

## 6

### Resultado dos Ensaios de Caracterização Mecânica de Rocha

A fim de caracterizar mecanicamente os blocos de afloramento de Botucatu, denominados A e B, foram realizados ensaios de tração indireta (ensaio brasileiro), uniaxial e triaxial.

De posse dos resultados dos ensaios brasileiros, uniaxiais e triaxiais é possível estimar uma envoltória de ruptura no caso de Mohr-Coulomb e estimar os parâmetros elásticos de Poisson e módulo de elasticidade.

Para estimar um comprimento característico (parâmetro necessário ao contínuo de Cosserat) foram realizados ensaios de granulometria em amostras dos blocos de afloramento de Botucatu, denominados A e B.

Foram também realizados ensaios de densidade para o bloco A e B do arenito Botucatu.

Todos estes ensaios foram realizados neste estudo para conhecer o comportamento do material em que foram realizadas as simulações físicas, que se encontram no capítulo 7. Para assim poder através de simulações numéricas, representar o comportamento observado nas simulações físicas, conforme capítulo 8.

No bloco A foram realizados dois ensaios de tração indireta e no bloco B foram realizados cinco ensaios de tração indireta. A taxa de carregamento, tipo controle de força, utilizada no ensaio brasileiro foi calculada para que o ensaio dure 1min e as dimensões dos corpos de prova utilizados foram de 25.4mm, referente ao comprimento, e 50.8mm, referente ao diâmetro, para atender norma [17].

No bloco A foram realizados dois ensaios uniaxiais e no bloco B foram realizados quatro ensaios uniaxiais. A taxa de carregamento, tipo controle de força, utilizada no ensaio uniaxial foi calculada para que o ensaio dure entre 5 e 15min e as dimensões dos corpos de prova utilizados foram de 101.6mm,

referente ao comprimento, e 50.8mm, referente ao diâmetro, para atender norma [16].

Nos ensaios triaxiais realizados no bloco A e B de arenito Botucatu todas as amostras foram saturadas, as dimensões dos corpos de prova utilizados foram de 101.6mm, referente ao comprimento, e 50.8mm. Como se tem o interesse de estimar os parâmetros no trecho elástico e parâmetros de resistência no pós-pico, seguinte esquema de carregamento foi utilizado:

- Carregamento hidrostático com controle de força, a fim de confinar a amostra;
- Carregamento axial com controle de força, até 50% do valor de ruptura esperado;
- Descarregamento axial com controle de força;
- Carregamento axial com controle de deslocamento.

Foram realizados quatro ensaios triaxiais em cada bloco de arenito do Botucatu, para cada ensaio foi utilizado um valor de tensão confinante conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões confinantes  $\sigma_c$  aplicadas nos ensaios triaxiais.

$\sigma_c$ (MPa)
2.5
5.0
10.0
15.0

### 6.1. Ensaios Bloco A

A seguir são apresentados os resultados obtidos para caracterizar as propriedades de resistência mecânica do bloco, conforme Tabela 2. Sendo estes: os ensaios de compressão uniaxial referentes às amostras CP-01 e CP-02, brasileiros referente às amostras CP-01A e CP-02A e os triaxiais referente às amostras CP-05, CP-06, CP-07 e CP-08. Também foram realizados ensaios de granulometria e densidade que serão apresentados posteriormente.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios triaxiais, uniaxiais e brasileiros.

Testo	$\sigma_{ruptura}$ (MPa)	$\sigma^c$ (MPa)	$E$ (GPa)	$E_d$ (GPa)	$\bar{\nu}$	$\bar{\nu}_d$
CP-01	16.82	-	-	-	-	-
CP-01A	2.08	-	-	-	-	-
CP-02	16.84	-	-	-	-	-
CP-02A	1.7	-	-	-	-	-
CP-05	61.13	10	12.22	13.60	0.149	0.127
CP-06	48.04	5	11.97	11.83	0.183	0.148
CP-07	70.98	15	12.36	13.22	0.187	0.131
CP-08	37.71	2.5	10.29	10.29	0.109	0.163

Onde:

$\sigma_{ruptura}$  - tensão na ruptura;

$\sigma^c$  - tensão de confinamento;

$E$  - módulo de deformabilidade;

$E_d$  - módulo de elasticidade;

$\bar{\nu}$  - Poisson (trecho carregamento); e

$\bar{\nu}_d$  - Poisson (trecho descarregamento).

Da Figura 42 até Figura 47 serão apresentados os gráficos dos ensaios realizados no Bloco A, com exceção dos CP-01 e CP-02, que não realizaram a aquisição de dados referente às deformações axial e lateral.

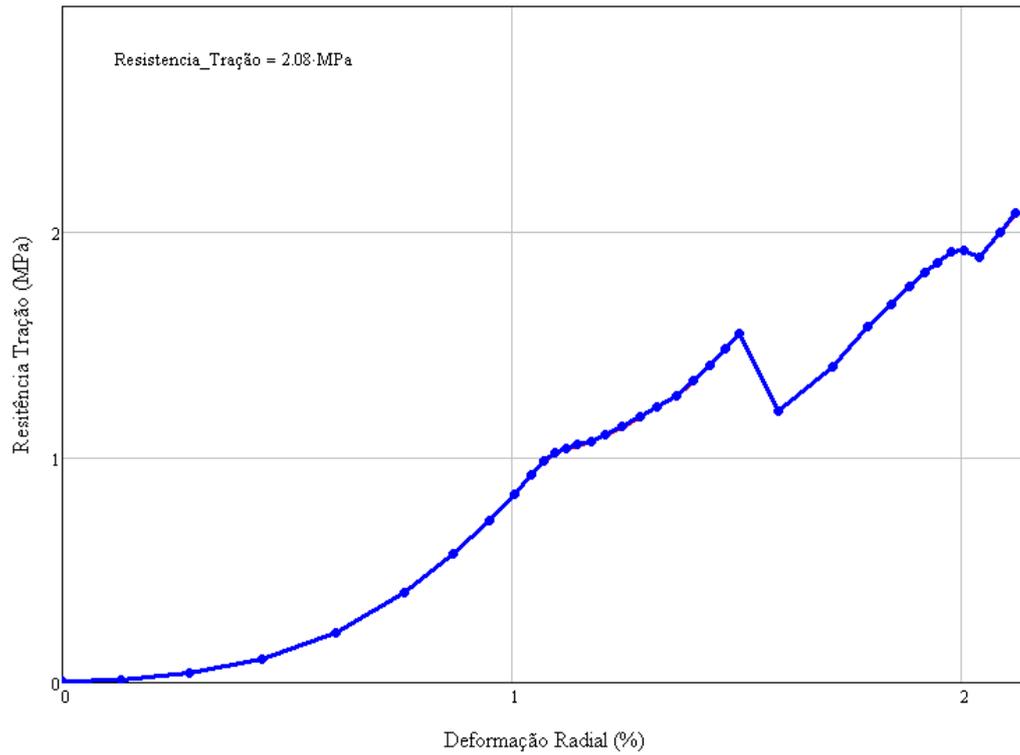


Figura 42 – Gráfico de deformação “radial” - resistência a tração do ensaio brasileiro CP-01A.

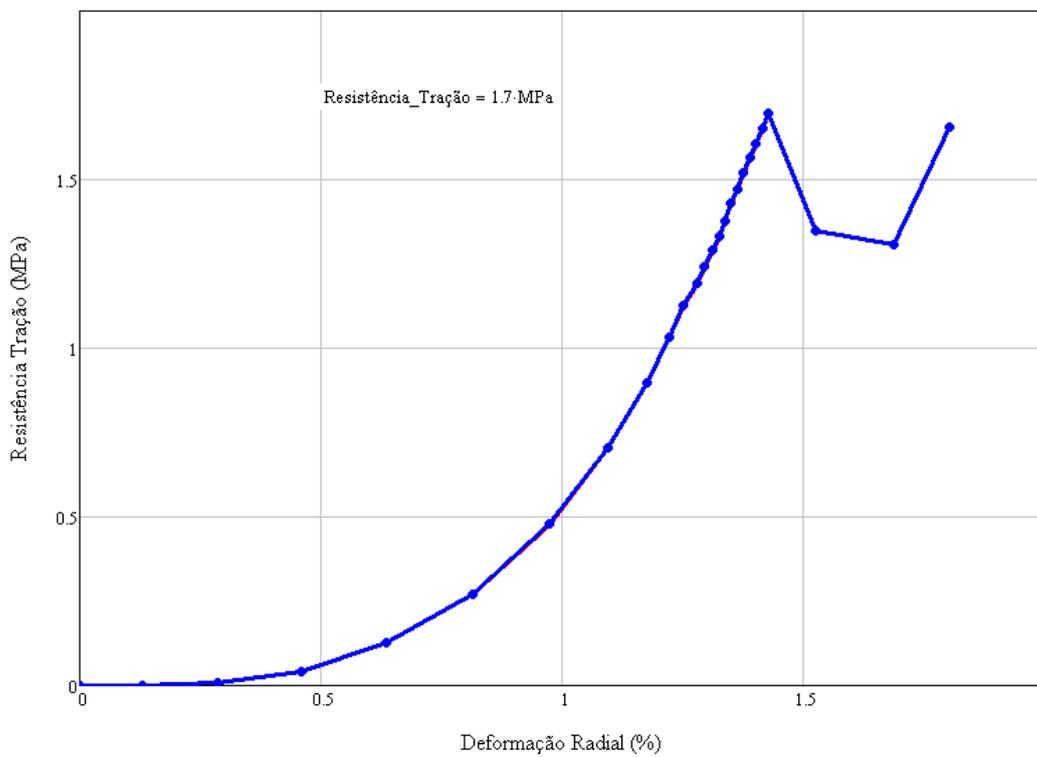


Figura 43 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-02A.

