluido saindo pelas extremidades do CP.

Além dos efeitos provocados pela aplicação da pressão de confinamento, a aplicação da tensão axial sobre a amostra produz um outro estado de tensão e de deformação que provoca o aumento gradual do diâmetro deste.

Em um ensaio múltiplo, no instante inicial do segundo estágio em diante os dois estados de tensão e deformação, um referente à aplicação de carga axial no primeiro estágio e o outro referente ao aumento da pressão de confinamento, agem simultaneamente, e o resultado pode ser verificado através da curva de deformação lateral. Pode-se afirmar que a curva é a resultante dos esforços que estão agindo no plano perpendicular ao eixo da amostra. Evidentemente, as extremidades do corpo de prova estão sujeitos a fenômenos semelhantes, porém com intensidades bem menores e quase imperceptíveis nas condições de ensaio. Vide figura 5.38, onde podem ser verificados todos os fenômenos analisados acima. Como consequência, não é recomendável a adoção dos trechos das curvas a partir do segundo estágio em diante, para a obtenção dos parâmetros elásticos.

O momento da mudança da pressão de confinamento foi decidido com o auxílio dos gráficos traçados por um *plotter* ligado à máquina de ensaio. Além do *plotter*, o resultado gráfico do ensaio era apresentado na tela de um micro computador acoplado ao sistema. Porém, este não apresentava resolução suficiente para permitir um bom acompanhamento do evolução das curvas de tensão-deformação. No *plotter* acompanhava-se principalmente a evolução da deformação lateral do CP, com escala ampliada, e identificando-se com relativa facilidade o momento em que este estava na iminência de romper, devido ao rápido aumento da inclinação da curva de tensão *versus* deformação.

Como as amostras de Lorena eram frágeis, foi adotada a técnica de escolher um ponto para mudança da pressão de confinamento bem anterior ao da tensão de ruptura. Posteriormente, era feita uma extrapolação manual (com uso de curva francesa) das curvas de tensão-deformação lateral, encontrando-se assim uma correção para o valor da ruptura para cada pressão de confinamento. Esta correção, na maioria dos casos, não

ultrapassava 10%. A técnica teve por objetivo evitar a ruptura brusca do CP antes da conclusão do ensaio.

Assim como no caso dos ensaios convencionais, nos ensaios múltiplos também foram aplicadas pré-cargas iniciais em torno de 1 kN para promover o ajuste e a vedação dos anéis (*o'rings*) do sistema de aplicação de carga.

Todas as curvas de deformação axial apresentaram, em sua porção inicial, concavidade voltada para cima, que corresponde ao fechamento das microfissuras. É interessante comentar que todos os ensaios múltiplos iniciaram a pressões de confinamento inferiores ou iguais a 5 MPa, que não foram suficientes para garantir uma boa compactação dos CP. Sendo assim, as curvas de deformação axial apresentaram uma concavidade acentuada.

Todas as curvas de deformação axial apresentaram durante o primeiro estágio, um trecho reto logo após o fechamento das microfissuras e que corresponde ao comportamento elástico da rocha. Este trecho reto também pode ser observado na terça parte inicial dos estágios seguinte.

As figuras 5.39 até 5.46 mostram as curvas obtidas nos ensaio de múltiplo estado de falha com as amostras do campo de Lorena.

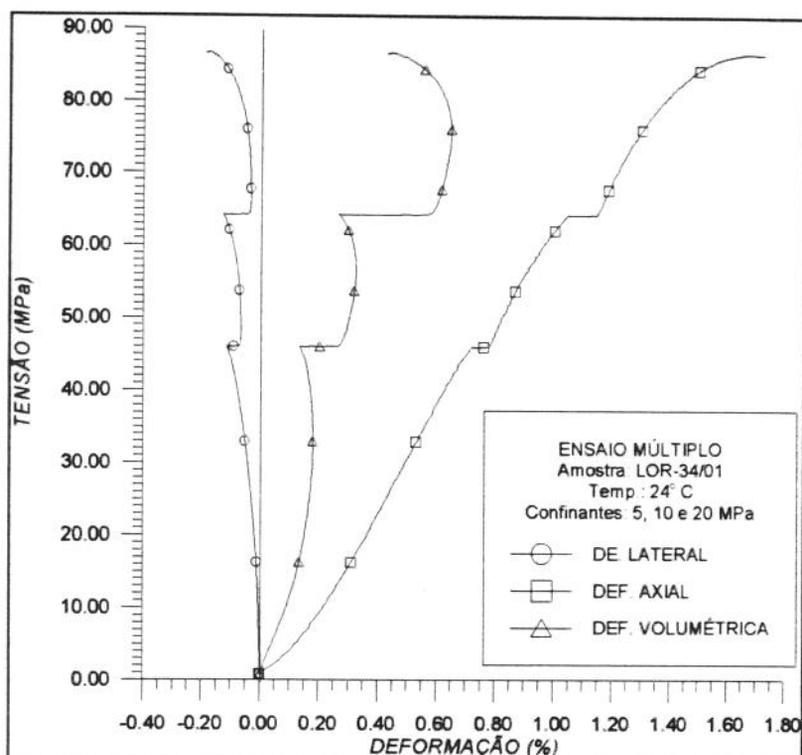


Figura 5.39 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/01.

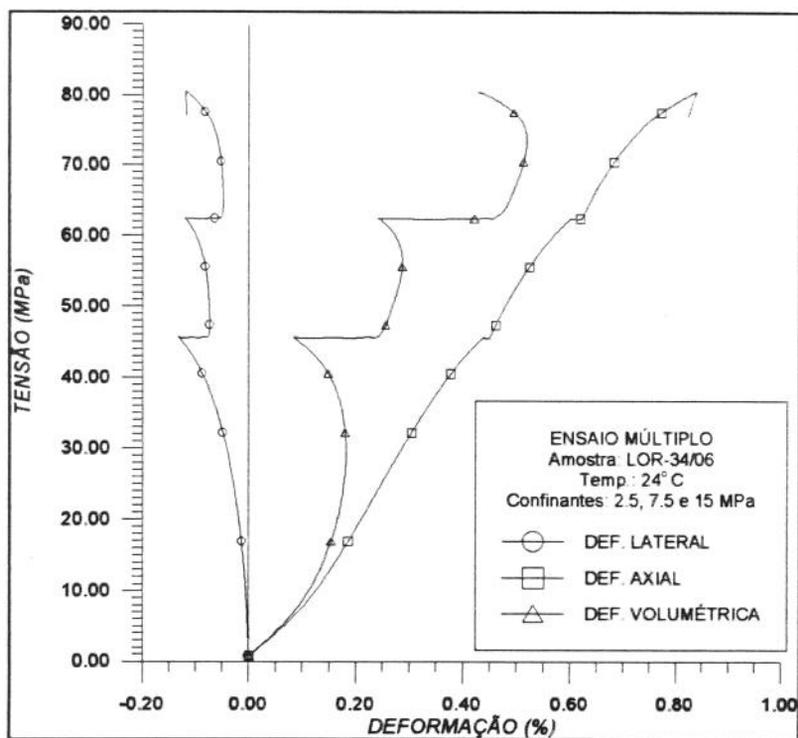


Figura 5.40 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/06.

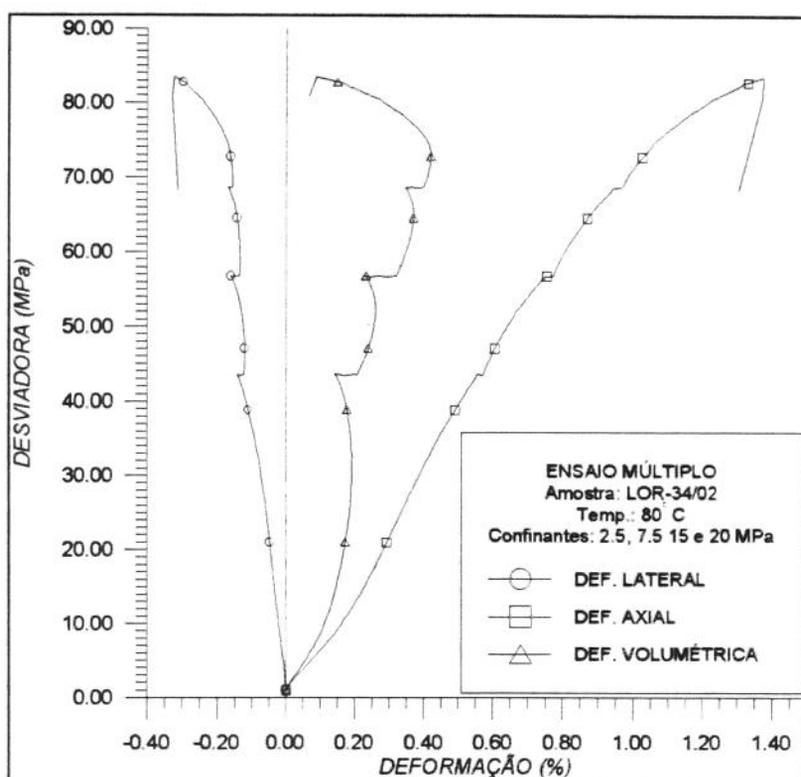


Figura 5.41 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/02.

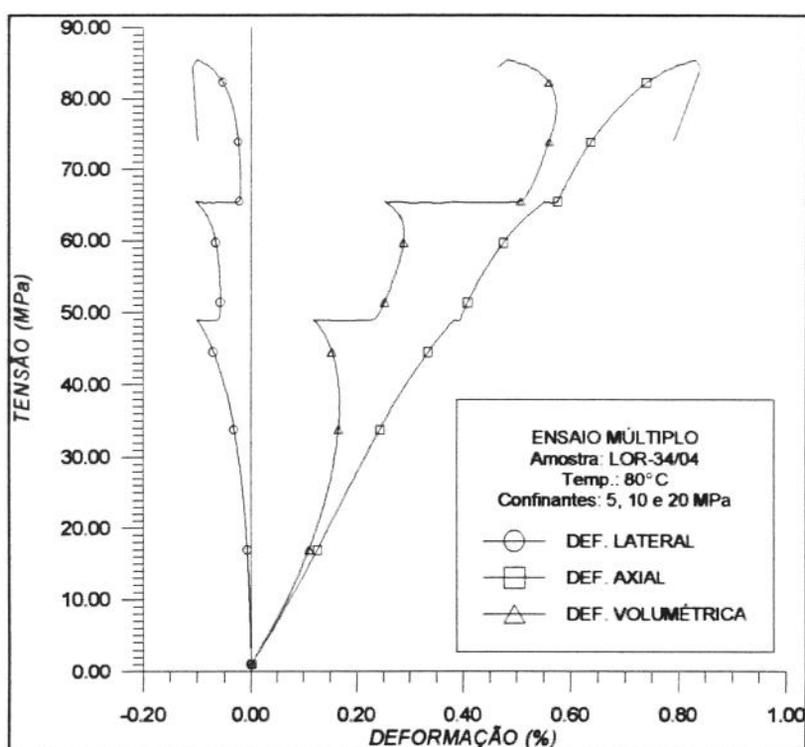


Figura 5.42 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/04.

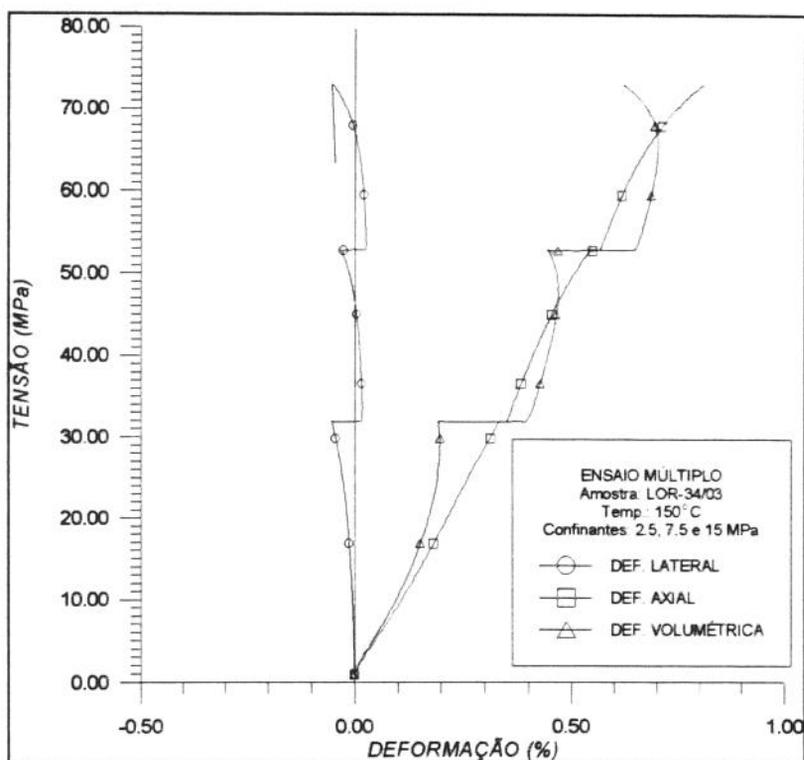


Figura 5.43 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/03.

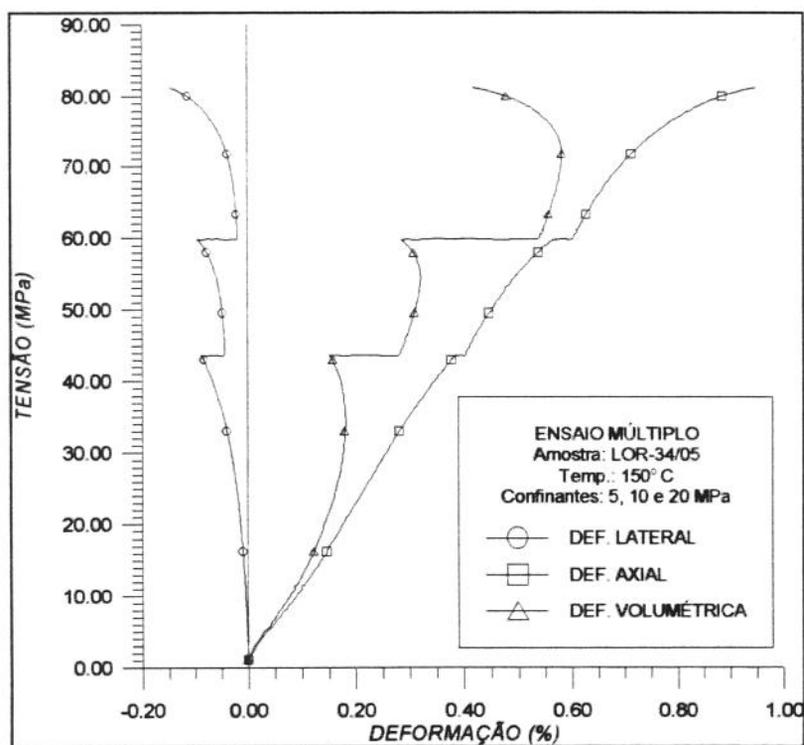


Figura 5.44 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-34/05.

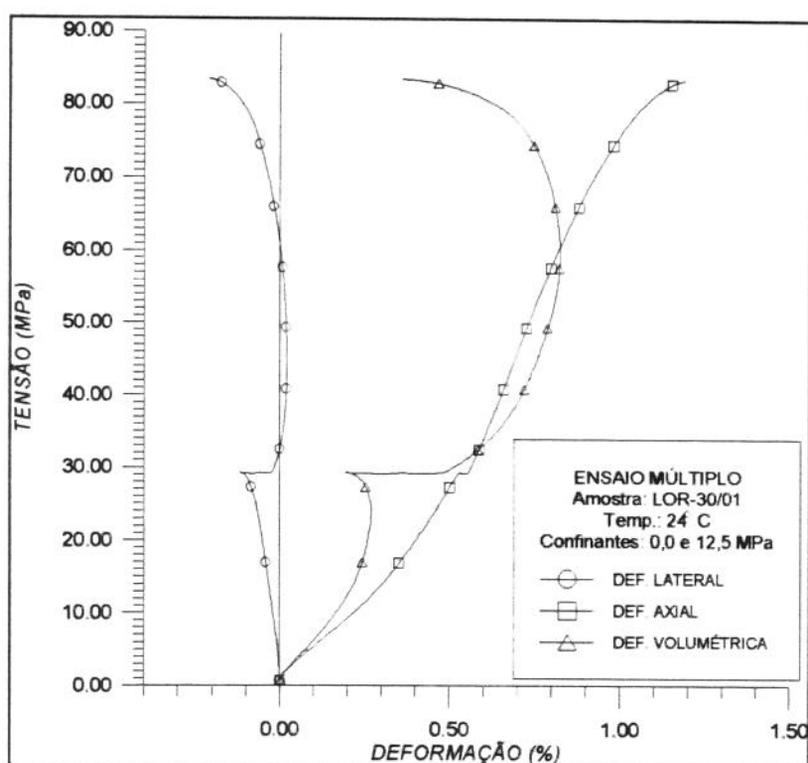


Figura 5.45 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-30/01.

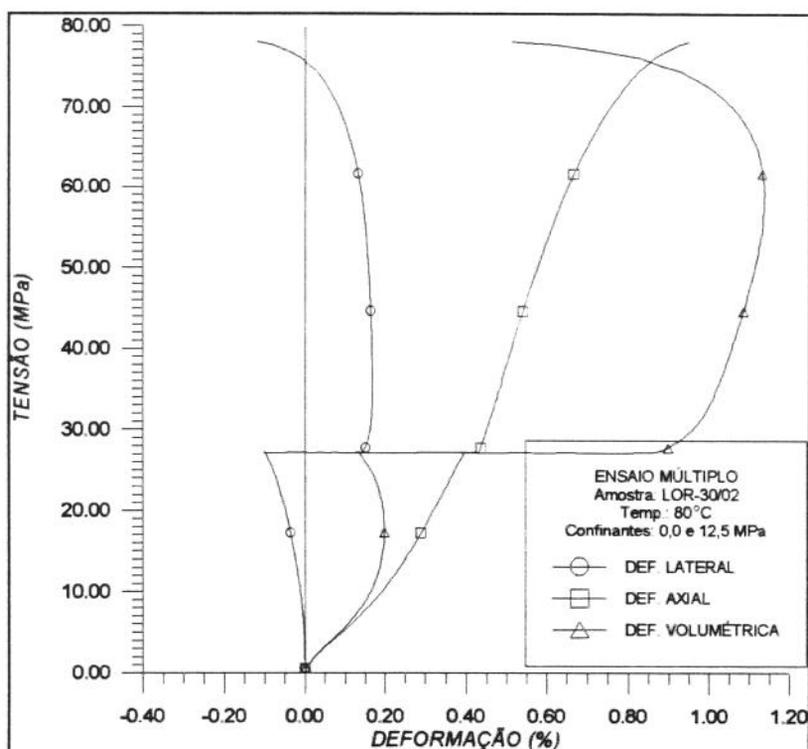


Figura 5.46 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra LOR-30/02.

Enquanto os ensaios para o Campo de Lorena utilizaram-se 2 CP para cada temperatura, para Canto do Amaro adotaram-se 3 CP para cada temperatura, mantendo-se a intercalação entre as pressões de confinamento (tabela 5.5).

Ao todo, foram preparados 14 CP a partir dos testemunhos do terceiro lote de amostras referentes aos poços de Canto do Amaro. Destes, através da análise visual, apenas 9 apresentaram boa similaridade e pertenciam a 6 poços distintos (3 do AP-153, 1 do AP128, 1 do CAM-510, 2 do CAM-519, 1 do CAM-529 e 1 do CAM-615).

Devido ao número reduzido de amostras, optou-se por executar apenas ensaios à temperatura ambiente e 150°C admitindo-se que os ensaios convencionais à temperatura ambiente e 80°C não seriam revistos ou complementados. Os resultados dos ensaios múltiplos seriam comparados entre si nas duas temperaturas estabelecidas e seriam a princípio analisados separadamente dos resultados obtidos nos ensaios convencionais. Esta separação teve como causa o fato de se tratarem de métodos distintos de ensaio, mesmo sabendo-se que em pesquisas anteriores as diferenças encontradas foram pequenas (Holt e Fjær, 1991).

As curvas apresentaram o mesmo aspecto obtido nos ensaios com as amostras do campo de Lorena, não apresentando grandes diferenças no formato. Apenas a amostra AP-128/02 (figura 5.52) deformou-se excessivamente ao se tentar atingir 12,5 MPa de pressão de confinamento (no momento de se passar do primeiro para o segundo estágio do ensaio múltiplo), obrigando a interrupção do ensaio apenas com o primeiro estágio (ensaio uniaxial no primeiro estágio).

As curvas de tensão-deformação lateral também apresentaram o mesmo formato encontrado nas curvas das amostras de Lorena, caracterizando a superposição das tensões geradas pela pressão de confinamento e tensão axial no instante posterior à mudança da pressão confinante.

Como os arenitos de Canto do Amaro deformam-se bastante antes de romper (grande deformação plástica), foi possível chegar mais próximo da tensão de ruptura do material sem que as amostras rompessem

explosivamente. Portanto, as correções para obtenção das tensões de ruptura ficaram abaixo dos 5%.

As figuras de 5.47 a 5.55 apresentam as curvas de tensão-deformação obtidas nos ensaios múltiplos dos arenitos de Canto do Amaro.

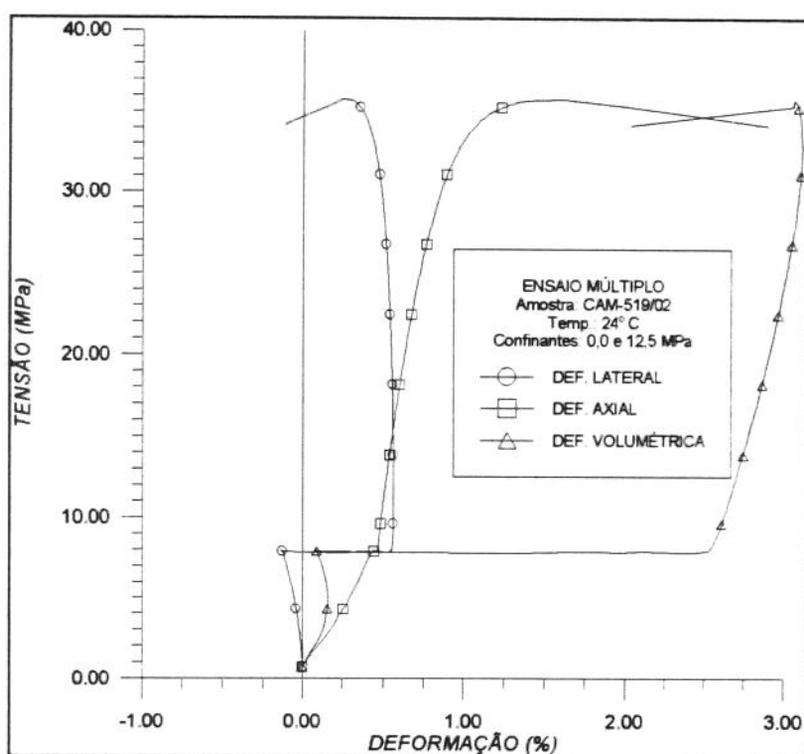


Figura 5.47 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-519/02.

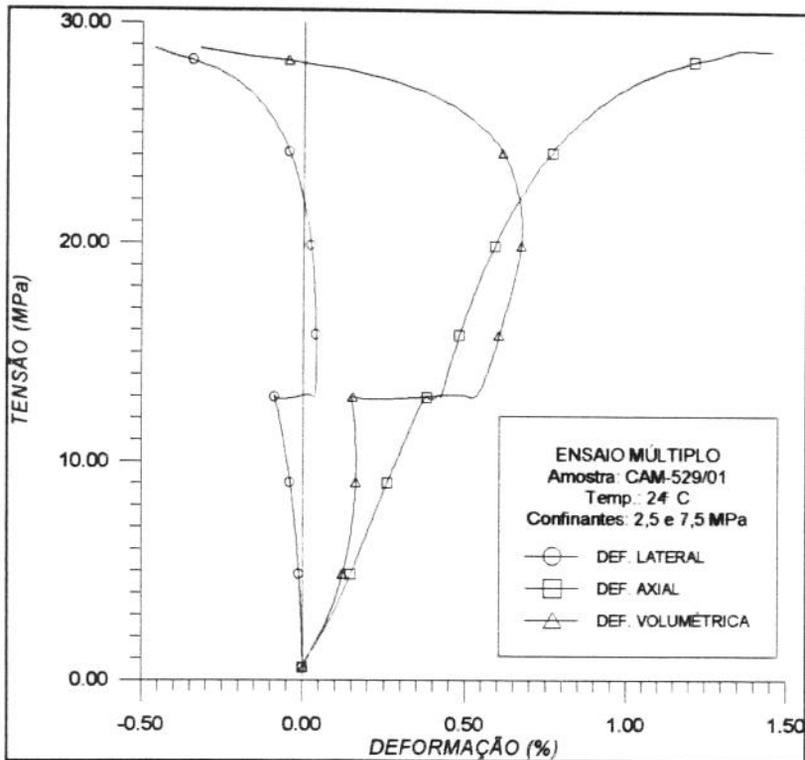


Figura 5.48 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-529/01.

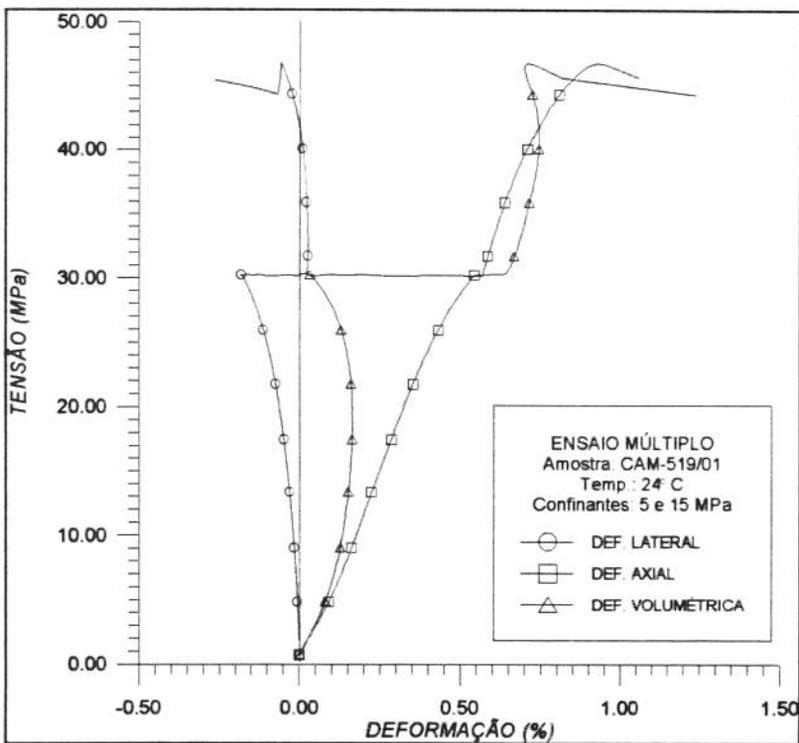


Figura 5.49 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-519/01.

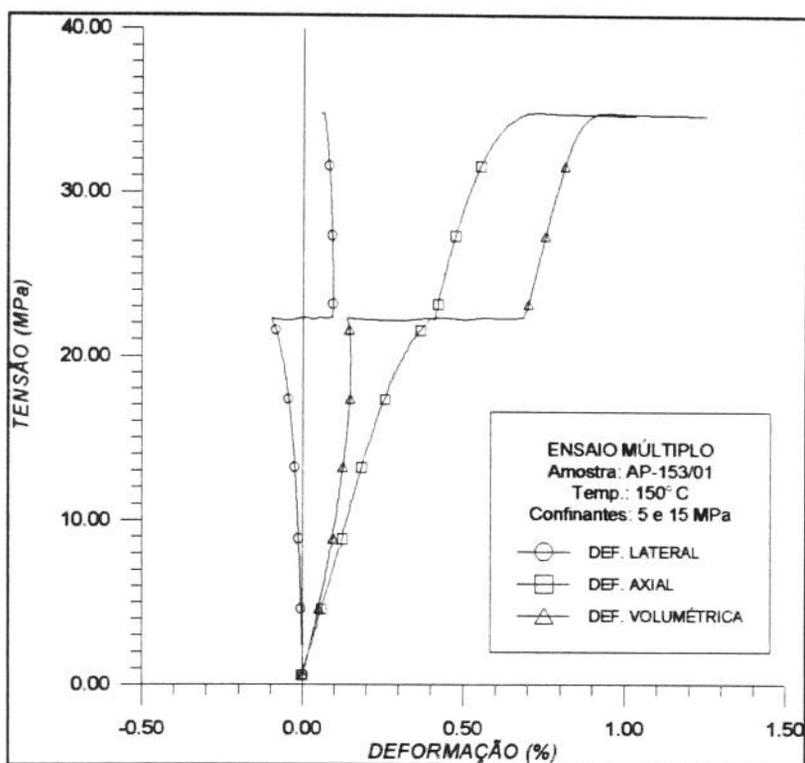


Figura 5.50 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/01.

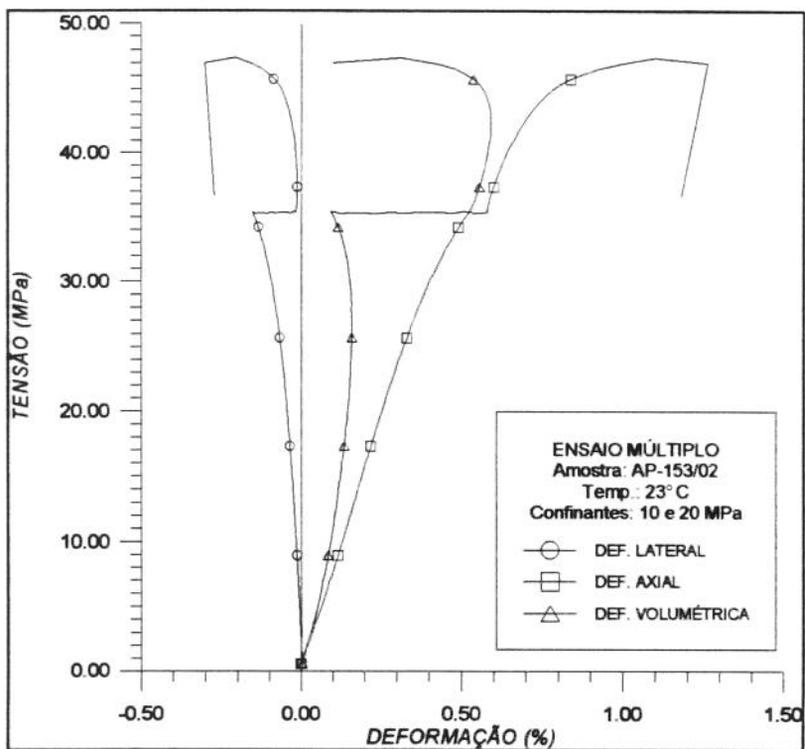


Figura 5.51 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/02.

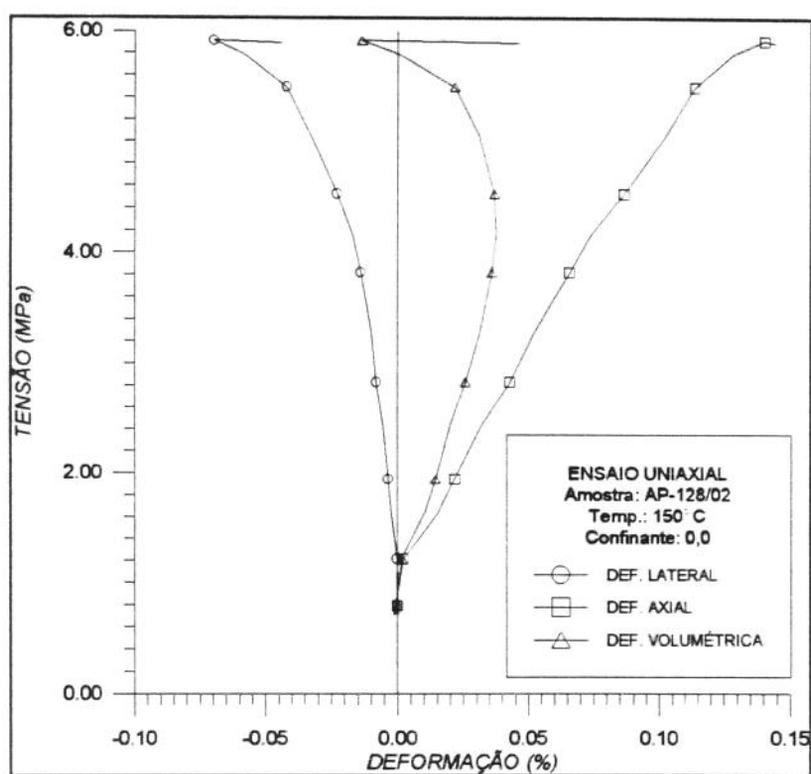


Figura 5.52 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-128/02.

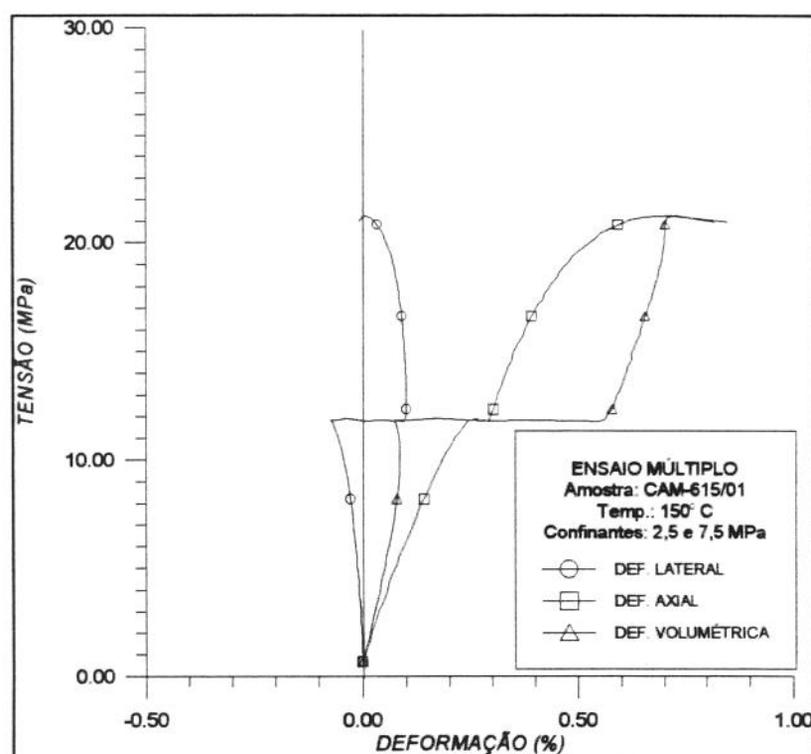


Figura 5.53 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-615/01.

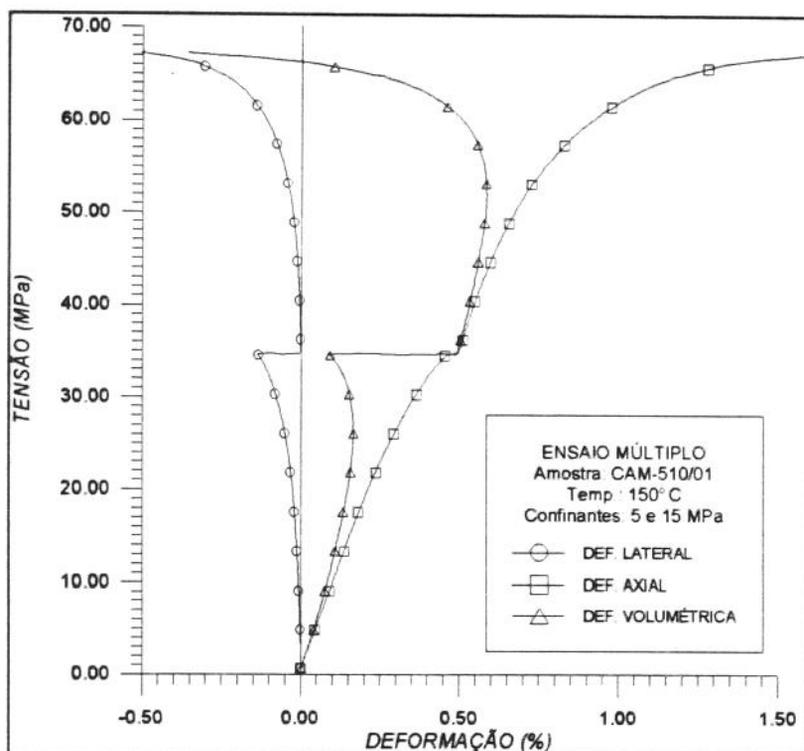


Figura 5.54 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra CAM-510/01.

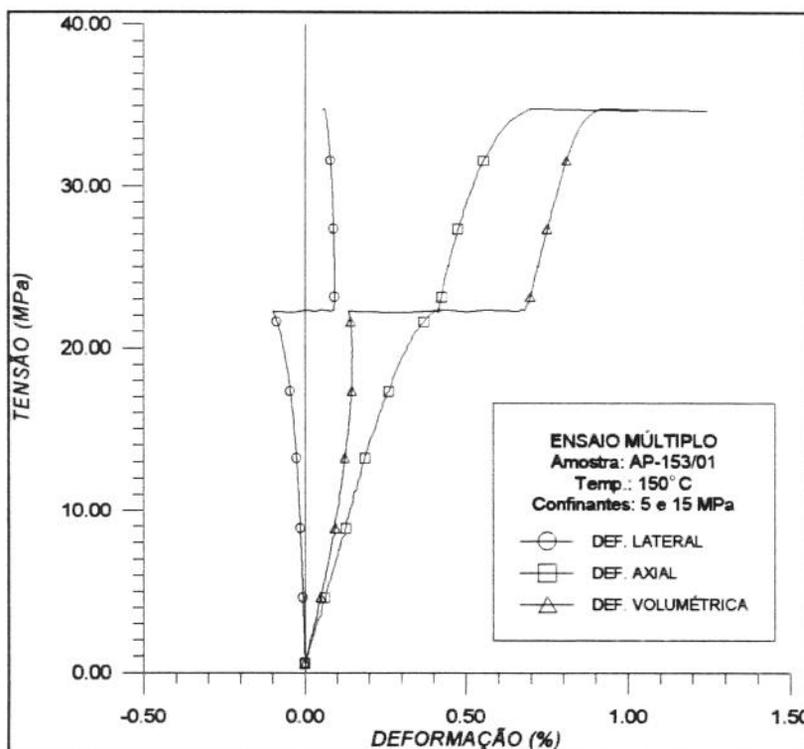


Figura 5.55 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/01.

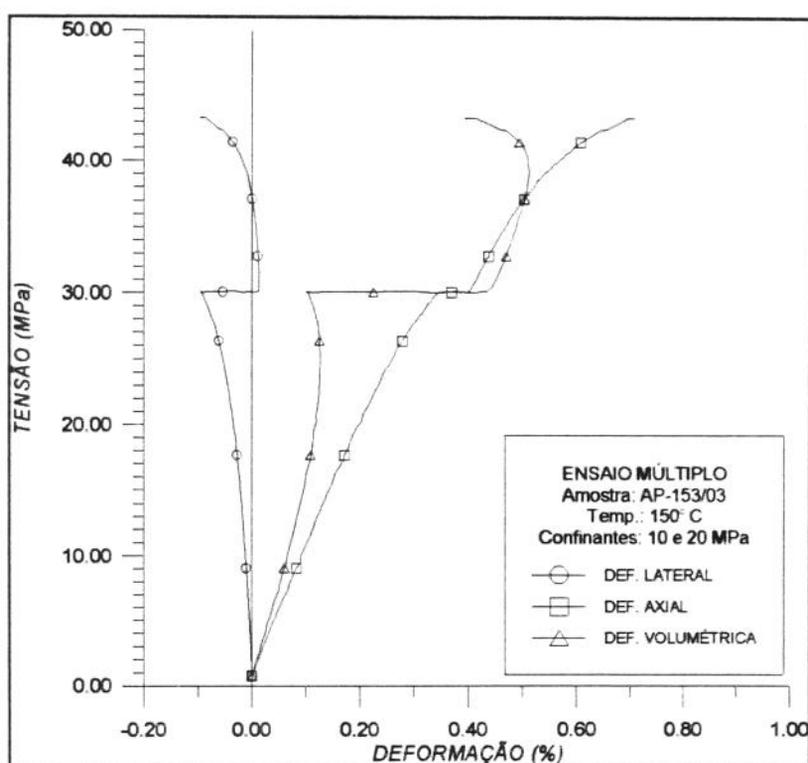


Figura 5.56 - Curva de tensão versus deformação obtida no ensaio múltiplo da amostra AP-153/03.

Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaios Convencionais. Os resultados dos ensaios de ruptura triaxiais estão apresentados na tabela 5.6 e foram obtidos a partir das curvas apresentadas nas figuras 5.16 a 5.37. A coluna referente a $\sigma_{1(\text{corrigido})}$ corresponde ao valor da tensão de ruptura corrigido em função das dimensões do CP. Esta correção foi sugerida por Protodyakonov (1969) apud Vutukuri, Lama e Saluja (1974) para obter o valor da tensão de ruptura para um corpo de prova cuja relação altura/diâmetro seja igual a 2 partindo-se de um CP cuja relação altura/diâmetro seja um valor inferior a 2. Esta equação é a seguinte:

$$\sigma_{c2} = \frac{8\sigma_c}{7 + 2\frac{d}{h}} \quad (5.10)$$

onde:

σ_{c2} é o valor da tensão de ruptura correspondente a uma amostra com $h/d=2$;

σ_c é o valor da tensão de ruptura obtido;

d é o diâmetro do corpo de prova;
 h é a altura do corpo de prova.

No caso deste projeto, $\sigma_{1(\text{corrigido})}$ é igual a σ_{c2} da equação 5.10

Na literatura pesquisada encontraram-se vários estudos sobre a influência das dimensões do CP sobre a tensão de ruptura. Os resultados destes estudos indicaram que a tensão de ruptura é influenciada pela relação h/d do CP, concluindo-se que uma relação altura/diâmetro igual ou superior a 2 leva a valores estáveis de tensão de ruptura.

Vutukuri, Lama e Saluja (1974) comentam ainda que para rochas fracas e friáveis, é difícil a obtenção de corpos de prova cuja relação h/d mantenha-se rigorosamente dentro do valor recomendável. Neste caso, deve-se determinar a tensão de ruptura do corpo de prova com as dimensões dos CP disponíveis e depois corrigir o valor obtido utilizado a equação 5.10 ou outras sugeridas em seu trabalho. Este tipo de correção também é sugerida pela ASTM (1986) em sua Designation D2938-86 utilizando-se a mesma equação 5.10.

A comparação entre os valores da tensão de ruptura obtidos nos ensaios triaxiais (σ_1) e os valores corrigidos ($\sigma_{1(\text{corrigido})}$), apresentados na tabela 5.6, demonstraram que a variação obtida foi pequena, não representando alteração significativa, embora as dimensões dos CP tenham variado bastante como pode ser comprovado nas tabelas 4.3 e 4.4. Atendendo a recomendação encontrada na literatura, os valores das tensões de ruptura adotados neste projeto para os ensaios convencionais, foram os corrigidos ($\sigma_{1(\text{corrigido})}$). Posteriormente, na obtenção das tensões de ruptura dos ensaios múltiplos, esta prática foi abandonada em virtude da melhor qualidades dos CP no que diz respeito as dimensões geométricas.

Tabela 5.6 - Tensões de ruptura obtidas nos ensaios triaxiais convencionais.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DE ENSAIO (°C)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	σ_1 (CORRIGIDO) (MPa)	
CAM-456	11	24	2,5	24,0	24,4	
	07		5,0	38,5	39,0	
CAM-373	04		5,0	41,5	41,7	
CAM-456	04		10,0	47,6	47,7	
	06		10,0	64,7	64,9	
AP-98	01		15,0	57,7	57,9	
CAM-456	10		20,0	93,0	92,2	
CAM-456	01		80	2,5	21,5	21,2
	02			5,0	32,8	32,5
	09			5,0	36,7	37,2
CAM-373	07	7,5		61,0	61,4	
CAM-456	08	10,0		39,7	39,6	
	12	10,0		36,0	35,8	
CAM-373	06	15,0		66,5	66,3	
CAM-456	05	20,0		90,0	88,7	
AP-98	03	150		2,5	19,4	19,5
CAM-373	05			5,0	54,7	55,0
AP-98	02		7,5	37,3	37,5	
AP-125	02		7,5	30,2	30,3	
CAM-456	03		10,0	24,7	25,0	
CAM-373	08		15,0	114,0	113,6	
AP-125	03		20,0	61,0	61,4	

Como pode ser observado na tabela 5.6, os valores das tensões de ruptura aumentam com o aumento da pressão de confinamento, estando de acordo com Vutukuri e Lama (1978) e Goodman (1989). Porém, os resultados obtidos a 150°C oscilaram bastante em consequência da heterogeneidade entre as amostras ensaiadas.

A tabela 5.7 traz os resultados referentes às constantes elásticas. Tanto o módulo de Young (E_{50}) quanto o coeficiente de Poisson (ν_{50}) foram obtidos pela tangente as curvas de tensão-deformação no ponto referente a 50% da tensão de ruptura. A International Society for Rock Mechanics

(1978) sugere esta maneira de obter os parâmetros elásticos, e uma outra cujos resultados denominam-se de parâmetros elásticos secantes, E_{sec} e ν_{sec} . Neste projeto optou-se apenas pelo cálculo dos parâmetros elásticos tangentes (E_{50} e ν_{50}).

Os parâmetros elásticos secantes são obtidos a partir das retas secantes que unem o ponto inicial das curvas de tensão-deformação (tensão axial igual a zero) até o ponto sobre estas curvas correspondentes a 50% da tensão de ruptura.

Tabela 5.7 - Valores das constantes elásticas obtidas nos ensaios triaxiais convencionais.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DE ENSAIO (°C)	σ_3 (MPa)	E_{50} (GPa)	ν_{50}	
CAM-456	11 07	24	2,5	3,42	0,343	
			5,0	7,82	0,270	
CAM-373	04		5,0	11,67	0,337	
CAM-456	04 06		10,0	6,87	0,295	
			10,0	12,04	0,310	
AP-98	01		15,0	10,20	0,273	
CAM-456	10		20,0	11,04	0,417	
CAM-456	01 02 09		80	2,5	4,38	0,313
				5,0	8,38	0,294
				5,0	4,83	0,267
CAM-373	07			7,5	15,62	0,207
CAM-456	08 12			10,0	6,24	0,345
		10,0		5,21	0,255	
CAM-373	06	15,0		10,43	0,181	
CAM-456	05	20,0		10,69	0,297	
AP-98	03	150		2,5	7,29	0,357
CAM-373	05			5,0	18,78	0,167
AP-98	02			7,5	8,78	0,162
AP-125	02			7,5	5,66	0,312
CAM-456	03		10,0	4,10	0,294	
CAM-373	08		15,0	18,55	0,274	
AP-125	03		20,0	7,51	0,286	

Observando-se os valores apresentados na tabela 5.7, foi possível, mais uma vez, detectar o efeito provocado pela heterogeneidade do material. As principais diferenças foram percebidas ao se comparar os valores de E_{50} das amostras do poço CAM-373 com os valores de E_{50} do restante das amostras. O fato de os arenitos deste poço apresentarem composição distinta dos demais, ou seja, maior concentração de calcita em média, pode justificar os valores mais altos no módulo de elasticidade.