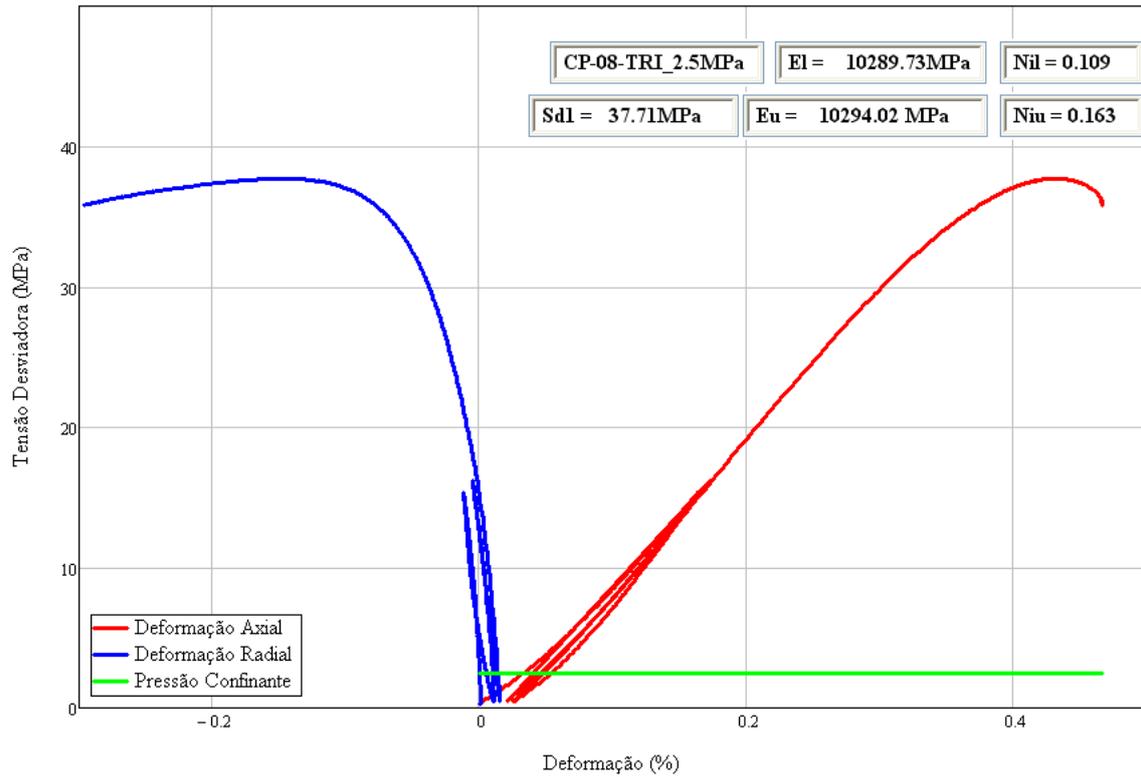


Figura 44 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-08, com confinante de 2.5MPa.

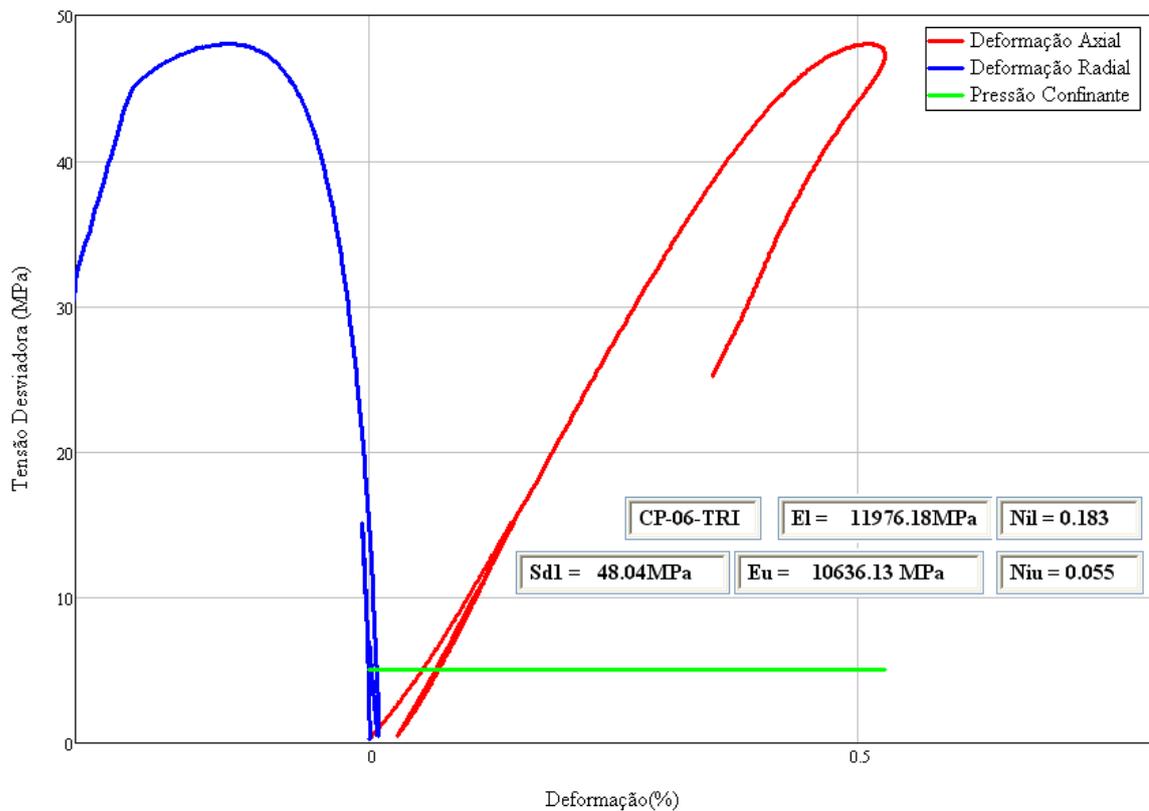


Figura 45 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-06, com confinante de 5MPa.

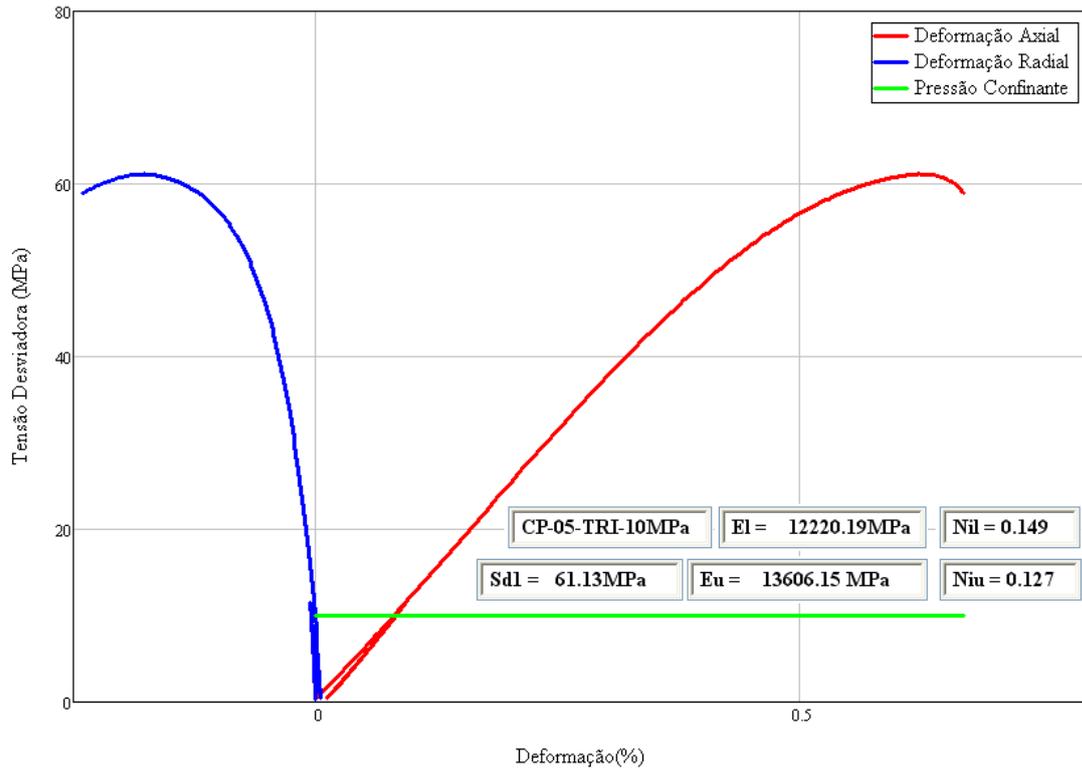


Figura 46 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-05, com confinante de 10MPa.

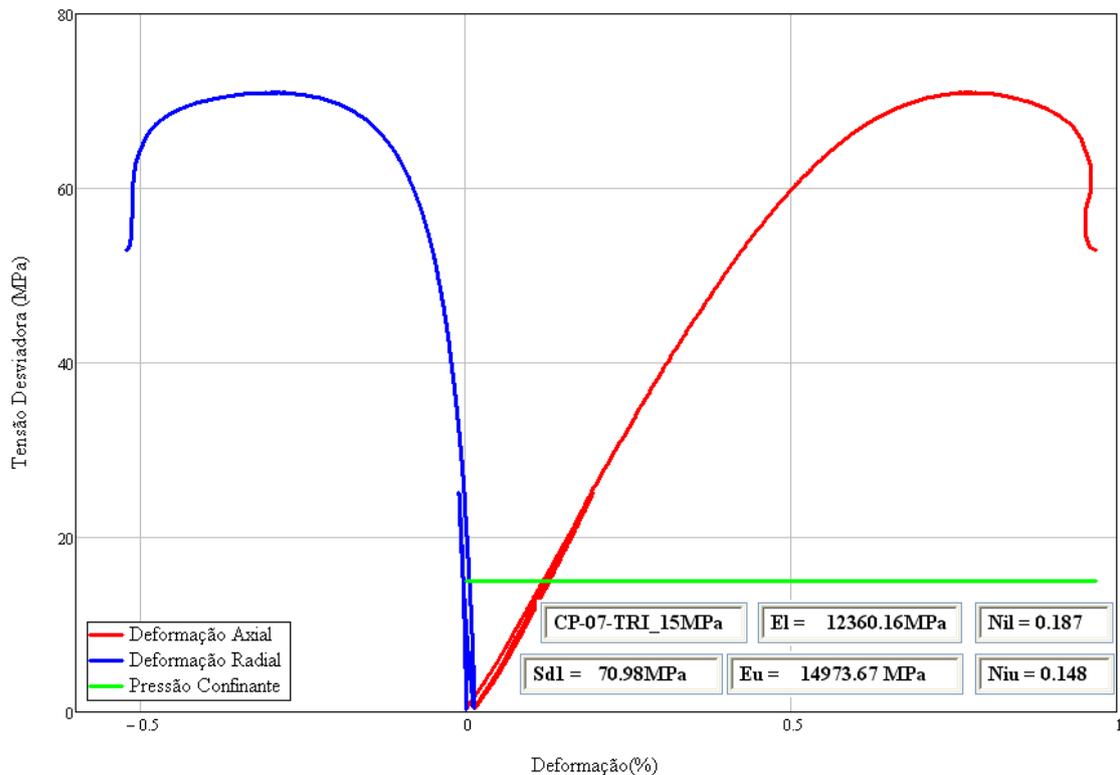


Figura 47 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-07, com confinante de 15MPa.

A envoltória de Mohr-Coulomb, para o bloco A, foi traçada no diagrama  $p'q$  e a equação da envoltória onde constam os valores dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno está apresentada abaixo.

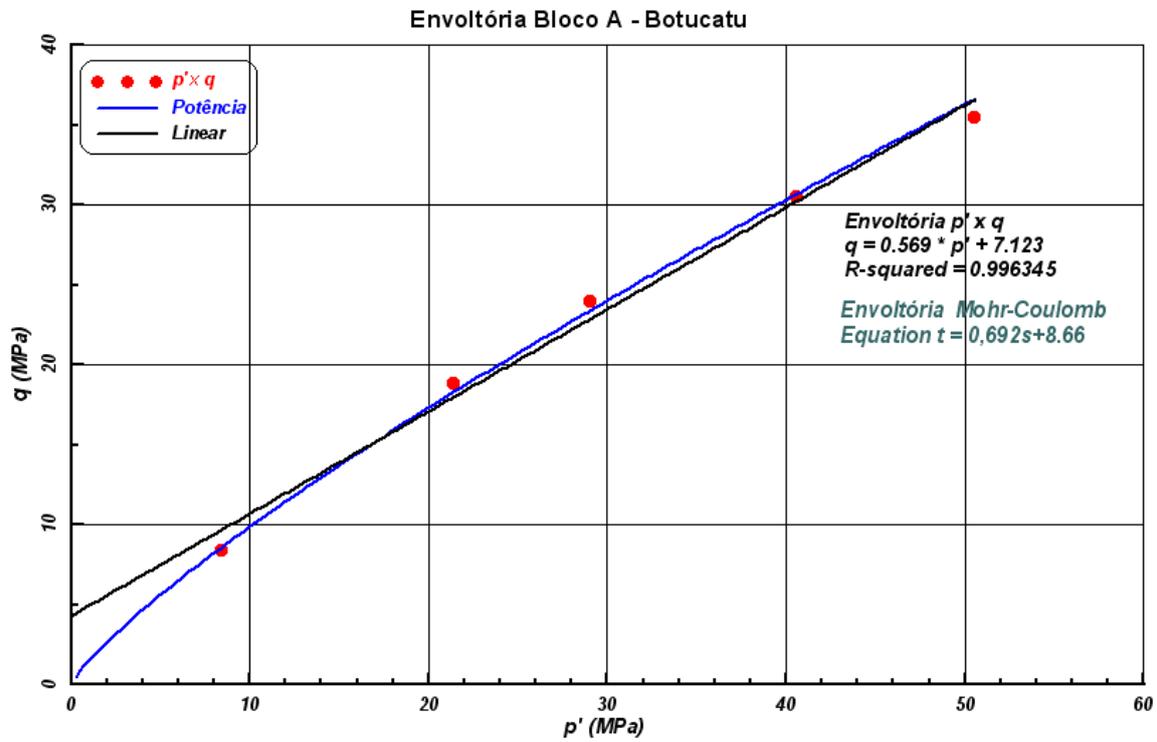


Figura 48 – Envoltória de Resistência com base nos ensaios realizados no Bloco A.

Como tentativa inicial de se estimar o comprimento característico, foi realizada análise granulométrica. O comprimento característico adotado foi o correspondente ao  $d_{50}$  conforme Figura 49. Para o bloco A o comprimento característico é de 0.18mm, supondo  $l = d_{50}$  [18], conforme Figura 50.

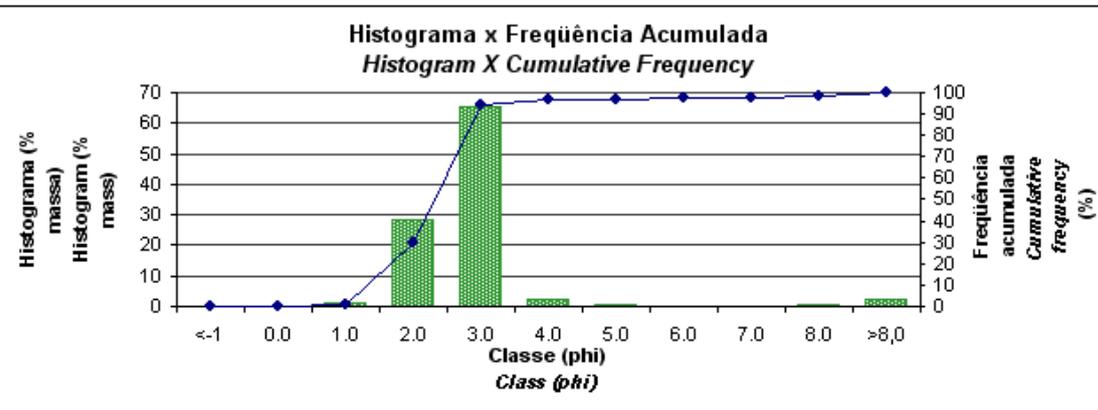
## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Poço: **AFLORAMENTO BOTUCATU** Profundidade(m): **Bloco A**

Nº Amostra: **139/09**  
 Data Análise: **29/04/09**  
 Solicitante: **Karen Ribeiro (TEP)**  
 Data Entrada: **15/04/09**

Tipo: **Outros**  
 Caixa:  
 Técnico Resp.: **Joana**

FRAÇÃO	mm	inch	MESH	CLASSE (Phi)	Massa (g)	% em Massa	% Acumulada
grânulo	4,000-2,000	0,0787	10	<-1	0,000	0,00	0,00
areia m. grossa	2,000-1,000	0,0394	18	0,0	0,000	0,00	0,00
areia grossa	1,000-0,500	0,0197	35	1,0	1,380	1,03	1,03
areia média	0,500-0,250	0,0098	60	2,0	37,821	28,34	29,37
areia fina	0,250-0,125	0,0049	120	3,0	86,968	65,17	94,54
areia m. fina	0,125-0,061	0,0025	230	4,0	2,705	2,03	96,57
Silte grosso	0,061-0,032	0,0012	400	5,0	0,471	0,35	96,92
	0,032-0,016	0,0006		6,0	0,269	0,20	97,12
silte fino	0,016-0,008	0,0003		7,0	0,294	0,22	97,34
	0,008-0,004	0,0002		8,0	0,844	0,63	97,97
argila	<0,004			>8,0	2,704	2,03	100,00



MASSA INICIAL(g): **133.878**  
 MASSA FINAL (g): **133.457**  
 PERDA(g): **0.421**

% GRÂNULO: **0.00**  
 % AREIA: **96.57**  
 % SILTE: **1.41**  
 % ARGILA: **2.03**

Phi MÉDIO: **2.88** *Areia fina (2<Phi<=3)*

*(Wentworth, 1922)*

SELEÇÃO: **0.39** *\*Bem selecionado (>=0,35 a <0,45)*

*(Petrobbras, 2006)*

MODA: **3**

*\*seleção = desvio padrão de Phi*

MEDIANA: **5**

% CARBONATO: **0.00**

MÉTODO DE ANÁLISE DA FRAÇÃO AREIA: **Peneiramento**

MÉTODO DE ANÁLISE DA FRAÇÃO FINA: **Analisador de Partículas - PX**

MÉTODO DE ANÁLISE DE CARBONATO: **Coluna d'água**

Incerteza Expandida da Medição (U) # Areias (Phi <= 4): **± 2,27 % , k= 2,6**  
 # Silte e Argila (Phi > 4): **± 0,36 % , k= 2,9**  
 # %CaCO<sub>3</sub>: **± 1,2 % , k= 2,3**

A Incerteza expandida (U) relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência K, o qual para uma uma distribuição t com neff graus de liberdades efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**OBSERVAÇÕES: Afloramento**

Figura 49 – Ensaio de Granulometria realizado no Bloco A.



<b>BOLETIM DE ENSAIOS E RESULTADOS</b>		<b>CIM 107-09</b>	
<b>SOLICITANTE:</b> Karen		<b>LOTAÇÃO:</b> TEP	
<b>DATA DA SOLICITAÇÃO:</b> 6/15/2009			
<b>ENVIO DE AMOSTRA:</b> 6/15/2009		<b>DATA:</b>	
<b>TÉCNICO RESPONSÁVEL:</b> Gabriel			
<b>RECEBIMENTO DE AMOSTRA:</b>			
<b>INÍCIO:</b> 6/15/2009	<b>PREVISÃO:</b> 6/18/2009	<b>CONCLUSÃO:</b> 6/15/2009	
<b>PROJETO:</b>			
<b>Diagrama de Rede:</b> 1000266748		<b>Oper.:</b> 0090	
<b>EQUIPAMENTO UTILIZADO:</b> Picnômetro a gás ( <b>Hélio</b> ).			
<b>Pedido:</b>			
Densidade de 2 amostras.			
<b>RESULTADOS:</b>			
<b>Leituras</b>	<b>Bloco A</b>	<b>Bloco B</b>	
<b>Leitura 1 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.6342	2.6365	
<b>Leitura 2 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.6346	2.6370	
<b>Leitura 3 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.6345	2.6371	
<b>Leitura 4 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.6344	2.6372	
<b>Leitura 5 (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.6341	2.6370	
<b>Média (g/cm<sup>3</sup>) *</b>	<b>2.6364</b>	<b>2.6369</b>	
<b>Desvio Padrão (g/cm<sup>3</sup>) *</b>	0.0002	0.0003	
* - Médias e Desvios calculados pelo equipamento.			

**RETEP - Rede de Excelência em Tecnologia de Engenharia de Poço  
Segmento Pesquisa, Desenvolvimento e Suporte Tecnológico**

Figura 51 – Gráfico do resultado da média das cinco amostras do ensaio de densidade para o Bloco A e B.

## 6.2. Ensaio Bloco B

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para caracterizar as propriedades de resistência mecânica do bloco B, conforme Tabela 3. Sendo estes: os ensaios de compressão uniaxial referentes às amostras CP-03, CP-04, CP-10, CP-11, CP-12, CP-19 e CP-20, brasileiros referente às amostras CP-03A, CP-04A, CP-13A, CP-15A, CP-16A e CP-17A e os triaxiais referente às amostras

CP-13, CP-14, CP-15 e CP-16. Também foram realizados ensaios de granulometria e densidade que serão apresentados posteriormente.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios triaxiais, uniaxiais e brasileiros.

Testo	$\sigma_{ruptura}$ (MPa)	$\sigma^c$ (MPa)	$E$ (MPa)	$E_d$ (MPa)	$\bar{v}$	$\bar{v}_d$
CP-03A	1.44	-	-	-	-	-
CP-04A	1.06	-	-	-	-	-
CP-10	7.63	-	4920	-	0.188	-
CP-11	12.49	-	5445	-	0.201	-
CP-12	8.56	-	6444	-	0.244	-
CP-13	67.8	15	10937.9	13371.87	0.089	0.113
CP-13A	2.14	-	-	-	-	-
CP-14	40.68	2.5	10644.5	10610.11	0.235	0.13
CP-15	58.03	10	118884	15176.67	0.126	0.155
CP-15A	1.46	-	-	-	-	-
CP-16	48.93	5	10883.5	12256.31	0.174	0.132
CP-16A	1.74	-	-	-	-	-
CP-17A	1.96	-	-	-	-	-
CP-20	21.13	-	7711	-	0.477	-

Da Figura 52 até Figura 66 serão apresentados os gráficos dos ensaios realizados no Bloco B, com exceção dos CP-03 e CP-04, que não realizaram a aquisição de dados referente às deformações axial e lateral.