A falta de homogeneidade entre amostras não permite que se obtenham valores muito confiáveis dos parâmetros desejados para serem usados de forma generalizada, mesmo tratando-se de materiais provenientes de um único campo ou formação. A melhor alternativa, neste caso, é excluir as informações obtidas a partir dos materiais muito diferentes, preservando-se apenas aquelas obtidas de um grupo menor (mais selecionado), porém com características mais próximas entre si. Este procedimento foi adotado em várias fases do projeto como, por exemplo, na determinação dos parâmetros de resistência (ângulo de atrito interno e coesão). Neste caso, especificamente, optou-se em analisar apenas os resultados do poço CAM-456, pois este forneceu o maior número de dados para as temperaturas ambiente e 80°C, com razoável homogeneidade entre si.

Este mesmo procedimento foi adotado na avaliação do comportamento da tensão de ruptura com a temperatura para os arenitos friáveis da Formação Açú. A única diferença, neste caso, foi a inclusão do valor de tensão de ruptura obtida pela amostra AP-98/01. Os dados referentes as amostras do poço CAM-373 foram excluídos pois, de um modo geral, se comportaram de forma muito diferente das demais.

Esta preparação prévia, buscando-se o máximo de homogeneidade entre as amostras, teve por objetivo tornar mais confiável a utilização de dois recursos na avaliação do comportamento da tensão de ruptura. O primeiro recurso refere-se ao cálculo da média aritmética dos resultados experimentais e o segundo refere-se a utilização dos gráficos representativos da tensão de ruptura no plano $\sigma_1 - \sigma_3$.

Segundo Luís Rey (1987), em trabalhos científicos, os valores obtidos durante o ensaio de qualquer variável, para serem comparados, podem ser substituídos por uns poucos valores sintéticos capazes de representar melhor o fenômeno estudado. A média aritmética é um destes

valores sintéticos (o desvio padrão pode ser o outro) e pode ser utilizada para caracterizar a tendência central de uma coleção de dados. Apesar de ser um recurso simples, a média aritmética pode dar uma idéia razoável do comportamento da variável que se quer estudar. Este recurso não foi aplicado apenas na avaliação da tensão de ruptura mas também na avaliação do módulo de Young e do coeficiente de Poisson.

O outro recurso, da representação gráfica das tensões de ruptura no plano $\sigma_1 - \sigma_3$, complementada com as curvas de regressão destes pontos para cada temperatura, auxiliaram na análise feita sobre o comportamento deste parâmetro. As curvas permitiram também observar a evolução da tensão de ruptura com a pressão de confinamento. O resultado está representado na figura 5.57. Os dois recursos foram utilizados em conjunto, um sendo o complemento do outro na análise global.

As médias aritméticas das tensões de ruptura em cada temperatura estão relacionados na tabela 5.8. Os números obtidos devem ser traduzidos como o comportamento médio do material entre as pressões de confinamento de 2,5 e 20 MPa, para cada temperatura ensaiada. A partir delas foi possível ter a primeira idéia da evolução da tensão de ruptura com a temperatura. Como pode ser observado na tabela 5.6 a variação dos resultados, que é inerente às diferenças naturais do material, dificultaria a interpretação em cada pressão de confinamento.

Tabela 5.8 - Valores médios das tensões de ruptura para cada temperatura (sem considerar os dados do poço CAM-373).

TEMPERATURA (°C)	TENSÃO DE RUPTURA MÉDIA, $\bar{\sigma}_1$ (MPa)
24	54,4
80	42,5
150	34,7

Os valores apresentados na tabela 5.8 mostram que a resistência a compressão dos arenitos caiu com o aumento da temperatura. A queda foi de 21,8% entre 24°C e 80°C e de 18,3% entre 80°C e 150°C, valores considerados significativos. As curvas apresentadas na figura 5.57

mostram de que forma a tensão de ruptura foi afetada pela temperatura entre 2,5 MPa e 20 MPa.

Vutukuri, Lama e Saluja (1974) apresentam os resultados de outros pesquisadores que verificaram ter havido queda na resistência a compressão de diversos tipos de rochas como a calcita, o granito, a dolomita, etc., com a elevação de temperatura. Estes resultados confirmam os resultados obtidos nesta fase do projeto.

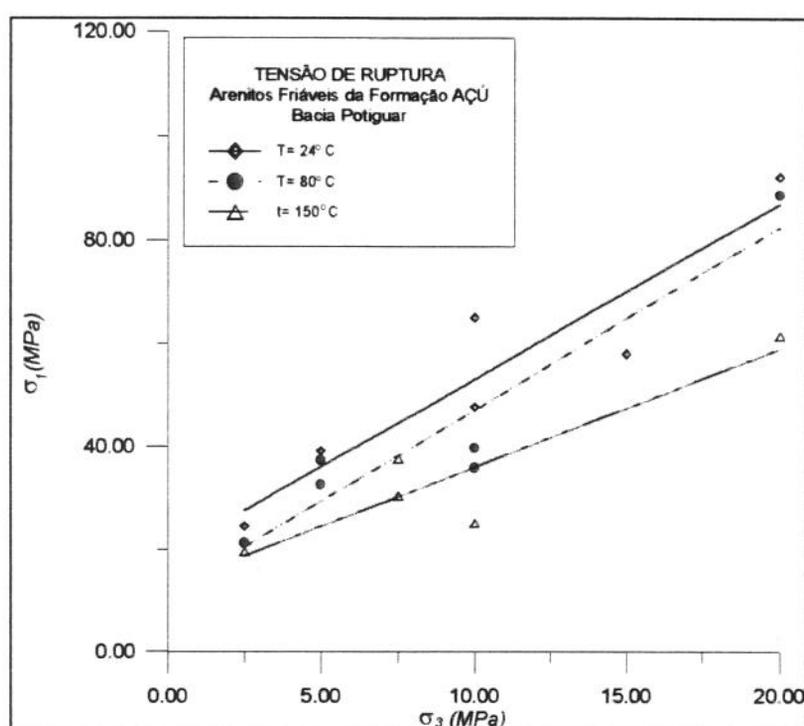


Figura 5.57 - Curvas de correlação apresentando o comportamento da tensão de ruptura versus pressão de confinamento no plano $\sigma_1 - \sigma_3$, em função da temperatura.

Tanto a tabela 5.6 quanto a figura 5.57 reforçam a importância da homogeneidade entre as amostras. Como a quase totalidade dos resultados à temperatura ambiente e a 80°C pertenceram a um único poço (CAM-456), ficou mais fácil constatar a queda na resistência do material com o aumento da temperatura. Todos os valores de tensão de ruptura obtidos a 80°C estiveram abaixo dos valores obtidos a temperatura ambiente, para o poço CAM-456.

A etapa seguinte, foi a avaliação do coeficiente de Poisson, que seguiu basicamente a mesma metodologia adotada para as tensões de ruptura. Primeiro foram eliminados os valores desta variável referentes ao poço CAM-373 e os demais pontos representados graficamente contra a pressão de confinamento, para cada temperatura. O resultado apresentado na figura 5.58, onde, além dos pontos referentes aos valores dos coeficiente de Poisson, foram representadas também as curvas de correlação linear destes pontos em cada temperatura.

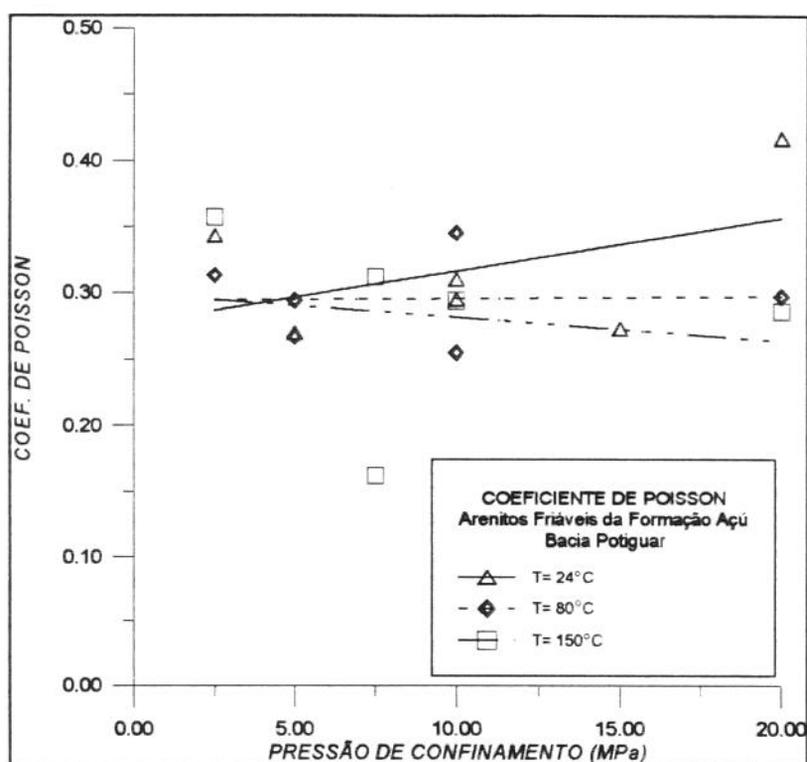


Figura 5.58 - Comportamento do coeficiente de Poisson em função da pressão de confinamento e da temperatura para os arenitos da Formação Açú.

A reta de regressão dos pontos obtidos a temperatura ambiente (24°C), demonstrou que houve um aumento do coeficiente de Poisson com a pressão de confinamento. A análise mais cuidadosa dos resultados nesta temperatura permitiu verificar que o último ponto, referente ao coeficiente de Poisson da amostra CAM-456/10 ($\nu=0,417$), está bem acima do valor médio que foi de 0,318 para temperatura ambiente. Este ponto terminou forçando a curva para cima, porém a eliminação deste mostraria clara-

mente uma tendência oposta para o coeficiente de Poisson ou seja, este parâmetro cai com o aumento da pressão de confinamento.

A figura 5.59 mostra como se comporta a curva à temperatura ambiente com a eliminação do dado referente a amostra CAM-456/10. Segundo Vutukuri e Lama (1978), o aumento do coeficiente de Poisson com o nível de tensão pode estar associado à deformação plástica do material. Esses pesquisadores ainda comentam que o aumento da pressão de confinamento leva à redução do coeficiente de Poisson para rochas fracas e no caso de rochas duras, não exerce qualquer influência.

Bloch (1993) confirmou os resultados obtidos por Vutukuri e Lama (1978) ao efetuar ensaios a temperatura ambiente com amostras de arenitos homogêneos e bem consolidados da formação Marfim, bacia do Recôncavo. Ele verificou que o coeficiente de Poisson caiu cerca de 35% com o aumento da pressão de confinamento entre 0 (zero) e 40 MPa.

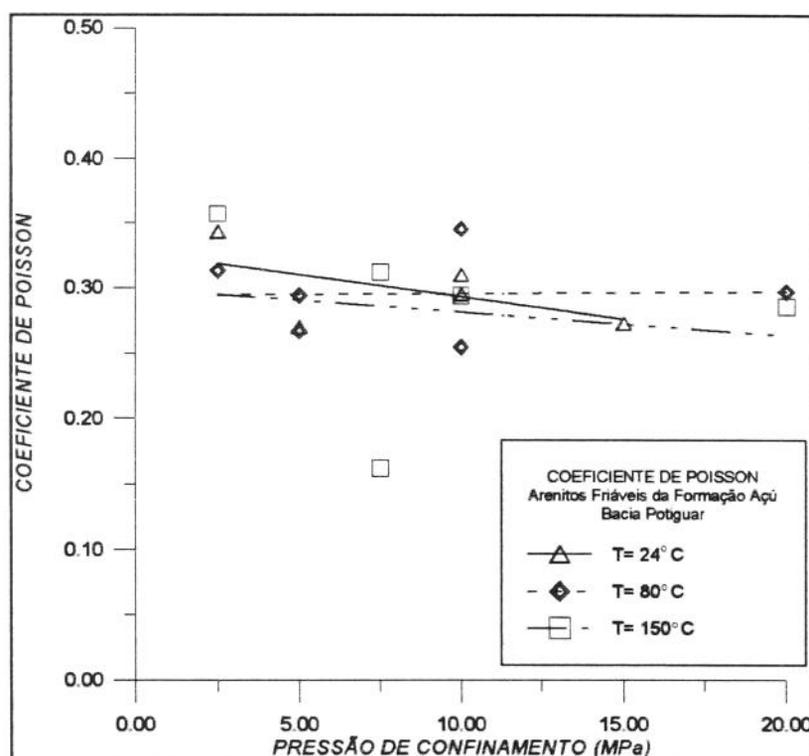


Figura 5.59 - Comportamento do coeficiente de Poisson para os arenitos da formação Açú. Na curva representativa da temperatura de 24°C foi excluído o ponto referente a amostra CAM-456/10.

De um modo geral, as três curvas de regressão da figura 5.59 apresentaram baixos valores de coeficiente de correlação (o mesmo pode ser afirmado para a figura 5.58). Os valores dos coeficientes de correlação (r) a 24°C, 80°C e 150°C foram respectivamente 0,55, 0,03 e 0,158. Valores tão baixos, principalmente a 80°C e 150°C, mostram pouca relação entre o coeficiente de Poisson e a pressão de confinamento para estas amostras.

A avaliação através da comparação entre os valores das médias aritméticas deste parâmetro para cada temperatura, não revelou diferenças significativas. Os valores médios desta variável a 24°C, 80°C e 150°C foram respectivamente, $v_{24}=0,318$, $v_{80}=0,295$ e $v_{150}=0,282$, demonstrando um decréscimo de 7,2% entre a temperatura ambiente e 80°C e de 4,4% entre 80°C e 150°C.

É bom salientar que, em virtude do número reduzido de amostras, os resultados não foram tratados estatisticamente. Portanto, estas diferenças podem estar em parte relacionadas à própria variação inerente aos trabalhos experimentais. A comparação do que ocorreu com o coeficiente de Poisson entre as temperaturas ambiente e 80°C oferece mais confiança pelo simples fato de que a maioria das amostras nestas duas condições pertencem a um único poço, o CAM-456.

Das figuras 5.58 e 5.59 não foi possível obter conclusão alguma a respeito da influência da temperatura sobre o coeficiente de Poisson. Os pontos obtidos nas três temperaturas se apresentaram de forma dispersa, superpondo-se para formar uma nuvem de pontos sem qualquer tendência visível. De todos os parâmetros apresentados neste projeto, os parâmetros elásticos foram os que apresentaram comportamentos mais aleatórios e de difícil interpretação.

A figura 5.60 mostra as variações ocorridas com o módulo de Young (E_{50}) em função da pressão de confinamento, tanto à temperatura ambiente quanto a 80°C. As duas curvas de regressão são polinômios de segundo grau e representam o melhor ajuste para os pontos nas duas temperaturas. Os coeficientes de correlação para estas duas curvas foram respectivamente $r_{24}= 0,82$ e $r_{80}= 0,795$, que significam uma correlação apenas razoável entre a pressão de confinamento e o módulo de Young. Se bem que estas correlações foram bem superiores àquelas apresentadas

pelo coeficiente de Poisson, que ficaram abaixo de 0,55 para qualquer uma das curvas apresentadas.

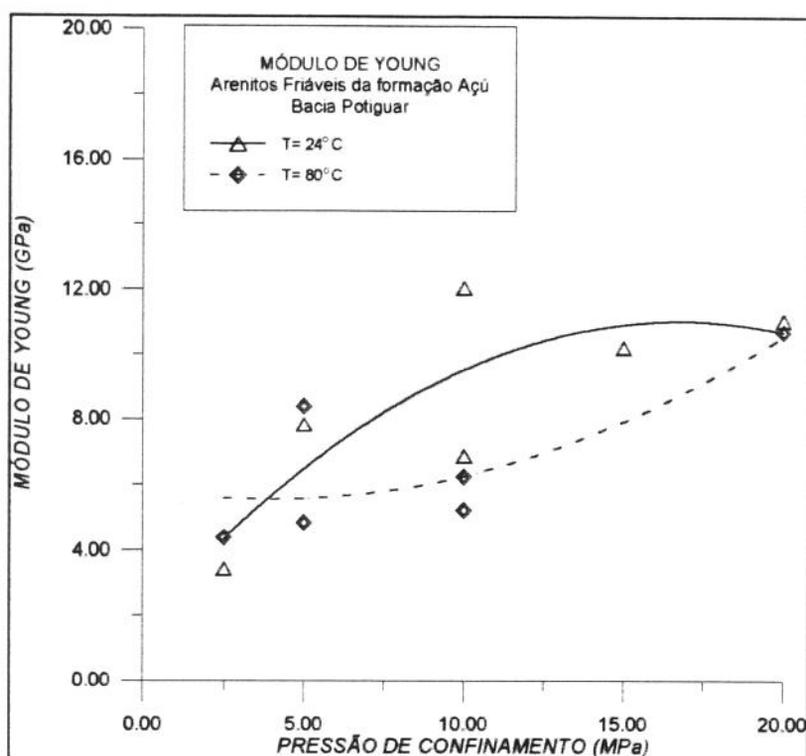


Figura 5.60 - Comportamento do módulo de Young à temperatura ambiente e 80°C para os arenitos friáveis da Formação Açú.

A curva superior, com concavidade voltada para baixo, representa o comportamento do módulo de Young à temperatura ambiente. Bloch (1993) obteve curva semelhante ao avaliar o comportamento dos arenitos homogêneos e bem consolidados da formação Marfim, Bacia do Recôncavo. No mesmo trabalho, o autor comenta que Vutukuri e Lama (1978) apresentaram vários resultados mostrando que o módulo de Young de arenitos aumenta cerca de 20% devido ao aumento da pressão de confinamento, porém nada mencionaram a respeito da queda posterior deste parâmetro após ser atingido o ponto de pico.

No caso das amostras ensaiadas neste projeto, o ponto de pico ocorreu a aproximadamente 17 MPa (figura 5.60), bem próximo do valor encontrado por Bloch (1993), que foi em torno de 20 MPa de pressão de confinamento.

O formato da curva obtida à temperatura ambiente pode estar relacionado com o fato de que as pressões de confinamento elevadas tornam o material mais dúctil e conseqüentemente com um comportamento mais plástico. Segundo Vutukuri e Lama (1978), materiais desta natureza apresentam variações no módulo de Young, que vai decrescendo com o aumento do nível de tensões.

A curva de ajuste dos pontos obtidos a 80°C teve sua concavidade voltada para cima. Gray (1967) apud Vutukuri e Lama (1978) apresenta curvas semelhantes a esta, referentes a pesquisas com amostras de folhelhos. Em uma destas curvas, o módulo de Young aumentou até ser atingida a pressão de 130 MPa a partir daí, decresceu cerca de 20% e estabilizou. Porém, não foi especificada a temperatura de ensaio. Vutukuri e Lama comentam que Gray não deixou claro o porquê da existência do pico de tensões.

O efeito da temperatura, conforme apresentado na figura 5.60, foi o de reduzir o módulo de Young dos arenitos ensaiados. As médias aritméticas obtidas à temperatura ambiente e 80°C foram respectivamente $E_{24}=8,57\text{GPa}$ e $E_{80}=6,62\text{GPa}$, representando uma redução de 22,7%. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Hughes e Maurette (1956) apud Vutukuri e Lama (1978). Esses pesquisadores, estudando o comportamento de amostras dos arenitos Caplen Dorn, obtiveram uma redução no módulo de Young de 20% para uma variação na temperatura de ensaio entre 25° e 200°C, a uma pressão de confinamento de 500 atm (49 MPa).

As curvas mostraram também que, para os valores mais baixos e mais altos de pressões de confinamento, os efeitos da temperatura foram bem menores do que no meio do intervalo. Neste ponto, a diferença calculada a partir das curvas de ajuste foi cerca de 32,7%.

Quanto à inversão da concavidade apresentada pela curva do módulo de Young *versus* pressão de confinamento quando a temperatura passa de 24°C para 80°C, não foi possível, com os dados disponíveis, encontrar qualquer justificativa para tal comportamento. Porém, este comportamento sugere que pode haver uma temperatura intermediária entre

24° e 80°C, onde a curva de correlação entre o módulo de Young e a pressão de confinamento dê uma equação do primeiro grau (uma linha reta).

O fato das curvas se cruzarem no extremo superior do intervalo de pressões (20 MPa), pode ainda significar que para valores superiores de pressão de confinamento haja uma inversão no comportamento do módulo de Young com a temperatura.

Análise dos Resultados Obtidos nos Ensaio Múltiplos. Os ensaios de múltiplo estado de falha apresentam algumas limitações que devem ser consideradas nos objetivos dos ensaios de laboratório de mecânica das rochas. Uma delas, de fundamental importância, é não poder utilizar as curvas de tensão *versus* deformação, a partir do segundo estágio do ensaio, para a determinação dos parâmetros elásticos da rocha. Segundo Fjær et al. (1992), os módulos de elasticidade são influenciados pelos danos estruturais causados pelo primeiro estágio de carregamento.

Porém, como o primeiro estágio do ensaio é idêntico a um ensaio convencional, os parâmetros elásticos obtidos neste trecho das curvas de tensão *versus* deformação são perfeitamente confiáveis. As tabelas 5.9 e 5.10 apresentam os valores dos módulos de Young (E_{50}) e dos coeficientes de Poisson (ν_{50}) obtidos a partir das curvas apresentadas nas figuras 5.39 a 5.56. As tabelas refletem também os cuidados tomados neste projeto para atender as recomendações apresentadas por Fjær et al. (1992). As lacunas representam as situações onde não se devem calcular os parâmetros elásticos.

Tabela 5.9 - Valores das constantes elásticas obtidas nos ensaios múltiplos com as amostras dos arenito do campo de Canto do Amaro.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DE ENSAIO (°C)	σ_3 (MPa)	E_{50} (GPa)	ν_{50}
CAM-519	02	24	0,0	1,82	0,382
CAM-529	01		2,5	3,65	0,247
CAM-519	01		5,0	6,73	0,285
CAM-529	01		7,5	-	-
AP-153	02		10,0	7,93	0,254
CAM-519	02		12,5	-	-
CAM-519	01		15,0	-	-
AP-153	02		20,0	-	-
AP-128	02		150	0,0	4,44
CAM-615	01	2,5		4,95	0,286
AP-153	01	5,0		6,88	0,172
CAM-510	01	5,0		7,84	0,259
CAM-615	01	7,5		-	-
AP-153	03	10,0		9,60	0,200
AP-153	01	15,0		-	-
CAM-510	01	15,0		-	-
AP-153	03	20,0		-	-

Tabela 5.10 - Valores das constantes elásticas obtidas nos ensaios múltiplos com as amostras dos arenito do campo de Lorena.

POÇO	Nº do CP	TEMP. DO ENSAIO (°C)	σ_3 (MPa)	E_{60} (GPa)	ν_{50}	
LOR-30	01	24	0,0	5,54	0,227	
LOR-34	06		2,5	13,46	0,281	
	01		5,0	11,41	0,261	
	06		7,5	-	-	
LOR-30	01		10,0	-	-	
	01		12,5	-	-	
LOR-34	06		15,0	-	-	
	01		20,0	-	-	
LOR-30	02		80	0,0	7,68	0,269
LOR-34	02			2,5	9,50	0,227
	04	5,0		14,91	0,242	
	02	7,5		-	-	
	04	10,0		-	-	
LOR-30	02	12,5		-	-	
LOR-34	02	15,0		-	-	
	04	20,0	-	-		
	03	150	2,5	10,56	0,183	
	05		5,0	12,50	0,207	
	03		7,5	-	-	
	05		10,0	-	-	
03	15,0		-	-		
05	20,0		-	-		

Durante a realização dos ensaios múltiplos com as amostras apresentadas na tabela 5.9, verificou-se que a amostra CAM-510/01 apresentou valores de tensão de ruptura bem acima das demais, nos dois estágios do ensaio (comparar figuras 5.54 e 5.55). Este fato pode estar relacionado com a maior cimentação desta amostra em comparação com as demais, em virtude da maior concentração de calcita e dolomita na forma de cimento. A primeira medida foi isolar os resultados obtidos com a amostra CAM-510/01 e repetir com uma outra, escolhida aleatoriamente, as mesmas condições de ensaio previstas para esta amostra. O CP esco-

lhido foi o AP-153/01. Portanto, os valores dos parâmetros elásticos referentes a amostra CAM-510/01 não foram utilizados na análise dos resultados apresentados para os poços do campo de Canto do Amaro nesta etapa do projeto.

A figura 5.61 apresenta as curvas representativas do comportamento do coeficiente de Poisson com a pressão de confinamento, nas temperaturas de 24°C e 150°C, para as amostras dos arenitos do campo de Canto do Amaro.

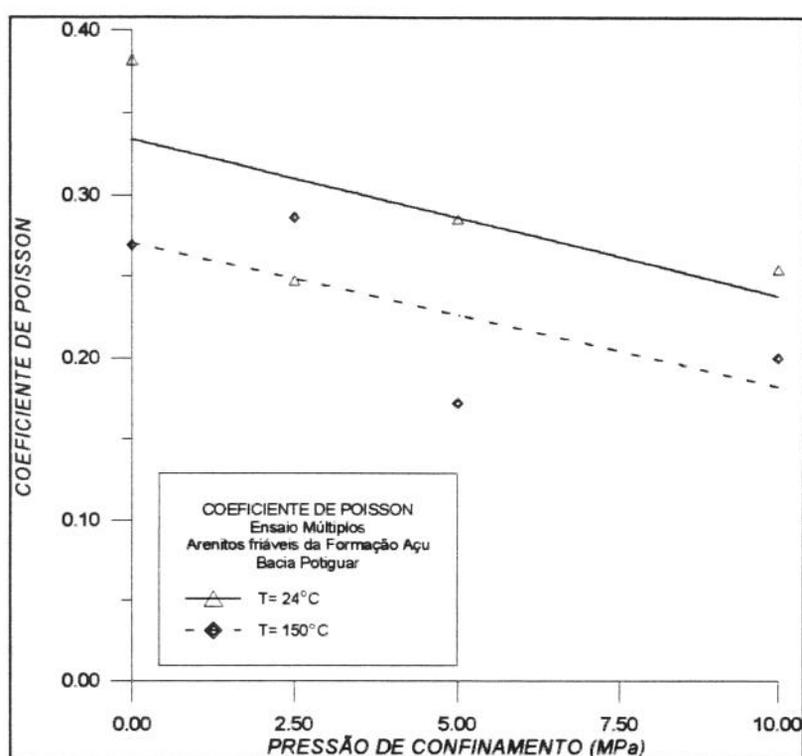


Figura 5.61 - Comportamento do coeficiente de Poisson à temperatura ambiente e a 150°C para as amostras dos arenitos da Formação Açú. Resultados obtidos nos ensaios múltiplos.

As curvas apresentadas na figura 5.61 representam retas de regressão dos pontos obtidos à temperatura ambiente e a 150°C respectivamente. Estas retas apresentaram melhores coeficientes de correlação do que as retas obtidas nos ensaios com as amostras do primeiro e segundo lotes (vide figura 5.58 e 5.59). Os coeficientes de correlação obtidos à temperatura ambiente e a 150°C foram respectivamente $r_{24}=0,66$ e $r_{150}=0,69$, que são apenas razoáveis mas permitem avaliar com certa confiança a variação do coeficiente de Poisson com a pressão de confinamento e a tem-

peratura. Os valores mais altos dos coeficientes de correlação em relação aos obtidos para as amostras do primeiro e segundo lotes foram atribuídos a maior homogeneidade entre as amostras ensaiadas.

A figura 5.61 sugere que o coeficiente de Poisson dos arenitos friáveis da formação Açu cai com o aumento da pressão de confinamento e da temperatura. As curvas são praticamente paralelas, indicando haver linearidade entre o coeficiente de Poisson e a temperatura.

Os valores médios dos coeficientes de Poisson à temperatura ambiente e a 150°C foram respectivamente, $\nu_{24}=0,292$ e $\nu_{150}=0,232$ que representaram uma redução média de 20,5% nesta variável quando a temperatura passou de 24° para 150°C.

Tanto a variação do coeficiente de Poisson com a pressão de confinamento quanto com a temperatura, confirmam os resultados aparentemente pouco precisos obtidos com as amostras do primeiro e segundo lotes. Inclusive, caso fosse admitida a hipótese de que a relação entre o coeficiente de Poisson e a temperatura é linear, permitiria encontrar, para as amostras do terceiro lote, uma variação média para este parâmetro, quando a temperatura passasse de 24° para 80°C. Esta variação seria em torno de 9,1%, que está bem próximo de 7,2% encontrado para as amostras do primeiro e segundo lotes. Portanto, a hipótese da linearidade na relação entre o coeficiente de Poisson e a temperatura pode a princípio ser admitida como verdadeira para os arenitos friáveis da Formação Açu.

A figura 5.62 apresenta os gráficos representativos do comportamento do módulo de Young com a pressão de confinamento, à temperatura ambiente e a 150°C.

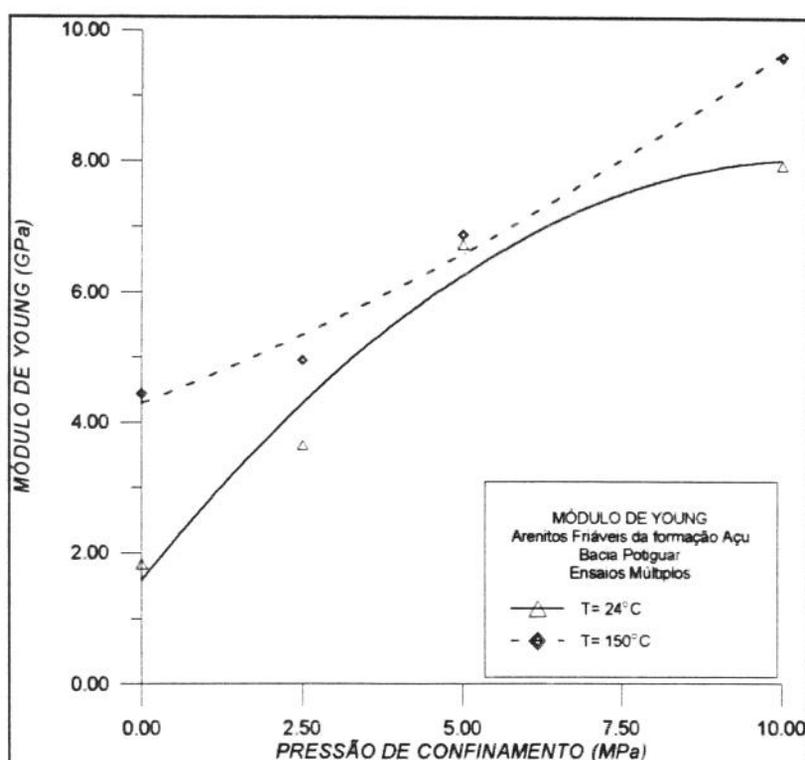


Figura 5.62 - Comportamento do módulo de Young com a pressão de confinamento, à temperatura ambiente e 150°C, para as amostras dos arenitos da Formação Açú. Resultados obtidos nos ensaios múltiplos.

As curvas de regressão apresentadas na figura 5.62 são parábolas e representam o melhor ajuste para os pontos obtidos à temperatura ambiente e a 150°C, e apresentaram respectivamente os seguintes coeficiente de correlação: $r_{24} = 0,985$ e $r_{150} = 0,991$. Estes valores indicam uma correlação muito boa entre o módulo de Young, a pressão de confinamento e a temperatura.

Os formatos das curvas são semelhantes aos obtidos para as amostras do primeiro e segundo lotes de amostras (figura 5.60), persistindo a mudança na concavidade em função da temperatura. Porém, a diferença ficou por conta da tendência oposta para o módulo de Young com a temperatura. A figura 5.62 indica que o módulo de Young, neste caso, aumenta com o aumento da temperatura. E no cálculo da média deste parâmetro para cada temperatura, obtiveram-se os seguintes valores: $E_{24} = 5,03$ GPa e $E_{150} = 6,47$ GPa, que representa um aumento de 28,6% quando a temperatura varia de 24° para 150°C, o que é considerável.

Wai e Lo (1982), ao estudarem o efeito da temperatura sobre a resistência e as propriedades de deformação de amostras de granito, verificaram ter havido aumento no módulo de deformação secante (E_{sec}), até a temperatura de 120°C. A partir desse ponto, o valor de E_{sec} diminuiu a razão de 25% a cada 100°C. Porém, os autores não apresentaram uma justificativa para tal fato ter ocorrido.

Não foi possível encontrar uma justificativa para o comportamento do lote 3 de amostras. O aumento do módulo de Young significa que o material ficou mais rígido a 150°C, ou seja, a inclinação da curva de tensão *versus* deformação axial aumentou com a temperatura. Porém, isso não significa que o material tenha se tornado mais resistente, ou seja, tenha aumentado a tensão de ruptura com o aumento da temperatura, o que de fato não se verificou.

A tabela 5.11 apresenta os valores das tensões de ruptura nas duas temperaturas ensaiadas. Como pode ser verificado, o comportamento, neste caso, continuou coerente com os obtidos nos ensaios do primeiro e segundo lotes de amostras (tabela 5.6 e figura 5.57) e com as conclusões apresentadas na literatura ou seja, a resistência do material caiu com o aumento da temperatura.

Tabela 5.11 - Valores da tensão de ruptura obtidos com as amostras dos poços do campo de Canto do Amaro, nos ensaios múltiplos.

POÇO	Nº do CP	TEMP. (°C)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)
CAM-519	02	24	0,0	9,2
CAM-529	01		2,5	17,8
CAM-519	01		5,0	36,0
CAM-529	01		7,5	36,4
AP-153	02		10,0	46,0
CAM-519	02		12,5	48,2
CAM-519	01		15,0	61,8
AP-153	02		20,0	67,3
AP-128	02	150	0,0	5,9
CAM-615	01		2,5	15,0
CAM-510	01		5,0	38,0
AP-153	01		5,0	27,3
CAM-615	01		7,5	28,7
AP-153	03		10,0	42,0
CAM-510	01		15,0	67,2
AP-153	01		15,0	49,8
AP-153	03		20,0	64,0

O primeiro detalhe a ser observado na tabela 5.11, são os valores das tensões de ruptura obtidos com o ensaio da amostra CAM-510/01, que estiveram em média 37% acima dos valores obtidos com a amostra AP-153/01. Este fato levou a exclusão dos dados referentes a amostra CAM-510/01 na análise dos resultados.

Os valores médios das tensões de ruptura em cada temperatura foram: $\sigma_{24}=40,3$ MPa e $\sigma_{150}=33,2$ MPa, que indicaram uma redução média de 17,6% na tensão de ruptura das amostras, quando a temperatura aumentou de 24° para 150°C.

A comparação deste resultado com o apresentado pelas amostras do primeiro e segundo lotes, onde a tensão de ruptura caiu 36,2% um aumento de temperatura de 24° para 150°C e 21,8% entre 24°

e 80°C, indica que a variação obtida para as amostras do terceiro lote foi aproximadamente a metade.

Do ponto de vista da Mineralogia, não existem grandes diferenças entre as amostras dos arenitos da Formação Açú dos lotes 1 e 2 e do lote 3. Porém, as porosidades apresentadas pelas amostras do poço CAM-456 (poço com maior número de amostras ensaiadas tanto a temperatura ambiente quanto a 80°C) ficaram bem abaixo daquelas apresentadas pelas amostras do terceiro lote (vide tabela 4.10). Inclusive esta diferença pode ter influenciado significativamente na resistência a ruptura média dos ensaios realizados à temperatura ambiente, para os dois casos. As amostras do poço CAM-456, devido a menor porosidade, levaram a uma maior resistência média ($\sigma_{24}=54,4$ MPa) para os lotes 1 e 2 do que as de porosidade mais alta do lote 3 ($\sigma_{24}=40,3$ MPa).

Esta diferença pode indicar que a maior variação na tensão de ruptura para as amostras do poço CAM-456 entre 24° e 80°C, está relacionada ao maior dano estrutural sofrido pelas amostras mais maciças ou seja, com menor espaços vazios (poros), quando submetidas ao aumento de temperatura. Estes danos estão relacionados as tensões térmicas que surgem nos pontos de contato entre os grãos do arcabouço da rocha em virtude das dilatações. Um arenito com maior espaço de vazios (poros), pode absorver melhor o processo de dilatação térmica da sua estrutura.

A figura 5.63 mostra a representação gráfica da tensão de ruptura das amostras no plano σ_1 - σ_3 tanto à temperatura ambiente quanto para 150°C. As retas que aparecem na figura são as curvas de regressão, cujos coeficientes de correlação são $r_{24}=0,97$ e $r_{150}=0,99$, e significam que existiu boa correlação entre a tensão de ruptura e a pressão de confinamento. Este resultado pode significar também que as amostras eram mais homogêneas entre si.

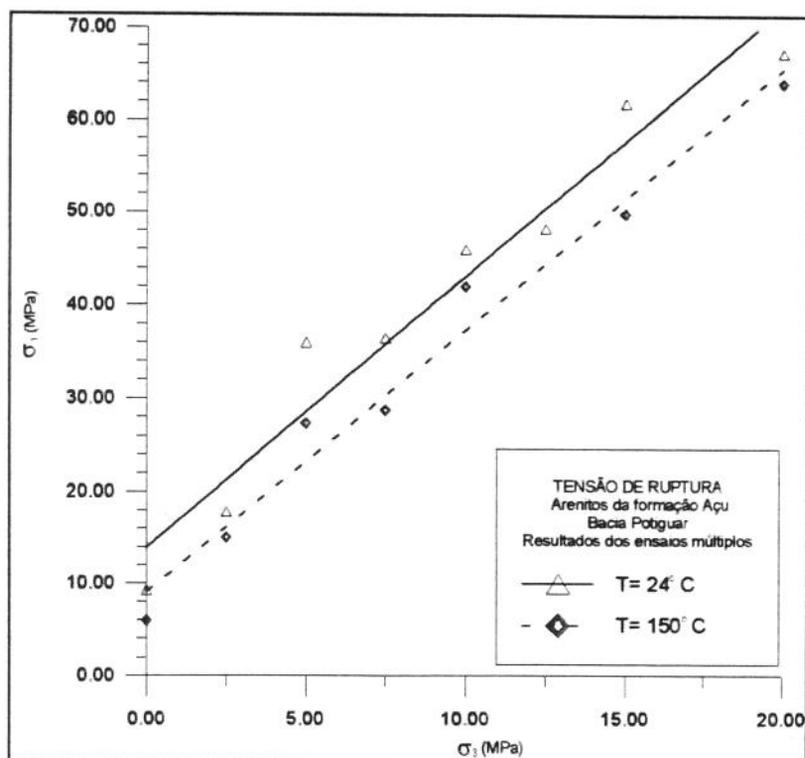


Figura 5.63 - Tensões de ruptura obtidas nos ensaios múltiplos para as amostras dos arenitos da Formação Açú.

Na figura 5.63 é possível perceber com mais clareza de que maneira a temperatura afeta a resistência do material. As curvas são praticamente paralelas, indicando que a variação da tensão de ruptura com a temperatura depende pouco da pressão de confinamento.

A análise dos parâmetros elásticos dos arenitos da formação Pendências provenientes dos poços do campo de Lorena a princípio ficou prejudicada pelos poucos dados existentes para compor as curvas de regressão. Como existiam poucas amostras, a utilização do método de ensaios múltiplos só permitiu verificar com confiança o comportamento da tensão de ruptura nas três temperaturas e a partir daí obter os parâmetros de resistência e as envoltórias de Mohr Coulomb, que serão apresentados no capítulo VI.

A avaliação do módulo de Young foi feita a partir dos valores médios para cada temperatura sendo assim, à temperatura ambiente, 80° e 150°C obtiveram-se respectivamente: $E_{24}=12,44$ GPa, $E_{80}=12,21$ GPa e $E_{150}=11,53$ GPa, que representaram reduções neste parâmetro de 1,9% entre 24° e 80°C e de 5,6% entre 80° e 150°C .

O coeficiente de Poisson foi avaliado também pelas médias aritméticas para cada temperatura. A temperatura ambiente, 80°C e 150°C obtiveram-se, respectivamente, os seguintes valores: $\nu_{24}=0,271$, $\nu_{80}=0,235$ e $\nu_{150}=0,195$, que representam uma variação média no coeficiente de Poisson de 13% entre a temperatura ambiente e 80°C e de 17% entre 80°C e 150°C. A variação média entre a temperatura ambiente e 150°C foi de 28%, que ficou acima de 20,5%, que foi o valor obtido nos ensaios múltiplos das amostras do campo de Canto do Amaro.

É bom lembrar, que tanto o valor médio do módulo de Young quanto o valor médio do coeficiente de Poisson para as amostras do campo de Lorena, basearam-se em apenas dois dados. Esta condição impõe um nível mais baixo de confiança nos resultados do que os obtidos a partir das amostras dos arenitos de Canto do Amaro. Mesmo assim, ao confrontar os resultados obtidos com as amostras de Lorena e os resultados apresentados na literatura percebe-se bastante semelhança no que diz respeito a tendência de comportamento.

A tabela 5.12 mostra os valores das tensões de ruptura das amostras dos arenitos dos poços do campo de Lorena.

Tabela 5.12 - Valores das tensões de ruptura obtidos nos ensaios múltiplos com as amostras dos arenitos da formação Pendências (campo de Lorena).

POÇO	Nº do CP	TEMP. (°C)	σ_3 (MPa)	σ_1 (MPa)	
LOR-30	01	24	0,0	29,2	
LOR-34	06		2,5	51,6	
	01		5,0	54,8	
	06		7,5	72,4	
	01		10,0	76,0	
LOR-30	01		12,5	95,8	
LOR-34	06		15,0	97,1	
	01		20,0	106,7	
LOR-30	02		80	0,0	28,7
LOR-34	02			2,5	49,0
	04	5,0		58,1	
	02	7,5		66,5	
	04	10,0		77,4	
LOR-30	02	12,5		90,6	
LOR-34	02	15,0		86,7	
	04	20,0		105,4	
	03	150		2,5	44,8
	05			5,0	53,9
	03		7,5	64,2	
	05		10,0	71,8	
03	15,0		90,5		
05	20,0		102,5		

Os valores médios das tensões de ruptura calculados a partir da tabela 5.12, com a exclusão dos dados referentes as amostras do poço LOR-30, à temperatura ambiente, 80° e 150°C foram, respectivamente: $\sigma_{24}=76,4$ MPa, $\sigma_{80}=73,9$ MPa e $\sigma_{150}=71,3$ MPa. Os resultados sugerem que a tensão de ruptura caiu cerca de 3,4% entre 24° e 80°C e depois subiu cerca de 3,5% entre 80° e 150°C. Porém, na prática, estas diferenças são realmente muito pequenas para serem consideradas. O que se pode comentar destes resultados é que os arenitos dos poços do campo de Lorena,

provenientes da formação Pendências, praticamente não sofreram influência da temperatura em sua resistência até o limite pesquisado de 150°C.

A figura 5.64 mostra a representação gráfica da tensão de ruptura das amostras no plano $\sigma_1 - \sigma_3$ nas três temperaturas ensaiadas. As retas apresentadas são as curvas de regressão representativas do comportamento da tensão de ruptura com a pressão de confinamento. Os coeficientes de correlação destas retas foram: $r_{24}=0,986$, $r_{80}=0,995$ e $r_{150}=0,997$, e significam que existiu boa correlação entre a tensão de ruptura e a pressão de confinamento principalmente a 150°C. Este resultado pode estar relacionado à melhor homogeneidade entre as amostras.

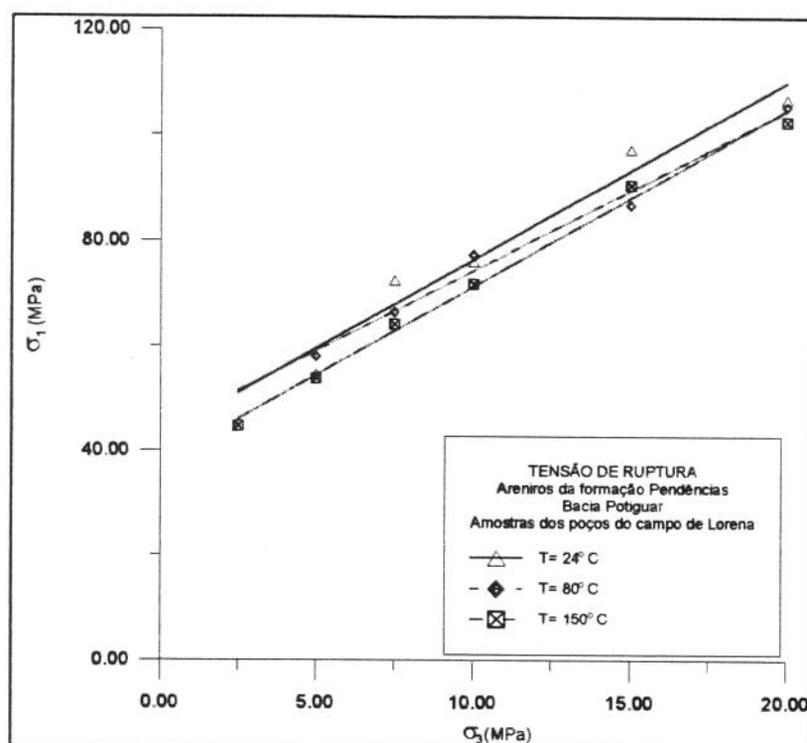


Figura 5.64 - Comportamento da tensão de ruptura dos arenitos da Formação Pendências, bacia Potiguar. Resultados obtidos a partir das amostras do poço LOR-34.

Através das retas apresentadas na figura 5.64 tem-se uma idéia mais ampla da maneira como estas curvas se deslocaram em função da influência da temperatura.

As figuras 5.65 a 5.69 mostram alguns CP ensaiados. Existe certa controvérsia nas opiniões de alguns pesquisadores quanto ao aspecto das fraturas apresentadas pelas rochas durante os ensaios de compressão. Segundo Jaeger e Cook (1979), fraturas do tipo cisalhante, são características de ensaios de compressão triaxial (CP CAM-456/09, CAM-456/12 na figura 5.65; CP CAM-456/04, CAM-456/06 e CAM-456/07 na figura 5.66; LOR-30/01 na figura 5.67). Vutukuri, Lama e Saluja (1975) consideram que este tipo de fratura ocorre devido a rotação ou translação relativa entre os espaçadores da máquina de ensaio, não sendo, portanto, uma característica do ensaio mas, do sistema de aplicação de carga.