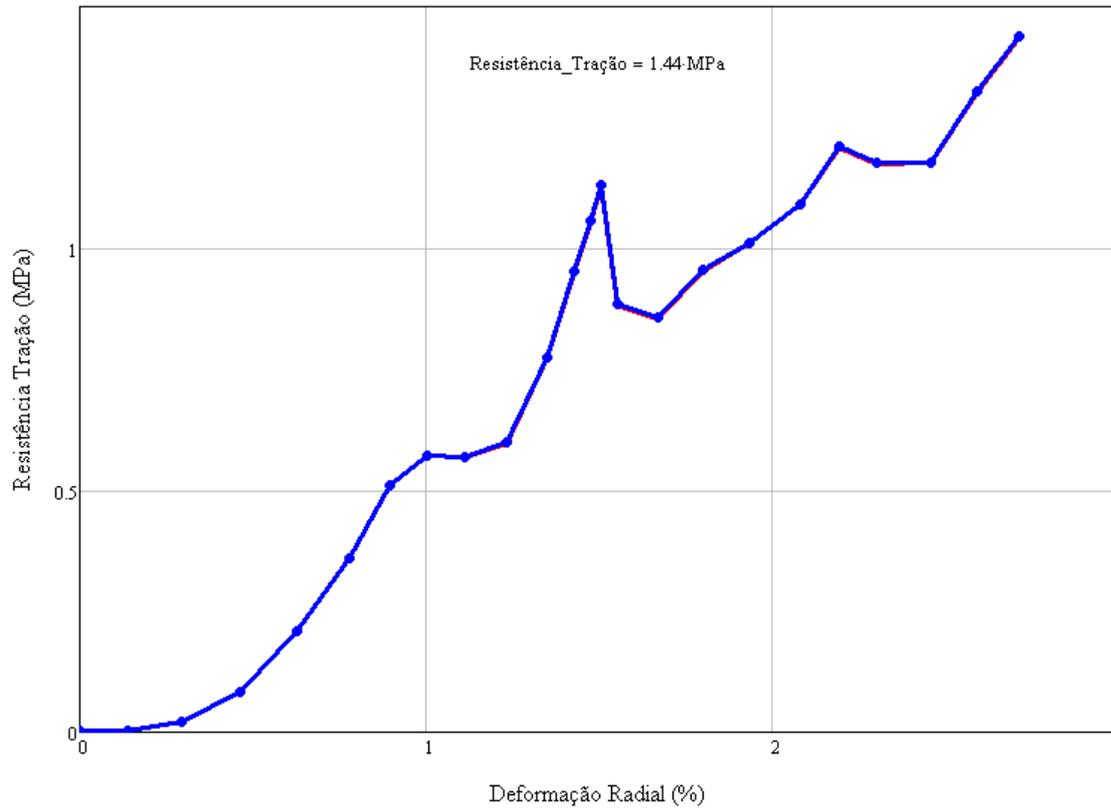


Figura 52 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-03A.

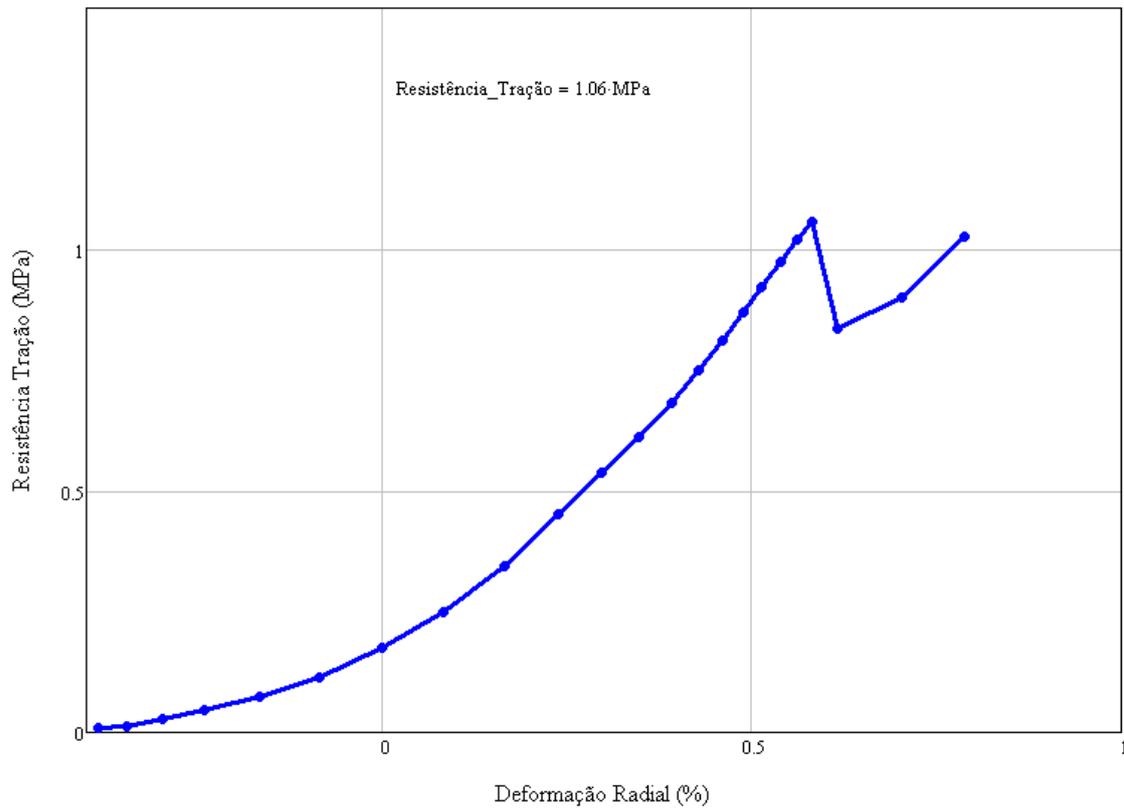


Figura 53 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-04A.

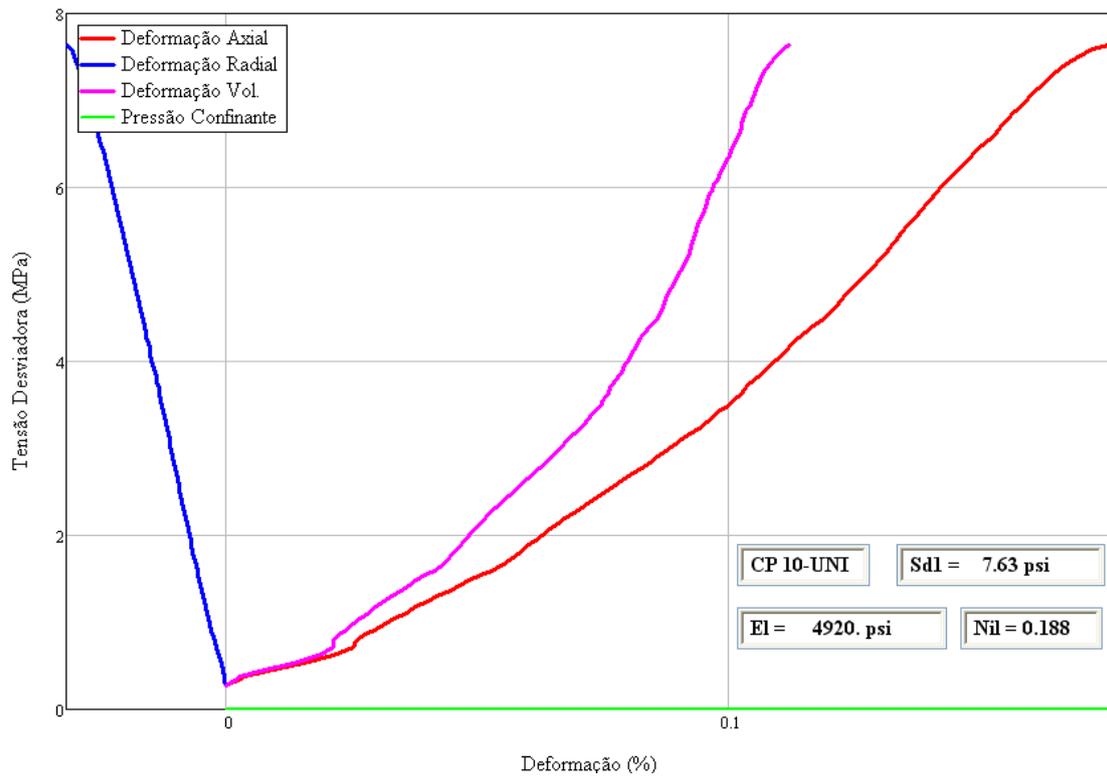


Figura 54 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio uniaxial do CP-10.

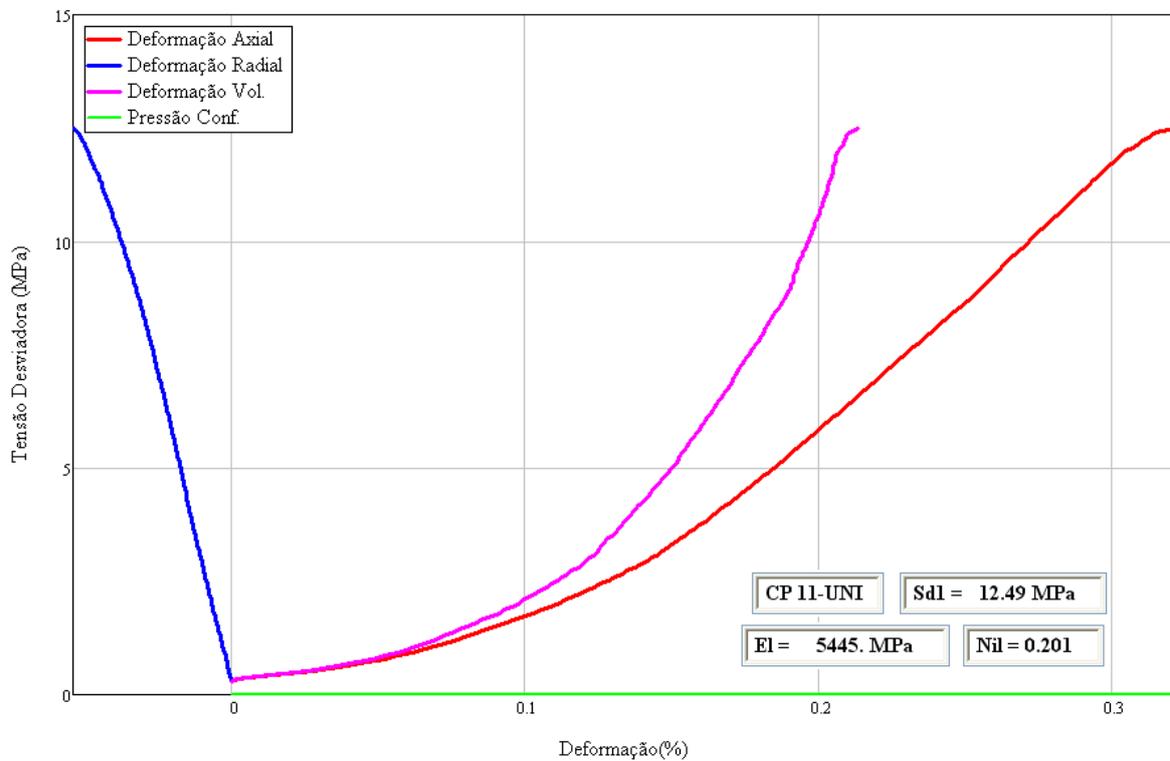


Figura 55 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio uniaxial do CP-11.

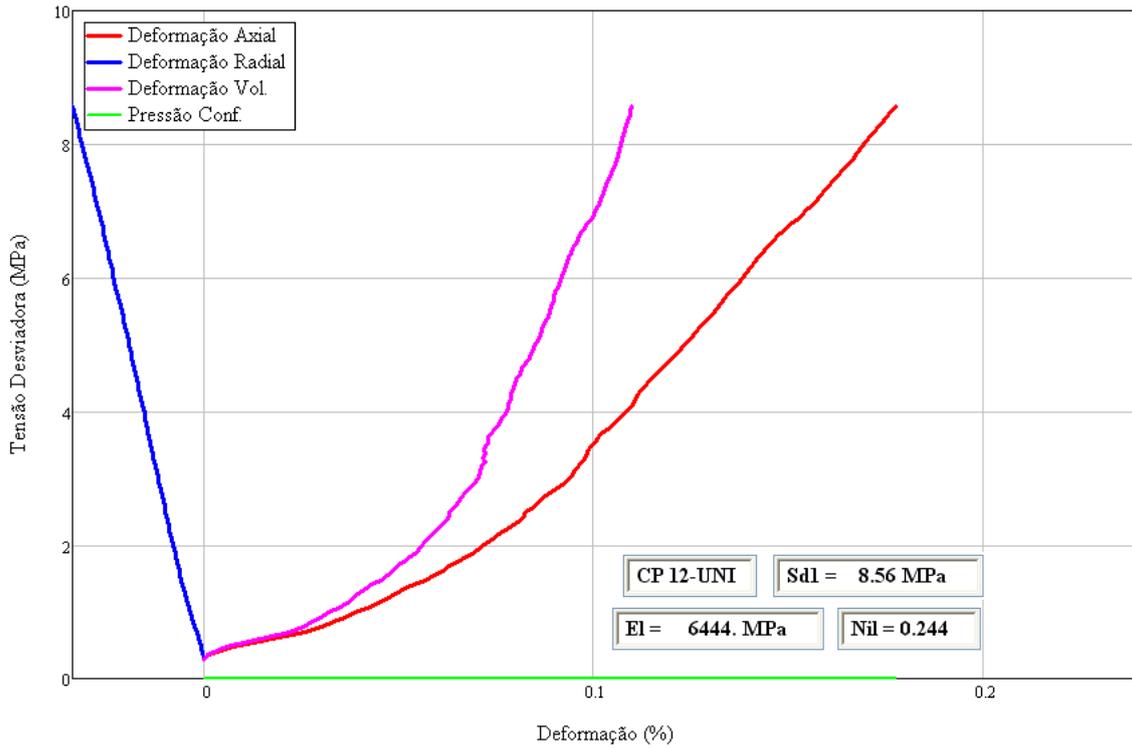


Figura 56 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio uniaxial do CP-12.

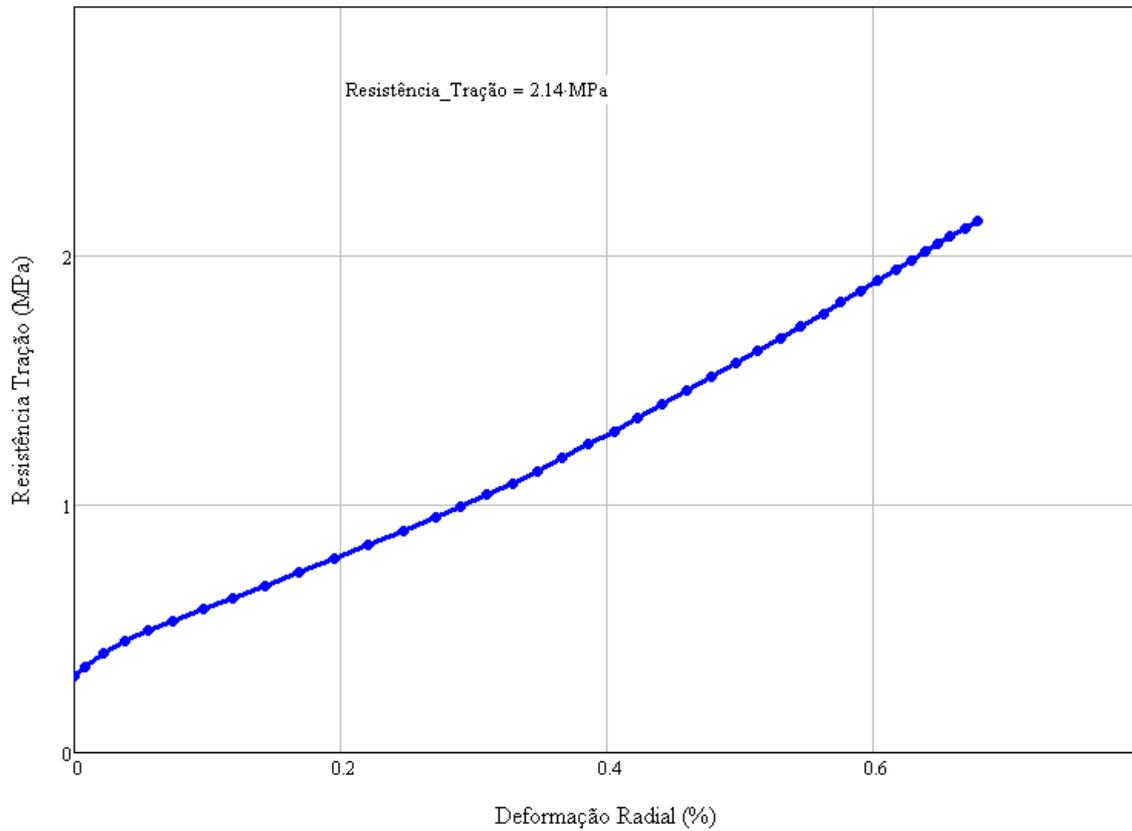


Figura 57 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-13A.

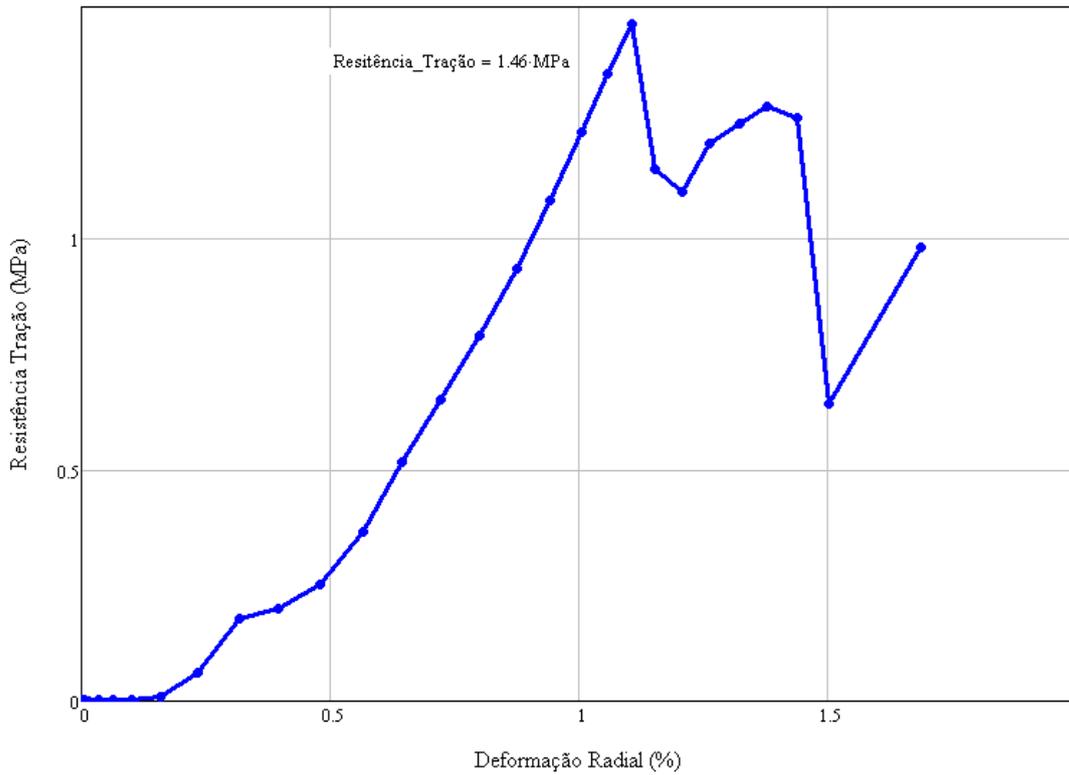


Figura 58 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-15A.