Os CP CAM-456/02, CAM-456/05, CAM-456/08 e CAM-456/10, na figura 5.65, mostram múltiplos planos de fratura que são característicos de materiais que apresentam deformação plástica durante o ensaio de compressão, segundo Jumikis (1983) e Jaeger e Cook (1979).

Mesmo os CP CAM-456/12 na figura 5.65 quanto os CP CAM-456/04, CAM-456/06 e CAM-456/07 na figura 5.66, não evidenciaram a total separação das partes da amostra na superfície de falha. Os arenitos da formação Açú caracterizaram-se por serem dúcteis e apresentarem deformações plásticas acentuadas nos ensaios de compressão sem que houvesse a completa destruição da amostra. Neste caso, ocorreu o escorregamento e a intrusão das partes do CP na superfície de falha, aumentando o seu diâmetro. Este tipo de comportamento predominou nas amostras ensaiadas dos poços de Canto do Amaro.

A figura 5.68 mostra os CP de Canto do Amaro utilizados nos ensaios múltiplos. A amostra CAM-519/01 e CAM-615/01 mostram deformação acentuada próximo ao topo (deformação plástica) sem plano de fratura definido. As amostras CAM-519/02 e CAM-529/01 evidenciaram este tipo de deformação no terço médio do corpo.

Para evitar que as amostras apresentassem deformações excessivas (deformações plásticas) após ser atingida a tensão de ruptura no último estágio dos ensaios múltiplos, o ensaio era interrompido e por isso as amostras não evidenciaram os possíveis planos de cisalhamento. A mesma medida foi tomada com relação aos corpos de prova do poço LOR-34 (figura 5.69). Desta vez procurou-se evitar também que ocorressem rup-

turas explosivas, a que estão sujeitas as amostras mais resistentes em ensaios com controle de carga.



Figura 5.65 - CP CAM-456/02, CAM-456/05, CAM-456/08, CAM-456/09, CAM-456/12 utilizados nos ensaios de compressão triaxial convencionais.

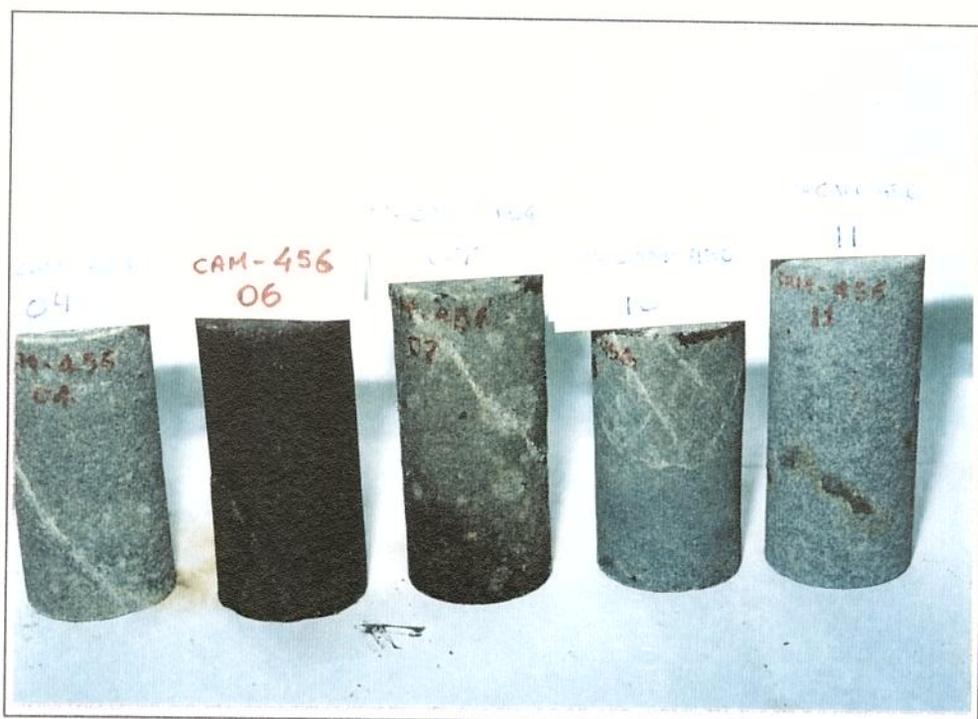


Figura 5.66 - CP CAM-456/04, CAM-456/06, CAM-456/07, CAM-456/10, CAM-456/11 utilizados nos ensaios de compressão triaxial convencionais.

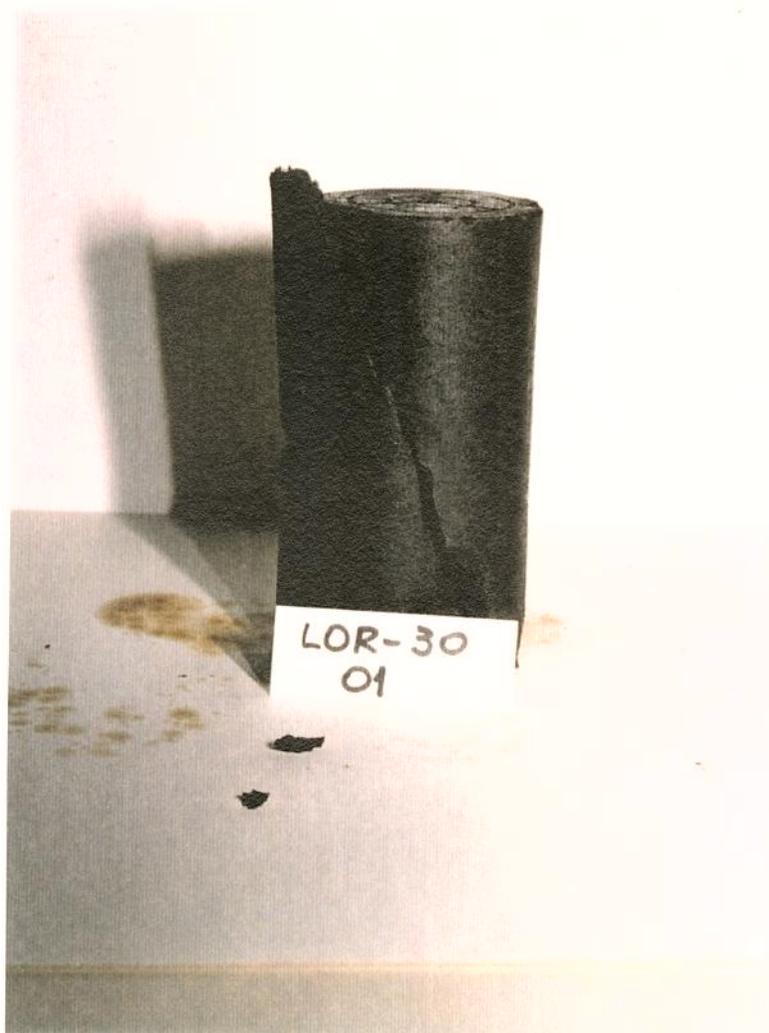


Figura 5.67 - CP LOR-30/01 utilizados no ensaio de compressão triaxial múltiplo.



Figura 5.68 - CP CAM-519/01, CAM-519/02, CAM-529/01, CAM-510/01, CAM-615/01 utilizados nos ensaios de compressão triaxial múltiplos.

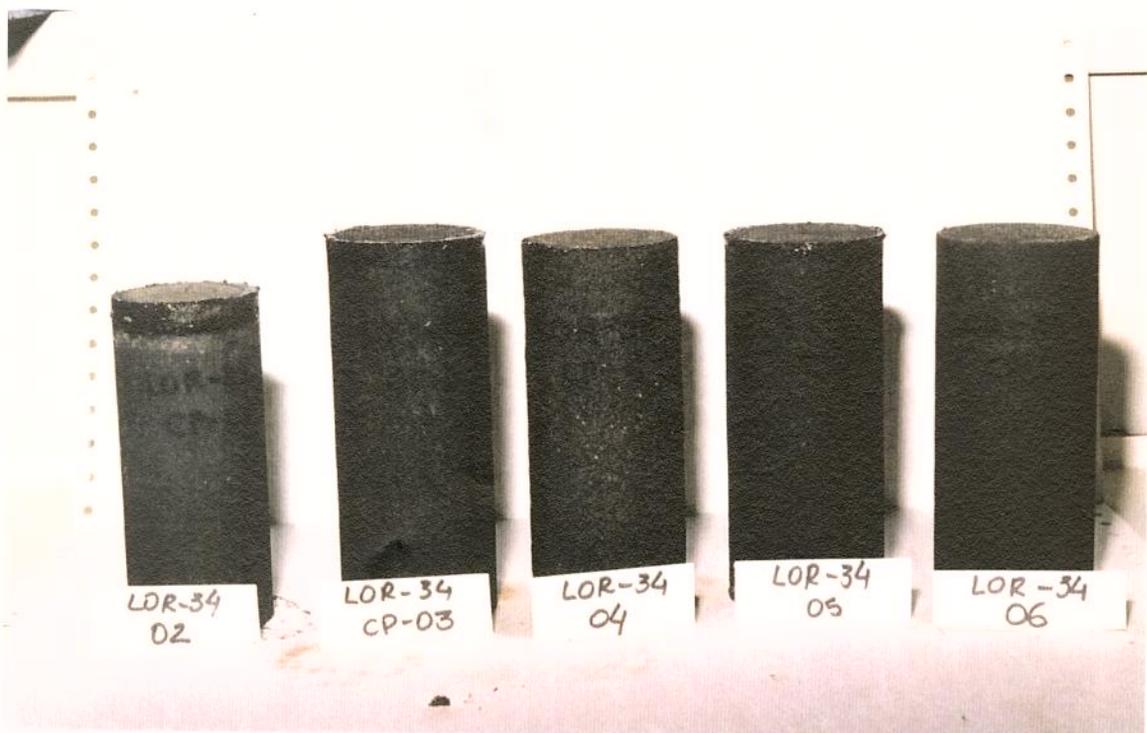


Figura 5.69 - CP LOR-34/02, LOR-34/03, LOR-34/04, LOR-34/05, LOR-34/06 utilizados nos ensaios de compressão triaxial múltiplos.

Ensaio de Compressão Diametral

Os ensaios de compressão diametral (Brazilian test) foram realizados apenas com as amostras do terceiro lote. Os equipamentos do LMR do CENPES não estão preparados para realizar ensaios desta natureza com a célula triaxial fechada, o que impossibilita a utilização de outras temperaturas além da ambiente.

Os resultados dos ensaios de compressão diametral estão na tabela 5.13.

Tabela 5.13 - Resultados dos ensaios de compressão diametral à temperatura ambiente.

POÇO	Nº do CP	TEMP. (°C)	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO (σ_t) (MPa)
AP-128	02	24	0,64
AP-153	01		1,18
	02		1,35
	03		0,70
CAM-510	01		1,53
CAM-519	01		1,02
	02		0,84
CAM-529	01		1,54
CAM-615	01		1,38
LOR-34	01		2,35
	03		2,64
	04		2,16
	05	2,83	
	06	1,85	

A partir dos resultados da tabela 5.13, foi possível determinar os valores médios das tensões de ruptura a tração para os arenitos dos poços do campo de Canto do Amaro, formação Açu e dos arenitos dos poços do campo de Lorena, formação Pendências. Sendo assim, para Canto do Amaro e Lorena obtiveram-se respectivamente, $\sigma_{tmc}=1,13\text{MPa}$ e $\sigma_{tml}=2,37\text{MPa}$, onde σ_{tmc} e σ_{tml} são respectivamente as resistências a tração médias para as amostras ensaiadas.

Bloch (1993), em ensaios da mesma natureza com amostras de arenitos de granulometria fina, homogêneos e bem consolidados da bacia sedimentar do Recôncavo (Bahia), obteve um valor médio de tensão de ruptura a tração de 3,7 MPa também à temperatura ambiente.

A tensão de ruptura à tração para Canto do Amaro e Lorena equivaleram, respectivamente, a 30,5% e 64,1% do valor encontrado por Bloch, sugerindo que estes arenitos são bem mais fracos, principalmente para o caso dos arenitos do campo de Canto do Amaro.

Ensaio Dinâmico Simultâneo

Ensaio Dinâmico

No ensaio dinâmico, o Laboratório de Física de Rocha do CENPES utiliza o método de emissão ultra-sônica pulsada, o qual consiste na obtenção do tempo de propagação de ondas ultra-sônicas através da amostra de rocha com polarização paralela e transversal à direção de propagação.

Antes da medição de velocidades, as amostras de rocha foram cuidadosamente medidas, tanto no seu comprimento quanto no seu diâmetro, e pesadas. A massa específica total ρ_b foi então calculada pela razão entre o peso e o volume da amostra e as velocidades V_p e V_s foram calculadas pela razão entre o comprimento da amostra e o tempo de trânsito da onda compressional e cisalhante, respectivamente.

As constantes elásticas dinâmicas foram obtidas utilizando-se as equações da teoria da elasticidade que as relacionam com V_p , V_s e ρ_b . Estas constantes são o coeficiente de Poisson (ν) e os módulos de elasticidade (E), volumétrico (K) e de cisalhamento (G).

$$\nu_{din} = (V_p^2 - 2V_s^2)/2.(V_p^2 - V_s^2) \quad (5.11)$$

$$E_{din} = \rho_b V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)/(V_p^2 - V_s^2) \quad (5.12)$$

$$K_{din} = \rho_b (V_p^2 - (4/3) V_s^2) \quad (5.13)$$

$$G_{din} = \rho_b V_s^2 \quad (5.14)$$

Ensaio Estáticos

Os ensaios estáticos correspondem à monitoração das deformações apresentadas pelo corpo de prova quando submetido a um campo variável de tensões.

O resultado de um ensaio estático típico é um gráfico de tensão *versus* deformação do tipo mostrado, por exemplo, na figura 5.37. A partir das curvas de deformação obtém-se as constantes elásticas de acordo com a teoria da elasticidade, a partir das seguintes equações:

$$\nu_{est} = - \Delta \varepsilon_{lateral} / \Delta \varepsilon_{axial} \quad (5.15)$$

$$E_{est} = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon_{axial} \quad (5.16)$$

$$K_{est} = E_{est} / (3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{est})) \quad (5.17)$$

$$G_{est} = E_{est} / (2 \cdot (1 + \nu_{est})) \quad (5.18)$$

As curvas de deformação obtidas nos ensaios, foram submetidas a um processo de regressão não linear para obter os polinômios que representam as curvas de deformação no intervalo anterior à ruptura. Estes polinômios, como funções contínuas, são deriváveis e pode servir como entrada nas equações 5.15 a 5.18 dentro de um aplicativo computacional. O resultado deste processo aplicado pelo Laboratório de Física das Rochas, leva a valores um pouco diferentes de E_{est} e ν_{est} obtidos a 50% da tensão de ruptura (vide tabela 5.14), quando comparado com os valores apresentados na tabela 5.7, que foram determinados graficamente. Porém, estas diferenças foram irrelevantes.

Ensaio Simultâneos Estáticos-Dinâmicos

O Laboratório de Física de Rochas e o de Mecânica de Rochas do CENPES desenvolveram, em um projeto conjunto, a capacidade de realiza-

ção de ensaios estáticos e dinâmicos ao mesmo tempo em amostras de rochas retiradas de testemunhos de poços.

A aquisição simultânea tem a vantagem de garantir a igualdade de condições em termos dos fatores externos que influenciam o comportamento mecânico da amostra, como por exemplo, o estado de tensões a que a amostra está submetida. As velocidades de propagação das ondas P e S podem ser obtidas seguidamente ao longo do ensaio estático, permitindo a observação contínua das propriedades elásticas dinâmicas. Este tipo de ensaio também permite a indicação do momento exato em que a amostra começa a microfissurar, seguido da coalescência destas microfissuras e finalmente da ruptura do corpo de prova.

Porém, a principal finalidade da obtenção simultânea de constantes elásticas é poder estabelecer relações lineares empíricas que permitam a conversão de constantes elásticas dinâmicas em estáticas e vice-versa. A contribuição destas relações para a exploração e, principalmente, produção de petróleo, é abrir a possibilidade de uma caracterização mecânica do reservatório sem a necessidade de ensaiar estaticamente amostras de testemunhos. Desta forma, o material básico necessário para a obtenção de um perfil de constantes elásticas estáticas passam a ser os perfis de geofísica de ondas P e S, e o perfil de densidade total (na verdade, massa específica total). Portanto, é importante que as informações obtidas nos ensaios sejam continuamente armazenadas em um banco de dados.

Ensaio Realizados

Foram ensaiadas pelo processo simultâneo, 13 amostras do campo de Canto do Amaro, bacia Potiguar, onde está incluído também um campo menor denominado de Alto da Pedra, cujas características geológicas são idênticas a Canto do Amaro. Na prática, formam um único campo de petróleo.

A tabela 5.14 apresentam os resultados obtidos no ensaios estáticos e dinâmicos. A densidade utilizada nos cálculos dos módulos dinâmicos deveria, a rigor, ser corrigida para cada situação de temperatura e pressão, a cada instante, durante os ensaios, porém, as limitações operacionais atuais não permitem a realização desta tarefa. Portanto, as densi-

dades consideradas foram as obtidas para cada amostra saturada antes do ensaio.

Tabela 5.14 - Propriedades estáticas e dinâmica das amostras dos arenitos dos poços do campo de Canto do Amaro, da formação Açú, bacia Potiguar.

POÇO	PROF. (m)	σ_3 (MPa)	T (°C)	E_{din} (GPa)	E_{est} (GPa)	V_{din}	V_{est}	K_{din} (GPa)	K_{est} (GPa)	G_{din} (GPa)	G_{est} (GPa)	σ_1 (MPa)	ρ_b (g/cm ³)
AP-125	651,05	7,5	150	11,98	5,71	0,15	0,30	5,78	4,87	5,19	2,19	30,3	2,073
	651,50	20	150	14,81	7,63	0,15	0,25	7,01	5,18	6,45	3,04	61,4	2,093
AP-98	639,35	15	24	23,20	9,88	0,20	0,25	13,30	6,51	9,91	3,96	57,9	2,169
	645,30	7,5	150	15,90	8,83	0,23	0,18	9,82	4,58	6,47	3,75	37,5	2,103
CAM-373	647,20	2,5	150	13,10	7,13	0,20	0,35	7,20	7,95	5,52	2,64	19,5	2,105
	681,55	5	24	29,48	11,44	0,24	0,30	18,57	9,72	11,93	4,39	41,7	2,283
CAM-456	691,05	7,5	80	37,40	15,61	0,29	0,22	30,00	9,38	14,47	6,38	61,4	2,498
	691,20	15	150	41,92	19,53	0,24	0,29	27,37	15,54	16,84	7,57	113,6	2,532
CAM-456	594,10	10	150	16,30	4,11	0,24	0,27	10,52	2,91	6,56	1,62	25,0	2,410
	687,05	20	80	35,40	10,85	0,26	0,30	24,20	8,95	14,11	4,18	88,7	2,446
CAM-456	591,60	5	80	22,80	8,46	0,24	0,30	14,50	6,92	9,20	3,26	32,5	2,230
	615,10	10	24	35,79	12,13	0,23	0,29	21,93	9,70	14,58	4,70	64,9	2,347
CAM-456	652,82	10	80	17,40	5,34	0,26	0,24	11,90	3,42	6,90	2,15	35,8	2,203

onde: σ_3 é a pressão de confinamento efetiva do ensaio;

E, K e G são respectivamente os módulos de elasticidade, volumétrico e de cisalhamento;

ν é o coeficiente de Poisson;

ρ_b é a densidade total aparente;

σ_1 = tensão de ruptura;

T é a temperatura do ensaio em °C.

Resultados Obtidos

O comportamento mecânico apresentado por este conjunto de amostras foi exaustivamente estudado com o objetivo de encontrar funções matemáticas que o descrevesse como dependente da temperatura e da pressão de confinamento. Após várias tentativas para estabelecer regressões multivariadas representativas, ou seja, com alto coeficiente de correlação ($r \cong 1$) e pequeno desvio padrão, foi detectada uma forte dependência da tensão de ruptura (σ_1) com o módulo de cisalhamento dinâmico (G) das amostras. A função que descreveu essa dependência foi um polinômio de 2º grau e o ajuste ficou sensivelmente melhorado quando as variáveis temperatura e pressão de confinamento foram inseridas na regressão.

Utilizou-se o módulo de cisalhamento dinâmico (G_{din}) com o objetivo de obter uma equação que permitisse avaliar a tensão de ruptura (σ_1), que é uma propriedade intrinsecamente estática e inelástica, a partir de dados dinâmicos, os quais eram mais disponíveis.

No conjunto de treze amostras ensaiadas simultaneamente, observou-se que duas delas apresentaram valores anormais de tensões de ruptura (σ_1), quando comparadas com as outras onze. Foram elas as amostras CAM-373/08 (profundidade 691,20 m), que rompeu com uma tensão desviadora muito maior que a esperada e CAM-456/03 (profundidade igual a 594,10 m), que apresentou uma tensão de ruptura menor que a esperada. Este segundo caso pode ser justificado quando há ocorrência de fissuras orientadas em uma mesma direção, prejudicando assim a integridade do material. A tensão de ruptura elevada pode ser justificada pela existência de heterogeneidades no material, como alto grau de consolidação ou cimentação, comparadas com as demais. A análise mineralógica detectou alta concentração de calcita (35%) como cimento, na amostra CAM-373/08. Portanto, só foi possível uma boa relação entre as variáveis para o caso do grupo restante de onze amostras.

A relação definida a partir das onze amostras de melhor homogeneidade foi a seguinte:

$$\sigma_1 = 0,0764 G_{din}^2 + 2,3639 G_{din} + 0,0604 T - 2,273\sigma_3 - 10,2404 \quad (5.18)$$

O desvio padrão ficou em 1,81 MPa e o coeficiente de correlação, $r = 0,9976$. As unidades das variáveis na equação 5.18 são:

σ_3 e σ_1 estão em MPa;

G_{din} em GPa e

T em °C.

Discussão dos Resultados

Deve ser lembrado, antes de analisar os coeficientes da equação 5.18, que tanto os valores da tensão de ruptura (σ_1) quanto os do módulo de cisalhamento dinâmico (G_{din}), obtidos em laboratório e utilizados para a regressão, estão influenciados pelas condições de temperatura e pressão.

A figura 5.70 apresenta o efeito da pressão confinamento (σ_3) sobre a relação entre a tensão de ruptura e o módulo de cisalhamento dinâmico, mantida uma temperatura constante e igual a 80°C. As curvas são os modelos gerados pela equação 5.18, mantendo-se fixa a temperatura e fazendo variar σ_3 . A forma da função sugere um comportamento quase linear dentro do intervalo analisado (observar o valor baixo do coeficiente do termo de segunda ordem), onde o crescimento de G_{din} determina um crescimento proporcional para a tensão de ruptura (σ_1).

A interpretação da figura 5.70 supõe ainda que ambas as variáveis, tensão de ruptura (σ_1) e G_{din} estão influenciadas pelas variáveis de controle, pressão e temperatura. Sendo assim, é possível afirmar, com base na figura 5.70 que, se uma amostra de rocha tem o mesmo módulo de cisalhamento que a outra, sob uma pressão de confinamento maior, é por que ela apresenta uma tensão de ruptura maior.

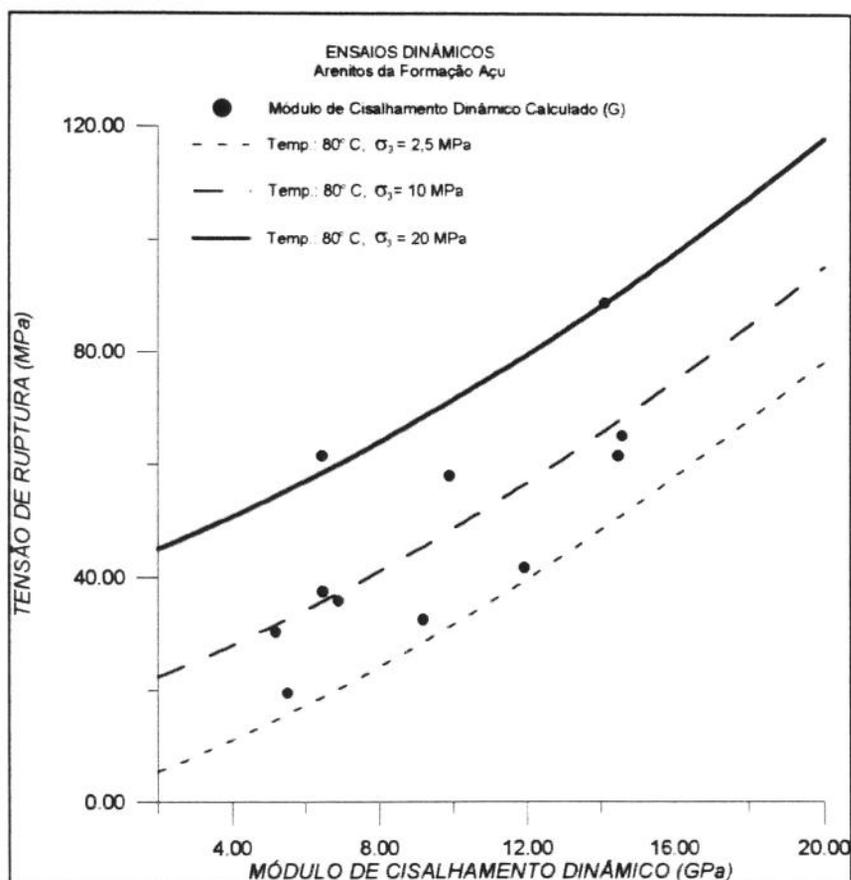


Figura 5.70 - Efeito da pressão de confinamento (σ_3) sobre a relação entre a tensão de ruptura (σ_1) e o módulo de cisalhamento dinâmico (G_{din}), à temperatura ambiente para os arenitos da Formação Açú.

A figura 5.71 apresenta o efeito da temperatura sobre a relação entre a tensão de ruptura (σ_1) e o módulo de cisalhamento dinâmico (G_{din}) desta vez fixando-se o valor de σ_3 em 7,5 MPa. As curvas são os modelos criados a partir da equação 5.18. Os resultados indicam que existe uma influência menor da temperatura, dentro do intervalo analisado, sobre a correlação entre a tensão de ruptura (σ_1) e o módulo de cisalhamento dinâmico (G_{din}), quando comparado com o efeito da pressão de confinamento (σ_3), o aumento da temperatura provoca uma diminuição nos valores de G_{din} , essencialmente devido a redução da densidade do fluido saturante.

Mais uma vez, deve ser lembrado que as variáveis tensão de ruptura (σ_1) e G_{din} estão influenciadas pelas variáveis de controle. Logo, a fi-

gura 5.71 não mostra que a tensão de ruptura aumentou com o aumento da temperatura na mesma amostra mas que, se duas amostras apresentarem o mesmo módulo de cisalhamento sob temperaturas diferentes, a de maior temperatura é a mais resistente.

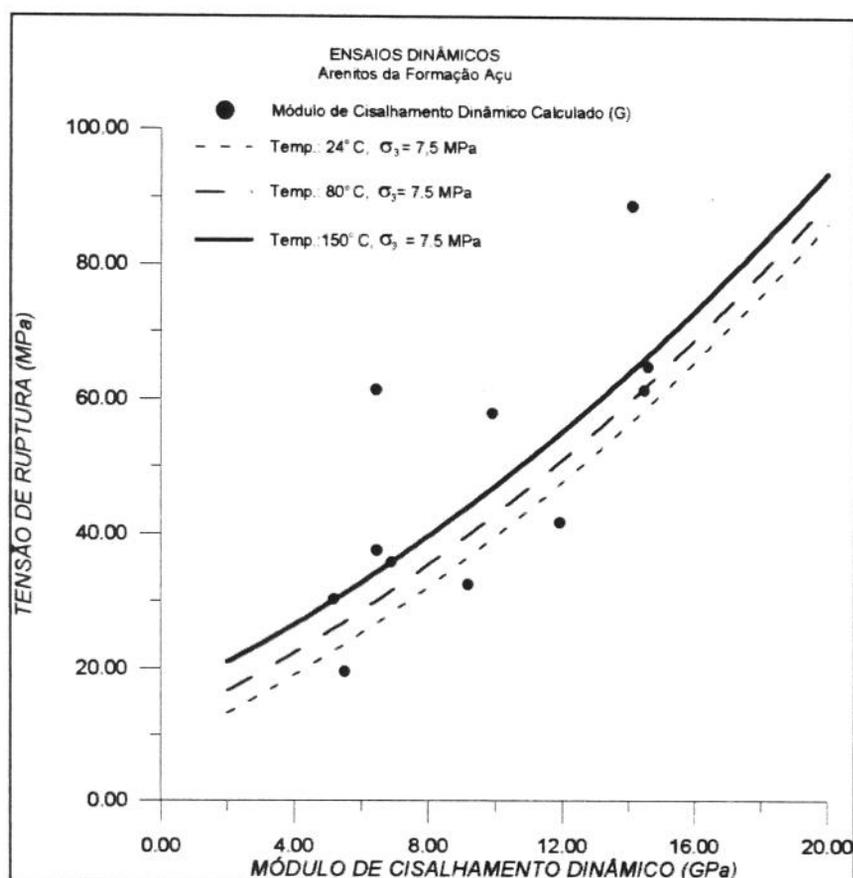


Figura 5.71 - Efeito da temperatura sobre a relação entre a tensão de ruptura (σ_1) e o módulo de cisalhamento dinâmico (G_{din}) a uma pressão de confinamento de 7,5 MPa. Para os arenitos da Formação Açu.

Resumo do Capítulo

Foram apresentados neste capítulo os resultados das análises feitas sobre o comportamento da compressibilidade volumétrica (*bulk compressibility*), dos parâmetros elásticos (E e ν), da resistência de amostras de arenitos friáveis da formação Açu e dos arenitos mais homogêneos e bem consolidados da formação Pendências, ambos pertencentes à bacia sedimentar Potiguar, quando submetidos a temperaturas entre 24° e

150°C. Foram apresentados e analisados também os resultados dos ensaios de compressão diametral.

Os resultados indicaram que a compressibilidade volumétrica (*bulk compressibility*) dos arenitos da formação Açú, provenientes dos poços do campo de Canto do Amaro, foi bastante afetada pela temperatura. A redução da compressibilidade situou-se em torno de 50% nas amostras do poço CAM-465 quando a temperatura variou de 24° para 80°C. Entre 80° e 150°C, a variação foi da mesma ordem de grandeza.

O coeficiente de Poisson também foi influenciado pela temperatura, sofreu uma redução média entre 4% e 13%, quando a temperatura variou de 24° para 80°C e entre 4% e 21% no intervalo de temperatura de 80° a 150°C, para os ensaios com as amostras de Canto do Amaro e Lorena.

O módulo de Young não apresentou uma tendência única de comportamento entre os CP ensaiados. As amostras dos arenitos do primeiro e segundo lotes (formação Açú), predominantemente do poço CAM-456, indicaram uma redução de 22,7% no módulo de Young, quando a temperatura passou e 24° para 80°C. Este comportamento está de acordo com outros trabalhos encontrados na literatura. Porém, as amostras do mesmo campo e dos outros poços que compuseram parte do terceiro lote de amostras apresentaram um comportamento oposto, ou seja, o módulo de Young aumentou em média 28,6% quando a temperatura passou e 24° para 150°C.

O comportamento do módulo de Young para as amostras dos arenito do campo de Lorena também obedeceu a tendência geral de queda com o aumento da temperatura.

Quanto à tensão de ruptura dos materiais ensaiados, houve uma tendência única. Os ensaios indicaram que a temperatura reduz a resistência média dos arenitos estudados. A diferença, neste caso, ficou por conta da magnitude de variação. Enquanto os arenitos friáveis, pouco compactos e de granulometria mais grosseira da formação Açú, variaram até 22% na tensão de ruptura, os arenitos mais compactos e mais finos da formação Pendências variaram menos de 3,5%.

A heterogeneidade das amostras da formação Açú e o número reduzido de amostras dificultou a análise dos resultados. O cálculo de valores médios dos parâmetros avaliados por faixas de pressão de confinamento para cada temperatura foi uma ferramenta fundamental na obtenção de algumas conclusões.

CAPÍTULO VI

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA E DAS ENVOLTÓRIAS DE RUPTURA

Este capítulo foi reservado à análise dos parâmetros de resistência das rochas ensaiadas, bem como das envoltórias de ruptura. Foram verificados de que maneira os parâmetros de resistência (ϕ e c) são afetados pelas temperaturas utilizadas nos ensaios. Estes dois parâmetros são de fundamental importância no estudo de estabilidade de poços de petróleo.

Neste capítulo, são apresentados também, os resultados de uma simulação numérica, para um caso real aplicado aos poços do Campo de Canto do Amaro, Formação Açu, Bacia Potiguar. O trabalho tem por objetivo avaliar a estabilidade das paredes de um poço, durante a fase de perfuração e produção de óleo. O relatório completo da simulação encontra-se no apêndice B.

Análise dos Resultados pelo Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb

Os resultados apresentados neste trabalho, mostraram que os picos de tensão alcançadas pelas amostras (tensão de ruptura, σ_1) durante os ensaios de ruptura triaxial, aumentaram em função da pressão de confinamento aplicada. A variação da tensão de ruptura σ_1 com a pressão de confinamento σ_3 , é conhecido por critério de ruptura ou critério de falha.

Segundo Goodman (1989), o critério de Mohr-Coulomb é o mais simples e o mais utilizado como critério de falha para materiais rochosos, consistindo de uma linha reta, denominada de envoltória de ruptura, que tangencia os círculos de Mohr desenhados no plano $\sigma - \tau$. Cada círculo é construído a partir dos pares de pontos (σ_3, σ_1) que são as tensões principais obtidos nos ensaios de ruptura. Segundo Holt e Fjær (1991), seriam necessários pelo menos 20 pares de pontos (σ_3, σ_1) para se obter com confiabilidade estatística uma envoltória de falha, que na prática nem sempre é possível.

A envoltória de ruptura representa uma superfície limite crítica para o material. Qualquer estado de tensão além desta superfície pode falhar o material. Na construção da envoltória de ruptura para rochas, utilizam-se normalmente os resultados obtidos nos ensaios de tração (por exemplo, o Brazilian test), ensaios uniaxiais e ensaios triaxiais. Goodman (1989) observa que na região de tração, a envoltória de Mohr-Coulomb superestima a capacidade do material. Porém, neste projeto, não foram utilizados os dados obtidos nos ensaios de tração (Brazilian test) na construção da envoltória de ruptura, porque o equipamento do LMR do CENPES não está preparado para a realização deste tipo de ensaios em outras temperaturas além da ambiente.

A envoltória bi-dimensional de Mohr-Coulomb é uma linha reta no plano $\tau - \sigma$ cuja equação é dada por:

$$\tau = c + \sigma \cdot \text{tg}(\phi) \quad (6.1)$$

onde: c é a coesão do material e ϕ é o ângulo de atrito interno.

Os parâmetros c e ϕ foram obtidos através das curvas de ajuste linear (retas de regressão) das tensão de ruptura do material para cada valor de pressão de confinamento representados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$. A equação da reta de regressão é dada por:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot \text{tg}(\beta) \quad (6.2)$$

onde:

σ_c representa a interseção da reta com o eixo dos σ_1 e deveria coincidir com a tensão de ruptura obtida no ensaio uniaxial;

β é a inclinação da reta.

A partir destes dois parâmetros é possível obter c e ϕ usando as equações (vide anexo 3):

$$\phi = \arcsen \left[\frac{\text{tg}(\beta) - 1}{\text{tg}(\beta) + 1} \right] \quad (6.3)$$

$$c = \sigma_c \cdot \left[\frac{1 - \sin \phi}{2 \cdot \cos \phi} \right] \quad (6.4)$$

As figuras 6.1 a 6.9 trazem os gráficos representativos dos ajustes das tensões de ruptura no plano $\sigma_1 - \sigma_3$ em todos os ensaios realizados. As curvas não incluem os pontos referentes aos dados dos poços CAM-373, CAM-510 e LOR-30.

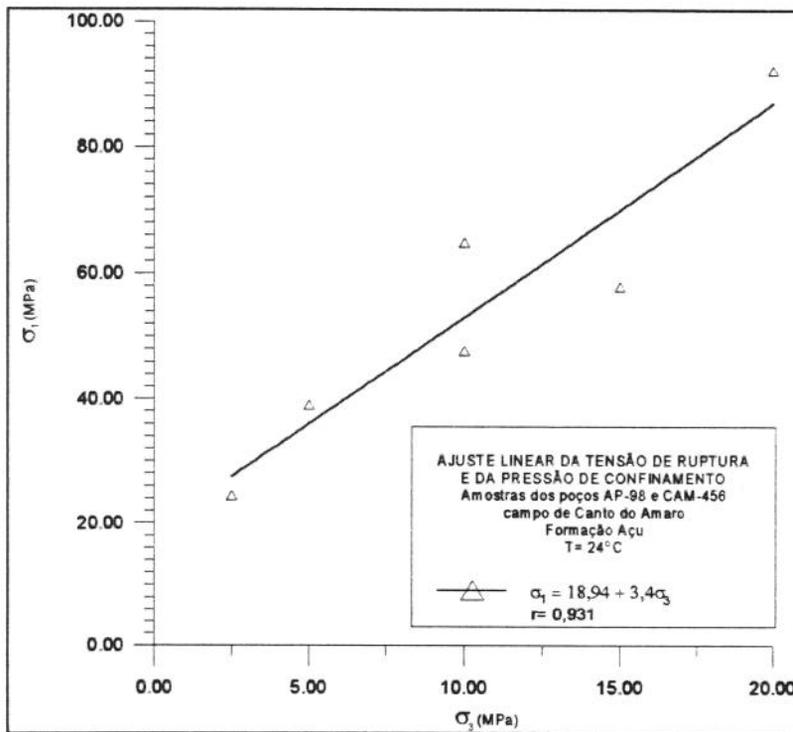


Figura 6.1 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço AP-98 e CAM-456 à temperatura ambiente.

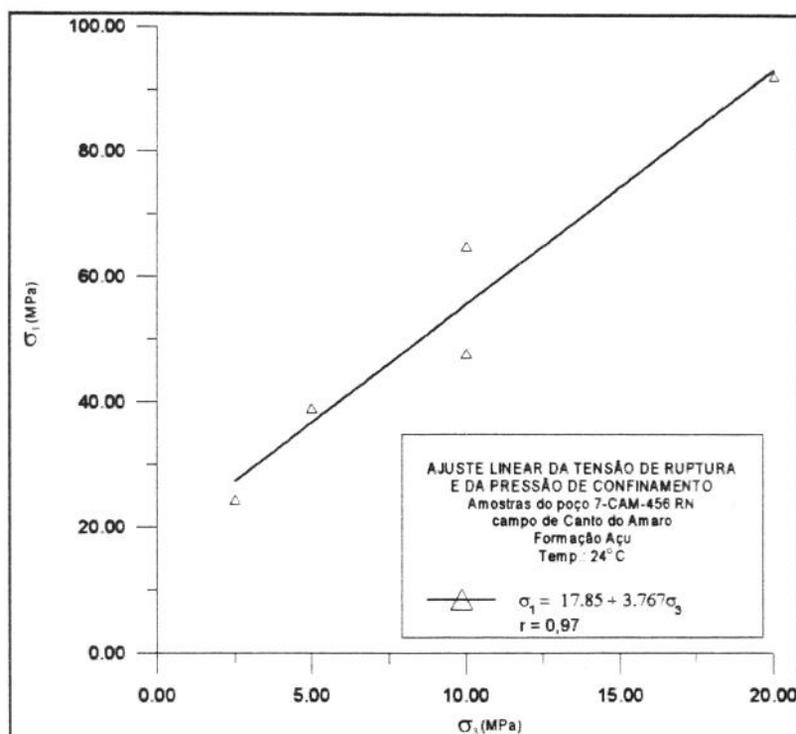


Figura 6.2 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço CAM-456 à temperatura ambiente.

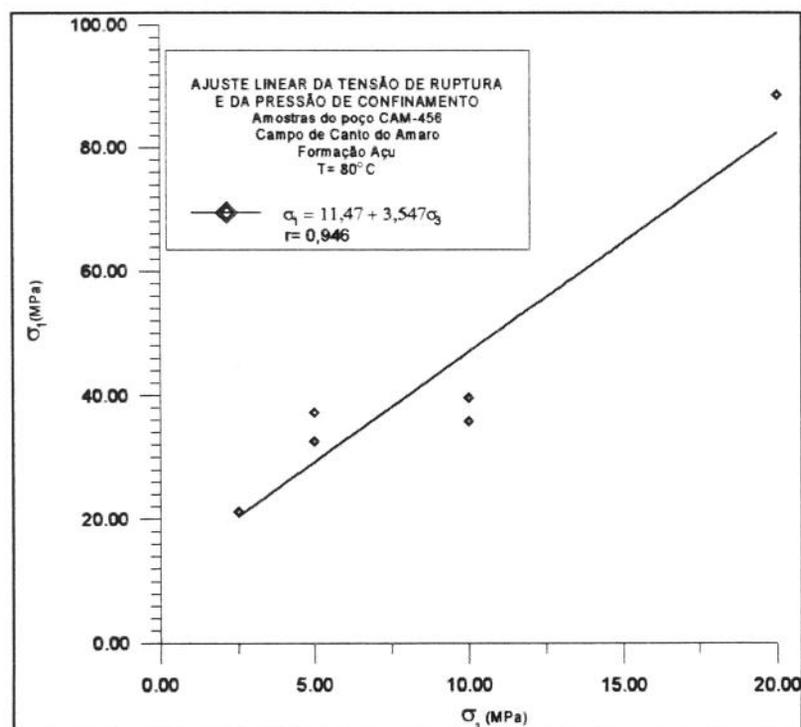


Figura 6.3 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço CAM-456 a 80°C.

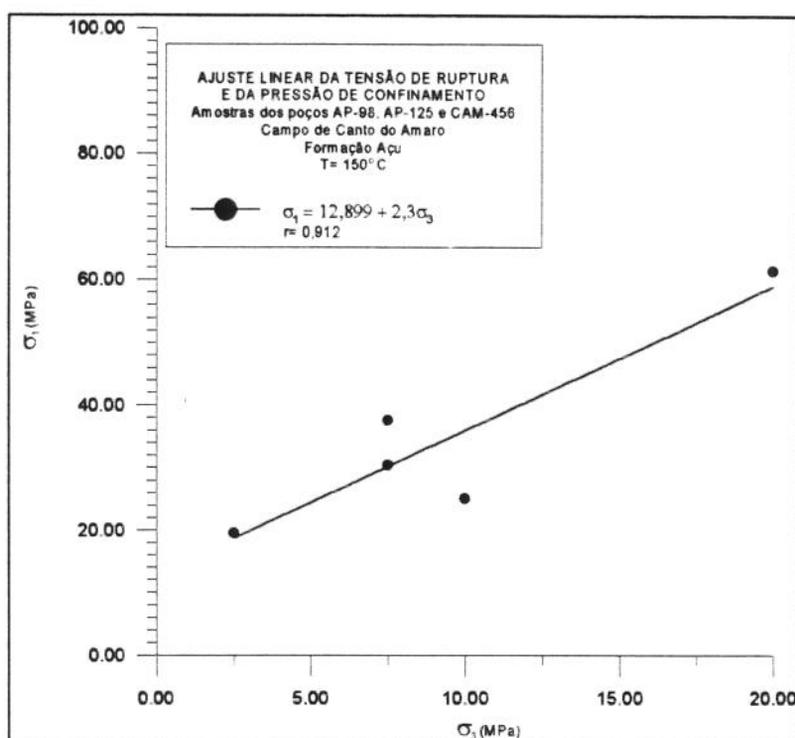


Figura 6.4 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras dos poços AP-98, AP-125 e CAM-456 a 150°C.

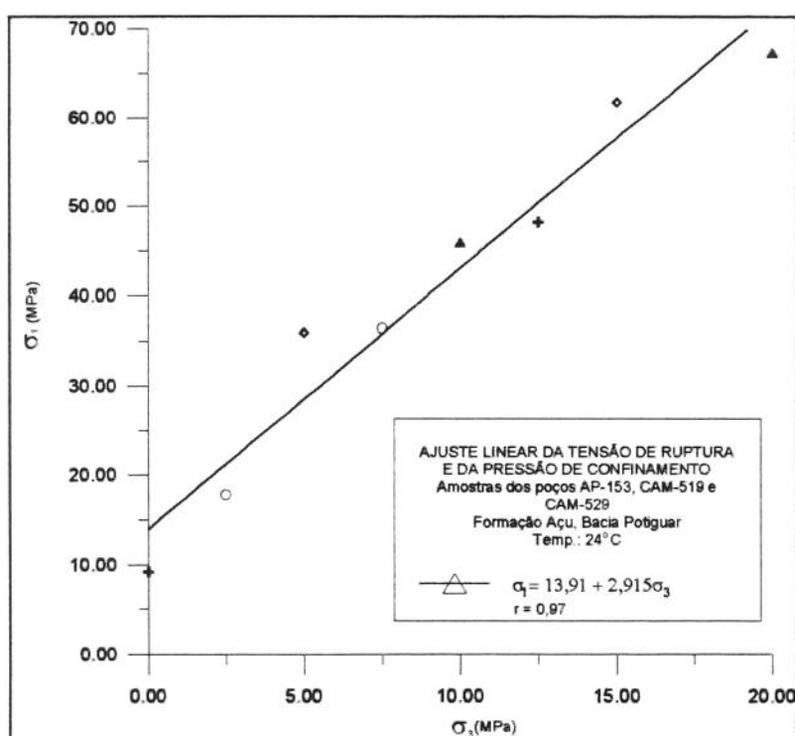


Figura 6.5 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras dos poços AP-153, CAM-519 e CAM-529 à temperatura ambiente.

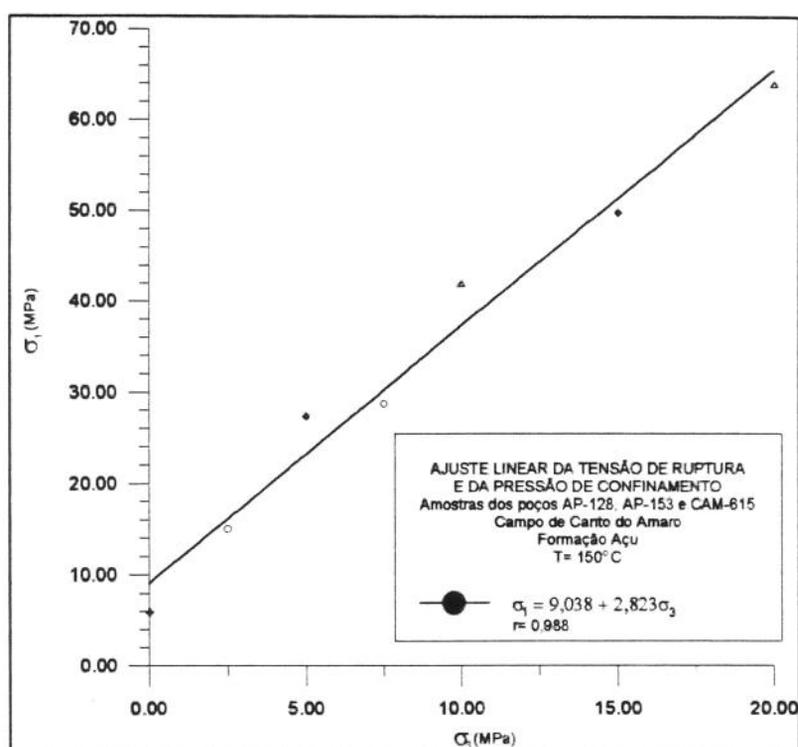


Figura 6.6 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras dos poços AP-128, AP-153 e CAM-615 a 150°C.