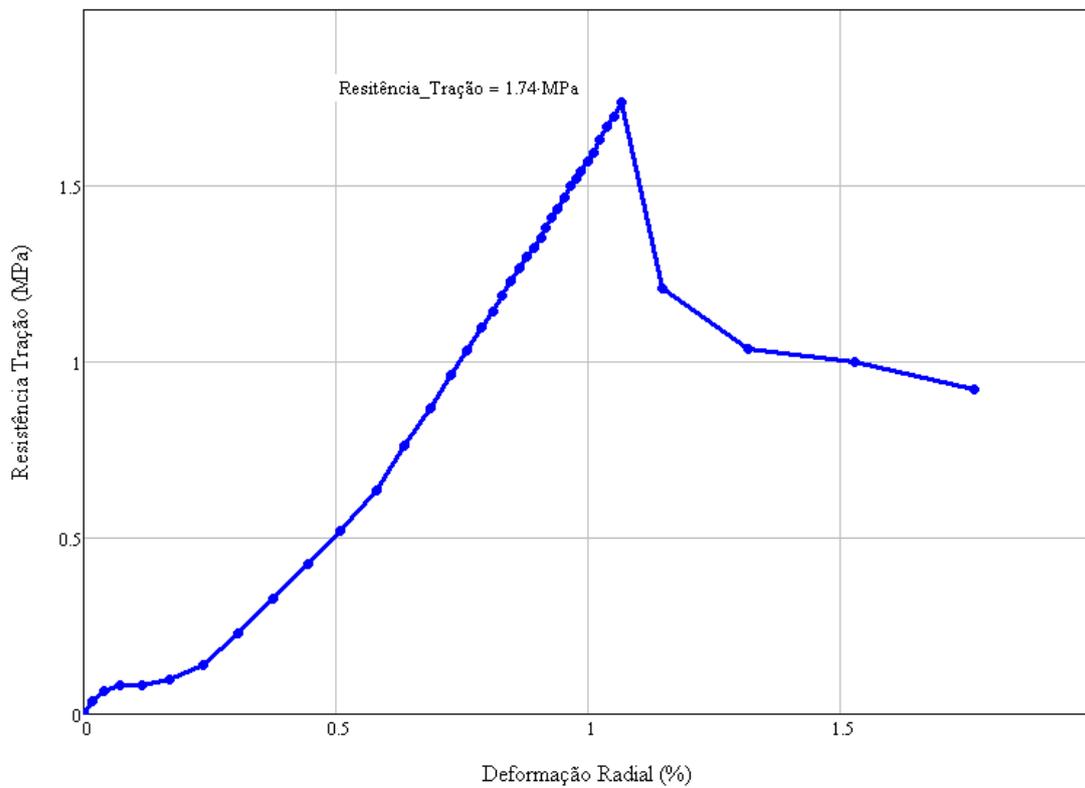


Figura 59 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-16A.

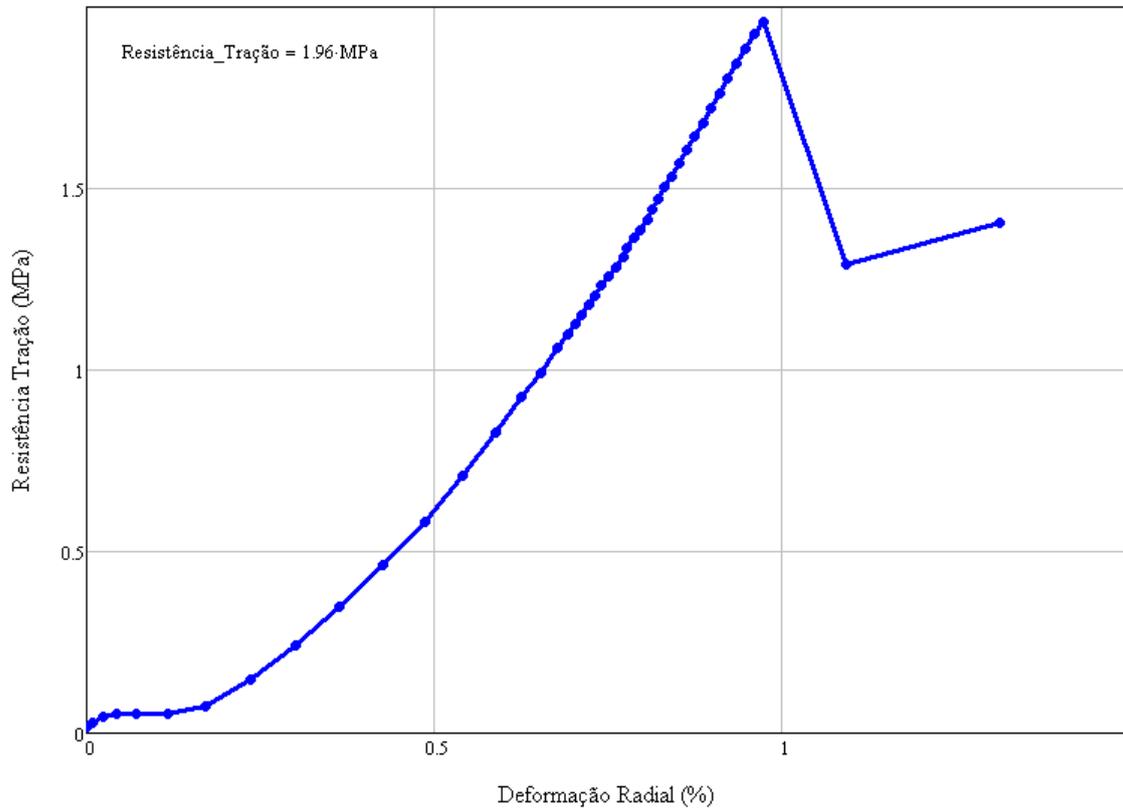


Figura 60 – Gráfico de deformação “radial” vs resistência a tração do ensaio brasileiro CP-17A.

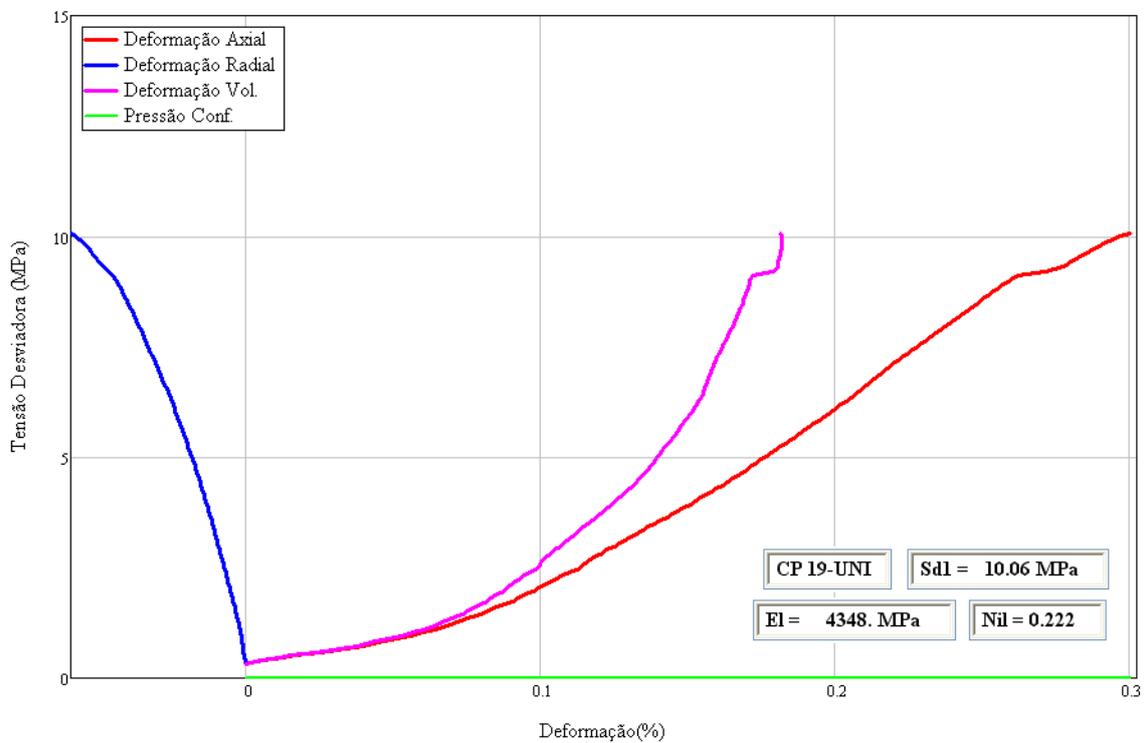


Figura 61 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio uniaxial do CP-19.

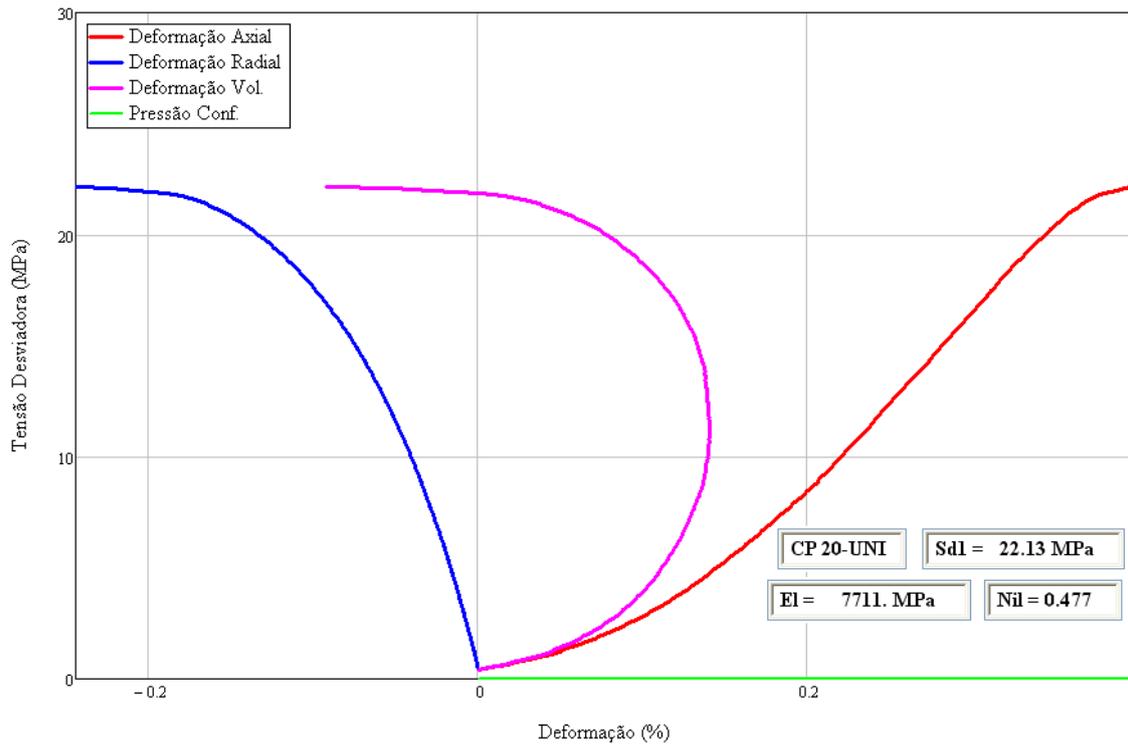


Figura 62 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio uniaxial do CP-20.

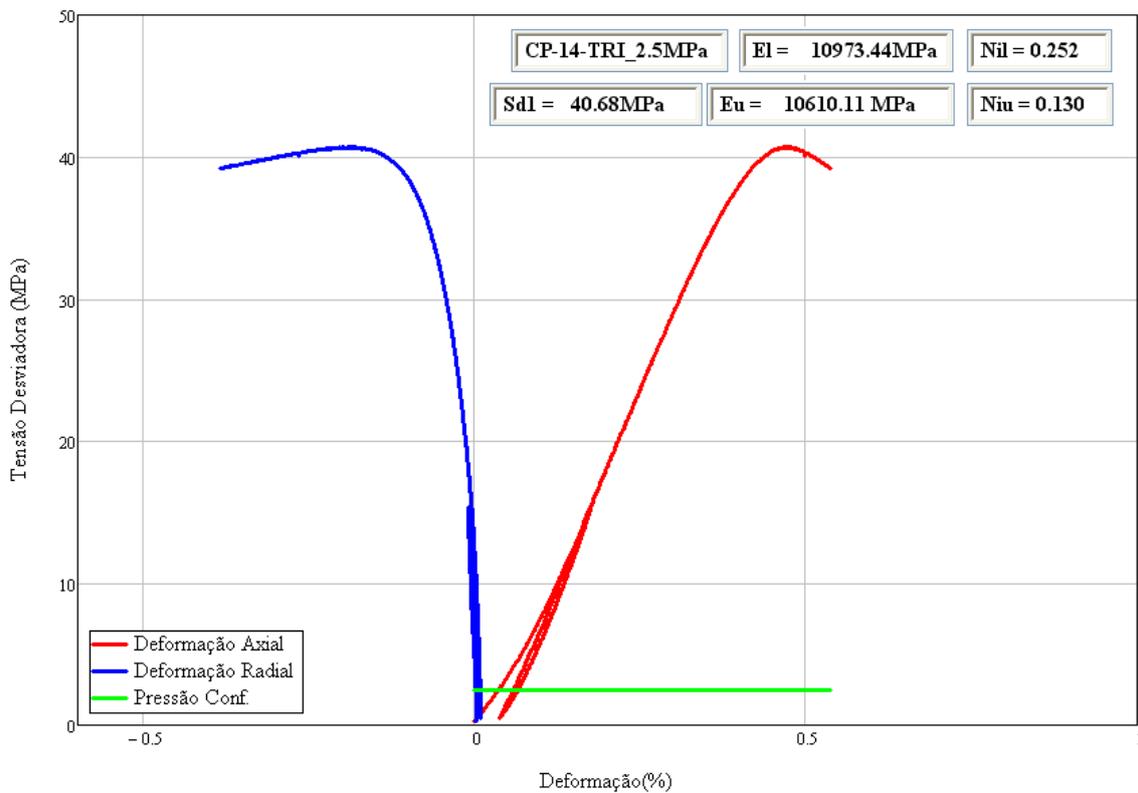


Figura 63 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-14, com confinante de 2.5MPa.

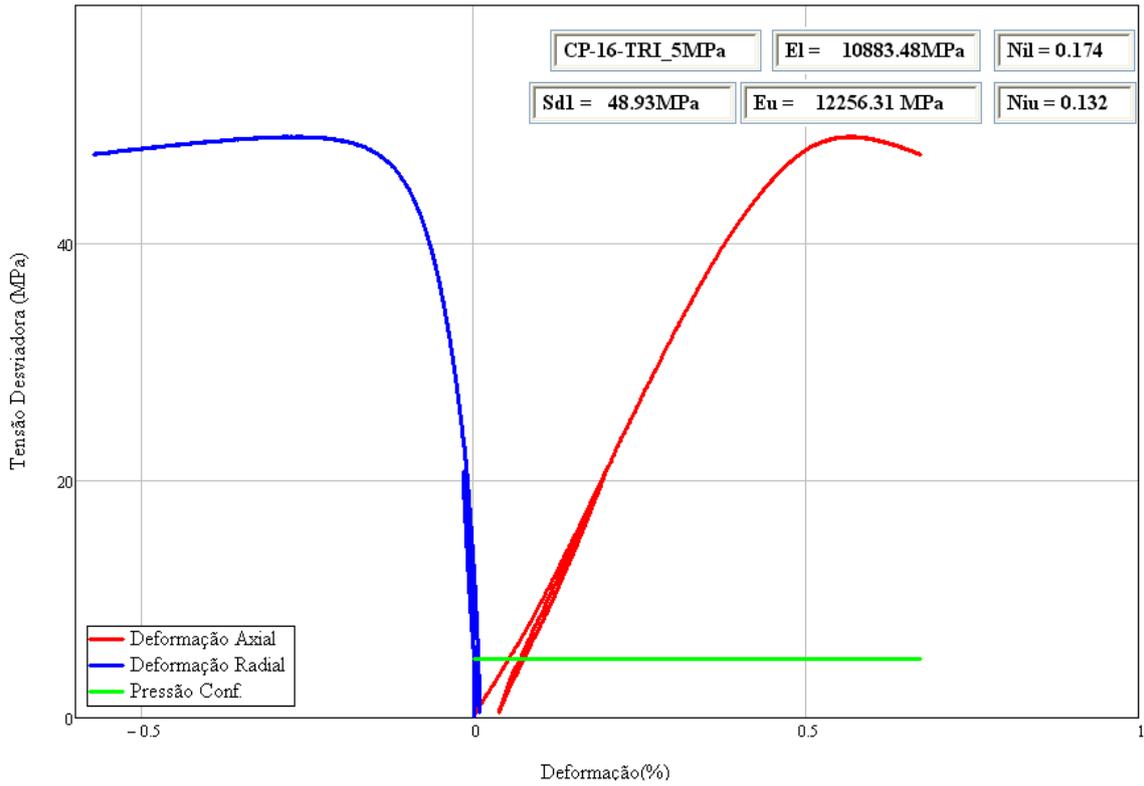


Figura 64 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-16, com confinante de 5MPa.

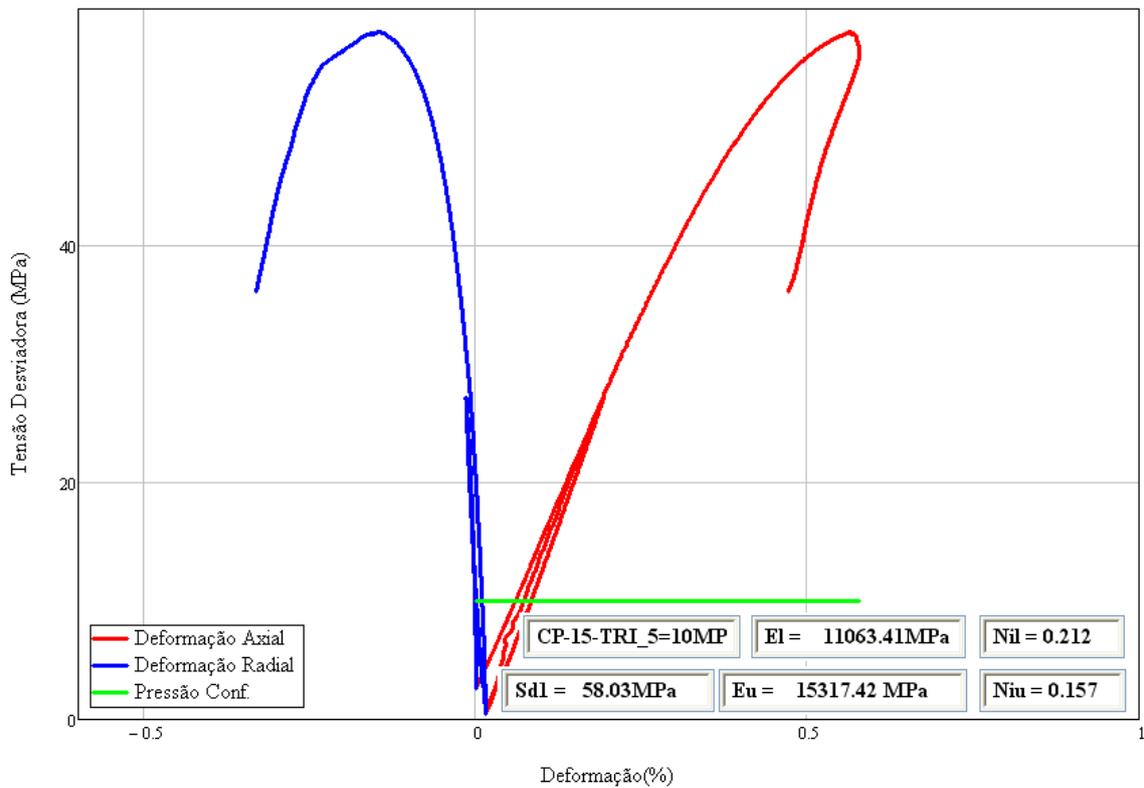


Figura 65 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-15, com confinante de 10MPa.

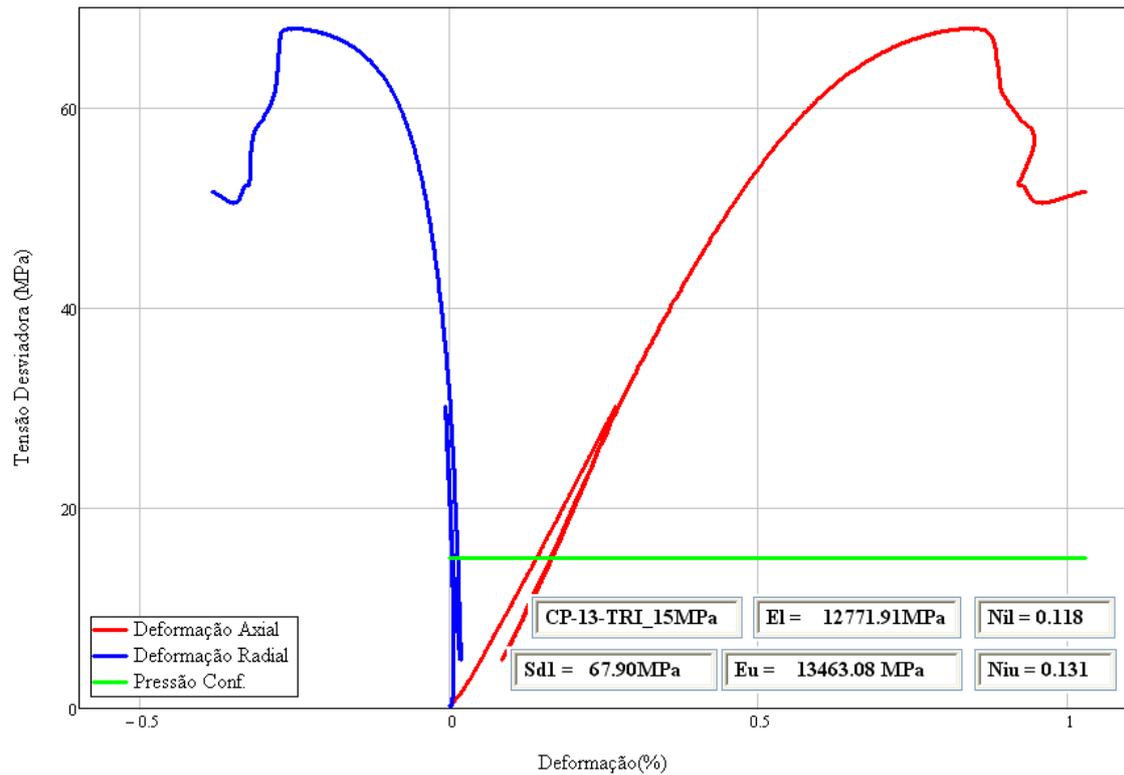


Figura 66 – Gráfico de deformação axial, radial vs tensão desviadora do ensaio compressão convencional triaxial do CP-13, com confinante de 15MPa.