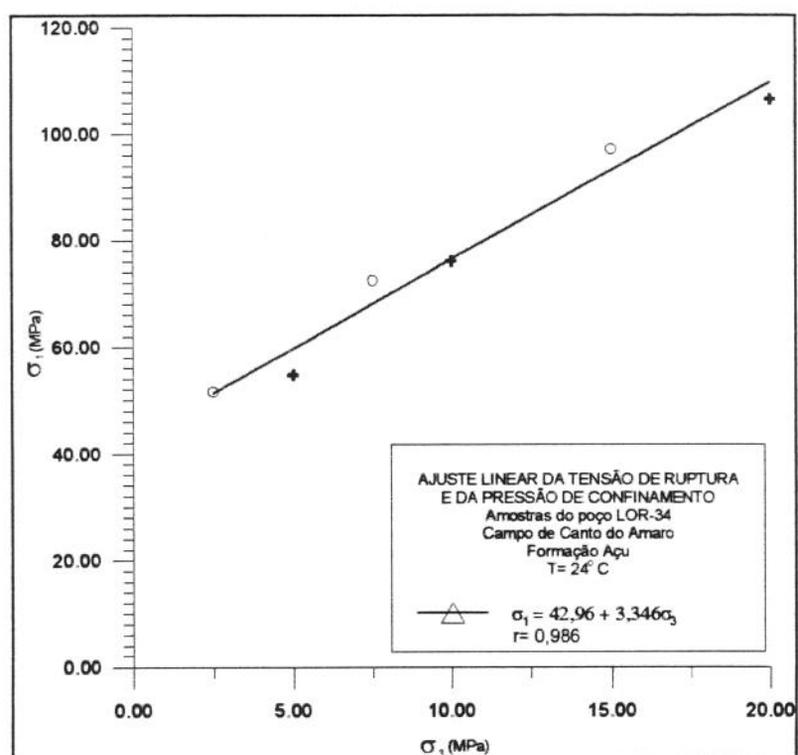


Figura 6.7 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço LOR-34 à temperatura ambiente.

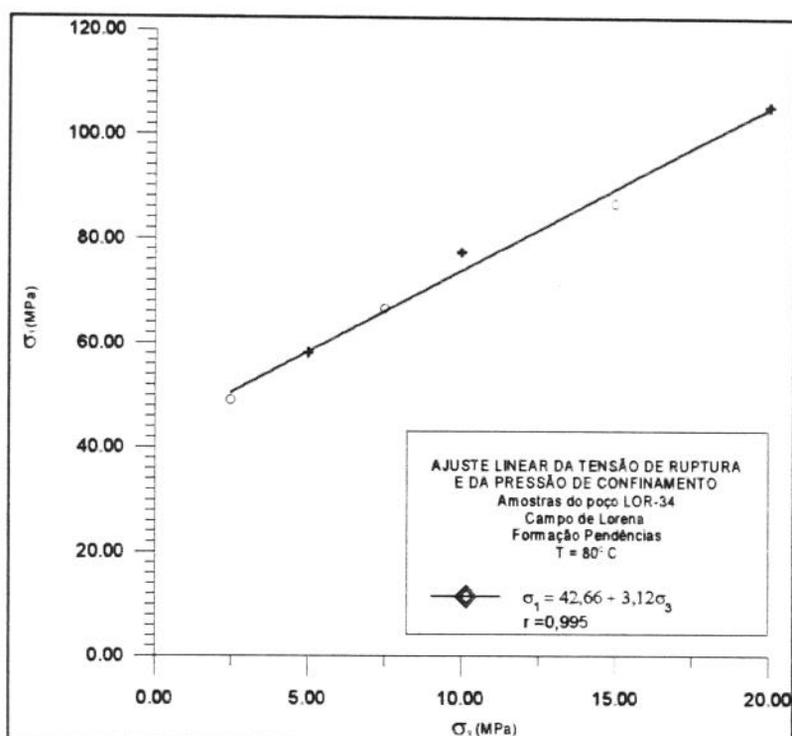


Figura 6.8 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço LOR-34 a 80°C.

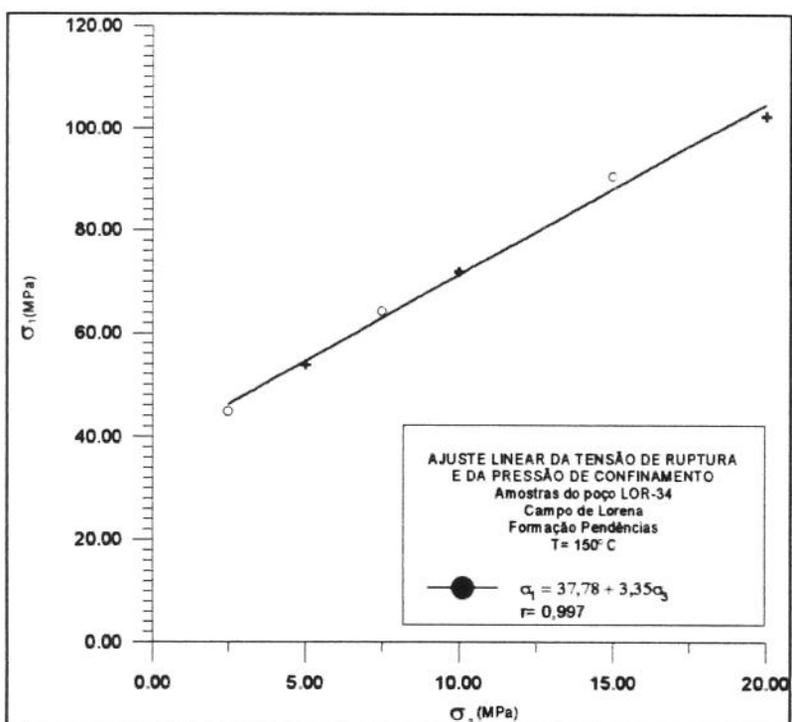


Figura 6.9 - Curva de ajuste linear das tensões de ruptura e da pressão de confinamento para os ensaios com as amostras do poço LOR-34 a 150°C.

Os coeficientes de correlação (r) das curvas que estiverem acima de 0,95 indicam ter havido um bom nível de proporcionalidade entre os resultados dos ensaios utilizados na construção de cada curva. Correlações elevadas facilitam e dão maior confiabilidade à interpretação dos fenômenos ocorridos com a coesão e o ângulo de atrito em função da temperatura.

A tabela 6.1 resume os valores dos parâmetros de resistência c e ϕ obtidos a partir dos gráficos das figuras 6.1 a 6.9. A primeira linha da tabela traz os valores de c e ϕ obtidos com a análise conjunta dos resultados dos poços AP-98 (apenas um resultado deste poço) e CAM-456 à temperatura ambiente. A linha seguinte traz os valores de c e ϕ apenas para o poço CAM-456 também à temperatura ambiente. Apenas a comparação destes dois resultados permite verificar a influência que possíveis diferenças entre amostras de poços distintos produzem nos resultados. Comparando-se as figuras 6.1 e 6.2, observa-se que na primeira o coeficiente de correlação foi de 0,93 enquanto que na segunda este parâmetro foi igual a 0,97. Esta aparente pequena diferença entre as amostras significa diferenças sensíveis no cálculo de c e ϕ , 21,7% entre os valores de c e 6,8% entre os valores de ϕ , tomados em relação aos resultados do poço CAM-456.

Tabela 6.1

Valores da coesão e do ângulo de atrito obtidos nos ensaios.

CAMPO	POÇO(S)	CP UTILIZADO(S)	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	TEMP. (°C)	C (MPa)	ϕ (°)			
CANTO DO AMARO	AP-98 e CAM-456	1 4,6,7,10 e 11	AÇU	ARENITO	24	3,61	33,1			
	CAM-456	4,6,7,10 e 11			24	4,60	35,5			
	CAM-456	1,2,5,8,9 e 12			80	3,05	34,1			
	AP-98, AP-125 e CAM-456	2 e 3 2 e 3 3			150	4,25	23,2			
	AP-153, CAM-519 e CAM-529	2 1 e 2 1						24	4,07	29,3
	AP-128, AP-153 e CAM-615	2 1 e 3 1			150	2,69	28,5			
	LORENA	LOR-34						1 e 6	PENDÊNCIAS	
					2 e 4	80	12,07	31,0		
					3 e 5	150	10,32	32,7		

Embora a tabela 6.1 traga um número razoável de resultados, a interpretação destes resultados requer um certo cuidado. Portanto, a avaliação da coesão e do ângulo de atrito do primeiro e segundo lotes de amostras, foi feita apenas a partir dos resultados apresentados pelo poço CAM-456, que contribuiu com o maior número de corpos de prova. Sendo assim, foi possível apenas estabelecer um comportamento para os arenitos do poço CAM-456. nada pôde ser precisado para os outros poços dos dois primeiros lotes. Felizmente esta situação mudou bastante entre os resultados do terceiro lote de amostras em função da melhor homogeneidade entre elas.

Os resultados para o CAM-456 indicaram que houve influência da temperatura sobre os parâmetros de resistência dos arenitos deste poço, principalmente sobre a coesão. O ângulo de atrito interno caiu de 35,5° para 34,1° e a coesão do material de 4,6 para 3,05 MPa, quando a

temperatura aumentou de 24° para 80°C. As variações percentuais de c e ϕ foram respectivamente: 33,7% e 4%.

Para as amostras dos arenitos do terceiro lote, os resultados à temperatura ambiente e 150°C indicaram o mesmo comportamento apresentado pelo poço CAM-456. O valor de ϕ caiu de 29,3° para 28,5° enquanto que o valor de c variou de 4,07 MPa para 2,69 MPa quando a temperatura subiu de 24° para 150°C, que representaram respectivamente, variações percentuais de 2,7% e 34%. A variação de c neste caso foi aproximadamente a metade do anterior, que foi o mesmo resultado encontrado no capítulo V para a tensão de ruptura média.

As amostras dos arenitos do poço LOR-34, Campo de Lorena (Formação Pendências), apresentaram um comportamento bem distintos dos arenitos dos poços de Campo de Canto do Amaro. As primeiras diferenças estão nos valores da coesão dos dois tipos de rochas. À temperatura ambiente, a coesão dos arenitos da formação Açú chega a ser 35% do valor obtido para os arenitos da formação Pendências. Esta diferença aumenta a 150°C, quando o valor do parâmetro c da Formação Açú representa apenas 26% do obtido para a formação Pendências. Este parâmetro já dá uma boa idéia da diferença entre os dois materiais. A observação das tabelas 5.11 e 5.12 permite uma avaliação complementar feita através dos valores das tensões de ruptura alcançados por ambos.

Outra diferença notável foi a variação da coesão em função da temperatura para o poço LOR-34. Entre 24°C e 80°C registrou-se um pequeno aumento (c passou de 11,74 para 12,07 MPa), de 2,7%, que na prática é desprezível, principalmente tratando-se de um dado experimental. Entre a temperatura ambiente e 150°C, a diferença sobe para 12,2% (c passa de 11,74 para 10,3 MPa), que ainda é bem inferior aos 34% registrado para as amostras de Canto do Amaro.

Para os arenitos da Formação Açú o ângulo de atrito mostrou-se pouco influenciado pela temperatura, indicado uma pequena redução nos dois casos (inferior a 4%), enquanto que para os arenitos da formação Pendências não ficaram claras as possíveis tendências de comportamento deste parâmetro. A redução no valor de ϕ entre 24° e 80°C e seu posterior aumento entre 80° e 150°C indicam uma influência não definida para o intervalo de temperatura estudado. Talvez isto indique que para os areni-

tos mais consolidados não hajam influências significativas dentro do intervalo de temperatura considerado neste projeto. De fato, a coesão do material mostrou-se bem mais sensível à variação da temperatura do que o ângulo de atrito, em todos os casos apresentados.

As figuras 6.10 a 6.16 apresentam as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb para os ensaios realizados.

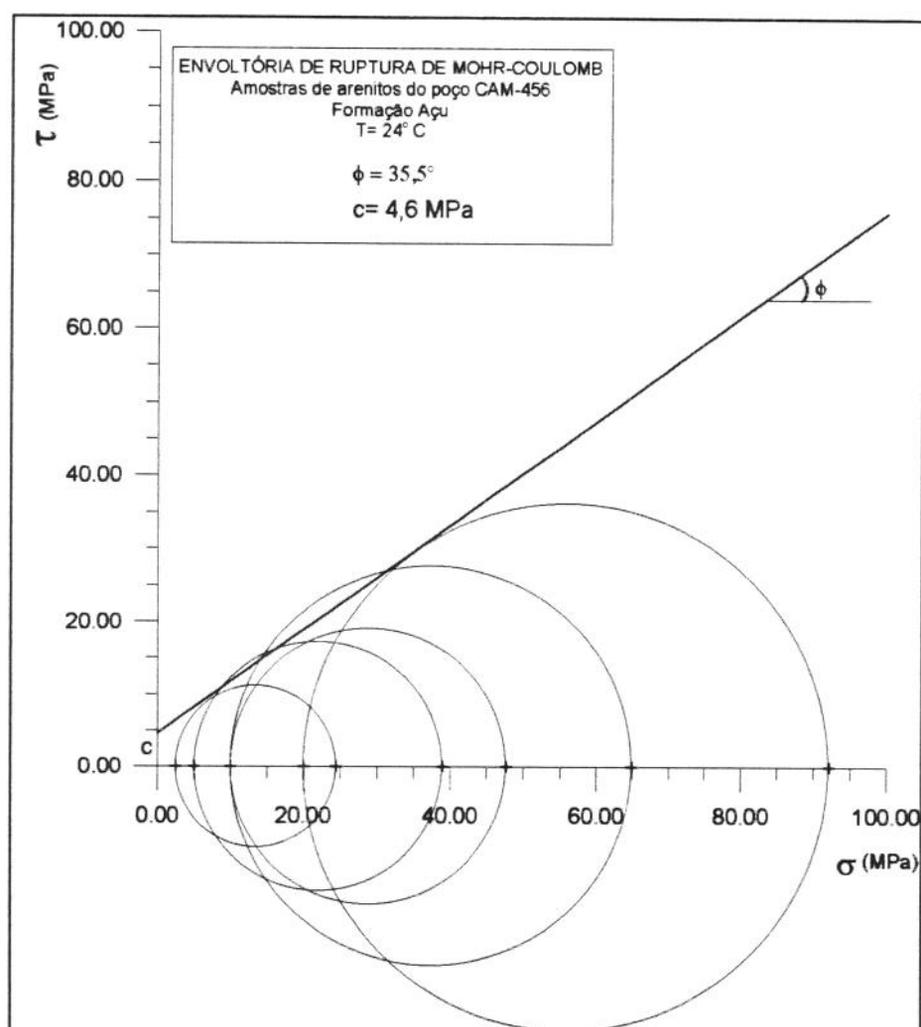


Figura 6.10 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço CAM-456. Resultados à temperatura ambiente.

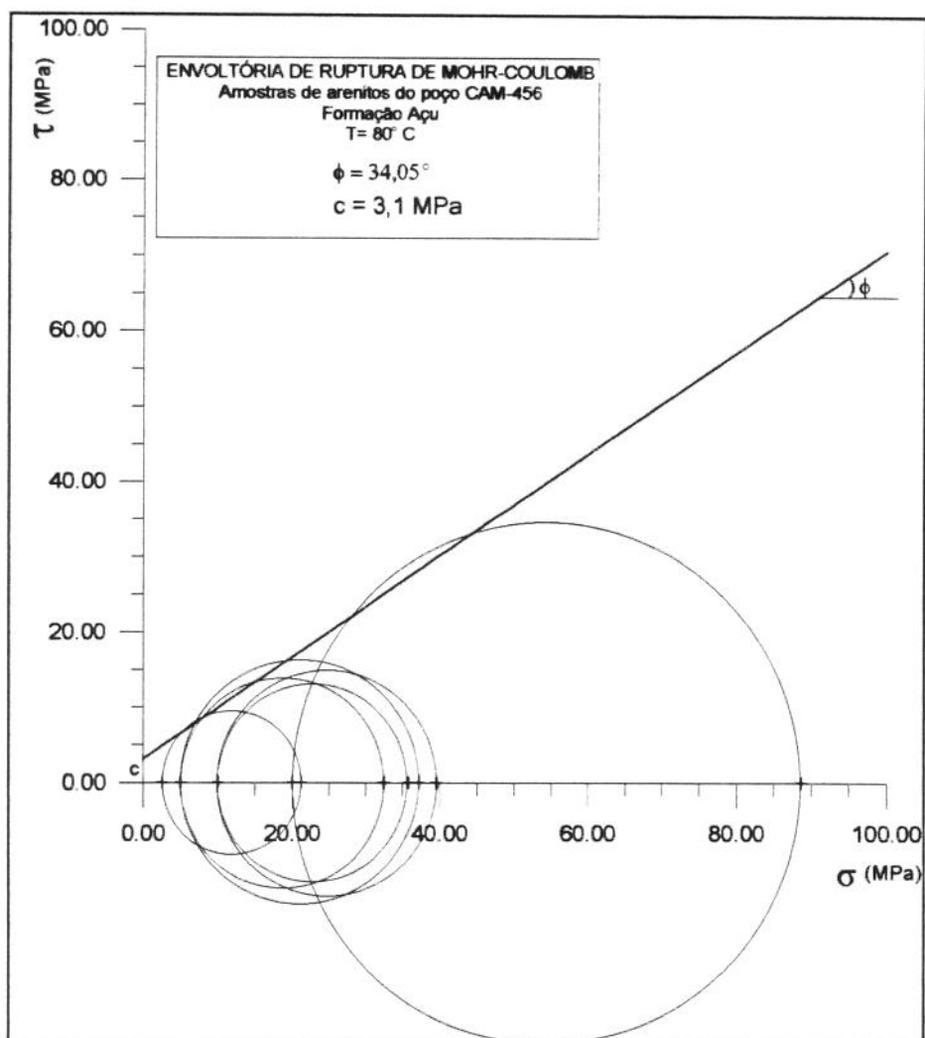


Figura 6.11 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço CAM-456. Resultado a 80°C.

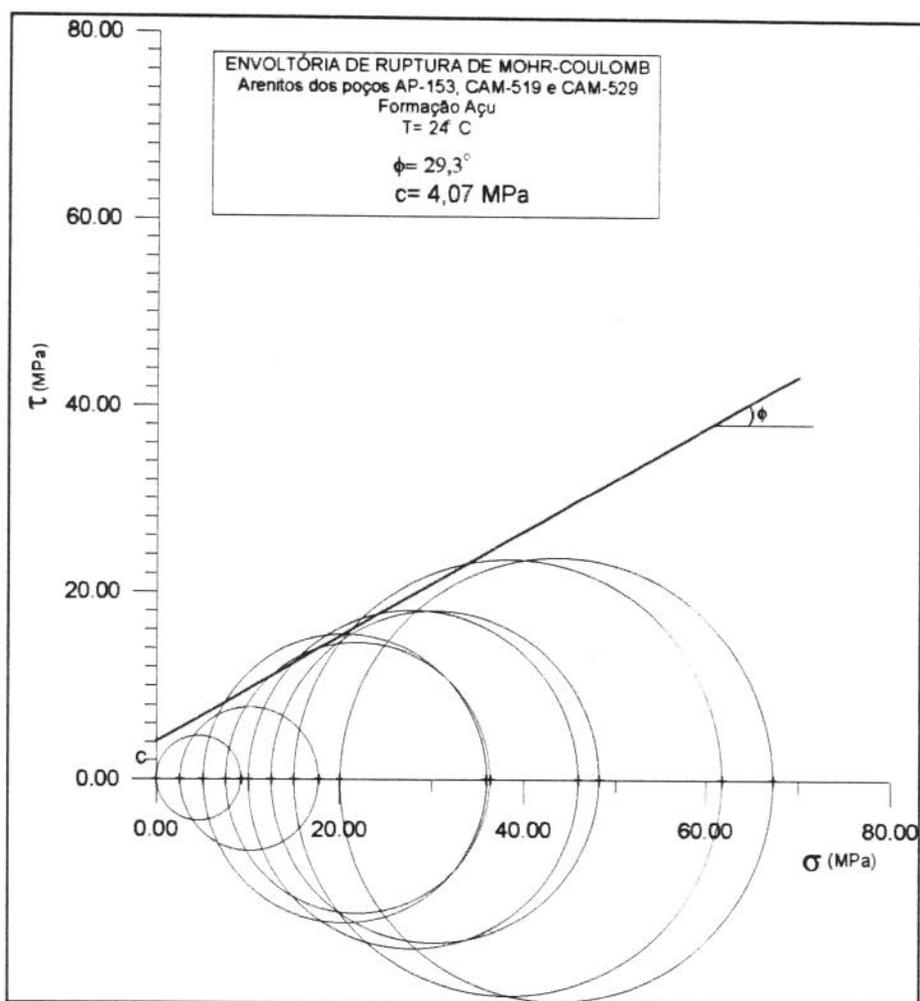


Figura 6.12 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos dos poços AP-153, CAM-519, CAM-529. Resultado a 24°C, obtidos nos ensaios múltiplos.

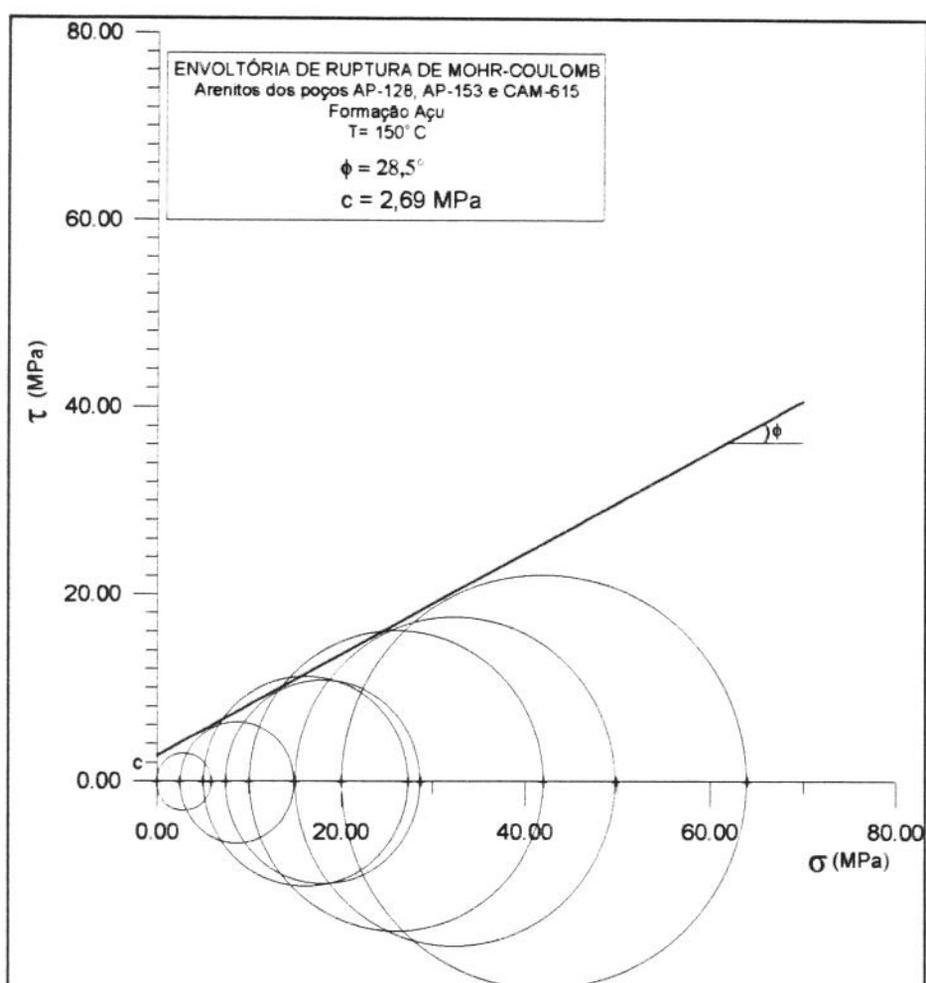


Figura 6.13 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos dos poços AP-128, AP-153 e CAM-615. Resultado a 150°C, obtidos nos ensaios múltiplos.

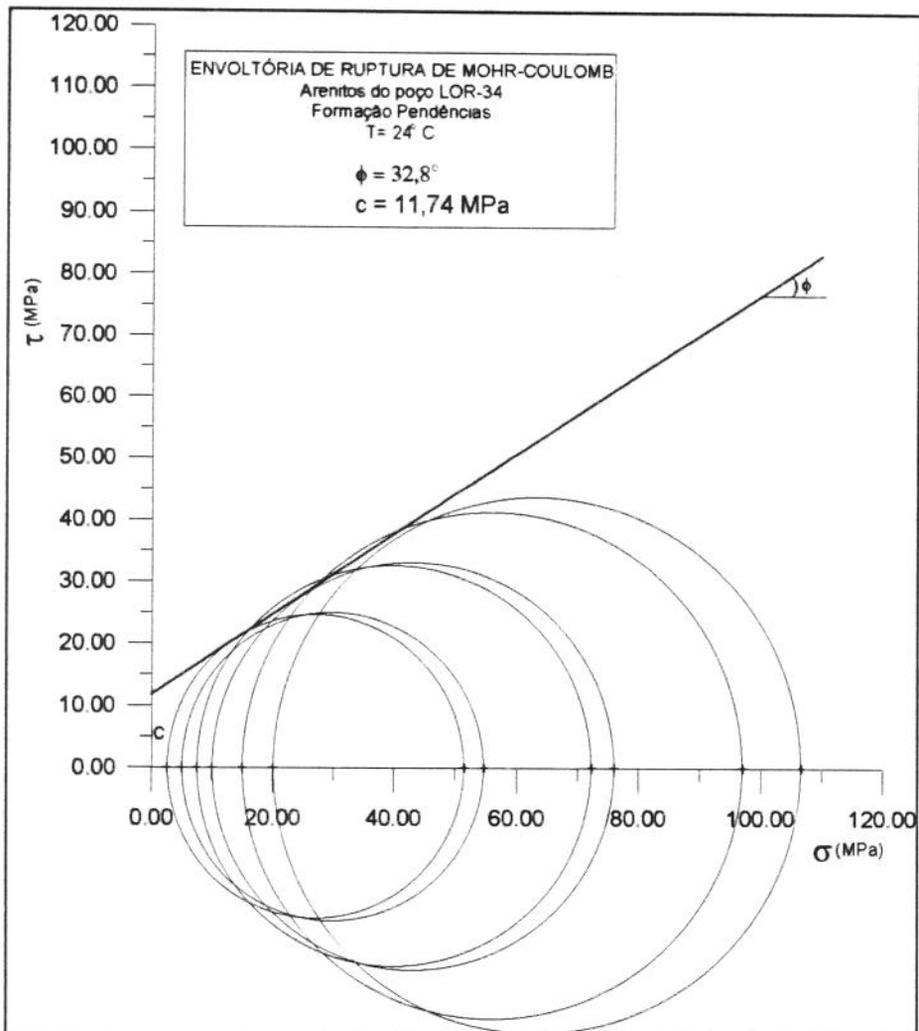


Figura 6.14 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço LOR-34. Resultado à temperatura ambiente, obtidos nos ensaios múltiplos.

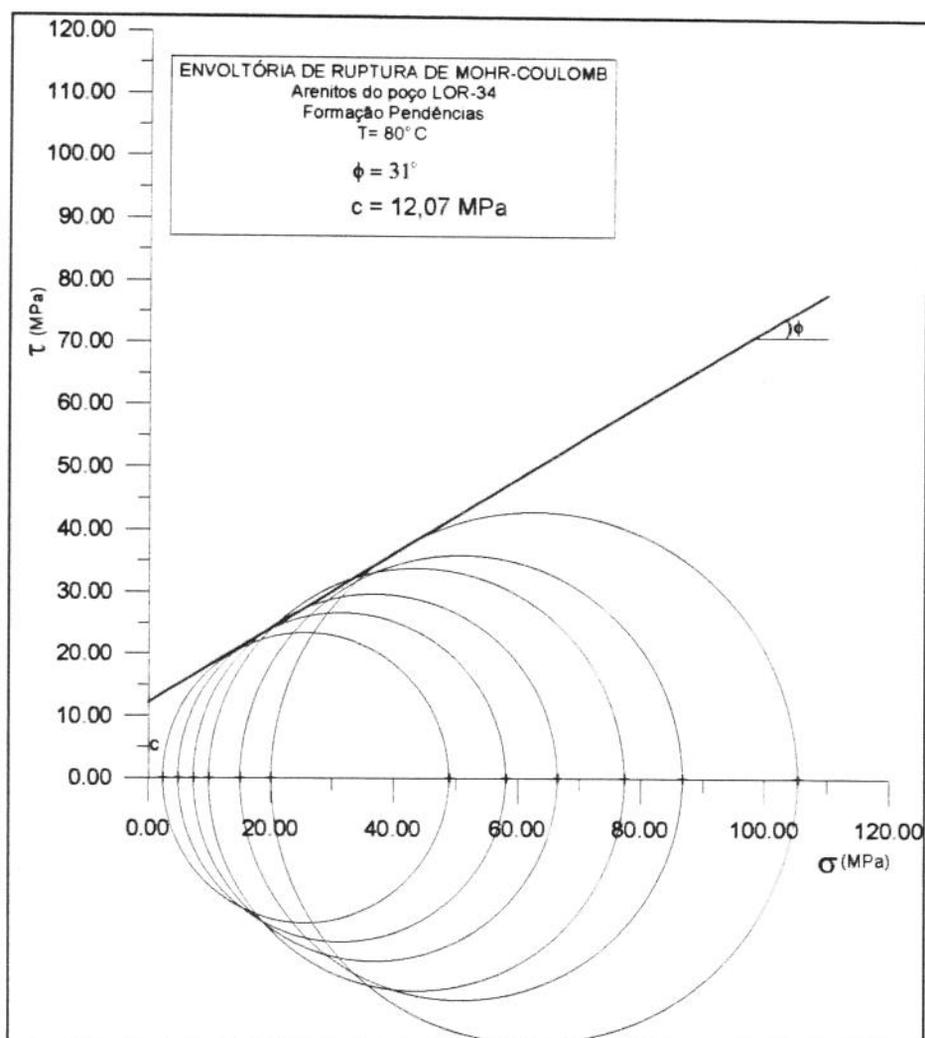


Figura 6.15 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço LOR-34. Resultado a 80°C. obtidos nos ensaios múltiplos.

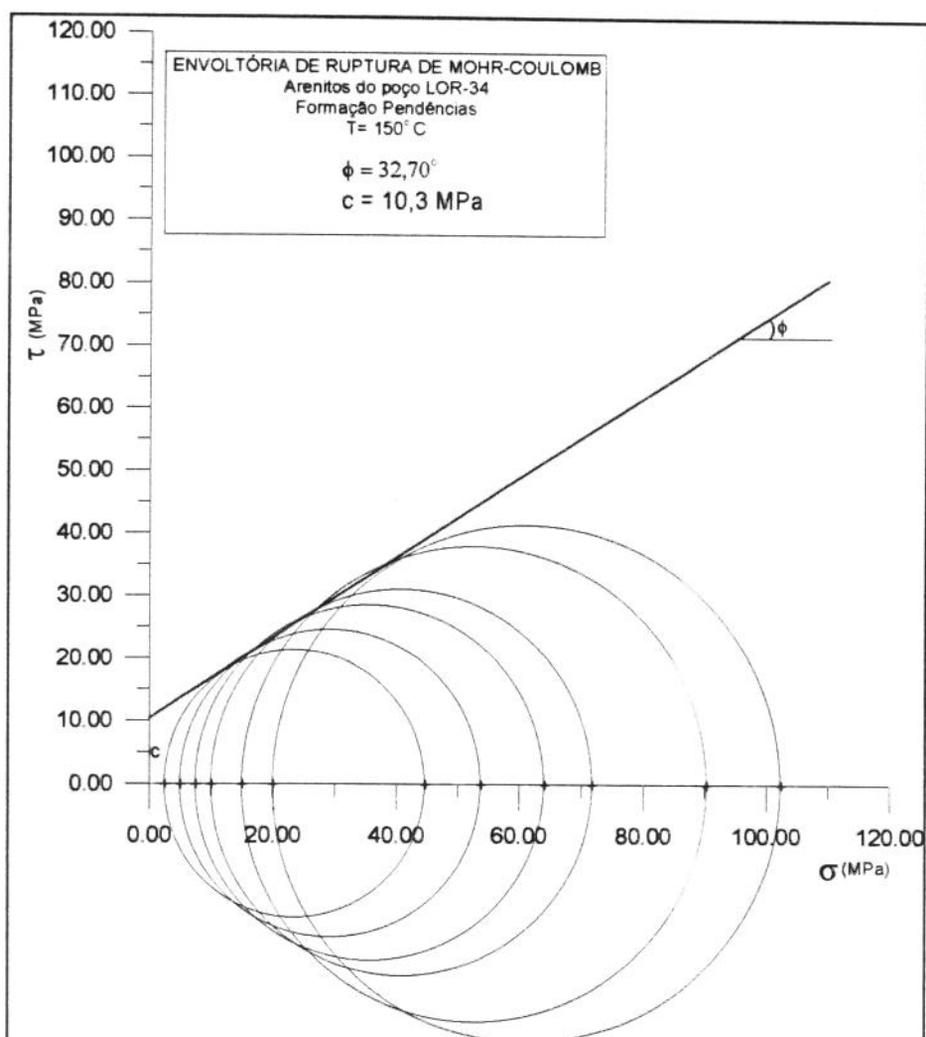


Figura 6.16 - Envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb para os arenitos do poço LOR-34. Resultado a 150°C, obtidos nos ensaios múltiplos.

As figuras de 6.17 a 6.19 mostram as comparações entre as envoltórias de ruptura apresentadas nas figuras 6.10 a 6.16 sem a representação dos círculos de Mohr.

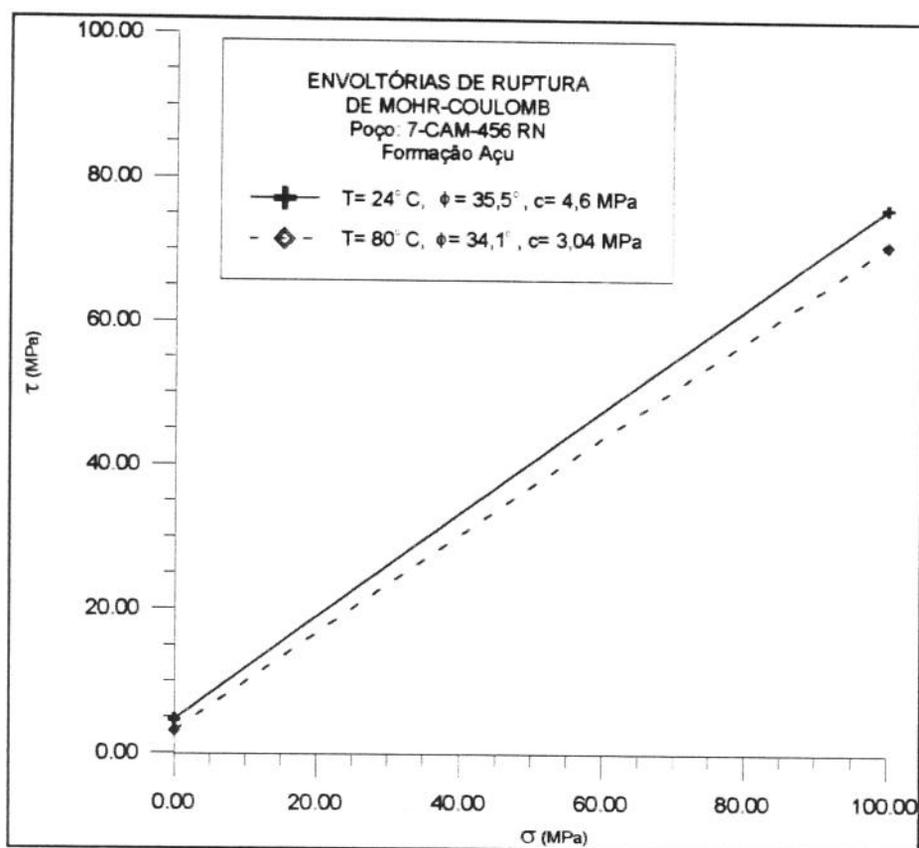


Figura 6.17 - Gráfico comparativo das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb à temperatura ambiente e a 80°C para o poço CAM-456 do campo de Canto do Amaro, formação Açu, bacia Potiguar.

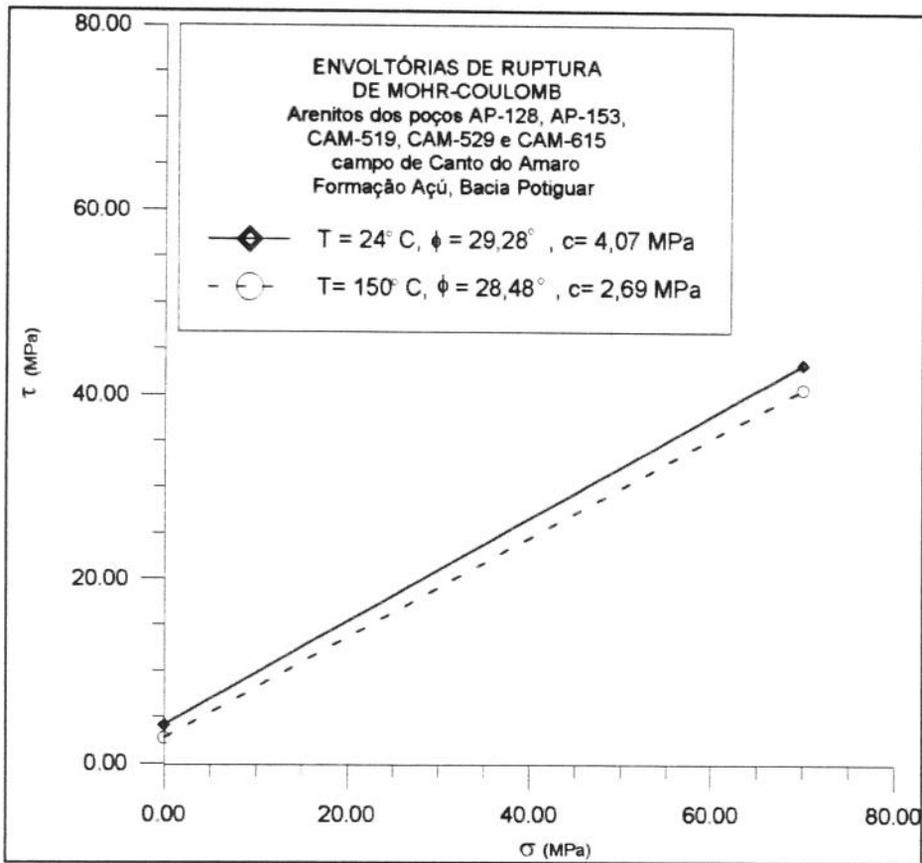


Figura 6.18 - Gráfico comparativo das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb à temperatura ambiente e a 150°C para os poços AP-128, AP-153, CAM-519, CAM-529 e CAM-615 do campo de Canto do Amaro, formação Açú, bacia Potiguar.

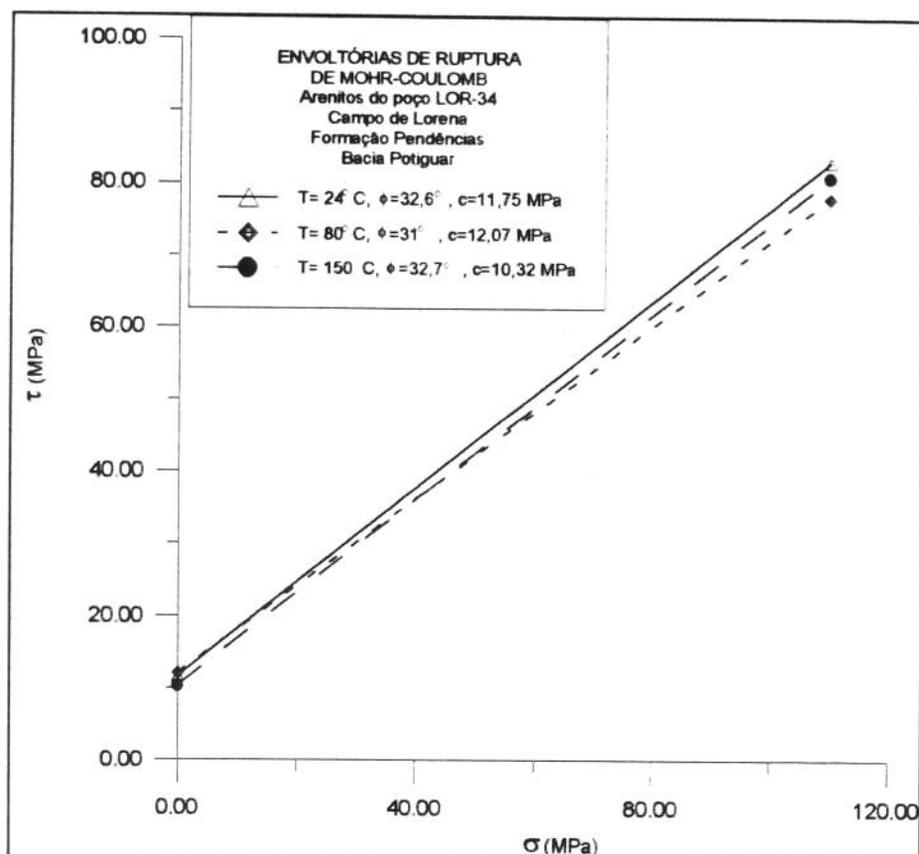


Figura 6.19 - Gráfico comparativo das envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb à temperatura ambiente, 80° e 150°C para o poço LOR-34 do campo de Lorena, formação Pendências, bacia Potiguar.

As figuras 6.17 a 6.19, permitem verificar os deslocamentos sofridos pelas envoltórias de ruptura dos materiais ensaiados, principalmente para os arenitos da formação Açú. A figura 6.19, que representa os resultados para o poço LOR-34, Formação Pendências, mostram ainda que para um nível de tensões de até 40 MPa, as curvas praticamente se confundem. Isto foi mais uma indicação da pouca influência da temperatura sobre as os parâmetros de resistência ao cisalhamento para o poço LOR-34.

Análise Complementar dos Resultados por Simulação Numérica

Um dos mais importantes desafios enfrentados nos projetos e execução de poços de petróleo é o da avaliação da estabilidade do poço durante as fases da perfuração, bem como prever a possível e indesejável

produção de areia associada ao petróleo produzido durante a vida útil do poço.

Tradicionalmente, os parâmetros geomecânicos usados nas simulações numéricas, são obtidos a partir de ensaios de mecânica de rochas realizados à temperatura ambiente. A tentativa de responder alguns questionamentos a respeito da influência da temperatura sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento de rochas reservatório levou à complementação deste projeto com um estudo de simulação numérica, em que fossem avaliadas as diferenças de comportamento geomecânico durante as simulações da verificação de estabilidade de poços de petróleo, quando considerada a influência da variação da resistência ao cisalhamento com a temperatura. O apêndice 2 traz o relatório completo dos resultados obtidos com as simulações numéricas realizadas, além de diversos detalhes necessários a compreensão das metodologias empregadas.

O estudo compõe-se de análises feitas durante a fase de perfuração e produção de poços verticais típicos do campo de petróleo de Canto do Amaro, bacia Potiguar, utilizando-se os dados deste campo. Os dados constituem-se das propriedades geomecânicas, características de reservatório (permeabilidade relativa, pressão estática, pressão de fluxo de produção, etc.) e o estado de tensões *in-situ*.

Para análise da influência da temperatura no comportamento geomecânico quanto à estabilidade das paredes do poço durante as fases de perfuração e produção, utilizou-se o programa de elementos finitos de análise elasto-plástica de nome AEEPECD (Análise estática elastoplástica de estruturas, cavidades e descontinuidades) desenvolvido pelo engenheiro da PETROBRAS S.A., Álvaro Maia da Costa.

Premissas Básicas

Na fase de perfuração considerou-se que não existia percolação de fluido de perfuração para dentro da formação. A análise feita desta forma, é denominada de “líquido não penetrante” e parte do pressuposto que o reboco formado pelo fluido de perfuração garante total impermeabilidade às paredes do poço.

Na fase de produção, considerou-se que o fluido percola pela rocha. Neste caso, a análise efetuada considera apenas a condição de fluxo permanente aplicando-se a solução de Laplace. As forças de percolação que provocam o arrasto de partículas finas de areia não foram consideradas no modelo.

Parâmetros Geomecânicos. Os parâmetros geomecânicos foram baseados nos resultados fornecidos pelos ensaios triaxiais, realizados no LMR do CENPES em diversas amostras de arenitos da formação Açu, retiradas de vários poços do campo de Canto do Amaro, bacia Potiguar, pelo processo de testemunhagem.

As amostras foram divididas em dois conjuntos distintos, cada qual com fácies geológicas semelhantes. O primeiro conjunto foi formado pelas amostras dos poços AP-98, CAM-373 e CAM-456, porém foram utilizados apenas os dados referentes ao poço CAM-456, por ter sido este o que dispunha de maior número de amostras e conseqüentemente, exercia uma predominância sobre as respostas dos ensaios triaxiais convencionais nas temperaturas ambiente e 80°C. O segundo conjunto, foi constituído por amostras obtidas dos poços AP-128, AP-153, CAM-519, CAM-529 e CAM-615. Neste caso adotaram-se as técnicas de ensaios múltiplos à temperatura ambiente e 150°C.

Os parâmetros elásticos adotados nas análises, tiveram como base a média aritmética obtidas nas curvas de tensão-deformação dos ensaios triaxiais. A tabela 6.2 traz os parâmetros de resistência e de deformabilidade utilizados como dados de entrada no trabalho de simulação numérica.

Tabela 6.2 - Parâmetros de resistência e elásticos utilizados na simulação numérica.

CONJUNTO DE AMOSTRAS	TEMP. DOS ENSAIOS (°C)	ϕ (°)	c (MPa)	E (MPa)	ν
1	24	35,5	4,60	6000	0,3
1	80	34,1	3,04	6000	0,3
2	26	29,3	4,07	6000	0,25
2	150	28,5	2,69	6000	0,25

Na tabela 6.2, aparece indicada a temperatura de 26°C que foi a efetivamente encontrada para a maioria dos experimentos com o terceiro lote das amostras dos arenitos da formação Açú. Ao longo deste trabalho, o fato de aparecer como temperatura média para este lote de amostras também o valor de 24°C, serviu apenas para uniformizar os comentários. Porém, acredita-se que a diferença de 2°C não deve representar alterações significativas nos resultados obtidos.

Outro detalhe da tabela acima foi o fato de ter sido considerado como a média de **E** para todos os casos o valor de 6000 MPa, que representa na realidade apenas a média do módulo de Young para as amostras do poço CAM-456 em uma pressão de confinamento de 10 MPa a 80°C.

Os outros dados do reservatório utilizados na simulação e apresentados na tabela 6.3, foram fornecidos pela PETROBRAS, responsável pelo acompanhamento e exploração do Campo de Canto do Amaro.

Tabela 6.3 - Dados do reservatório produtor de petróleo do campo de Canto do Amaro utilizados na simulação numérica.

PROF. DA ZONA (m)	SOBRECARGA DAS CAMADAS (Kgf/cm ² /m)	GRAD. DE FRATURA (Kgf/cm ² /m)	PRESSÃO ESTÁTICA (Kgf/cm ²)	DEPLEÇÃO DE PRODUÇÃO (Kgf/cm ²)	PERMEAB. (μm ²)	VISCOSID. DO ÓLEO (Pa.s) x 10 ⁻³	DENSID. DO ÓLEO
660	0,231	0,2079	40,0	35,0	0,0987 - 0,296	2 - 15	0,876 - 0,825

A permeabilidade adotada para a solução de Laplace variou de 1,3x10⁻⁶ m/s a 5,3x10⁻⁶ m/s, que corresponde a uma permeabilidade entre 0,1 e 0,3 Darcy para o tipo de fluido da formação Açú no campo de Canto do Amaro. Foi considerado ainda que os arenitos apresentam propriedades isotrópicas.

Estado de Tensões *in-situ*. O estado de tensões *in-situ* adotado na modelagem numérica, na fase anterior à perfuração do poço, foi fundamentado na avaliação das tensões verticais utilizando-se o peso das camadas sobrejacentes à zona de interesse, situada a uma profundidade de 660 metros. Na avaliação das tensões horizontais adotou-se o gradiente de fratura obtido a partir de micro-fraturamento hidráulico em poços do campo.

Para a avaliação das tensões verticais considerou-se um peso específico médio da coluna de $23,1 \text{ kN/m}^3$ (1 psi/pé). Para as tensões horizontais utilizou-se o gradiente de fratura de $20,34 \text{ kN/m}^3$ (0,9 psi/pé). Este conjunto de valores indicou um coeficiente de empuxo^{6.1} no repouso de 0,86 para a profundidade do reservatório de 660 metros.

Modelo de Análise. Foi utilizado o programa de elementos finitos AEEPECD, adotando-se a técnica de *mesh-rezoning* para execução da escavação do poço e a aplicação da solução de Laplace para fluxo em regime permanente (vide apêndice 2).

Anteriormente a etapa de perfuração, é gerado o estado de tensões equivalente ao estado *in-situ*, sendo considerado que o modelo se encontra em equilíbrio estático. Na fase de perfuração considera-se que o fluido de perfuração não percola para dentro da formação, não se estabelecendo fluxo algum. Neste caso, a análise é dita como sendo de “líquido não penetrante”, sendo avaliado o efeito conjunto da perfuração de um furo no maciço e a aplicação simultânea de uma pressão correspondente ao peso de lama junto à parede do poço. A lama idealizada para a análise nesta fase foi um fluido de gradiente equivalente a $6,1 \text{ kN/m}^3$ (5,1 lb/gal).

Na fase da produção de óleo considera-se a ocorrência de fluxo de fluido por dentro da formação, correspondente ao escoamento do óleo. A avaliação da estabilidade nesta fase, foi feita através da aplicação de uma pressão negativa junto à parede do poço, correspondente à diferença entre a pressão aplicada pelo fluido durante a fase de perfuração e a decorrente do óleo dentro do poço durante a fase de produção. Nesta etapa a solução de Laplace é aplicada de forma a se considerar a variação de tensões ao longo do maciço e a conseqüente variação volumétrica devida ao processo (vide apêndice 2).

^{6.1} Coeficiente de empuxo é a razão entre a tensão horizontal efetiva e a tensão vertical efetiva. As tensões efetivas são obtidas deduzindo-se das tensões totais as parcelas correspondentes a pressão hidrotática dos fluidos contidos nos poros da rocha.

Resultados

Fase de Perfuração. O resultado das análises de estabilidade utilizando-se os dados disponíveis na tabela 6.2 para as diferentes temperaturas, mostrou que a redução de resistência ao cisalhamento devido ao aumento da temperatura influencia diretamente a condição de estabilidade das paredes do poço podendo, a depender do gradiente do fluido, significar a condição de estabilidade ou instabilidade do poço.

Para a análise e representações gráficas apresentados no relatório da simulação (vide apêndice 2), utilizou-se a relação entre a tensão de cisalhamento atuante e a tensão de cisalhamento admissível (denominada, no relatório, de Ratio) *versus* distância (entre o eixo do poço e um ponto do maciço). Verificou-se que a diminuição da resistência ao cisalhamento, decorrente do aumento da temperatura, provocou o aumento da relação de tensões junto à parede do poço. Para a condição do estado de tensões *in-situ* e gradiente de fluido analisados, este acréscimo pode significar a plastificação de pontos ao longo do maciço.

Os resultados da simulação mostraram que não houve plastificação em nenhum ponto do maciço quando foram considerados os parâmetros obtidos a temperatura ambiente. Porém, os resultados da simulação mostraram o contrário quando foram utilizados os parâmetros a temperaturas mais elevadas.

Fase de Produção. Nesta etapa considerou-se a estabilidade da fase de produção adotando-se uma depleção dentro do poço de 3500kN/m^2 em relação a pressão estática do reservatório. O decaimento de pressões do maciço para o poço foi dado pela solução de Laplace.

Nesta fase, a pressão sobre a parede do poço foi deduzida do valor correspondente a pressão de fluido hipotético adotado para a perfuração ($6,1\text{ kN/m}^3$), para o valor correspondente ao da pressão dentro do poço durante a exploração do campo.

Os resultados das análises de estabilidade mostraram uma condição pior do que o apresentado na etapa de perfuração. Com exceção da análise do conjunto 1, a partir dos parâmetros obtidos a temperatura ambiente, todas as outras apresentaram plastificação do maciço.

Salienta-se inclusive, que o modelo não contempla o efeito da força de arrasto ocasionada pelo fluxo de óleo através da formação. Este efeito aumentaria ainda mais a força instabilizante sobre as paredes do poço.

Conclusões

As análises apresentadas, mostraram que a redução da resistência ao cisalhamento do material, quando submetido a altas temperaturas, tem como consequência imediata a redução da estabilidade dos poços tanto na fase de perfuração quanto na fase de produção, verificado através do aumento da razão entre a tensão de cisalhamento atuante e a tensão de cisalhamento admissível.

Uma vez que, tradicionalmente, as análises de estabilidade de poços de petróleo são feitas a partir de resultados de ensaios triaxiais conduzidos à temperatura ambiente, deve-se tomar uma postura conservadora no momento do dimensionamento do fluido de perfuração e na previsão da produção de areia na fase de produção do poço, para compensar o fato de que os parâmetros de resistência sofrem redução a temperaturas mais elevadas. Porém, recomenda-se a continuidade na investigação dos efeitos da temperatura sobre os parâmetros de resistência dos materiais de modo que se possam estabelecer fatores de minoração para uso prático em projetos de engenharia. Devido ao uso crescente de poços horizontais como uma solução viável a exploração de reservatórios de hidrocarbonetos, recomenda-se um amplo debate sobre os critérios de dimensionamento e verificação de estabilidade tanto para a fase de perfuração quanto para a fase de produção.

Resumo do Capítulo

A parte inicial deste capítulo destinou-se a apresentação dos resultados referentes aos parâmetros de resistência (ϕ e c) de amostras dos arenitos da formação Açú e Pendências, ambas pertencentes à bacia Potiguar, com características de homogeneidade, compactação e resistência bem distintas entre si. Avaliaram-se as influências da temperatura sobre os respectivos parâmetros de resistência das rochas descritas, entre a temperatura ambiente e 150°C.

A parte final do capítulo destinou-se a apresentação dos resultados das simulações numéricas feitas pelo CENPES, em que foi avaliada a influência da temperatura sobre a estabilidade das paredes dos poços do campo de Canto do Amaro, bacia Potiguar. As simulações foram realizadas partindo-se, entre outras informações, dos resultados dos parâmetros de resistência obtidos nos ensaios nas temperaturas utilizadas neste trabalho.

Os resultados dos ensaios mostraram que o aumento da temperatura provocou a redução dos parâmetros de resistência, principalmente da coesão, das amostras de arenitos utilizadas nos ensaios de laboratório. Os resultados mostraram também que esta redução foi mais pronunciada nas amostras dos arenitos mais fracos da formação Açú.

Quanto aos resultados das simulações numéricas, ficou demonstrado que a redução nos parâmetros de resistência em função do aumento da temperatura pode comprometer significativamente a estabilidade das paredes dos poços durante as fases de perfuração e produção. Os resultados mostraram que a plastificação da parede do poço, demonstrada em temperaturas mais elevadas, leva à instabilidade e ao comprometimento da segurança do projeto.

CAPÍTULO VII

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Discussão dos Resultados

Este projeto foi conduzido em um prazo relativamente curto. Os trabalhos experimentais começaram no início do mês de fevereiro de 1995, com apenas 12 amostras (poço CAM-456) do total de 40 ensaiadas, todas provenientes da Bacia Sedimentar Potiguar e retiradas de poços produtores de petróleo. As demais foram definidas e providenciadas em função das necessidades que foram identificadas no transcorrer dos experimentos. Foi a partir destes resultados que se identificou a necessidade de ensaiar amostras homogêneas e bem consolidadas.

Além das amostras efetivamente utilizadas no desenvolvimento do projeto, foram ensaiadas outras, tanto de um dos arenitos estudados (Formação Açu ou Pendências), quanto de outros disponíveis no LMR do CENPES (amostras de arenitos de poços da bacia do Recôncavo, por exemplo). Estas amostras serviram ao processo de calibração dos equipamentos, estabelecimento de procedimentos experimentais, avaliações complementares de fenômenos que surgiram ao longo dos experimentos, como foi o caso apresentado no apêndice I.

O objetivo inicial do projeto previa a avaliação dos fenômenos em discussão a partir de amostras de arenitos com alto grau de homogeneidade e de consolidação. Com isto, seria mantida uma regra quase unânime adotado por outros pesquisadores, quando avaliam fenômenos pouco explorados e portanto, pouco conhecidos. A pesquisa prévia a respeito da Influência da Temperatura sobre os Parâmetros Elásticos e de Resistência em Rochas Reservatório de Petróleo, já dava uma indicação de que seriam poucos os resultados disponíveis na literatura para efeito de comparação. Este fato já representava uma justificativa aceitável para se ter cautela na escolha do material a ser ensaiado.

Verificou-se que pelo menos 70% dos trabalhos de pesquisa utilizados como base neste projeto buscaram resultados do comportamento de fenômenos como tensão de ruptura, módulos de elasticidade, propagação de ondas sonoras (ultra-som), compressibilidade do material etc., em função da temperatura, a partir de amostras de rochas como granito, mármore e arenito Berea ou outros tipos de rochas que se caracterizavam por boa homogeneidade e consolidação. Evidenciaram-se nestes casos, além da tentativa de compreender e descrever os fenômenos, a busca de materiais mais fáceis de manusear e de descrever. Mesmo quando o assunto trata de rochas reservatórios de petróleo, aquelas com propriedades de mais fácil controle e descrição são preferidos.

Bloch (1993), ao justificar a escolha dos arenitos para sua pesquisa, escreve:

“...As amostras ensaiadas neste trabalho são provenientes do arenito Catu 6, formação Marfim, ...Este arenito foi escolhido pela sua alta homogeneidade, afim de permitir a comparação dos resultados de ensaios mecânicos em diferentes corpos de prova (CP), e boa porosidade, para facilitar os ensaios com medição de poropressão.”

No caso deste projeto, apenas 20% das amostras disponíveis (arenitos dos poços LOR-30 e LOR-34, Formação Pendências) poderiam ser enquadradas dentro dos aspectos colocados nos parágrafos anteriores. O restante (arenitos dos poço do campo de Canto do Amaro, formação Açú), pelo baixo nível de consolidação (arenitos friáveis) e de homogeneidade, não poderiam ser considerados materiais ideais para este tipo de pesquisa. Porém, tratavam-se de arenitos provenientes de um campo de petróleo importante (o maior campo terrestre produtor de petróleo no Brasil), para os quais os resultados do projeto poderiam significar informações valiosas.

A etapa de caracterização dos arenitos deste projeto não foi conduzida conforme o planejado. Devido à indisponibilidade de pessoal e equipamentos por todo o tempo necessário, nem todas as amostras passaram pelo processo de descrição macro e microscópica e DRX. Principalmente, quando se tratam de arenitos menos homogêneos, é importante a análise de todas as amostras para identificar as possíveis diferenças que

possam interferir nos resultados dos ensaios. Inclusive esta etapa deve vir logo após a fase de preparação dos corpos de prova, para permitir ao pesquisador ter à sua disposição as características do material a ser ensaiado.

Um outro ponto importante foi o fato de que o LMR do CENPES não tinha experiência anterior na realização de ensaios com temperaturas elevadas, embora o equipamento já estivesse disponível há pelo menos dois anos. Em função disto, o projeto permitiu também capacitar tecnicamente o laboratório e sua equipe para trabalhos desta natureza.

A fase de preparação das amostras, mostrou-se uma etapa delicada. Os primeiros corpos de prova (12 amostras do poço CAM-456) foram cortadas com a utilização de água como fluido de refrigeração das ferramentas de corte. Esse procedimento mostrou-se inadequado em virtude dos problemas que surgiram, como a desagregação parcial da superfície externa dos corpos de prova. Esse procedimento poderia inclusive provocar outro problema, que é o inchamento de argilas, que felizmente não foi detectado. As amostras seguintes foram preparadas com a utilização de ar. Embora a recomendação inicial fosse a de congelar os testemunhos antes da retirada das amostras, esta prática não foi seguida, mesmo tendo sido verificado uma acentuada perda inicial de corpos de prova. A maior habilidade do técnico na preparação minimizou o problema para os testemunhos seguintes.

Outro procedimento considerado inadequado, e que foi corrigido posteriormente, foi a não secagem das primeiras amostras em estufa, principalmente aquelas cortadas com água, embora o tempo decorrente entre a preparação e os ensaios fosse suficiente para reduzir a umidade dos corpos de prova. O problema é que não se tem um controle adequado da perda de umidade se a amostra não for submetida à estufa.

Como, em função da experiência que se acumulou, as amostras do lote 3 foram preparadas de forma significativamente diferente das amostras dos lotes 1 e 2, optou-se por avaliá-las separadamente.

Os resultados obtidos, principalmente com as amostras dos lotes 1 e 2, evidenciaram a heterogeneidade entre as amostras. A utilização do método de ensaio múltiplo conseguiu minimizar sensivelmente o

problema, através da redução do número de amostras ensaiadas. Porém, esse método leva a um outro problema não resolvido até o momento, que é a não utilização das curvas de tensão-deformação dos estágios subseqüentes ao primeiro, na determinação dos parâmetros elásticos.

Tendo em vista tanto o grande número de condições a serem analisadas quanto o número de parâmetros a determinar, o número reduzido de amostras não permitiu que fosse dado um tratamento estatístico adequado aos resultados. Por outro lado, é difícil reunir um número elevado de corpos de prova que permitam dar maior confiança estatística aos resultados. Este conjunto de fatores pode ser uma justificativa para a preocupação dos pesquisadores em procurar, na maioria dos casos, materiais de elevado grau de homogeneidade para trabalhar. Infelizmente a natureza não obedece regras bem definidas e nem sempre as situações mais favoráveis representam aquelas de real interesse prático.

Durante os ensaios para a determinação da compressibilidade total das amostras, verificou-se que a equação linearizada que define a deformação volumétrica das amostras não era adequada. Mostrou-se que a utilização das curvas linearizadas levavam a erros grandes na determinação da compressibilidade. As deformações das amostras dos arenitos com as características das que foram ensaiadas, não puderam ser consideradas como fenômenos de pequenas deformações. Para estes casos, o correto é admitir a equação da deformação volumétrica com todos os seus termos, para obter uma curva não linearizada e mais correta.

Não foi possível justificar adequadamente o comportamento verificado com o módulo de Young dos arenitos da Formação Açú. As diferenças na mineralogia e nos índices físicos a princípio não justificam a diferença de comportamento.

Conclusões

Os resultados alcançados neste projeto permitiram chegar a algumas conclusões importantes:

- 1- É importante a homogeneidade entre as amostras a serem ensaiadas para obtenção da influência da temperatura sobre os parâmetros elásticos e de resistência em rochas reservatório. O ideal seria a utilização de amostras provenientes de um único poço ou de um conjunto destes de

comprovado grau de homogeneidade dentro da camada de rocha que se deseja avaliar, para permitir a extrapolação dos resultado para uma área maior de um campo produtor.

- 2- Os resultados mostraram que a resistência à compressão dos arenitos friáveis da Formação Açu foram fortemente afetados pela temperatura, para o intervalo de 24°C a 150°C. Os ensaios com as amostras do poço CAM-456 mostraram que a tensão de ruptura (σ_1) caiu em média cerca de 22% quando a temperatura subiu de 24° para 80°C. Os resultados com as amostras dos outros poços ensaiados entre 24° C e 150°C, indicaram uma queda média de 17,5%. Esta diferença de comportamento está relacionada com a heterogeneidade entre as amostras. Para os corpos de prova do poço LOR-34, Formação Pendências, a queda da tensão de ruptura entre 24°C e 80°C foi de 3,4% enquanto que entre 24°C e 150°C a variação foi de 6,7%. Esta menor sensibilidade ao efeito da temperatura, pode ser justificada pelo fato de este arenito ser mais consolidado e mais compacto do que os arenitos da Formação Açu. O comportamento deste parâmetro ficou bem definido;
- 3- O módulo de Young não apresentou uma tendência única entre os CP ensaiados. As amostras dos arenitos do primeiro e segundo lotes (Formação Açu), predominantemente do poço CAM-456, indicaram uma redução média de 22,7% no módulo de Young, quando a temperatura passou de 24°C para 80°C. Porém, as amostras do mesmo campo e dos outros poços que compunham parte do terceiro lote de amostras apresentaram um comportamento oposto, ou seja, o módulo de Young aumentou em média 28,6% quando a temperatura passou de 24°C para 150°C. O módulo de Young dos arenito do campo de Lorena, caíram 1,8% entre 24°C e 80°C e 7,3% entre 24°C e 150°C;
- 4- O coeficiente de Poisson caiu em média 9,8% entre 24°C e 80°C para os arenitos da Formação Açu e 20,5% entre 24°C e 150°C. Os arenitos da Formação Pendências mostraram uma queda média deste parâmetro de 13% entre 24°C e 80°C e de 28% entre 24°C e 150°C. Neste caso não foi verificada a mesma tendência dos outros parâmetros, em que as rochas mais fracas tendem a apresentar maiores variações do que as mais resistentes e compactas;

- 5- Verificou-se que a deformação volumétrica das amostras, quando submetidas ao ensaio hidrostático, não pode ser considerada como um fenômeno de pequenas deformações. O valor da compressibilidade volumétrica calculado com a hipótese de pequenas deformações levou, em alguns casos, a diferenças superiores a 60%, em comparação com o mesmo parâmetro obtido a partir da hipótese de grandes deformações;
- 6- Os resultados indicaram que a compressibilidade volumétrica (*bulk compressibility*) dos arenitos da formação Açu, provenientes dos poços do campo de Canto do Amaro, foi bastante afetada pela temperatura. A redução da compressibilidade situou-se em torno de 50% nas amostras do poço CAM-465 quando a temperatura variou de 24°C para 80°C. Entre 80°C e 150°C, a variação média obtida a partir dos ensaios com amostras do poço CAM-373 foi da mesma ordem de grandeza;
- 7- Os parâmetros de resistência ao cisalhamento (c e ϕ) também foram afetados pela temperatura. Mais uma vez verificou-se a redução destes parâmetros devido ao aumento da temperatura. As amostras do poço CAM-456 indicaram uma redução respectivamente de 33,7% e 4% nos valores de c e ϕ quando a temperatura passou de 24°C para 80°C. Entre 24°C e 150°C, os resultados a partir de amostras de vários poços do campo, mostraram respectivamente uma redução de 34% e 2,7% nos mesmos parâmetros. Quanto aos arenitos da Formação Pendências, o valor de ϕ praticamente não sofreu variação entre 24°C e 150°C enquanto c ficou quase constante entre 24°C e 80°C, sofrendo depois uma redução de 14% entre 80°C e 150°C;
- 8- A simulação numérica para avaliar a estabilidade das paredes de um poço padrão do Campo de Canto do Amaro quanto ao cisalhamento, durante as fases de perfuração e produção de petróleo, mostrou que as reduções sofridas pelos parâmetros de resistência, em função do aumento da temperatura, foi suficiente para produzir um estado de plastificação nas paredes do poço, levando à instabilidade. O processo foi mais severo na fase de produção, em virtude do efeito do fluxo de fluidos da formação para dentro do poço.

Recomendações

Os resultados obtidos no trabalho, sugerem algumas recomendações:

- 1- O estudo de rochas menos homogêneas exige um número maior de amostras que permitam um tratamento estatístico adequado. Como exemplo, Vutukuri, Lama e Saluja (1974), recomendam entre 5 e 10 amostras para a obtenção da resistência a compressão de arenitos. No caso de ensaios de compressão triaxial com diferentes temperaturas, recomenda-se que sejam ensaiadas cerca de 10 amostras para cada temperatura, com a pressão de confinamento distribuída ao longo do intervalo de interesse. Este procedimento deve possibilitar um número suficiente de dados para aplicação de um critério de ruptura como por exemplo, Mohr-Coulomb;
- 2- Durante a fase de preparação das amostras, recomenda-se cumprir a etapa de secagem em estufa por no mínimo 4 horas. Principalmente se no processo de corte do CP for utilizado água. Verificar antes se a alteração da umidade pode trazer algum problema para a estrutura da rocha. A perda ou o ganho de água em rochas que contém argilas pode comprometer as características físicas da rocha;
- 3- Na medida do possível, evitar o congelamento na preparação de amostras de rochas de baixa resistência, pois o congelamento também altera as características físicas, principalmente quando existe a presença de água no interior da estrutura da rocha;
- 4- Procurar a todo custo efetuar a etapa de caracterização das amostras antes do início dos ensaios de laboratório de mecânica de rocha. É fundamental que se tenha à mão os resultados de análises mineralógicas, petrográficas e outras que tenham por finalidade caracterizar as rochas a serem ensaiadas;
- 5- Efetuar um estudo complementar para identificar até que ponto a utilização de equações linearizadas, na determinação da deformação volumétrica de amostras de rochas, não prejudica a obtenção dos parâmetros que dependem desta variável. O estudo deve ser comparativo entre os diversos tipos de rochas para identificar aquelas que apresentam

deformações suficientemente pequenas para permitir linearização. Em princípio, a utilização de equações não linearizadas é a mais recomendada para ensaios hidrostáticos;

- 6- Dar continuidade ao estudo da influência da temperatura sobre a compressibilidade total de rochas sedimentares, objetivando confirmar os resultados obtidos neste projeto. Os poucos dados encontrados na literatura não permitiram consolidar os resultados;
- 7- Conduzir ensaios para determinação dos parâmetros elásticos e de resistência de rochas reservatório, na medida do possível à temperatura da rocha pesquisada. Os resultados deste projeto mostraram que a temperatura afeta fortemente estes parâmetros, sendo esta influência maior para as rochas mais fracas. Também nem sempre foi verificado um comportamento único ou linear;
- 8- Os dados obtidos nos ensaios descritos no item 7 devem servir também para alimentar um banco de dados que deve ficar à disposição dos profissionais ligados às atividades relacionadas com o estudo de reservatórios de hidrocarbonetos, e a projetos para verificação de estabilidade de poços;
- 9- Devido à crescente utilização de poços horizontais na exploração de reservatório de hidrocarbonetos, recomenda-se uma reavaliação dos critérios de dimensionamento e verificação da estabilidade dos poços durante as fases de perfuração e produção, tentando contemplar os aspectos gerados ao se considerar as temperaturas de fato existentes nas camadas do subsolo.

BIBLIOGRAFIA:

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) -
Designation: D4543-85. Standard Practice for Preparing Rock Core Specimens and Determining Dimensional and Shape Tolerances. Philadelphia. 1985.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) -
Designation: D3148-86. Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression. Philadelphia. 1986.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) -
Designation: D3967-86. Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. Philadelphia. 1986.

- BASTOS, L. R., FERNANDES, M. L., PAIXÃO, L. & DELUIZ, N. -
Manual para a Elaboração de Projetos e Relatórios de Pesquisa, Teses, Dissertações e Monografias. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1995. 96 p.

- BILLINGS, M. P. - **Structural Geology.** USA, Prentice Hall, Second Edition, 1957. p. 363 - 383.

- BLOCH, M. - **Um Estudo Experimental de Propriedades Mecânicas de um Arenito Proveniente de Reservatório de Petróleo.** Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1993. 190 p. (Tese de Mestrado).

- CENPES - **Implementação de Banco de Dados de Constantes Elásticas Estáticas e Dinâmicas.** Rio de Janeiro, Petrobras, 1995, Relatório Único de Projeto.

- CHISTENSEN, N. I. - **Measurements of Dynamics Properties of Rock at Elevated Temperatures and Pressures. in: Measurement of Rock Properties at Elevated Pressure and Temperature**, ASTM S.T.P. 869. Philadelphia: H. J. Pincus and E. R. Hoskins, American Society For Testing and Materials, 1985. p. 93-107.

- CHIU, H. K., JOHNSTON, I. W. & DONALD, I. B. - **Appropriate Techniques for Triaxial Testing of Saturated Soft Rock**. Great Britain, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst. 1983. v. 20, n. 3, p. 107 - 120.

- FIGUEIREDO, A. M. F. - **Geologia das Bacias Brasileiras**. Rio de Janeiro, PETROBRAS/DEPEX, 198-. 38 p.

- FJÆR, E., HOLT, R. M., HOSRUD, P. & RAANEN, A. - **Petroleum related rock mechanics**. Elsevier, 1992. 337p.

- GOODMAN, R. E. - **Introduction to rock mechanics**. 2. ed. New York, John Wiley & Sons, 1989. 562p.

- HOLMAN, J. P. - **Experimental Methods for engineers**. 3.ed. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1978. 493p.

- HOMAND-ETIENNE, F. - **Action de la température sur les roches: dilatation et fissuration. in: Rock at great depth**. Balkema, Rotterdam: Maury & Fourmaintraux, 1989. p. 371-378.

- HOLT, R. M. & FJÆR, E. - **Validity of Multiple Failure State triaxial tests in sandstones**. Aachen, Proc. VII Int. Congress on Rock Mechanics, 1991.

- INNAURATO, N. & OCCELLA, E. - **Laboratory and In Situ Rock Thermal Property Measurement in Hot Mine. in: Rock at great depth**. Balkema, Rotterdam: Maury & Fourmaintraux, 1989. p. 379-385

- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) - **Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials.** 1979.

- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) - **Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression: Revised Version.** Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Great Britain, 1983. v. 20, n. 6, p. 283-290.

- JAEGER, J. C. & COOK, N. G. W. - **Fundamentals of rock mechanics.** 3. ed. London, Chapman and Hall, 1979. 593 p.

- JUMIKIS, A. R. - **Rock mechanics** 2. ed. Trans Tech Publications, USA, 1983. 613 p.

- LEONARD, O. & DUVALL, W. I. - **Rock mechanics and the design of structures in rock.** John Wiley & Sons, Inc., 1967.

- NEWMAN, G. H. - **Pore Volume Compressibility of Consolidated, Friable and Unconsolidated Reservoir Rock under Hydrostatic Loading.** [S. L.]: JPT, 1973. 25 v., n.2 p. 129-134

- POLLILLO F^o, A., COSTA, A. M. & EBECKEN, N. F. - **An Analysis of Hydraulic Fracturing by the Finite Element Method.** Proceedings of sixth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics. Innsbruck, G. Swoboda, 1988.

- REY, L. - **Planejar e Redigir Trabalhos Científicos.** São Paulo, Edgard Blücher, 1987. 239 p.

- SEVERINO, A. J. - **Metodologia do Trabalho Científico.** 18^a ed. São Paulo, Cortez, 1992. 252 p.

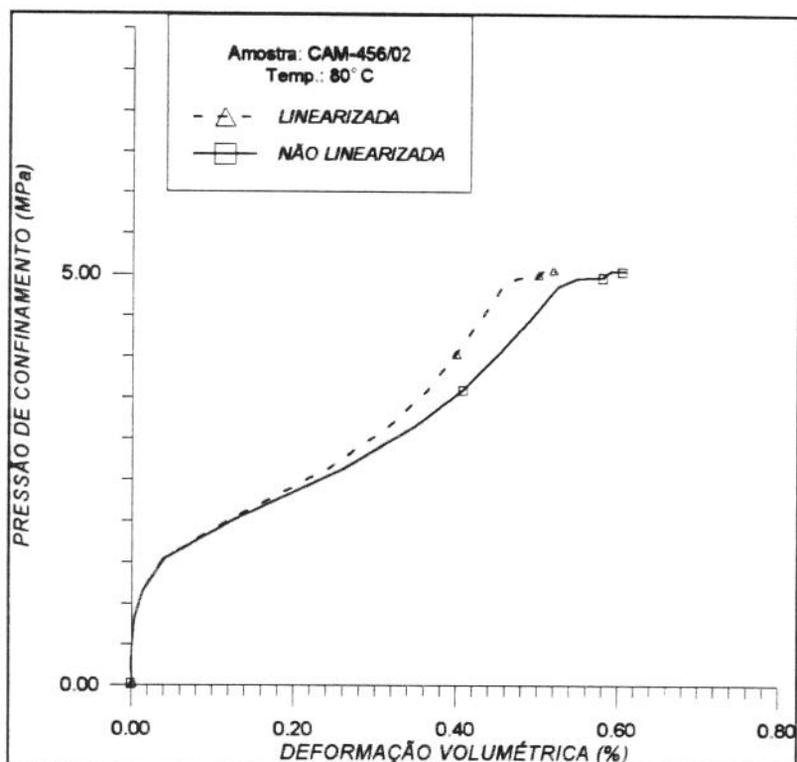
- SOMERTON, W. H. - **Thermal Properties and Temperature - Related Behavior of Rock / Fluid Systems**. New York Elsevier, 1992. Cap. I, IV, IX e X.
- _____ - **Thermo Mechanical Behavior of Porous Rock**. Dallas: SPE, 1961. SPE - 231.
- _____ - **Some Thermal Characteristics of Porous Rocks**. Berkeley, Calif.: SPE, 1958. v 213
- SOMERTON, W. H. & SELIM, M. - **Additional Thermal data for Porous Rocks -- Thermal Expansion and Heat of Reaction**. Berkeley, Calif.: AIME, 1961. 222 v., n.II, p.249 - 253.
- SOMERTON, W. H., DEAN, G. W. and METHA, M. M.- **Thermal Alteration of Sandstones**. Dallas: JPT, 1965. 17 v., p. 579-583
- SOMERTON, W. H., & GUPTA, V. S. - **Role of Fluxing in Thermal Alteration of Sandstones**. Berkeley, Calif. : JPT, 1965. v.17, p. 585-588
- SOMERTON, W. H., EL SHAARANI, A. H., and MOBARAK, S. - **High Temperature Behavior of Rock Associated with Geothermal Type Reservoir**. Dallas : SPE, 1974. SPE-4897
- VON GONTEN, W. D. & CHOUDHARY, B. K. - **The Effect of Pressure and Temperature on Pore Volume Compressibility**. Dallas: SPE, 1969. SPE-2526
- VUTUKURI, V. S., LAMA, R. D. & SALUJA, S. S. - **Handbook on mechanical properties of rock**. Clausthal, Trans Tech Publications, v. 1, 1974. 280 p.

- VUTUKURI, V. S. & LAMA, R. D. - **Handbook on mechanical properties of rock**. Clausthal, Trans Tech Publications, v. 2, 1978. 481 p.
- WAI, R. S. C. & LO, K. Y. - **Temperature effects on strength and deformation behaviour of rock in Southern Ontario** Canada, Can. Geotech. J., 1982. v. 19, p. 307-319.
- ZIMMERMAN, R. W., HARADEN, J. L. and SOMERTON, W. H. **The Effect of Pore Pressure and Confining Pressure on Pore and Bulk Volume Compressibilities of Consolidated Sandstones. in: Measurement of Rock Properties at Elevated Pressure and Temperature**, ASTM S.T.P. 869. Philadelphia: H. J. Pincus and E. R. Hoskins, American Society For Testing and Materials, 1985. p. 24-36.
- ZIMMERMAN, R. W. - **Compressibility of Sandstones**. Amsterdam, Elsevier, 1991. 173 p.

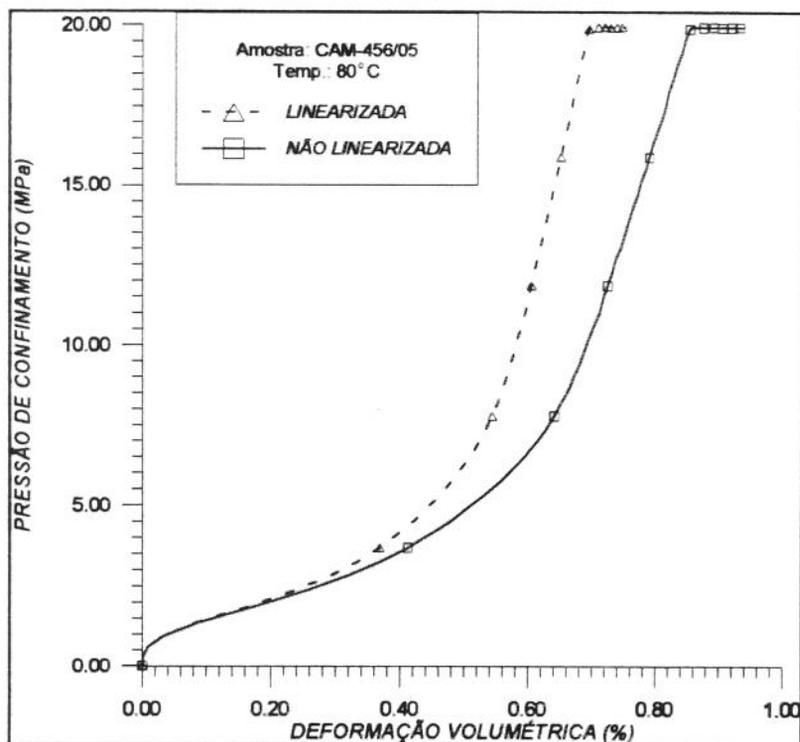
ANEXOS

ANEXO 1

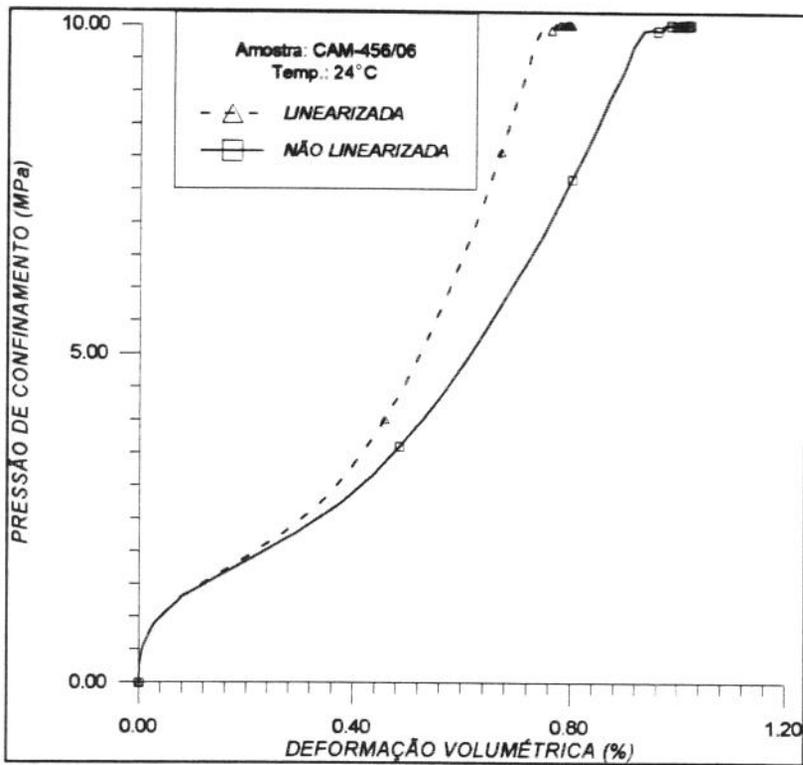
GRÁFICOS OBTIDOS NOS ENSAIOS HIDROSTÁTICOS



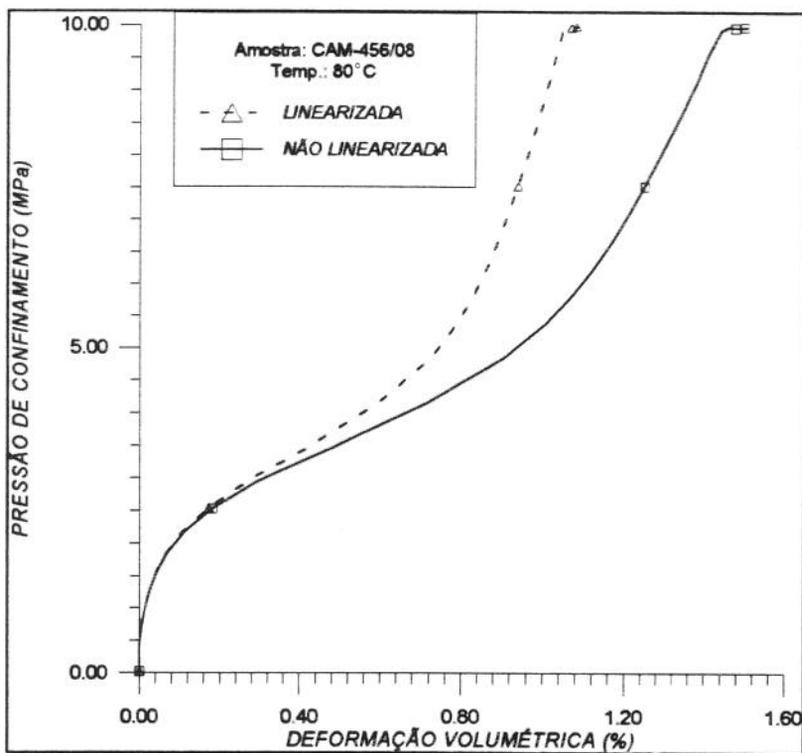
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 80°C com a amostra CAM-456/02.



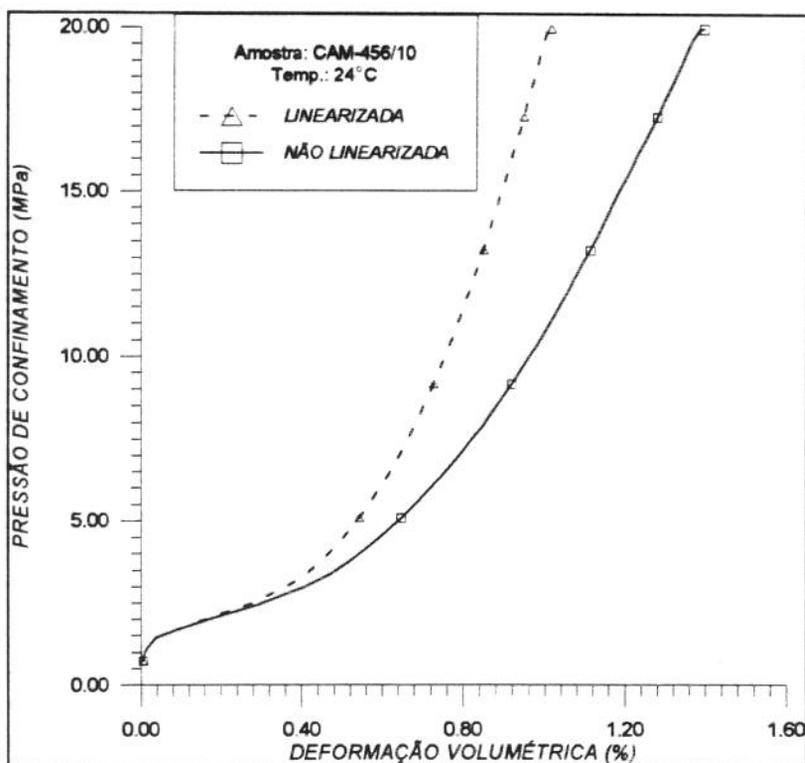
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 80°C com a amostra CAM-456/05.



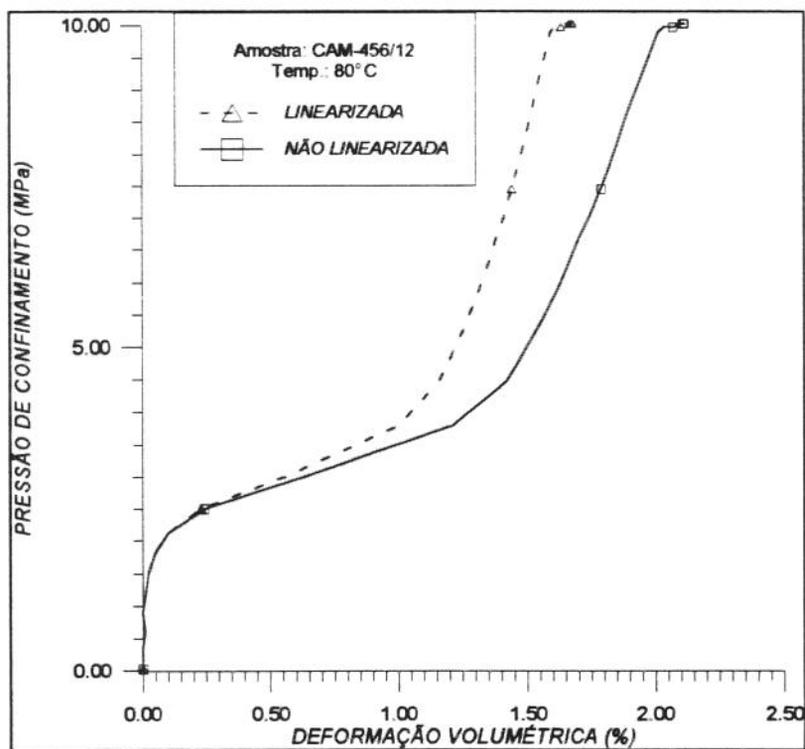
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 24°C com a amostra CAM-456/06.



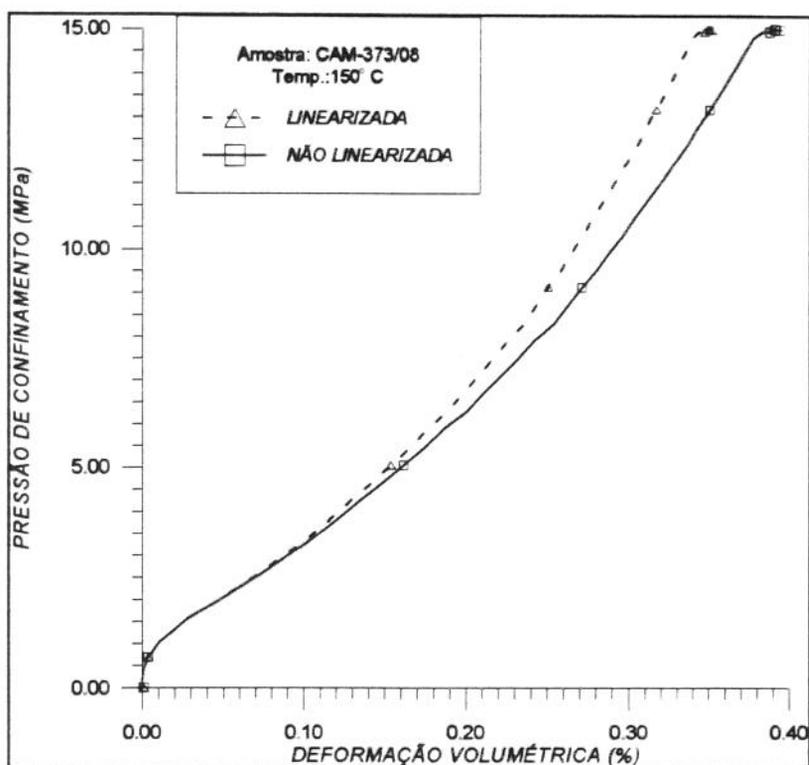
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 80°C com a amostra CAM-456/08.



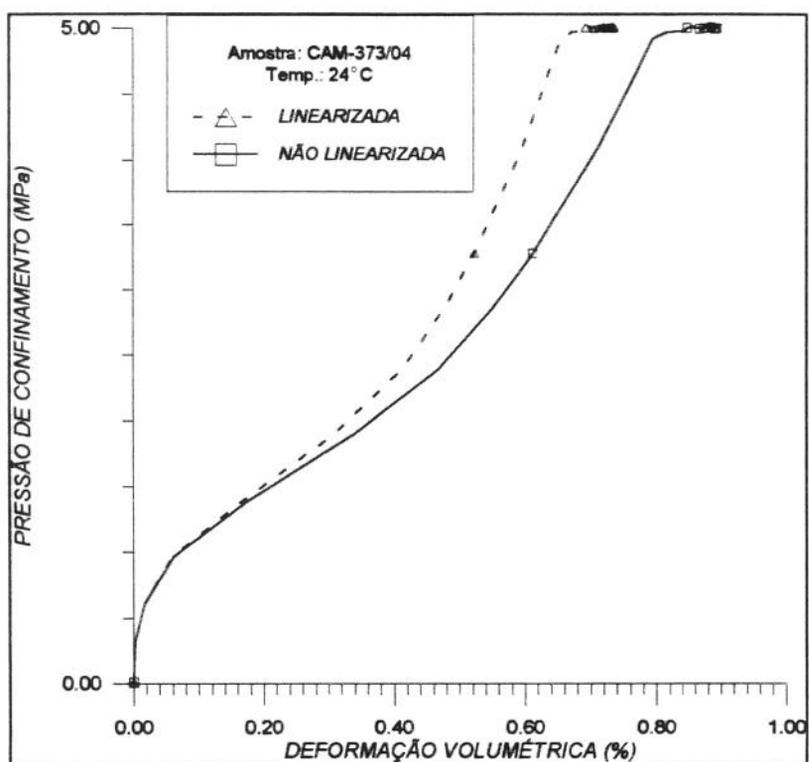
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 24°C com a amostra CAM-456/10.