A envoltória de Mohr-Coulomb, para o bloco B, foi traçada no diagrama  $p$  $q$  e a equação da envoltória onde constam os valores dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno está apresentada abaixo.

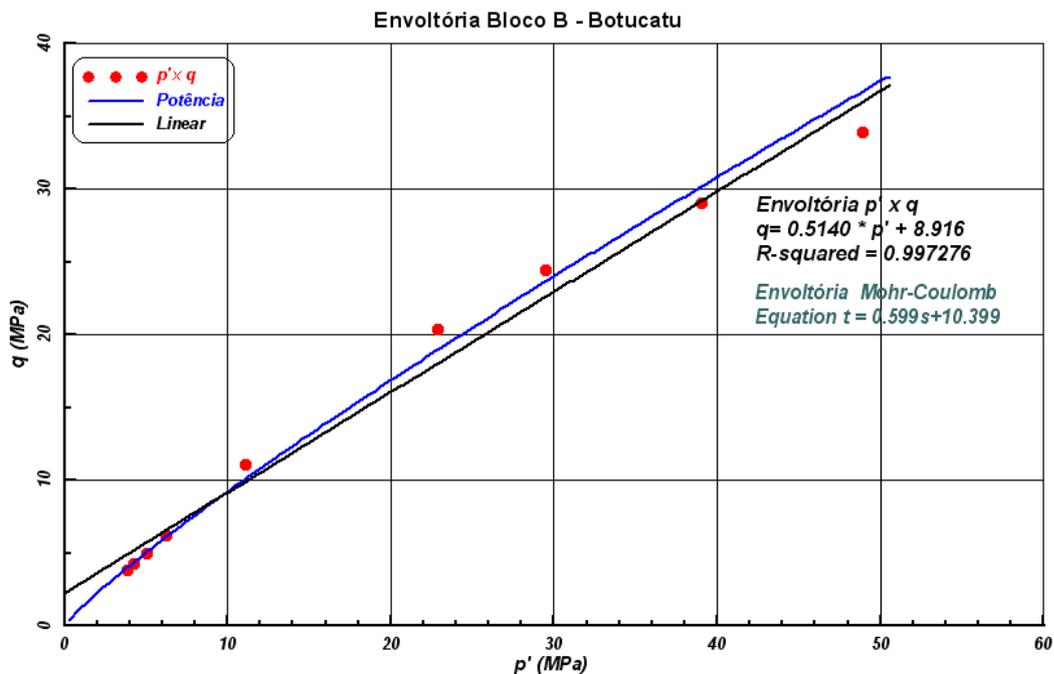


Figura 67 – Envoltória de Resistência com base nos ensaios realizados no Bloco B.

Como tentativa inicial de se estimar o comprimento característico, foi realizada análise granulométrica. O comprimento característico adotado foi o correspondente ao  $d_{50}$  conforme Figura 68. Para o bloco B o comprimento característico é de 0.18mm, supondo  $l = d_{50}$  [18], conforme Figura 69.

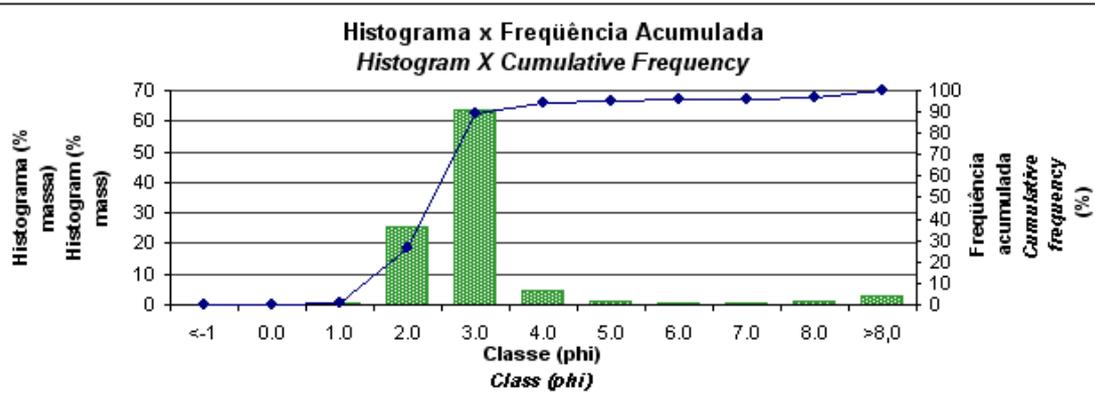
## ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Poço: **ARENITO BOTUCATU**Profundidade(m): **Bloco B**Nº Amostra: **186/09**Tipo: **Outros**Data Análise: **6/12/2009**

Caixa:

Solicitante: **Karen Ribeiro (TEP)**Técnico Resp.: **Carlos Jorge**Data Entrada: **6/1/2009**

FRAÇÃO	mm	inch	MESH	CLASSE (Phi)	Massa (g)	% em Massa	% Acumulada
grânulo	4,000-2,000	0,0787	10	<-1	0,000	0,00	0,00
areia m. grossa	2,000-1,000	0,0394	18	0,0	0,000	0,00	0,00
areia grossa	1,000-0,500	0,0197	35	1,0	0,949	0,78	0,78
areia média	0,500-0,250	0,0098	60	2,0	30,870	25,31	26,09
areia fina	0,250-0,125	0,0049	120	3,0	77,400	63,46	89,54
areia m. fina	0,125-0,061	0,0025	230	4,0	5,522	4,53	94,07
Silte grosso	0,061-0,032	0,0012	400	5,0	1,194	0,98	95,05
	0,032-0,016	0,0006		6,0	0,606	0,50	95,54
silte fino	0,016-0,008	0,0003		7,0	0,491	0,40	95,95
	0,008-0,004	0,0002		8,0	1,129	0,93	96,87
argila	<0,004			>8,0	3,814	3,13	100,00

MASSA INICIAL(g): **122.254**MASSA FINAL (g): **121.976**PERDA(g): **0.278**% GRÂNULO: **0.00**% AREIA: **94.07**% SILTE: **2.80**% ARGILA: **3.13**Phi MÉDIO: **3.06** *Areia muito fina (3<Phi<=4)**(Wentworth, 1922)*SELEÇÃO: **0.46** *\*Moderadamente selecionado (>=0,45 a <0,65)**(Fetters, 2006)*MÓDA: **3***\*seleção = desvio padrão de Phi*MEDIANA: **5**% CARBONATO: **0.00**MÉTODO DE ANÁLISE DA FRAÇÃO AREIA: **Peneiramento**MÉTODO DE ANÁLISE DA FRAÇÃO FINA: **Analizador de Partículas - RX**MÉTODO DE ANÁLISE DE CARBONATO: **Manômetro Digital**Incerteza Expandida da Medição (U) # Areias (Phi <= 4): **± 2,24 % , k= 2,6**# Silte e Argila (Phi > 4): **± 0,59 % , k= 2,9**# %CaCO<sub>3</sub>: **± 1,6 % , k= 2,2**

A Incerteza expandida (U) relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência K, o qual para uma uma distribuição t com neff graus de liberdades efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

**OBSERVAÇÕES: Afloramento**

Figura 68 – Ensaio de Granulometria realizado no Bloco B.

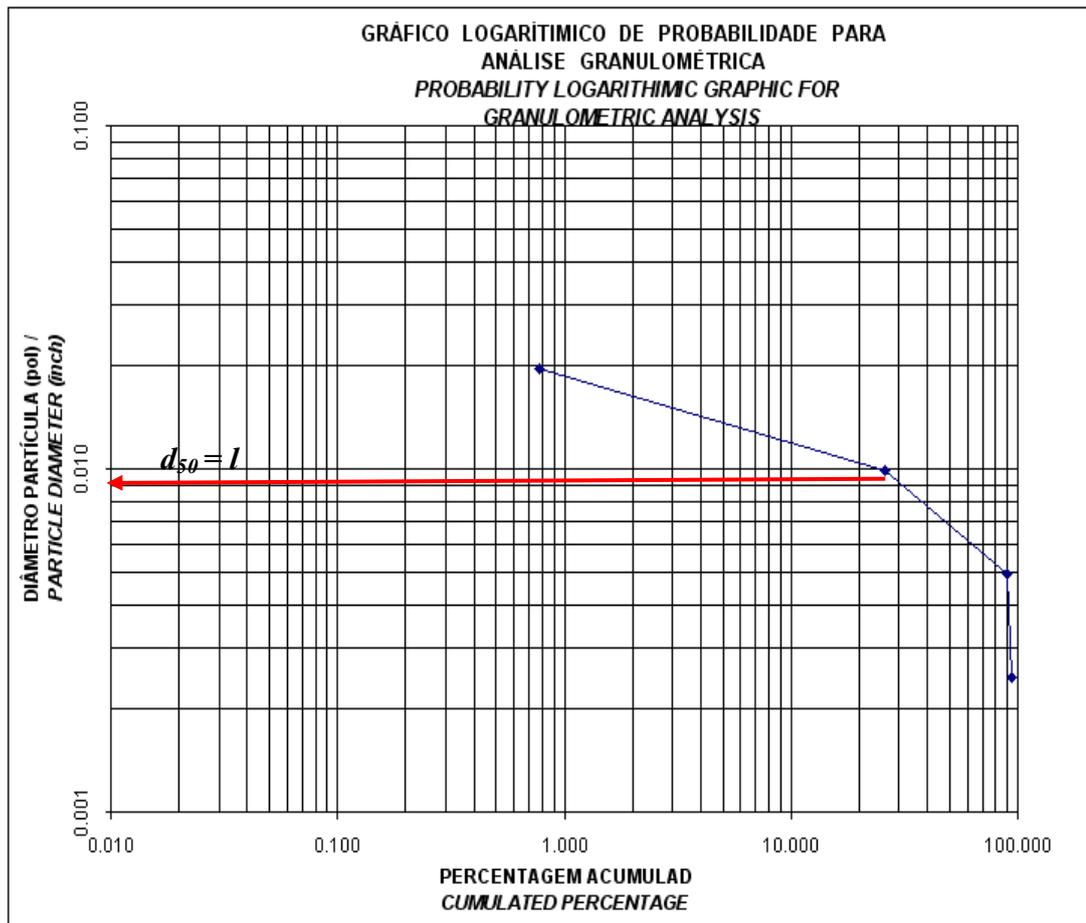


Figura 69 – Gráfico percentagem acumulada vs diâmetro da partícula referente ao Ensaio de Granulometria realizado no Bloco B.