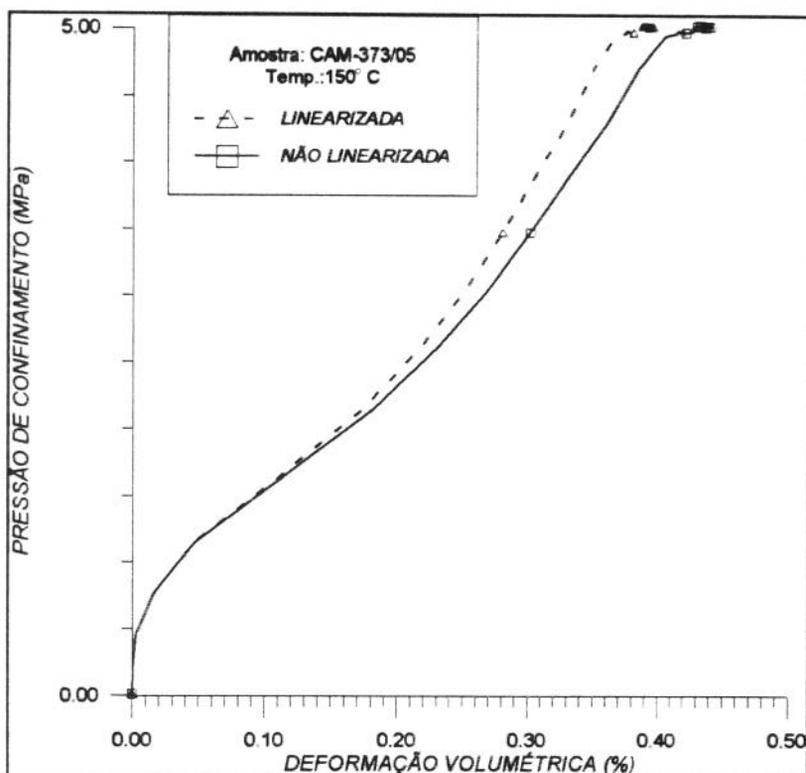
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 80°C com a amostra CAM-456/12.



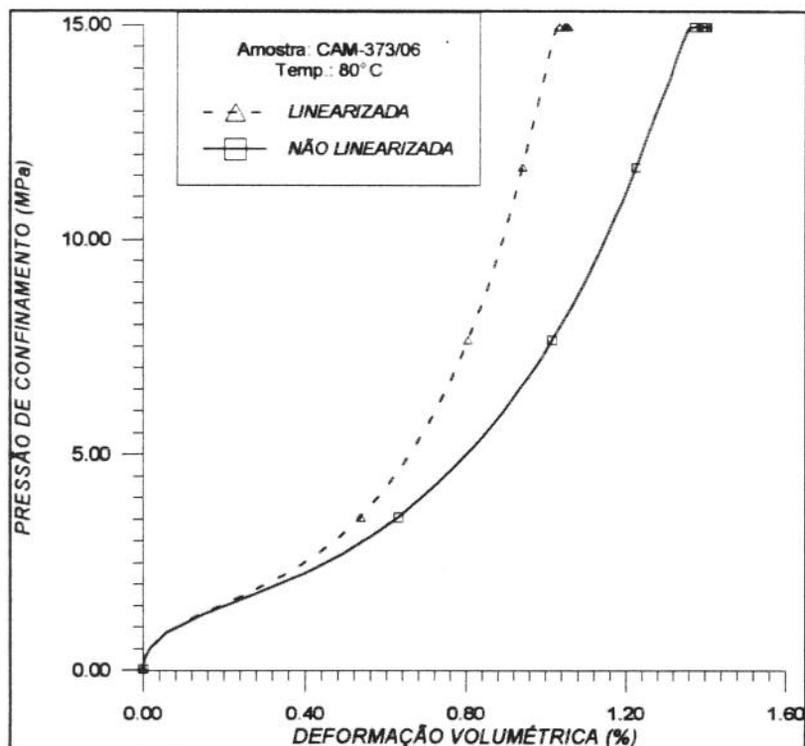
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 150°C com a amostra CAM-373/08.



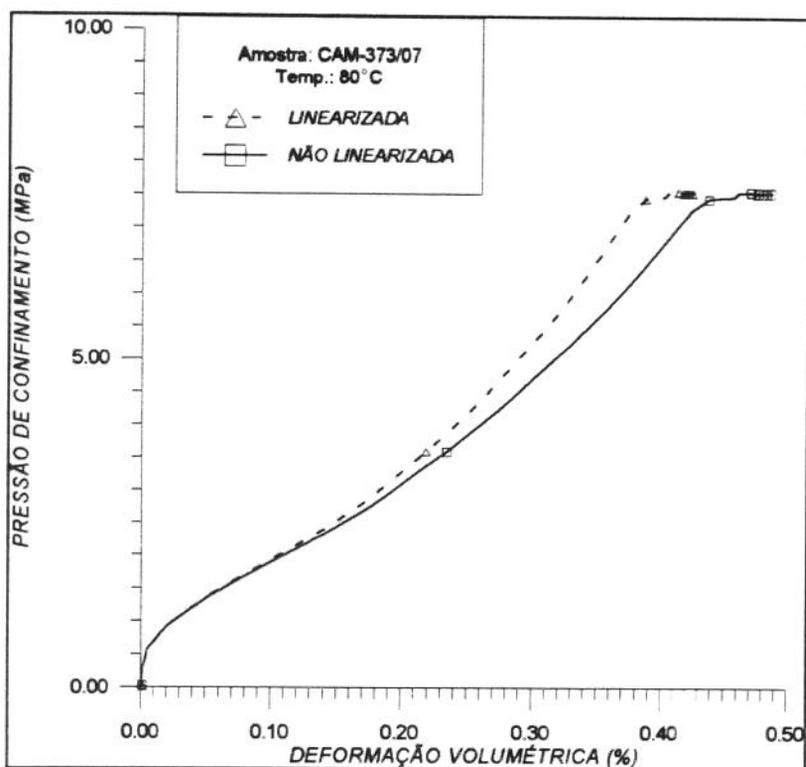
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 24°C com a amostra CAM-373/04.



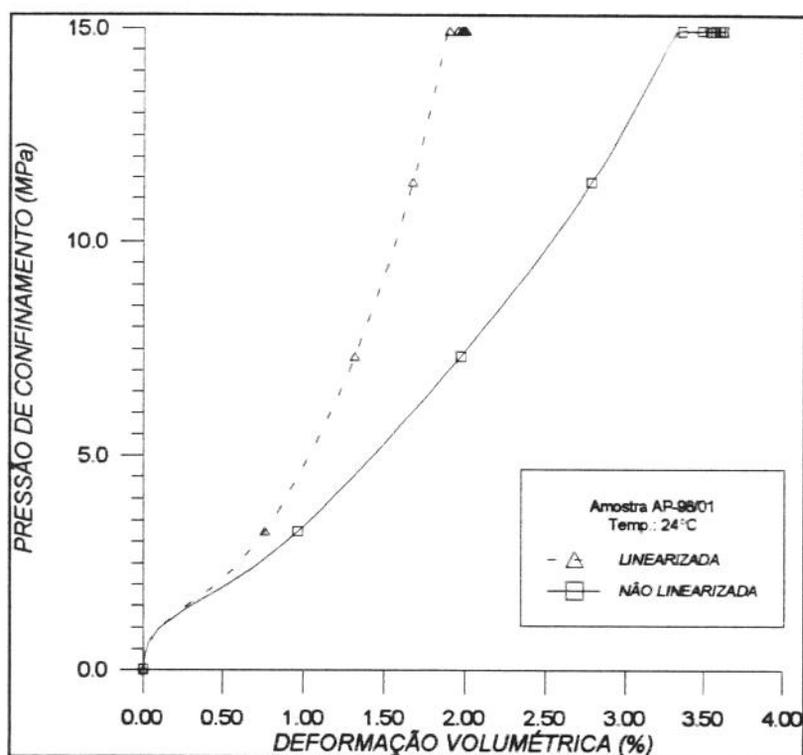
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 150°C com a amostra CAM-373/05.



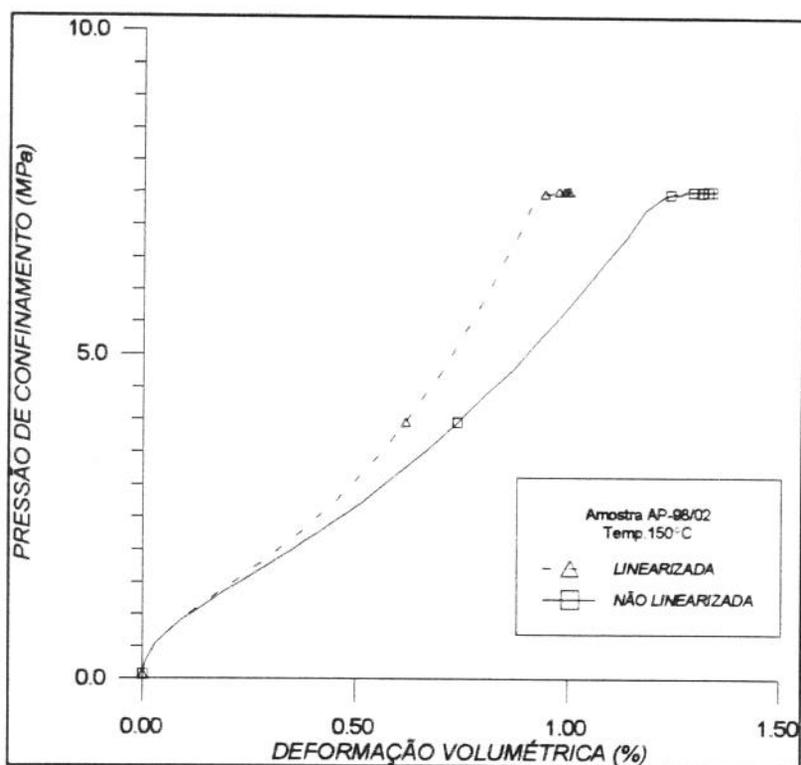
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 80°C com a amostra CAM-373/06.



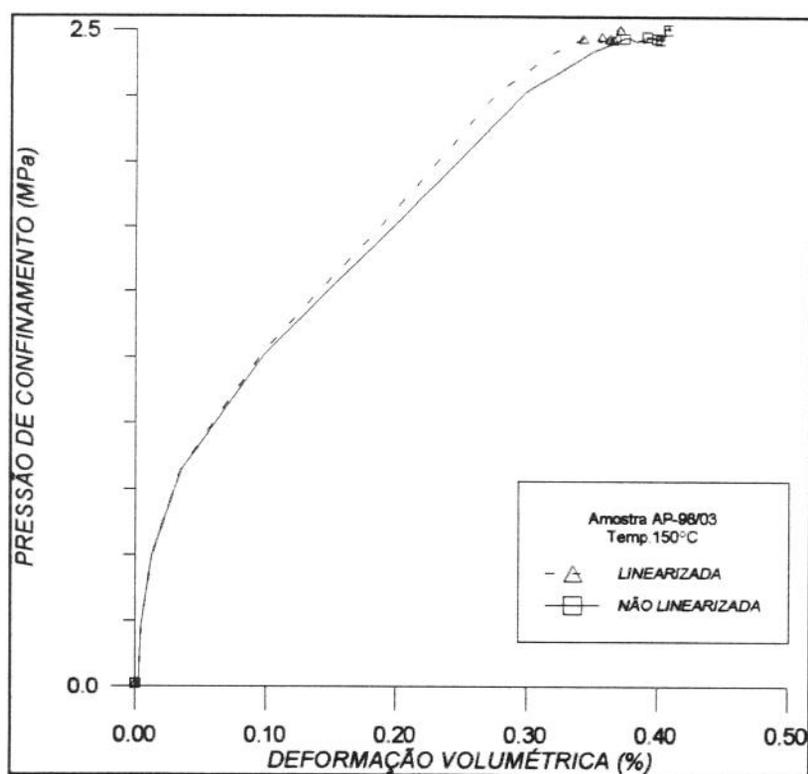
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 80°C com a amostra CAM-373/07.



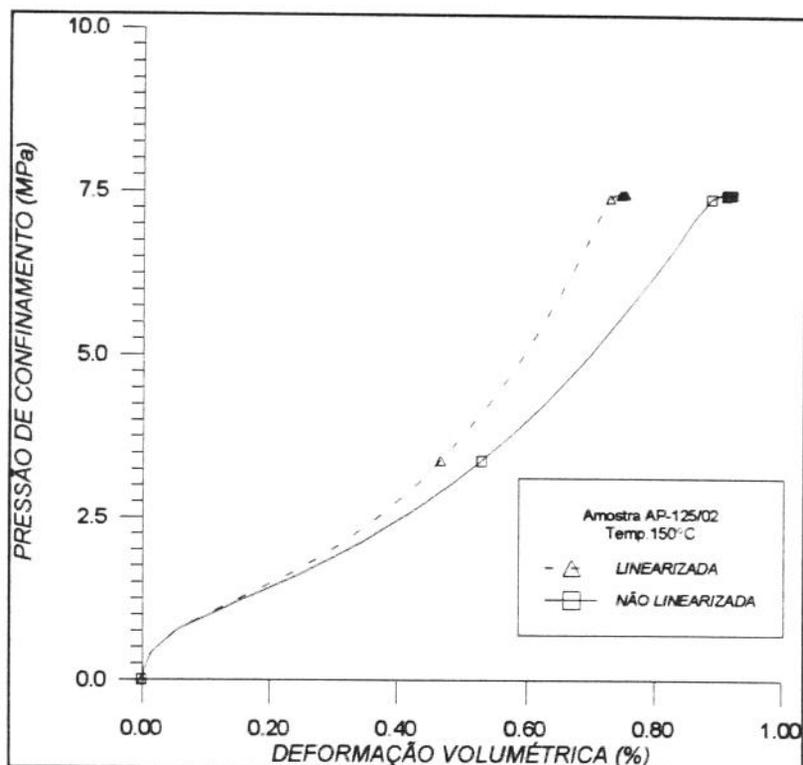
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 24°C com a amostra AP-98/01.



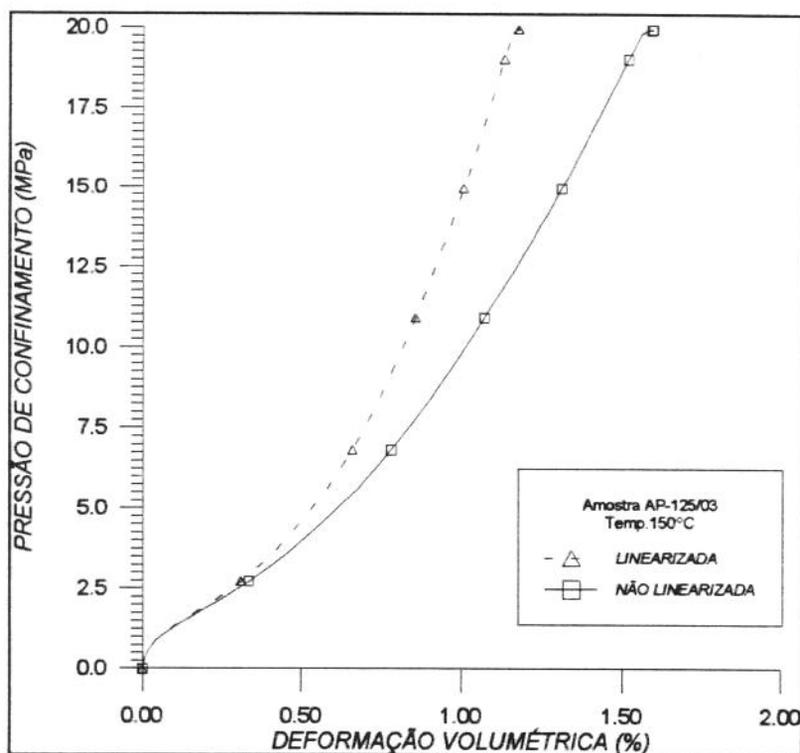
Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 150°C com a amostra AP-98/02.



Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 150°C com a amostra AP-98/03.



Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 150°C com a amostra AP-125/02.



Ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica a 150°C com a amostra AP-125/03.

ANEXO 2

**CURVAS REPRESENTATIVAS DA TENSÃO DE RUPTURA
VERSUS PRESSÃO DE CONFINAMENTO, NO PLANO $\sigma_1 - \sigma_3$
PARA AS AMOSTRAS DOS LOTES 1 E 2**

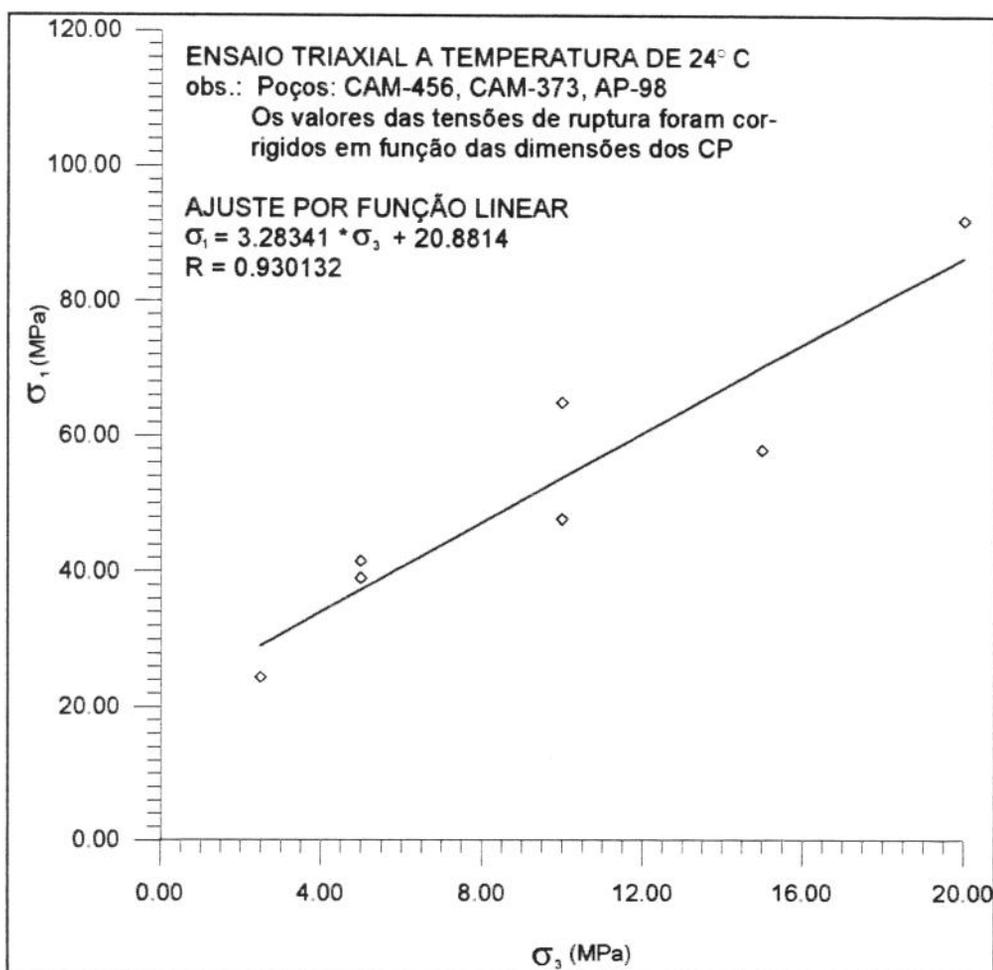


Figura 01: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais à temperatura ambiente com as amostras dos lotes 1 e 2. Pontos ($\sigma_3 - \sigma_1$) plotados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$ (resultados obtidos a partir de todas as amostras ensaiadas).

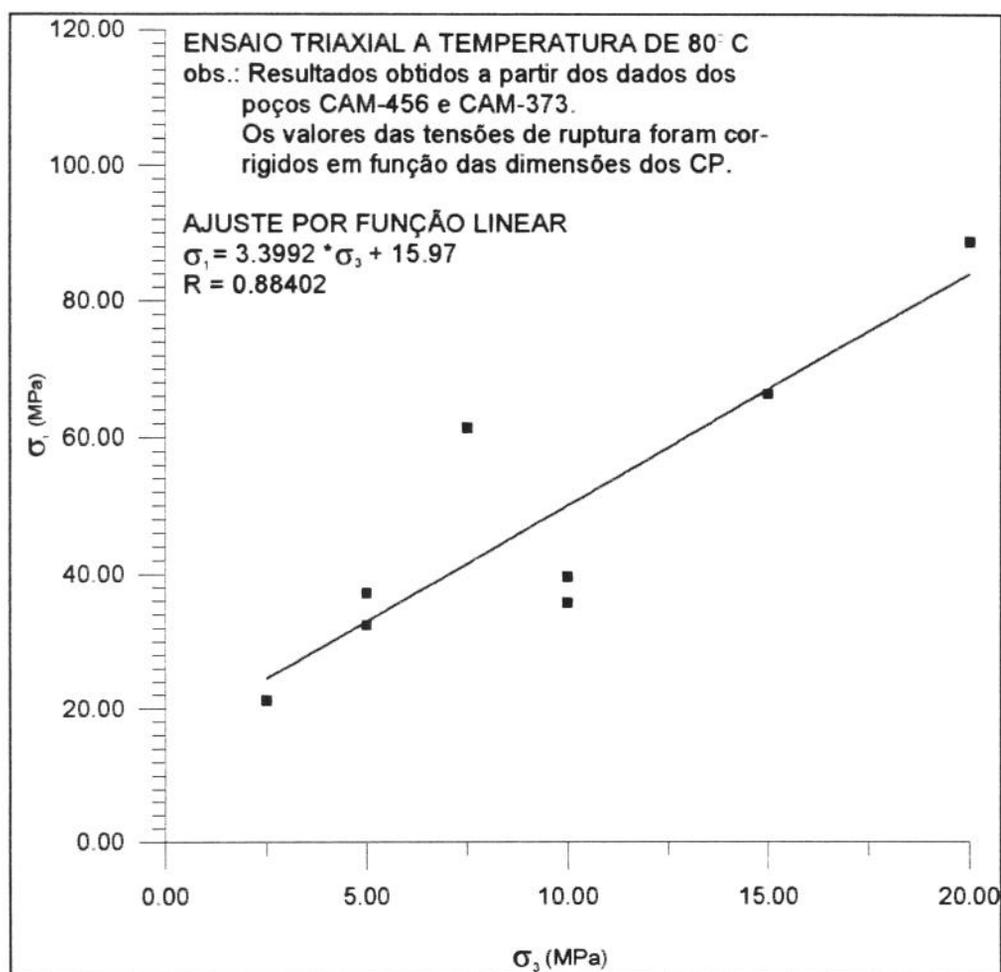


Figura 02: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais à 80°C com as amostras dos lotes 1 e 2. Pontos ($\sigma_3 - \sigma_1$) plotados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$ (resultados obtidos a partir de todas as amostras ensaiadas).

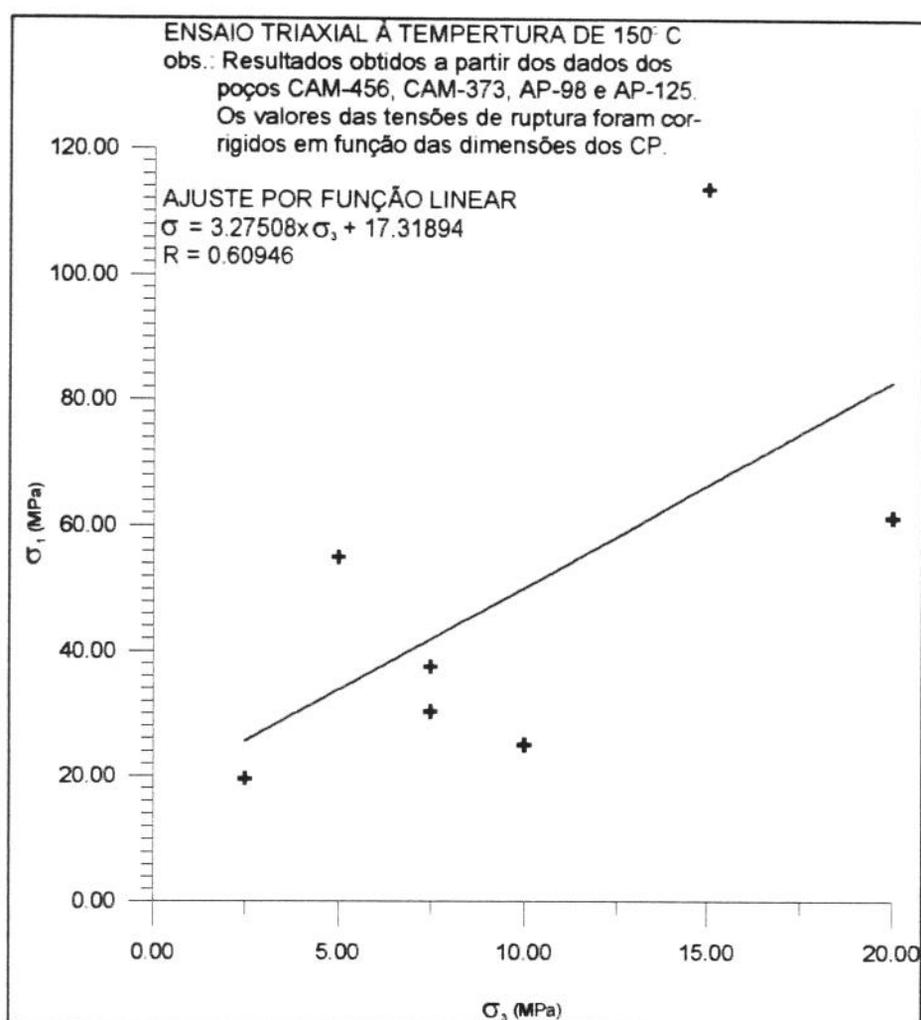


Figura 03: Resultado dos ensaios triaxiais convencionais a 150°C com as amostras dos lotes 1 e 2. Pontos ($\sigma_3 - \sigma_1$) plotados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$ (resultados obtidos a partir de todas as amostras ensaiadas).

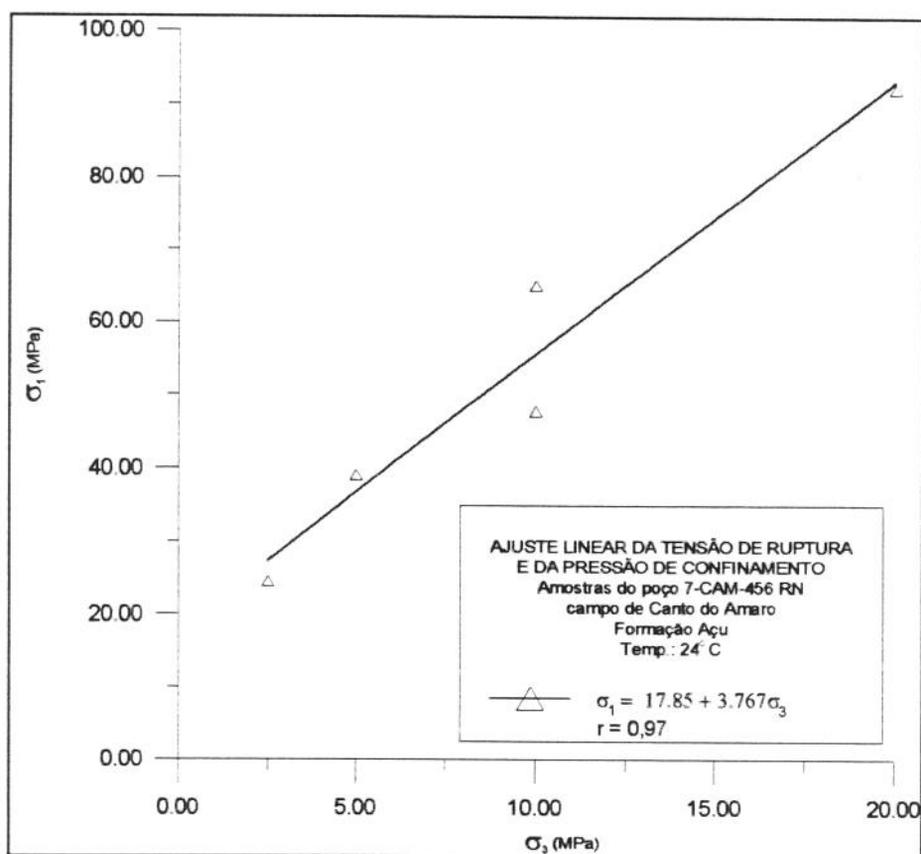


Figura 04: Resultados dos ensaios triaxiais convencionais à temperatura ambiente com as amostras do poço CAM-456. Pontos ($\sigma_3 - \sigma_1$) plotados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$.

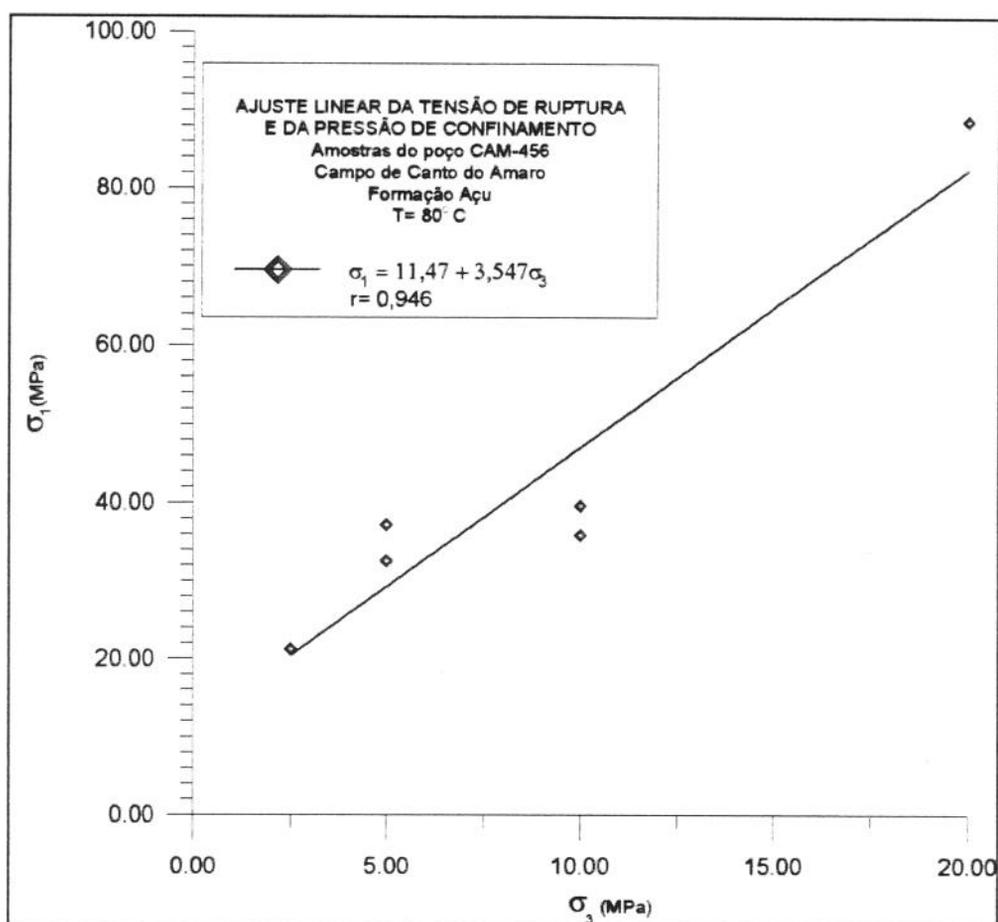


Figura 05: Resultados dos ensaios triaxiais convencionais à temperatura ambiente com as amostras do poço CAM-456. Pontos ($\sigma_3 - \sigma_1$) plotados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$.

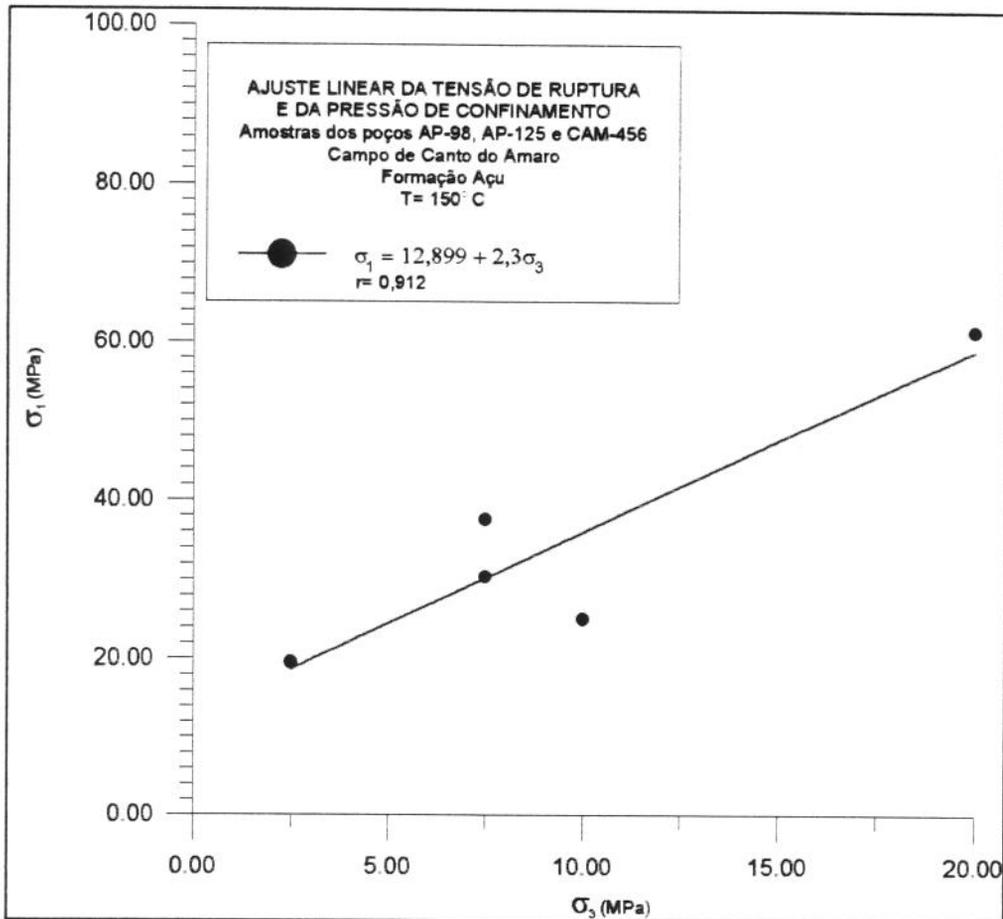


Figura 06: Resultados dos ensaios triaxiais convencionais à temperatura ambiente com as amostras dos lotes 1 e 2, porém foram excluídos os pontos referentes ao poço CAM-373. Pontos ($\sigma_3 - \sigma_1$) plotados no plano $\sigma_1 - \sigma_3$.

ANEXO 3

DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES QUE FORNECEM O VALOR DA
COESÃO (c) E DO ÂNGULO DE ATRITO INTERNO (ϕ)

Dedução das Equações que Fornecem o Valor da Coesão (c) e o Ângulo de Atrito interno (ϕ)

Da teoria da elasticidade sabe-se que ao se tomar como orientação dos eixos coordenados $x - y$ as direções das tensões principais $\sigma_1 - \sigma_3$, é possível representar o estado de tensões dados por σ e τ atuando em um plano qualquer cuja normal faz um ângulo θ com a direção σ_1 pelas equações:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta \quad (1)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta \quad (2)$$

Uma outra relação conhecida é dada por:

$$\phi + \frac{\pi}{2} = 2\theta \quad (3)$$

onde: ϕ é o ângulo de atrito interno.

O critério de Mohr-Coulomb assume uma envoltória de ruptura linear que é dada pela equação:

$$\tau = c + \mu\sigma \quad (4)$$

onde: $\mu = \text{tg}\phi$

e c é a coesão do material

Substituindo as equações (1) e (2) dentro da equação (4) teremos:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\theta = c + \mu\left[\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\theta\right] \quad (5)$$

Substituindo θ e μ por ϕ a equação (4) toma a forma:

$$\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos \phi = c + \frac{1}{2}\text{tg}\phi(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}\text{tg}\phi \cdot \sin \phi \cdot (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (6)$$

Multiplicando os dois termos da equação (6) por $2\cos\phi$ e rearranjando os termos, teremos:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = 2c \cdot \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \phi \quad (7)$$

após resolver a equação acima, fica:

$$\sigma_1 = 2c \cdot \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} + \sigma_3 \cdot \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (8)$$

Sabe-se também que no plano $\sigma_1 - \sigma_3$ a tensão de ruptura (σ_1) pode ser relacionada com a pressão de confinamento (σ_3) através da equação:

$$\sigma_1 = \sigma_c + \operatorname{tg} \alpha \cdot \sigma_3 \quad (9)$$

onde: σ_c fornece o valor da tensão de ruptura no ensaio uniaxial ($\sigma_3 = 0$)

As equações (8) e (9) são semelhantes o que permite concluir que:

$$\sigma_c = 2c \cdot \frac{\cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (10)$$

$$\text{ou: } c = \sigma_c \left(\frac{1 - \sin \phi}{2 \cdot \cos \phi} \right) \quad (11)$$

Finalmente:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (12)$$

$$\text{ou: } \phi = \operatorname{arcsin} \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha - 1}{\operatorname{tg} \alpha + 1} \right) \quad (13)$$

Finalmente, as equações (11) e (13) são aquelas que permitem, a partir da obtenção da equação (9), fornecer os valores da coesão (c) e do ângulo de atrito interno do material (ϕ) em ensaios com rocha.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

VERIFICAÇÃO DO FORMATO DAS CURVAS DE PRESSÃO DE
CONFINAMENTO *VERSUS* DEFORMAÇÃO VOLUMÉTRICA

O objetivo do estudo experimental apresentado neste apêndice foi o de verificar o formato das curvas de deformação volumétrica durante o ensaio hidrostático, para determinação da compressibilidade volumétrica (*bulk compressibility*) dos arenitos da Formação Açu. Estas curvas apresentaram no trecho inicial concavidade voltada para baixo, sendo que, logo em seguida, a curva se inverte assumindo o aspecto esperado, ou seja, a inclinação aumenta gradativamente, devido ao fechamento das microfissuras e depois assume uma inclinação constante (vide figura A.1) cujo inverso fornece a compressibilidade volumétrica do material. Na figura A.1 o círculo tracejado marca a região da curva cujo formato precisa ser avaliado.

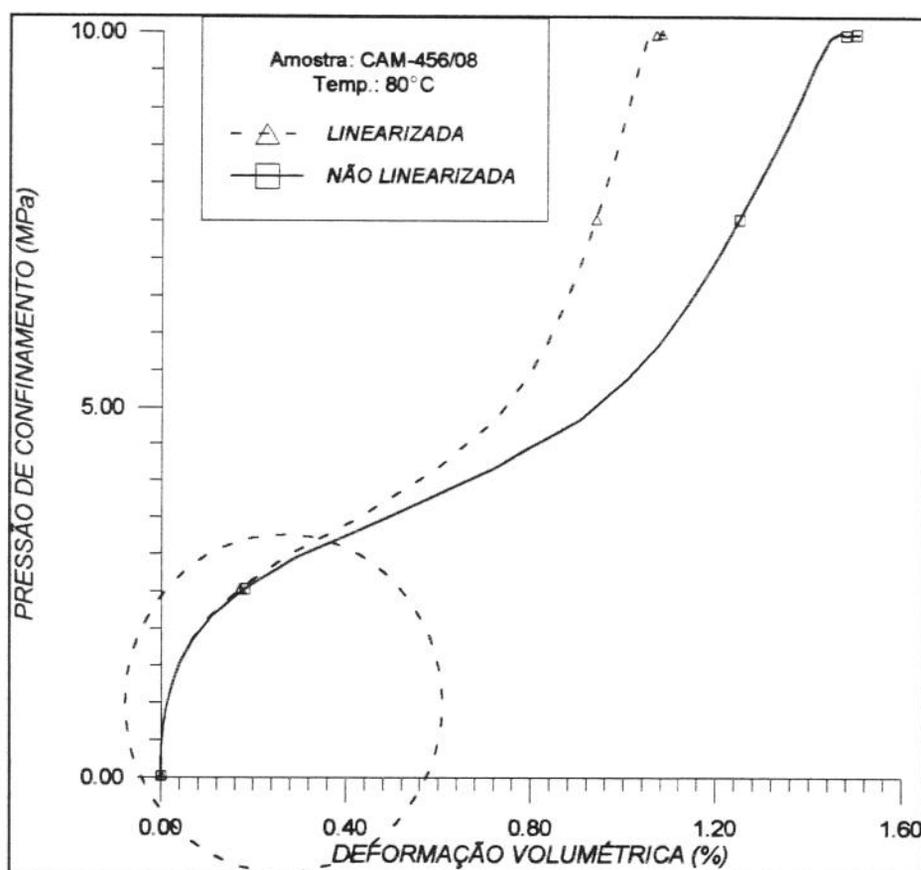


Figura A.1: Curva típica apresentada durante o ensaio hidrostático para obtenção da compressibilidade volumétrica.

A princípio partiu-se da hipótese de que o formato inicial das curvas estavam relacionados a dissipação da pressão dos fluidos intraporos, pois as amostras foram ensaiadas saturadas com óleo e os ensaios foram do tipo drenado. Portanto, a aplicação rápida da pressão

hidrostática (taxa de 0,2 MPa/s) poderia estar provocando acúmulo de pressão intraporos que necessitava de um certo tempo para ser dissipada. A variação desta pressão poderia estar interferindo no formato da curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica.

A maneira simples encontrada para avaliar a influência do fluido intraporos, foi conduzir ensaios hidroatáticos nas mesmas condições em amostras de arenitos secas. As hipóteses admitidas foram simples: (a) se o formato da curva de pressão de confinamento *versus* deformação volumétrica não se alterasse, ficaria provado que não houve influência dos fluidos saturantes; (b) caso contrário, realmente o fluido estava interferindo no formato inicial da curva.

Foram realizados dois ensaios hidrotáticos à temperatura ambiente em amostras de arenitos da Formação Pendências retiradas por testemunhagem do poço TR-6 Campo de Trapiá. Embora não sejam apresentadas as características mineralógicas das amostras, estas podem ser consideradas semelhantes aos arenitos dos poços do Campo de Lorena, que pertencem a mesma Formação. As amostras foram secas em estufa a 60°C por quatro horas antes de serem preparadas para o ensaio hidrostático, cujo procedimento foi idêntico ao adotado para as amostras dos arenitos do Campo de Canto do Amaro. Os resultados dos ensaios são apresentados nas figuras A.2 e A.3.

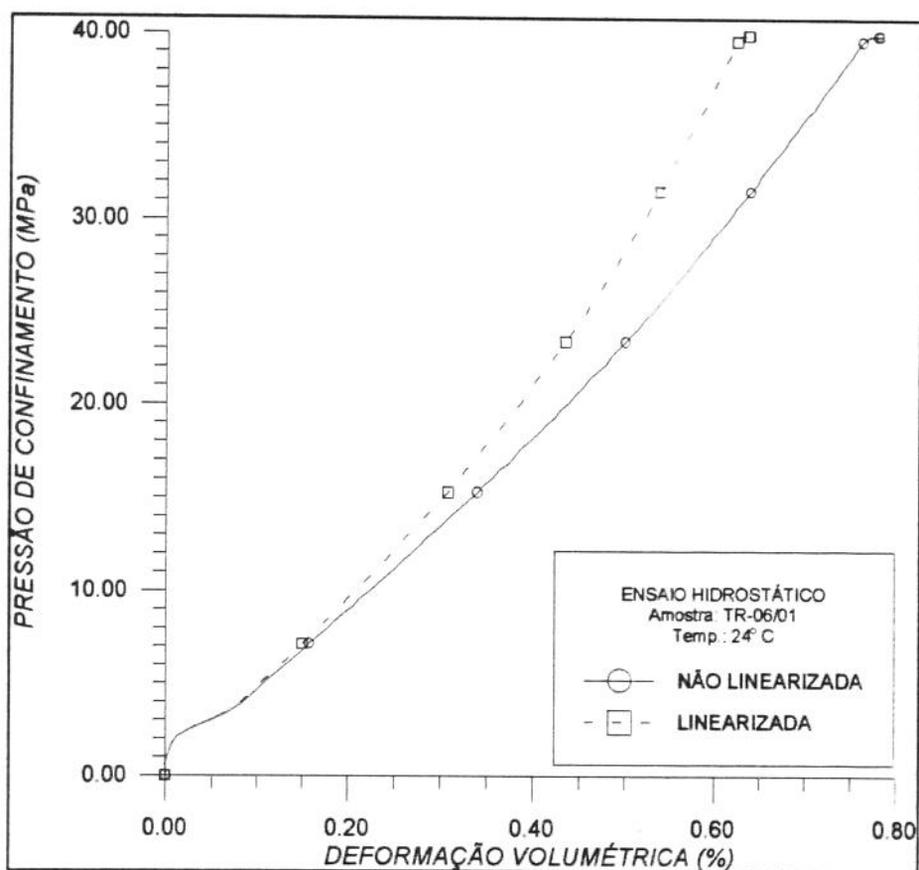


Figura A.2: Curva de pressão de confinamento versus deformação volumétrica obtida no ensaio hidrostático à temperatura ambiente com a amostra TR-06/01.

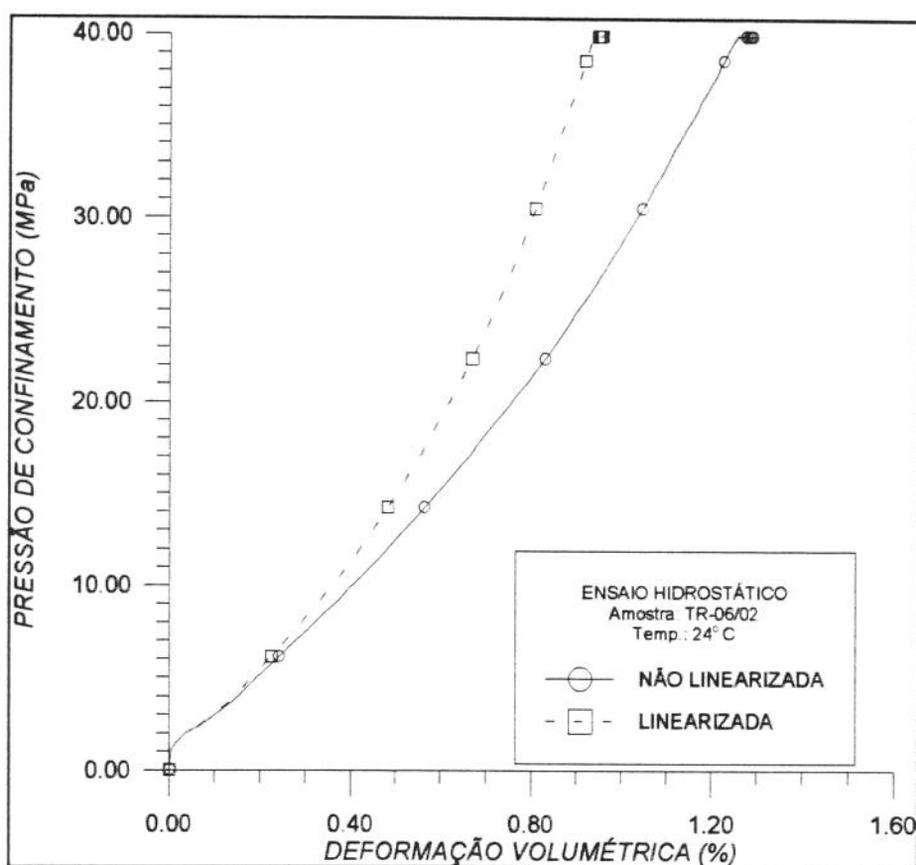


Figura A.3: Curva de pressão de confinamento versus deformação volumétrica obtida no ensaio hidrostático à temperatura ambiente com a amostra TR-06/02.

Os ensaios foram condizidos levando-se a pressão hidrotática a um nível superior ao adotado nos decorrer do trabalho. Os resultados mostraram que as amostras são mais rígidas e compactas do que as amostras do Campo de Canto do Amaro, em virtude de terem apresentado menor deformação volumétrica à máxima pressão hidrostática de 40 MPa. Os resultados mostraram também que o formato da curva não sofreu alteração mesmo tratando-se de amostras secas. Conseqüentemente, o fluido intraporos não foi o responsável pelo formato inicial apresentado pelas curvas de pressão de confinamento versus deformação volumétrica obtidas nos ensaios hidroatáticos com amostras de arenito da Formação Açú. Porém, a pesquisa não foi aprofundada o suficiente para que se obtivessem mais informações a respeito do fenômeno.

APÊNDICE 2

COMUNICAÇÃO TÉCNICA - ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA NA
ESTABILIDADE DE POÇOS DE PETRÓLEO

**CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO
LEOPOLDO A. MIGUEZ DE MELLO - CENPES**

COMUNICAÇÃO TÉCNICA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA
AO CISALHAMENTO COMO FUNÇÃO DA
TEMPERATURA NA ESTABILIDADE DE
POÇOS DE PETRÓLEO
(UMA EXPERIÊNCIA NO CAMPO DE
CANTO DO AMARO)**

**CT - DIPREX/SEDEM-014/95
JULHO/95**

COMUNICAÇÃO TÉCNICA

SEDEM - 014/95

**Centro de Pesquisas e Desenvolvimento
Leopoldo A. Miguez de Mello
CENPES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA NA
ESTABILIDADE DE POÇOS DE PETRÓLEO
(UMA EXPERIÊNCIA NO CAMPO DE CANTO DO AMARO)**

**JULHO/95
SUPEN/DIPREX/SEDEM**

**SUPERINTENDÊNCIA DE ENGENHARIA BÁSICA
DIVISÃO DE PROJETOS DE EXPLOTAÇÃO
SETOR DE DESENVOLVIMENTO E MÉTODOS**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA
NA ESTABILIDADE DE POÇOS DE PETRÓLEO
(UMA EXPERIÊNCIA NO CAMPO DE CANTO DO AMARO)**

CT - SEDEM 014/95

**AUTORES : CLÁUDIO DOS SANTOS AMARAL (DIPREX/SEDEM)
ALVARO MAIA DA COSTA (DIPREX/SEDEM)**

JULHO DE 1995

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO COMO FUNÇÃO DA TEMPERATURA
NA ESTABILIDADE DE POÇOS DE PETRÓLEO
(UMA EXPERIÊNCIA NO CAMPO DE CANTO DO AMARO)**

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO

2 - PREMISSAS BÁSICAS

2.1 - PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

2.2 - ESTADO DE TENSÕES "IN-SITU"

3 - MODELO DE ANÁLISE

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 - FASE DE PERFURAÇÃO

4.2 - FASE DE PRODUÇÃO

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1- INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios existentes no projeto e execução de um poço de petróleo é o da avaliação da estabilidade do poço durante as fases de construção e operação, assim como a previsão da possibilidade de produção de areia durante a fase de exploração.

Tradicionalmente os parâmetros geomecânicos usados nas simulações numéricas, são obtidos a partir de ensaios de Mecânica de Rochas realizados a temperatura ambiente em amostras obtidas por testemunhagem. Alguns questionamentos quanto a influência da temperatura sobre os parâmetros de resistência ao cisalhamento são levantados nos dias de hoje. O objetivo deste relatório é o de avaliar a diferença de comportamento geomecânico durante as simulações de verificação de estabilidade de poços de petróleo, quando considerada a influência da variação da resistência ao cisalhamento com a temperatura.

Neste estudo foram realizadas análises nas fases de perfuração e produção de poços verticais utilizando-se os dados fornecidos do Campo de Canto do Amaro no que diz respeito as propriedades geomecânicas, características do reservatório e o estado de tensão "in-situ".

Neste estudo utilizou-se um programa de elementos finitos, sendo adotado os parâmetros geomecânicos obtidos a partir de ensaios realizados pelo Laboratório de Mecânica de Rochas (LMR) do Cenpes em amostras coletadas em diversos poços de uma mesma formação. O estado de tensão "in-situ" antes da perfuração foi avaliado utilizando-se como base as informações disponíveis na região de produção.

2 - PREMISSAS BÁSICAS

Para a realização do estudo, são adotados algumas premissas básicas na modelagem do problema.

Na fase de perfuração considera-se que não existe percolação do fluido de perfuração para dentro da formação. A análise é chamada de líquido não penetrante, ou seja não há fluxo pela formação. Esta premissa parte do pressuposto que o reboco formado pelo fluido de perfuração forma um filtrado que garante total impermeabilidade das paredes do poço

Na fase de produção considera-se que o fluido percola pelo maciço. Neste caso, a análise efetuada considera apenas a condição de fluxo permanente aplicando-se a solução de Laplace. As forças de percolação que provocam o arraste de partículas finas de areia não são consideradas no modelo.

2.1 - PARÂMETROS GEOMECÂNICOS

Os parâmetros geomecânicos adotados no estudo foram baseados nos resultados fornecidos a partir dos ensaios triaxiais realizados pelo DIPLOT/SECRES no Laboratório de Mecânica das Rochas em diversas amostras de arenito da Formação Açú escolhidas a partir de testemunhos extraídos de diversos poços existentes no Campo de Canto do Amaro. Estes ensaios são parte da tese de Mestrado do Engenheiro Romero Gomes da Silva Araujo a ser apresentada na Universidade de Campinas.

Para determinação das propriedades, por não se dispor de inúmeros corpos de provas, foram escolhidos 2 conjuntos distintos de amostras, cada qual com faceis geológicas semelhantes. O primeiro foi constituído dos testemunhos dos poços CAM-456, CAM-373 e AP-98, estes conduzidos a temperatura ambiente e a 80° C através de ensaios triaxiais convencionais, onde cada amostra era carregada até a ruptura de forma tradicional. O segundo conjunto foi constituído de amostras obtidas dos testemunhos dos poços CAM-519, CAM-529, CAM-615, CAM-510, AP-153 e AP-128. Estas foram rompidas utilizando-se a técnica de ensaios triaxiais múltiplos, ensaiadas a temperatura ambiente e a 150° C.

Os parâmetros elásticos adotados nas análises, teve como base os resultados médios obtidos das curvas tensão deformação dos ensaios triaxiais. O resumo dos resultados interpretados de resistência e deformabilidade são apresentados na tabela 1.

Conjunto de amostras	Temperatura de Ensaio (°C)	ϕ' (graus)	c' (MPa)	E' (MPa)	ν
1	24	35.5	4.60	6000	0.3
1	80	34.1	3.04	6000	0.3
2	26	29.3	4.07	6000	0.25
2	150	28.5	2.69	6000	0.25

TABELA 1

A permeabilidade adotada para a solução de Laplace foi baseada em informações coletadas na região de produção variando de $1.3 \times 10^{-6} \text{m/s}$ à $5.3 \times 10^{-8} \text{m/s}$ o que corresponde para o tipo de fluido do reservatório a uma permeabilidade física que varia de 0.1 à 0.3 Darcy. Foi considerado que este arenito apresenta propriedades isotrópicas.

O coeficiente de compressibilidade poroelástica foi avaliada em função dos parâmetros elásticos e da compressibilidade relativa entre a rocha e o meio rochoso, esta última, estimada como sendo 0,85.

2.2 - ESTADO DE TENSÕES "IN-SITU"

O estado de tensões "in-situ" adotado na modelagem numérica na fase anterior ao processo de perfuração foi fundamentado na avaliação das tensões verticais utilizando-se o peso das camadas subjacentes à zona de interesse, situada a uma profundidade de 660 metros, e na avaliação da tensão horizontal com base nos ensaios de microfraturamento hidráulico que apontou um gradiente de fratura, possibilitando-se assim avaliar regionalmente o valor do coeficiente de empuxo no repouso.

A pressão estática atualmente considerada no fluido do reservatório foi de 4.000KN/m^2 .

Para a avaliação das tensões verticais considerou-se um peso específico médio da coluna de $23,1 \text{KN/m}^3$ (1 psi/ft). Já para as tensões horizontais utilizou-se o levantamento do gradiente de fraturamento hidráulico que foi de 20.36KN/m^3 (0.9psi/ft) tido como representativo para a região de produção. Foi considerado não haver anisotropia de tensões na direção horizontal. Este conjunto de valores indicou um valor de coeficiente de empuxo no repouso de 0.86 para a profundidade do reservatório que é de 660 metros.

3 - MODELO DE ANÁLISE

Para analisar a influência da temperatura no comportamento geomecânico quanto a estabilidade das paredes dos poços durante as fases de perfuração e produção, foi utilizado o programa de elementos finitos de análise elasto plástica de nome AEEPECD (Análise estática elastoplástica de estruturas, cavidades e descontinuidades) desenvolvido pelo Engenheiro Alvaro Maia da Costa (DIPREX/SEDEM) (ref. 2 e ref. 3). Foi utilizado a técnica de mesh-rezoning para a execução da escavação do poço e a aplicação da solução de Laplace para fluxo em regime permanente. Adotou-se, que na zona produtora o poço possui um diâmetro de 8,5 polegadas.

A malha utilizada na análise, representa a discretização da seção transversal do poço, consistindo de 600 elementos isoparamétricos de 8 nós, totalizando 1591 nós. Na extremidade do modelo foram utilizados elementos infinitos de forma a representar a continuidade do maciço. A malha utilizada é apresentada na figura 1.

Anteriormente a etapa de perfuração é gerado o estado de tensões equivalente ao estado "in-situ", sendo considerado que o modelo se encontra em equilíbrio estático.

Na fase de perfuração considera-se que o fluido de perfuração não percola para dentro da formação, não se estabelecendo fluxo algum. Neste caso a análise é dita como sendo de líquido não penetrante, sendo analisado o efeito conjunto da escavação de uma cavidade no maciço e a aplicação simultânea de uma pressão correspondente ao peso de lama junto da parede da escavação.

Na fase de produção de óleo considera-se a ocorrência de fluxo de fluido por dentro da formação, correspondente ao escoamento do óleo, sendo a análise chamada como de líquido penetrante. A avaliação da estabilidade do poço nesta fase, é feita através da aplicação de uma pressão negativa junto a parede da escavação, pressão esta decorrente da diferença entre a aplicada pelo fluido na fase de perfuração e a decorrente do óleo dentro do poço durante a fase de produção. Nesta etapa a solução de Laplace é aplicada de forma a se considerar a variação de tensões ao longo do maciço e a conseqüente variação volumétrica devido ao processo. Nesta condição não é considerado o efeito induzido pelas forças de arraste ocasionado pela percolação do fluido do reservatório para o poço.

4 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item são apresentados os resultados dos estudos de estabilidade, tanto para fase de perfuração quanto na fase de produção, realizado para poços verticais perfurados na região de forma a avaliar a influência da mudança de resistência ao cisalhamento decorrente da temperatura. Neste estudo utilizou-se os dois conjuntos distintos de amostras, cada qual com características geológicas semelhantes. Nos dois conjuntos utilizou-se 2 faixas de temperatura. No primeiro conjunto utilizou-se 24°C e 80°C, no segundo adotou 26 °C e 150°C.

4.1 - FASE DE PERFURAÇÃO

Nesta fase considerou-se a estabilidade da fase de perfuração considerando-se a adoção de um fluido hipotético de gradiente equivalente 6.1 KN/m³ (5.1 lb/gl).

O resultado das análises de estabilidade utilizando-se os dados disponíveis para as diferentes temperaturas, mostrou que a redução de resistência ao cisalhamento devido a temperatura influencia diretamente a condição de estabilidade das paredes do poço podendo, dependendo do gradiente de fluido, significar a condição de estabilidade ou instabilidade do poço nesta fase.

Para os dois conjuntos de amostras foi avaliado a influencia sobre a estabilidade de poços utilizando-se os resultados de ensaios triaxiais convencionais realizados a temperatura de 24°C e 80°C (conjunto 1) e os resultados dos ensaios múltiplos realizados a temperatura de 26°C e 150°C (conjunto 2).

As figura 2, 3, 4, 5 mostram a relação de tensão (tensão cisalhante atuante sobre tensão cisalhante admissível) obtida para os parâmetros alcançados a diferentes temperaturas pelo conjunto 1 e conjunto 2 respectivamente. Conforme já esperado, observa-se que a diminuição da resistência ao cisalhamento decorrente do aumento de temperatura provoca um aumento da relação de tensão junto da parede do poço. Para a condição de estado de tensão "in-situ" e gradiente de fluido analisado, este acréscimo pode significar a plastificação de pontos ao longo do maciço. Como pode ser observada nas figuras acima mencionadas, caso se considere os resultados dos ensaios obtidos a temperatura ambiente (figuras 2 e 4), o maciço não apresentará plastificação em nenhum ponto. O contrário ocorrerá caso venhamos considerar os parâmetros obtidos a partir de ensaios a temperatura mais elevada (figuras 3 e 5).

As figuras 6 e 7 apresentam uma comparação da relação de tensão desenvolvida em diferentes pontos da formação dispostos ao longo da radial do poço, quando utilizado os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidas para os conjuntos 1 e 2 de amostras respectivamente.

Nos casos em que não sejam verificados plastificação em nenhum ponto do maciço, é de se esperar que o estado de tensões sejam identicos, independente dos parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados. As figuras 8 à 11 apresentam o

estado de tensões proveniente da perfuração do poço até que ele atinja a condição de plastificação. Estes casos representam as análises efetuadas a temperatura ambiente tanto para o conjunto 1 como para o conjunto 2 das amostras. A análise do conjunto 1 efetuada a 80°C também apresentou o mesmo estado de tensões indicado nas figuras acima. Este fato demonstra que apesar de termos um ratio igual a unidade junto da parede lateral do poço, ainda não se iniciou o processo de redistribuição de tensão, ou seja, o maciço se encontra no início do processo de plastificação. Já a análise do conjunto 2 demonstra valores bastante diferentes devido a plastificação do maciço e a aplicação da não linearidade de tensões. O estado de tensões alcançados neste caso é apresentado nas figuras 12 à 15.

4.2 - FASE DE PRODUÇÃO

Nesta etapa considerou-se a estabilidade da fase de produção a adotando-se uma depleção dentro do poço de 3.500 KN/m^2 em relação ao pressão estática do reservatório. O decaimento de pressões do maciço para o poço é dado pela solução de Laplace, sendo seu resultado apresentado da figura 16.

Nesta fase a pressão sobre a parede do poço é reduzida do valor correspondente a pressão do fluido hipotético adotado para a perfuração (6.1 KN/m^3 (5.1 lb/gl)), para o valor correspondente ao da pressão dentro do poço durante a exploração do campo.

Os resultados das análises de estabilidade nesta etapa utilizando-se os dados disponíveis para as diferentes temperaturas e conjunto de amostras são apresentados nas figuras 17 à 20. Como pode ser observado a condição de produção apresenta condição de estabilidade pior do que a apresentada na etapa de perfuração. Com exceção da análise do conjunto 1 com parâmetros obtidos a temperatura ambiente, todas as outras apresentaram plastificação do maciço.

Deve-se salientar que o modelo empregado para esta análise não considera o efeito das forças de arraste ocasionada pelo fluxo de óleo pela formação. Este efeito aumentaria a força instabilizante sobre a parede do poço.

5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do anteriormente exposto, pode-se concluir que a redução da resistência ao cisalhamento do material quando submetido a altas temperaturas, tem como consequência imediata, a redução da estabilidade dos poços na fase de perfuração e produção, ou seja, um aumento no coeficiente de plastificação (ratio).

Na medida que, tradicionalmente as análises de estabilidade de poços de petróleo são feitas a partir de ensaios triaxiais realizados a temperatura ambiente, deve-se tomar postura conservadora no momento do dimensionamento do fluido de perfuração e na previsão de produção de areia na fase de produção, de forma a se considerar que os parâmetros de resistência reais a temperaturas mais elevadas, são inferiores aos obtidos pelos ensaios triaxiais tradicionais.

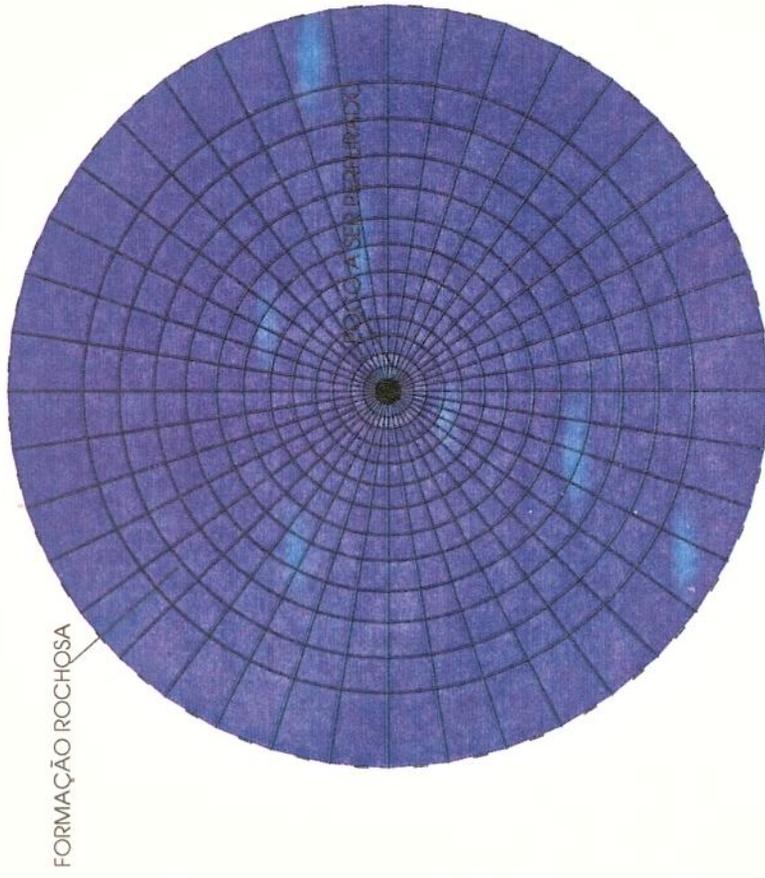
Recomenda-se que seja prosseguida a investigação da influência da temperatura sobre a resistência dos materiais de forma a se tentar definir um fator de minoração da mesma com efeito prático de engenharia. Devido a crescente utilização de poços horizontais como solução de exploração e consequente necessidade de seu dimensionamento, recomenda-se ainda que se inicie um amplo debate sobre critérios de dimensionamento e verificação de estabilidade tanto para a fase de perfuração, quanto para a fase de produção, critério este que procure contemplar também este aspecto, até então desconsiderado nas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ref. 1 - Soares, A. C., Bloch, M., Oliveira, J. B., Dantas, M. A. R., Freitas, S. M. S. "ENSAIOS DE MECÂNICA DAS ROCHAS PARA O POÇO 7-BA-348D-BA", Comunicação Técnica SECRES- 02/95, fevereiro de 1994.

Ref. 2 - Costa, A. M. "UMA APLICAÇÃO DE MÉTODOS COMPUTACIONAIS E PRINCÍPIO DE MECANICA DAS ROCHAS NO PROJETO E ANÁLISE DE ESCAVAÇÕES DESTINADAS A MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA", Tese de Doutorado - COPPE- UFRJ, 1984.

Ref. 3 - Polillo Filho, A. " UM PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE E FRATURAMENTO DE POÇOS DE PETRÓLEO", Tese de Mestrado - UFOP - MG, 1987.



**FIGURA 1 - MALHA DE ELEMENTOS FINITOS ADOTADA NA SIMULAÇÃO (SEÇÃO TRANSVERSAL DO POÇO)
1561 NÓS - 600 ELEMENTOS.**

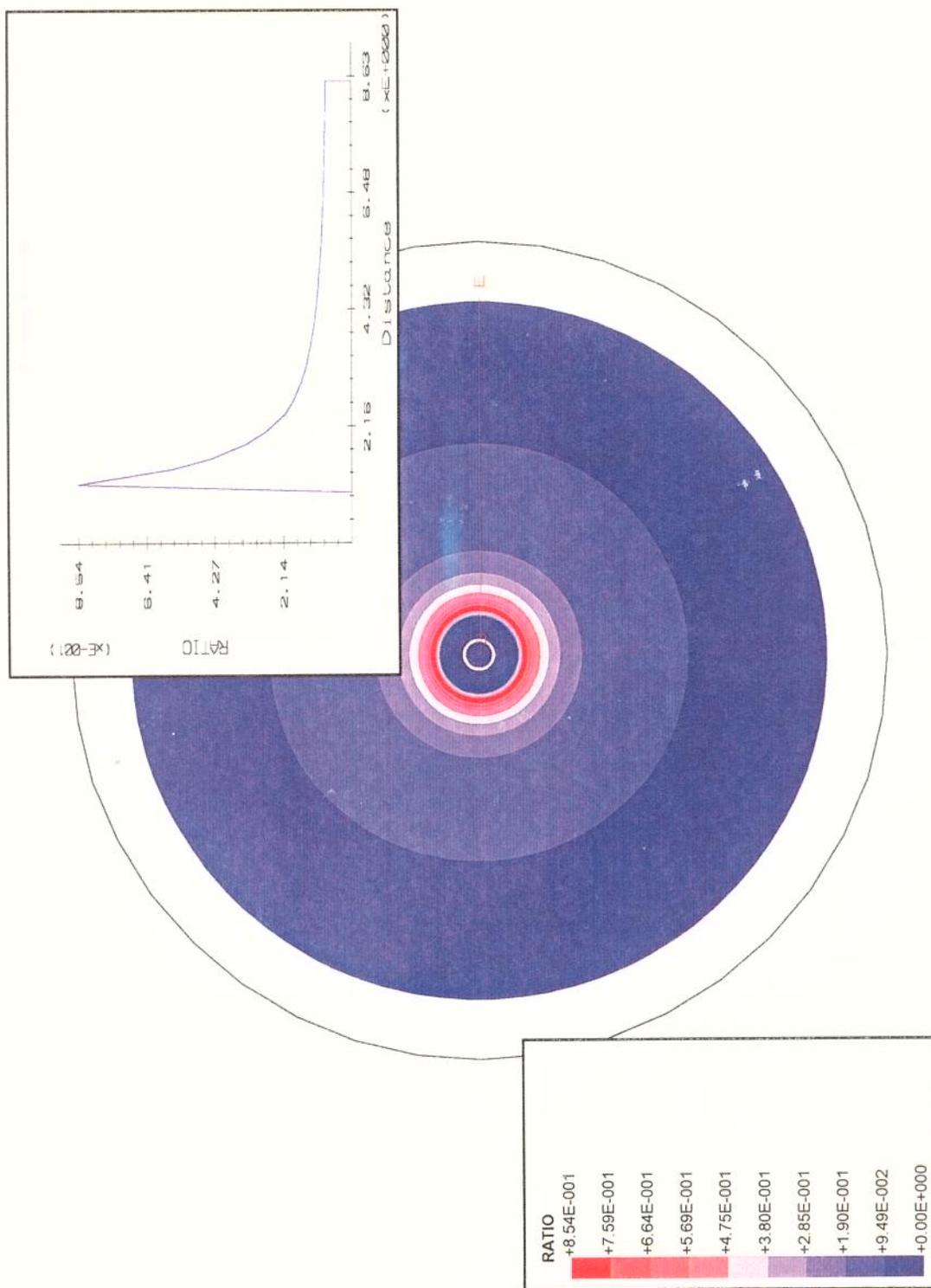


FIGURA 2 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMÉCÂNICOS DO CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 OBTIDAS PARA 24°C.

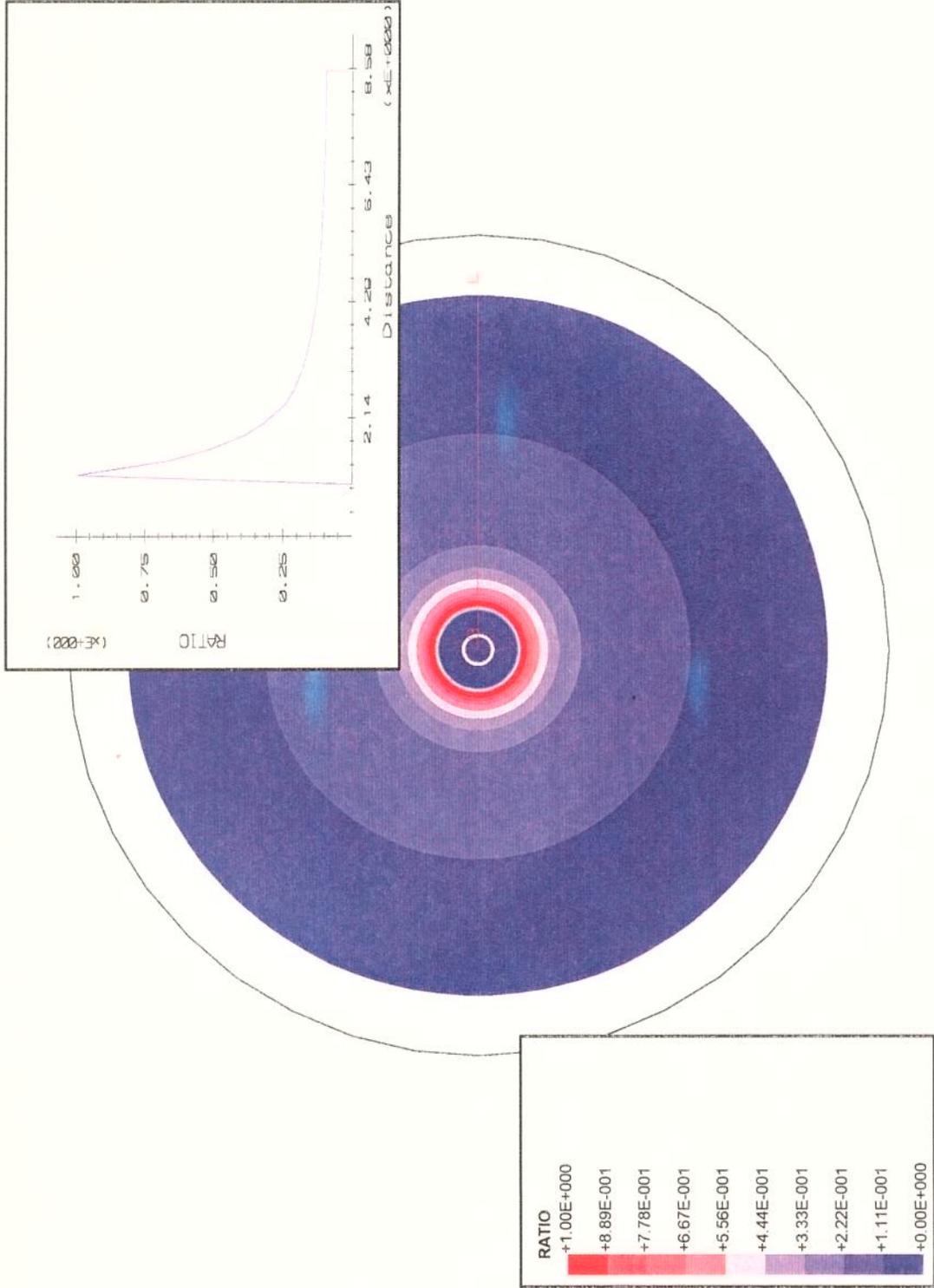


FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMÉCÂNICOS DO CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 OBTIDAS PARA 80°C.

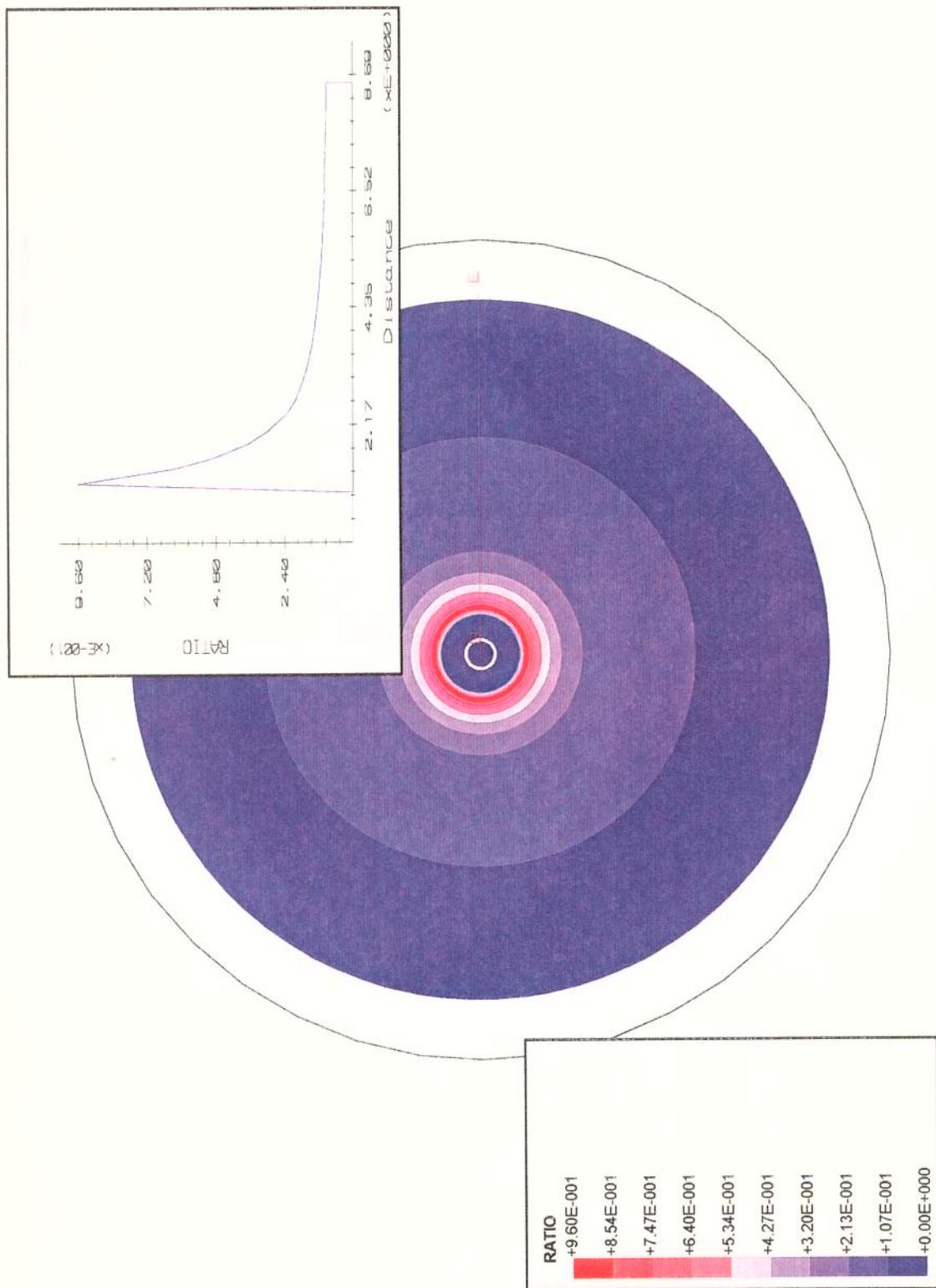


FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DO CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 OBTIDAS PARA 26°C.

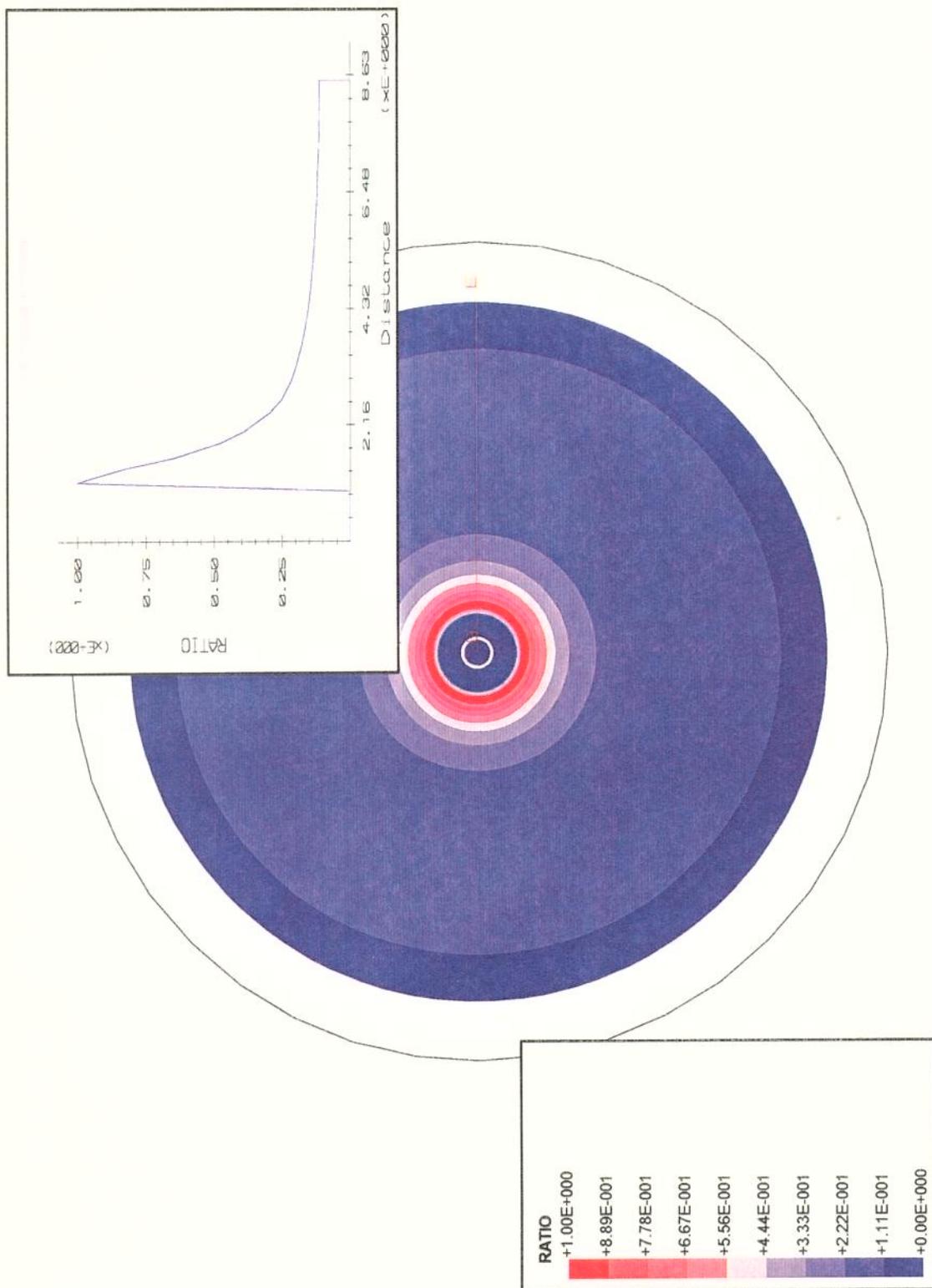


FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DO CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 OBTIDAS PARA 150 GRAUS.

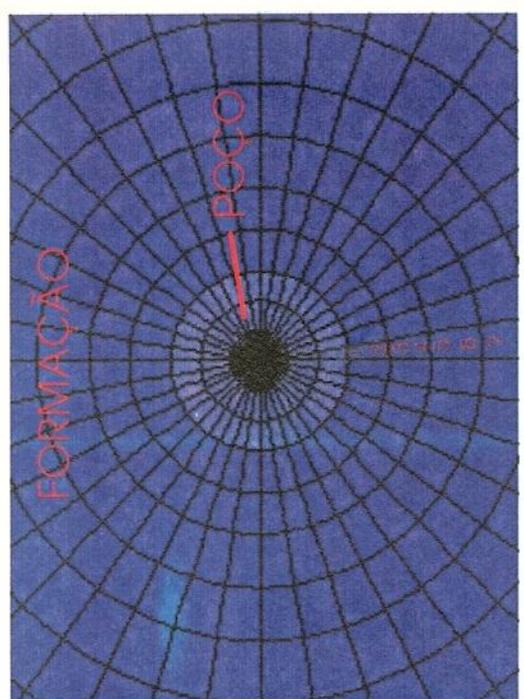
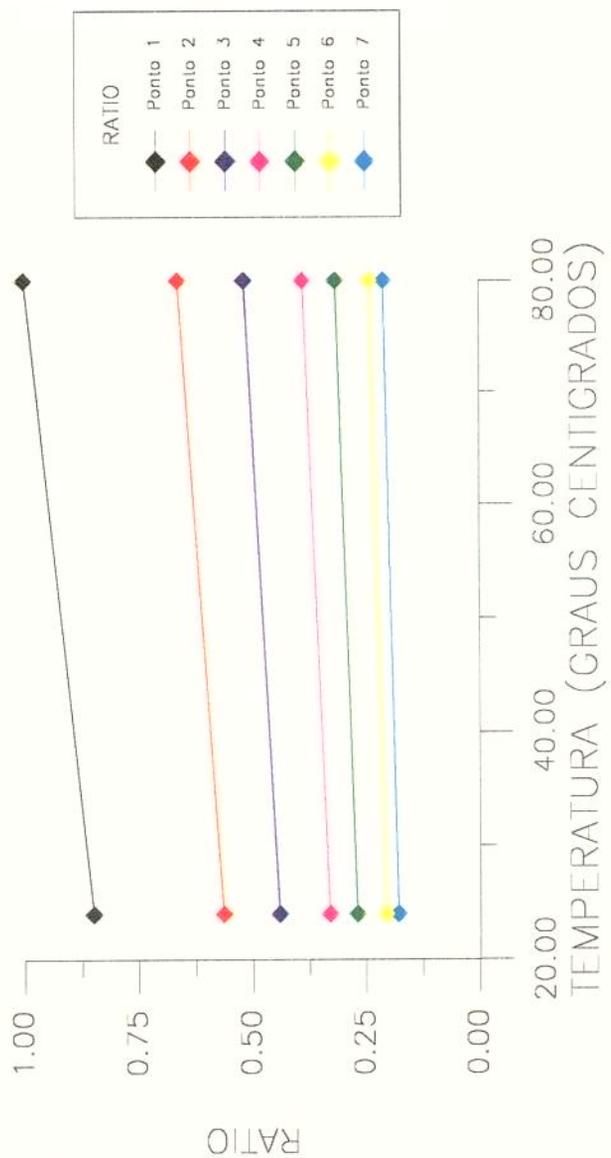


FIGURA 6 - EVOLUÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO PARA DIFERENTES PONTOS DA FORMAÇÃO AO LONGO DA DISTANCIA RADIAL DO POÇO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 1

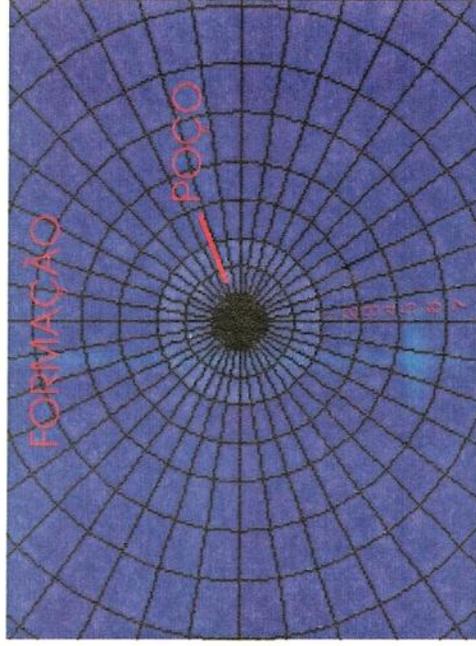
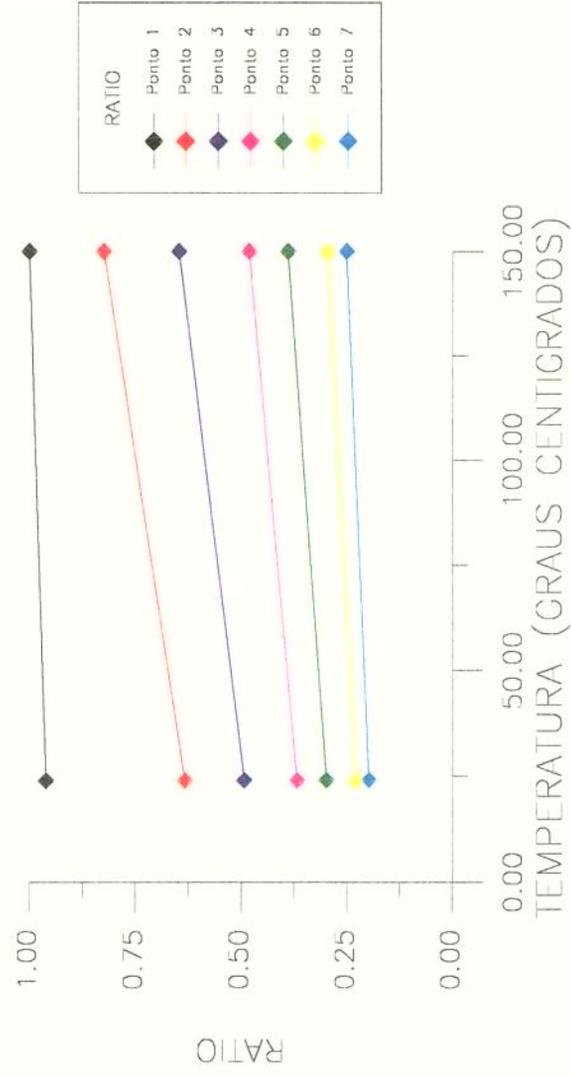


FIGURA 7 - EVOLUÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO PARA DIFERENTES PONTOS DA FORMAÇÃO AO LONGO DA DISTANCIA RADIAL DO POÇO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRA 2.

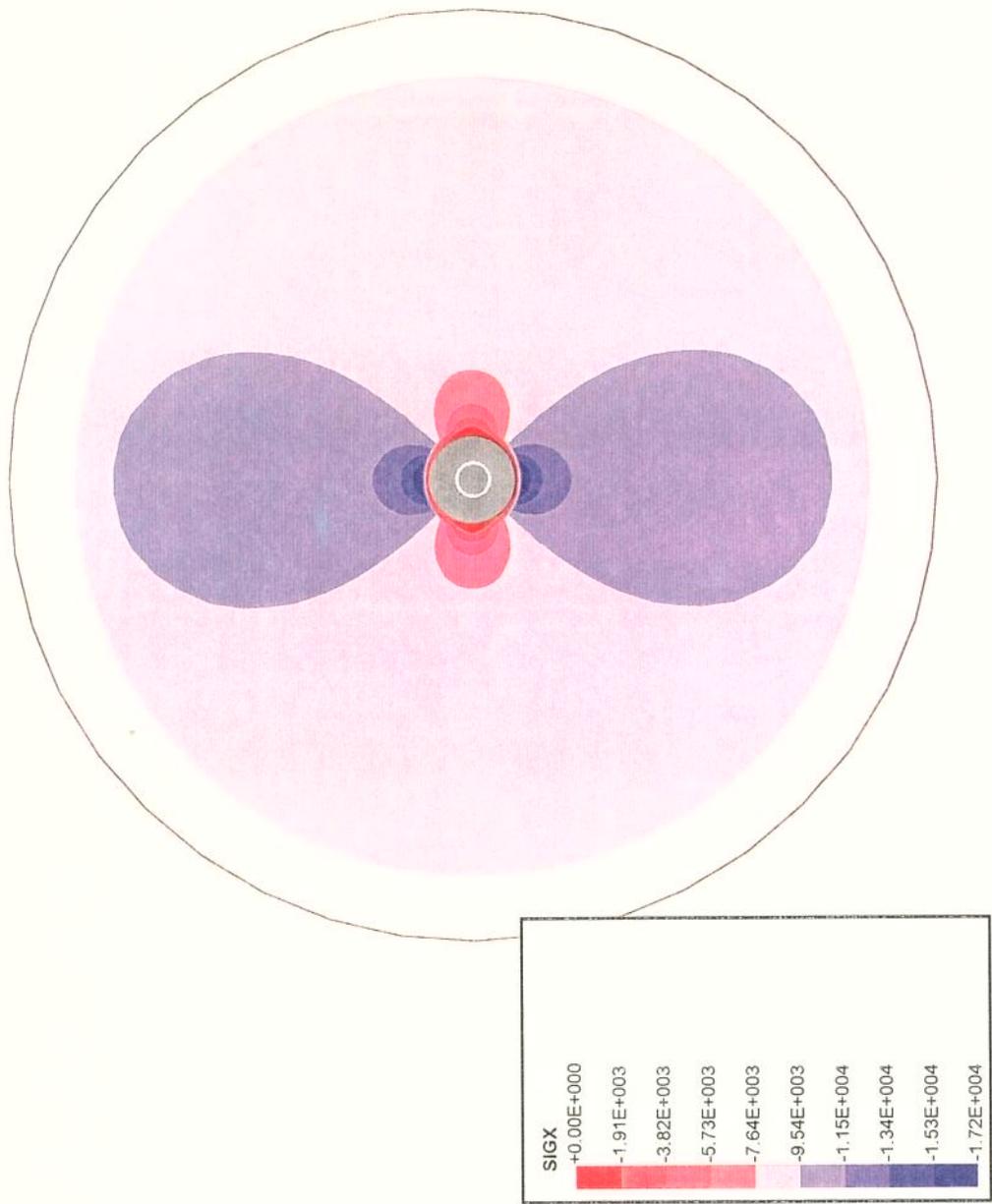


FIGURA 8 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO HORIZONTAL NA DIREÇÃO X DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 (24° E 80°C) E PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 26°C.

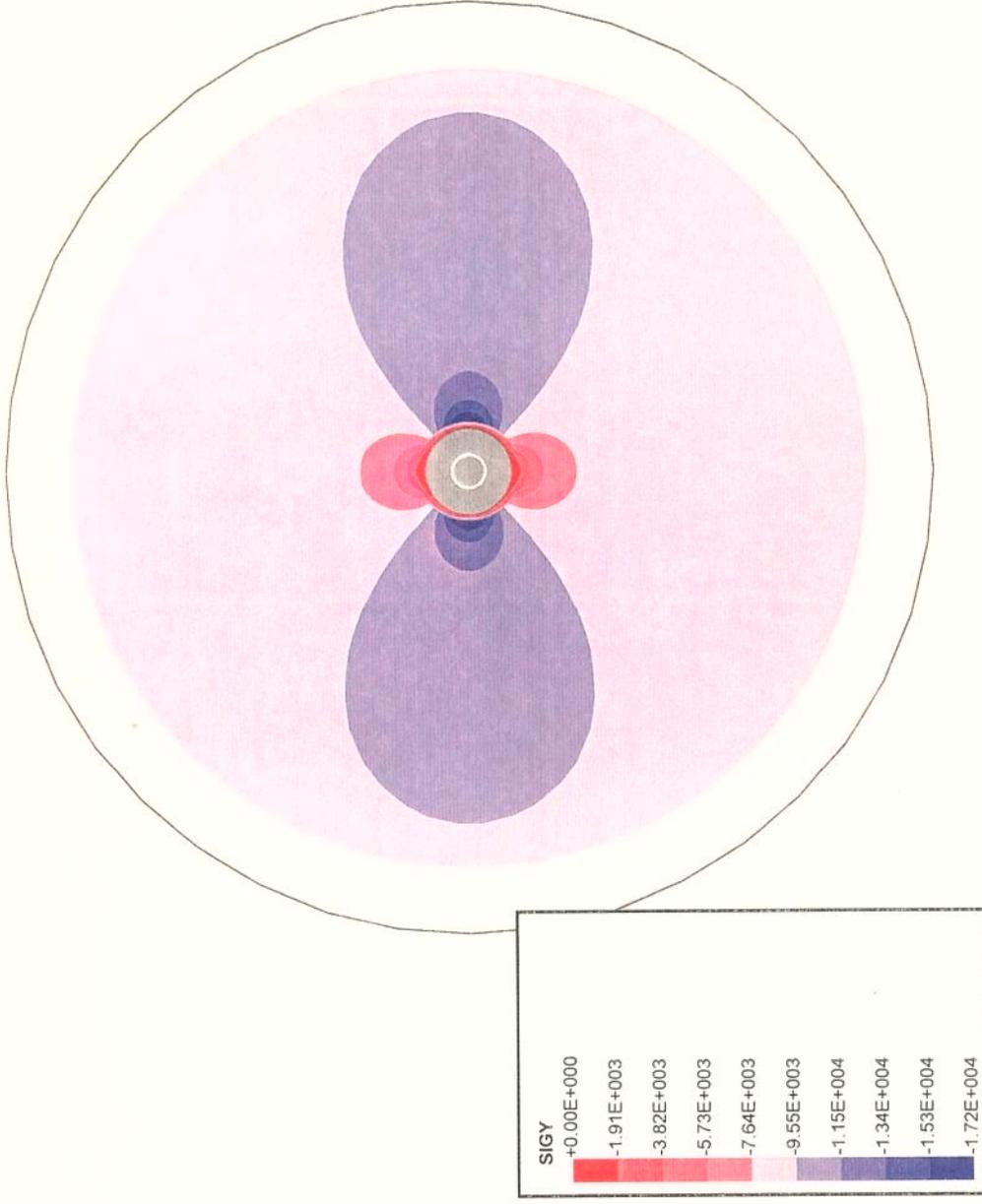


FIGURA 9 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO HORIZONTAL NA DIREÇÃO Y DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 (24° E 80°C) E PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 26°C.

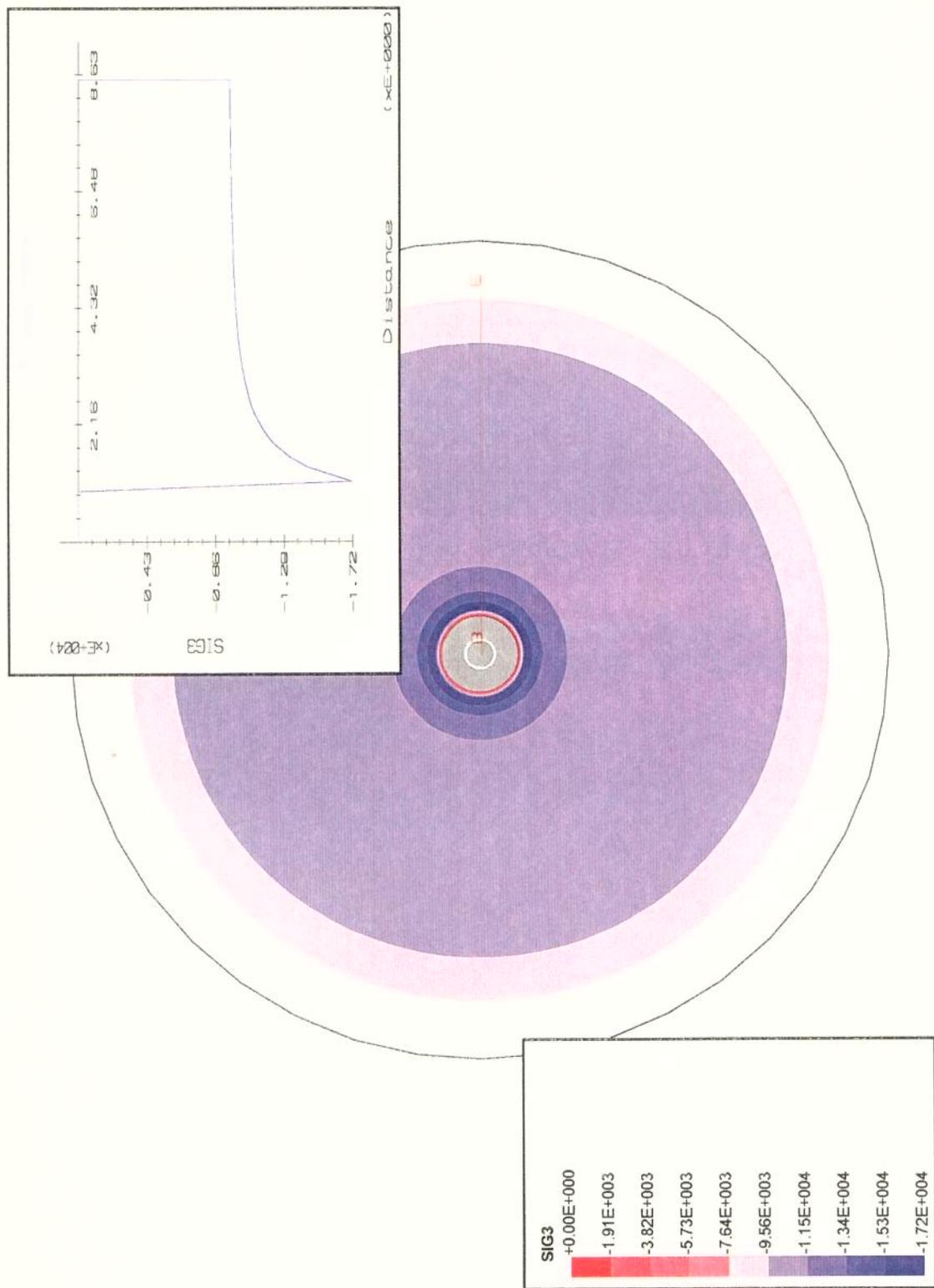


FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO PRINCIPAL MAIOR DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 (24° E 80°C) E PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 26°C.

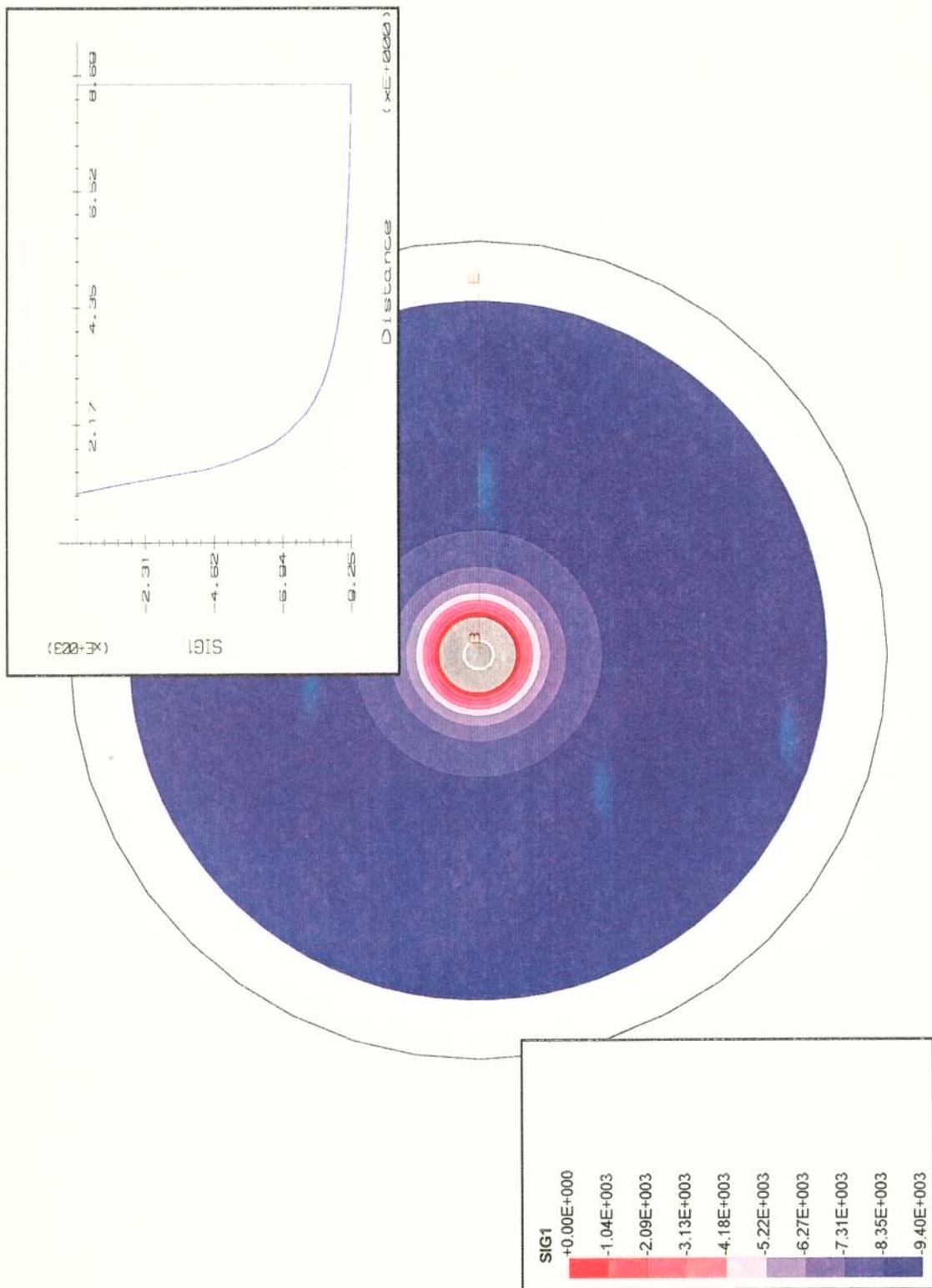


FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO PRINCIPAL MENOR DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 (24° E 80°C) E PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 26°C.

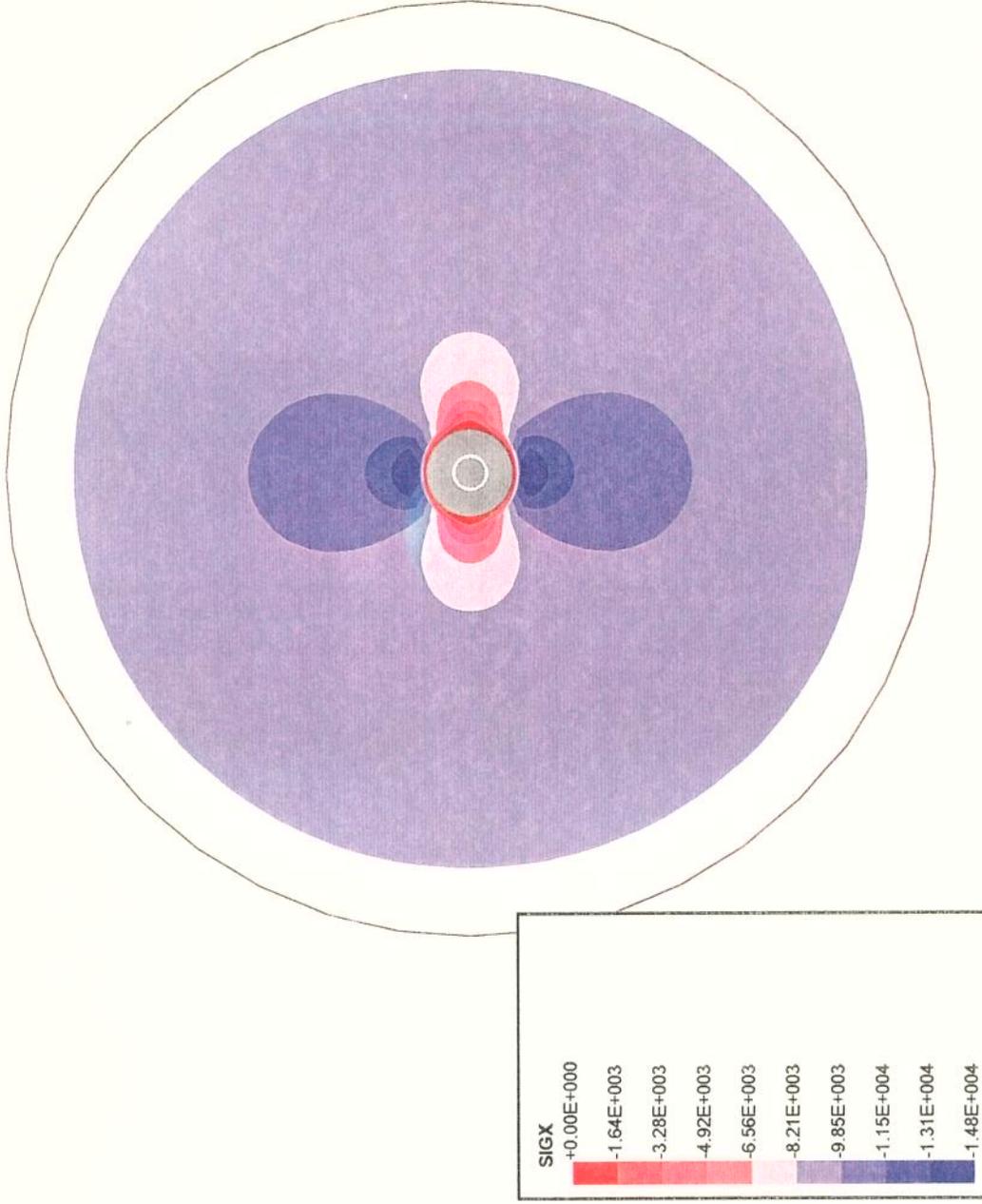


FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO HORIZONTAL NA DIREÇÃO X DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 150°C.

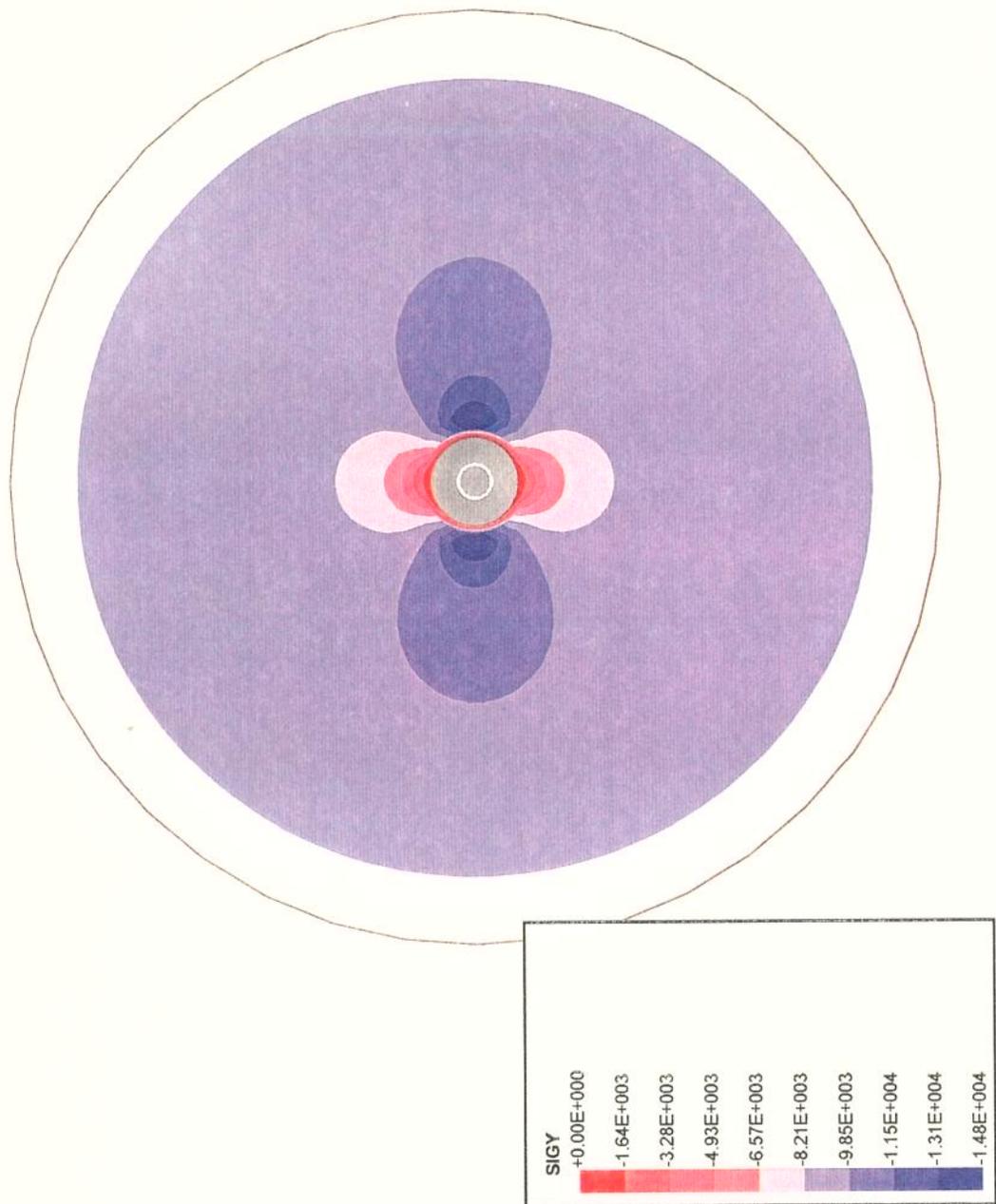


FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO HORIZONTAL NA DIREÇÃO Y DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 150°C.

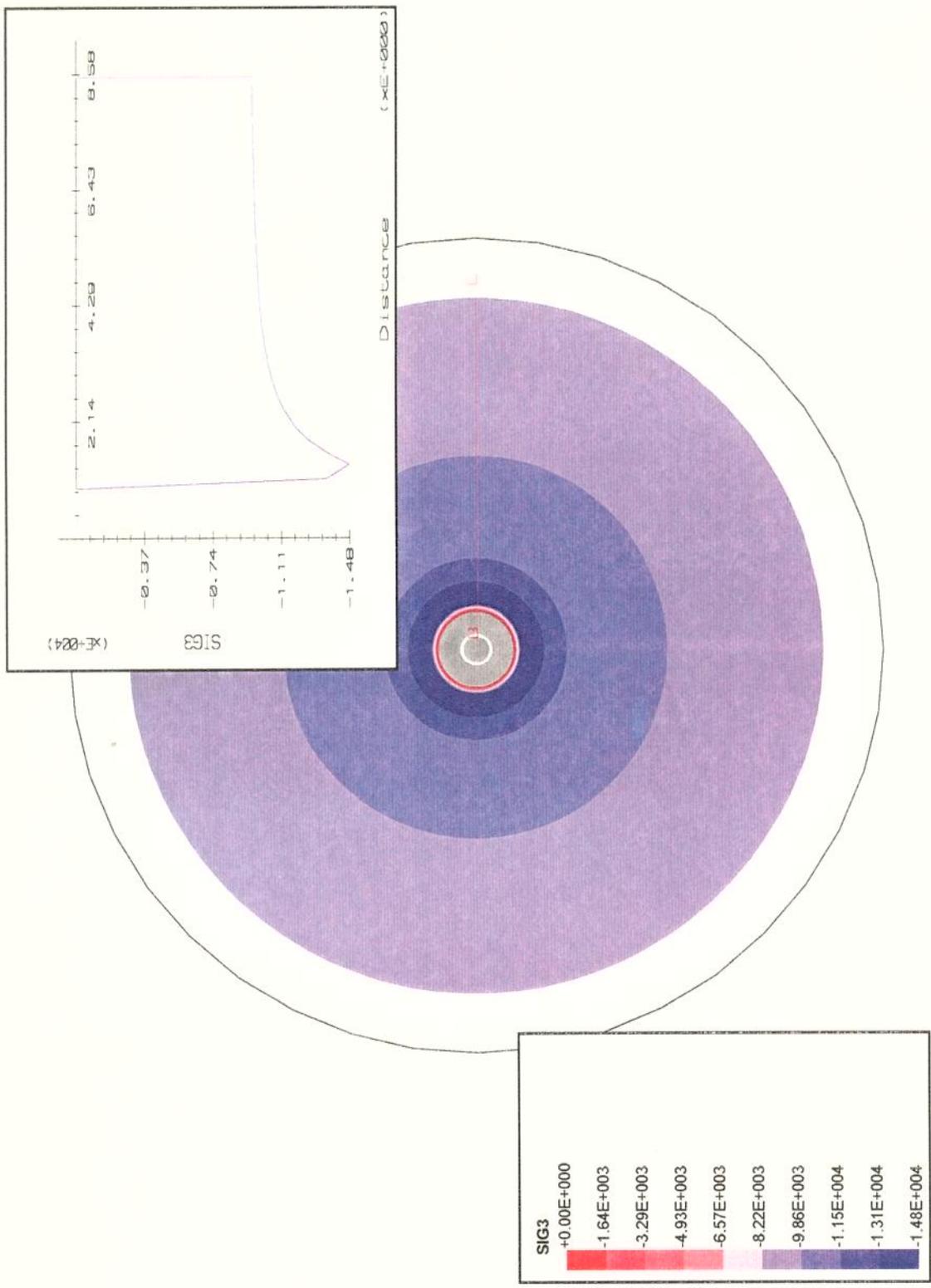


FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO PRINCIPAL MAIOR DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURAÇÃO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 150°C.

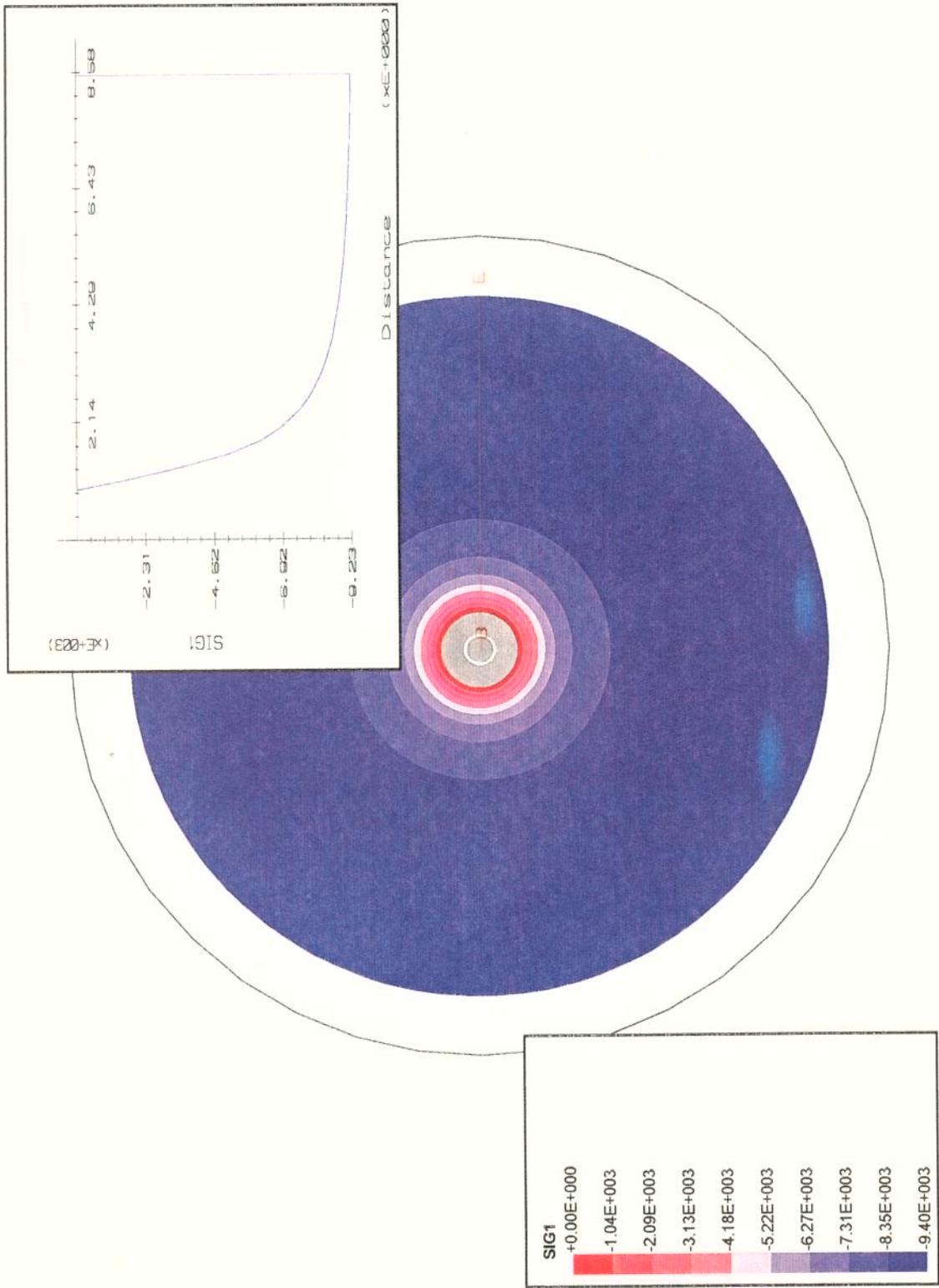


FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO PRINCIPAL MENOR DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PERFURACAO PARA O CONJUNTO DE AMOSTRAS 2 A 150°C.

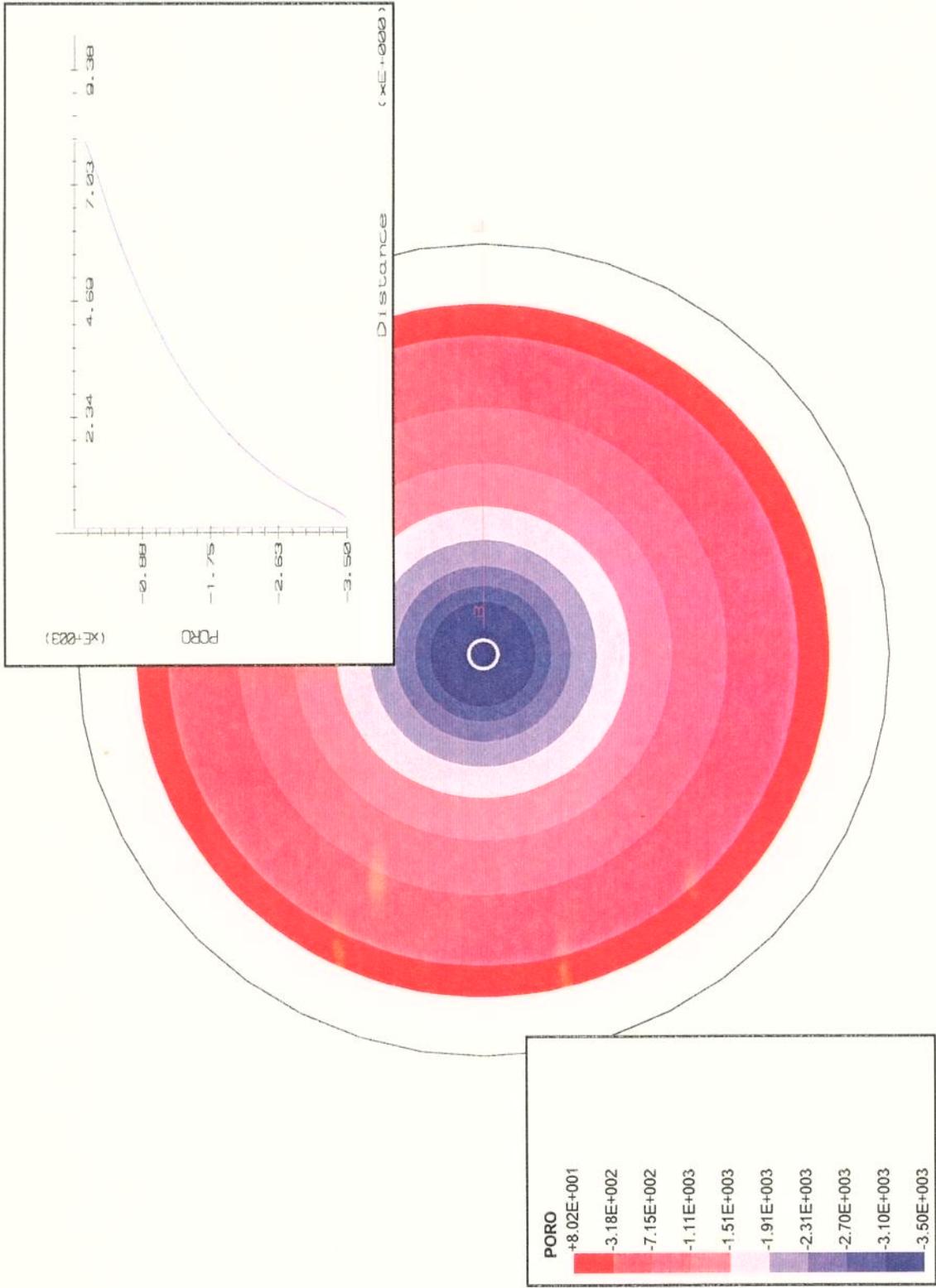


FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO DA CURVA DE VARIAÇÃO DA POROPRESSÃO AO LONGO DO MACIÇO DURANTE A FASE DE PRODUÇÃO PARA UMA DEPLEÇÃO DE 3.500 KN/M².

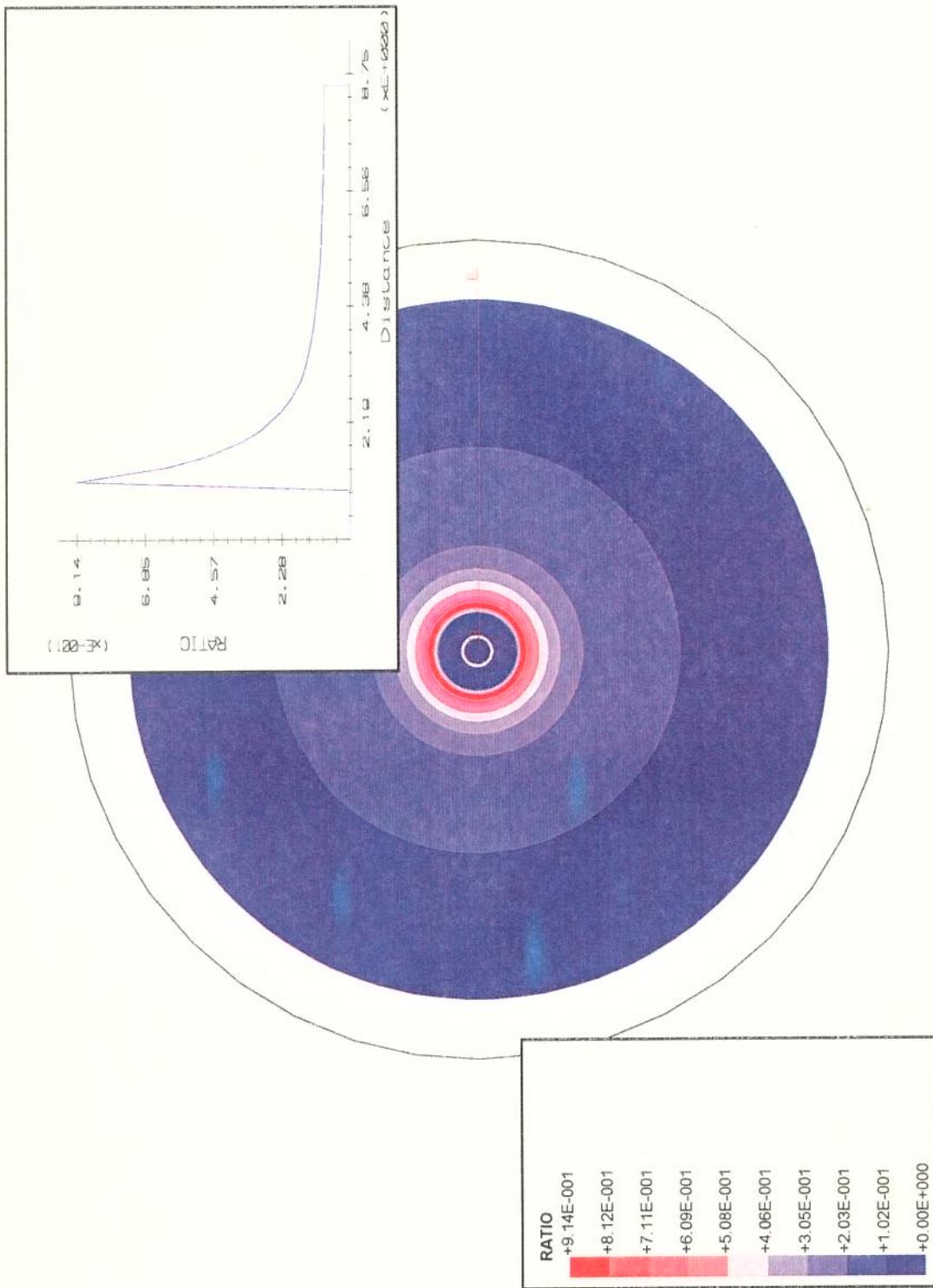


FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PRODUÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DO CONJUNTO DE AMOSTRAS 1 OBTIDOS PARA 24°C.

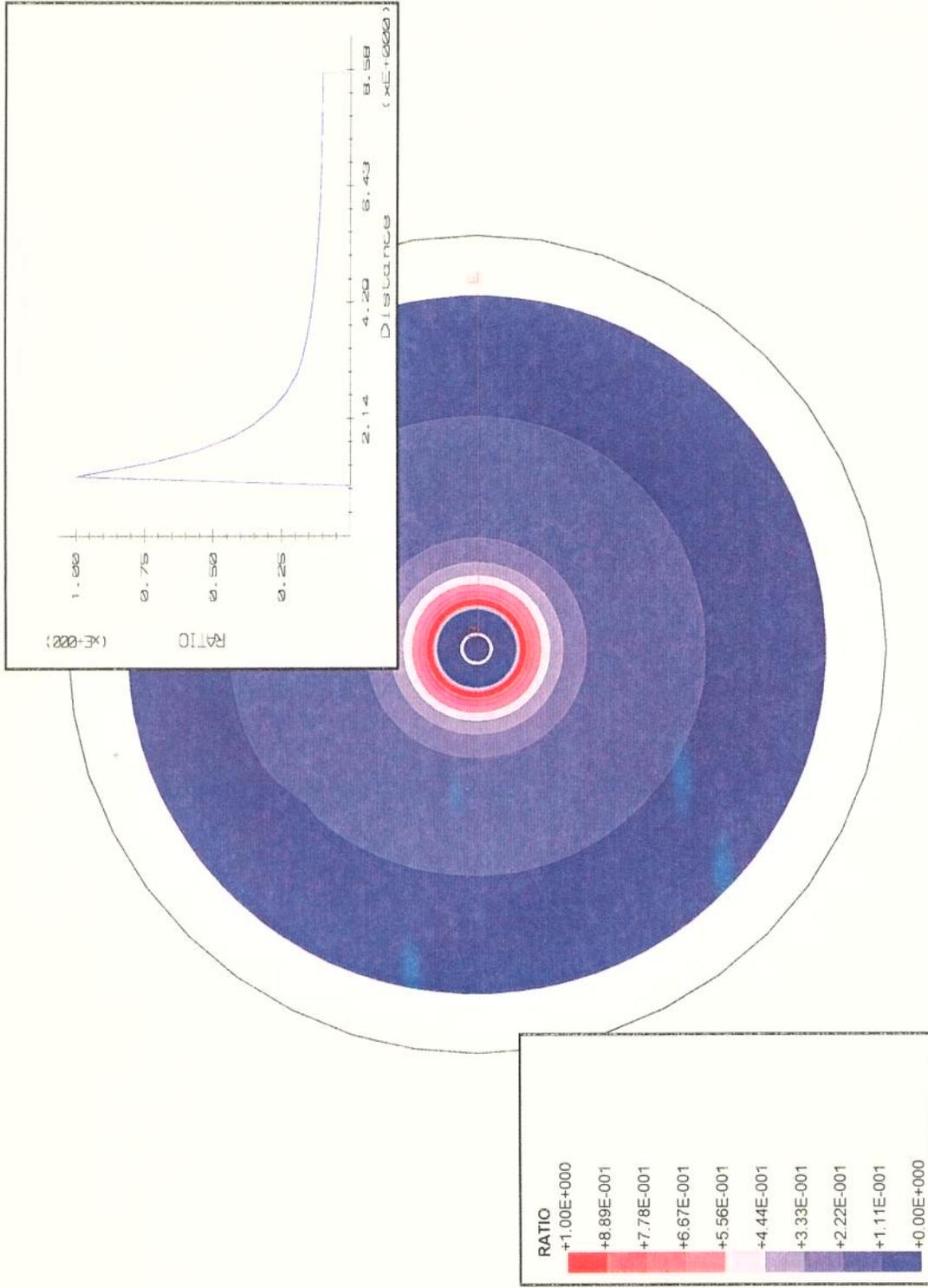


FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PRODUÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DO CONJUNTO DE AMOSTRAS I OBTIDOS PARA 80°C.

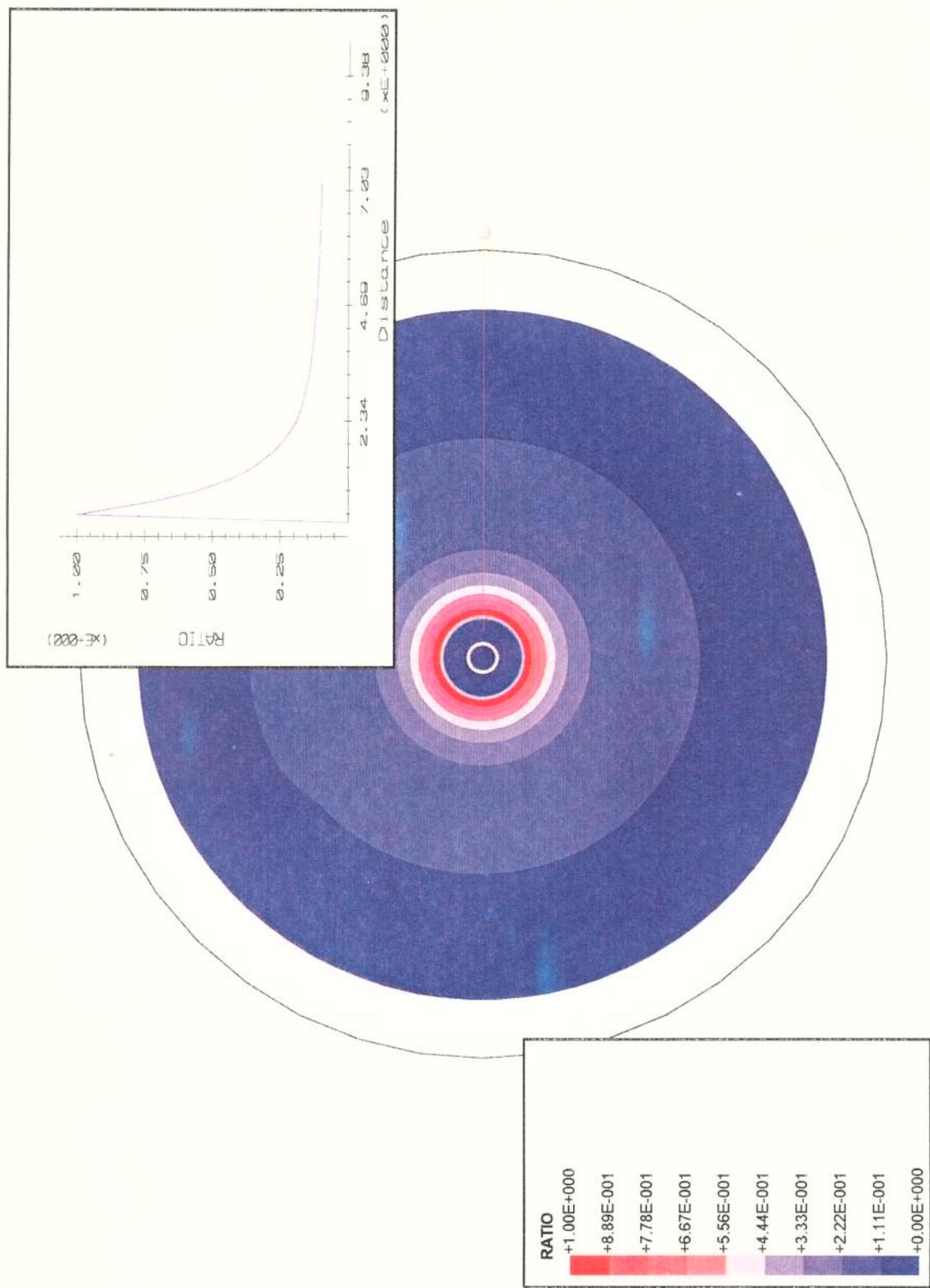


FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PRODUÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DO CONJUNTO 2 OBTIDOS PARA 26 ° C.

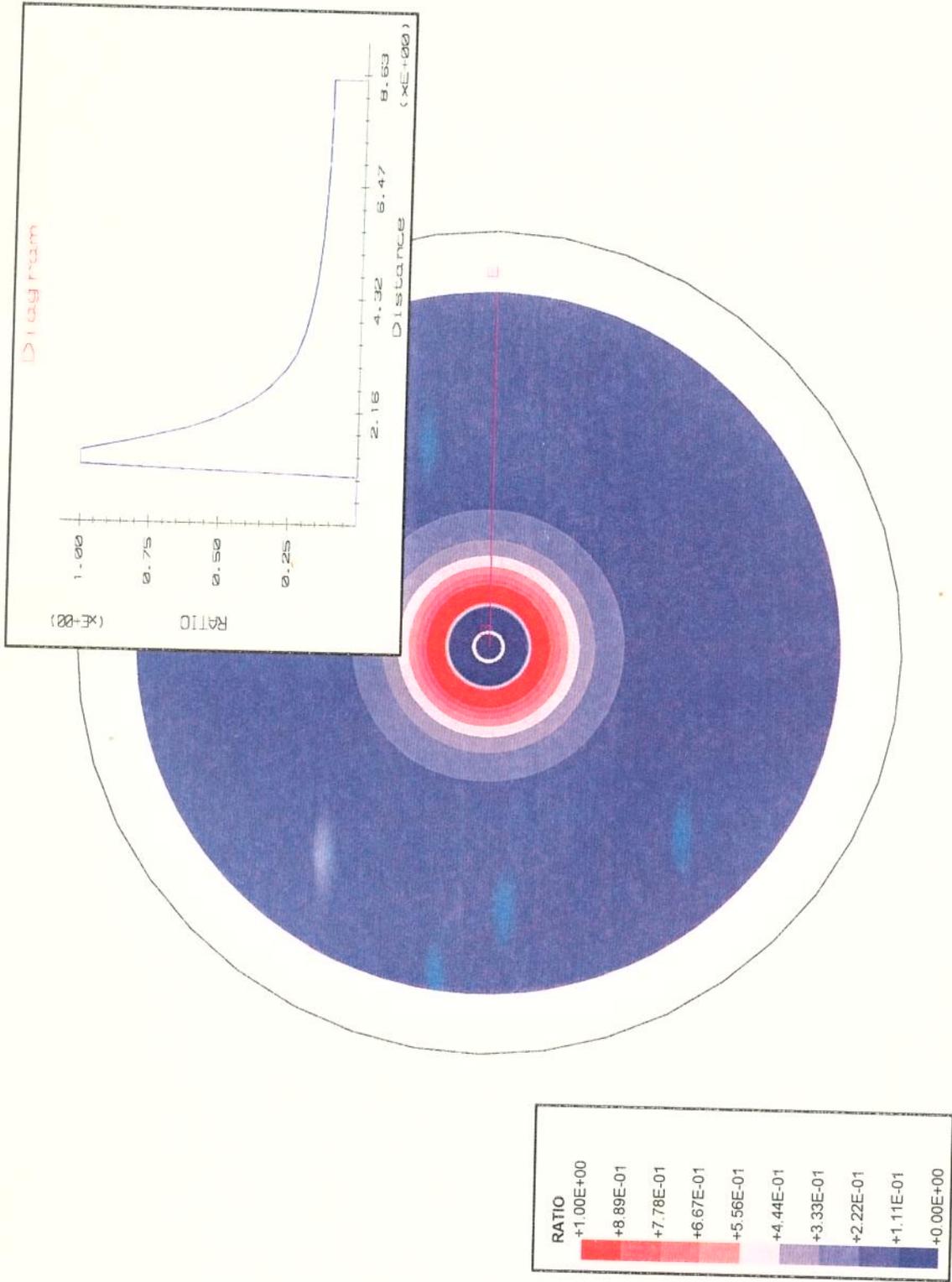


FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DA RELAÇÃO DE TENSÃO DESENVOLVIDA AO REDOR DO POÇO NA FASE DE PRODUÇÃO, PARA OS PARÂMETROS GEOMECÂNICOS DO CONJUNTO 2 OBTIDOS PARA 150 GRAUS C.