

5. Resultado dos ensaios experimentais

Os resultados serão apresentados seguindo a ordem utilizada para a descrição dos ensaios no capítulo anterior.

5.1. Resultados dos ensaios uniaxiais

No total foram ensaiadas seis (6) amostras, nas quais (como foi mencionado no capítulo anterior) foi feito o controle de deformação, isto para analisar o comportamento pós-pico do material. Para rochas que exibem comportamento frágil, quando carregadas em compressão uniaxial não é suficiente o controle da taxa de ruptura, portanto, a “preservação” das amostras (sem rupturas explosivas) nas regiões de pico e pós condicionaram a preferência pelo controle de deformação.

A Figura 28 mostra comportamento da curva tensão-deformação de dois corpos de prova do arenito A

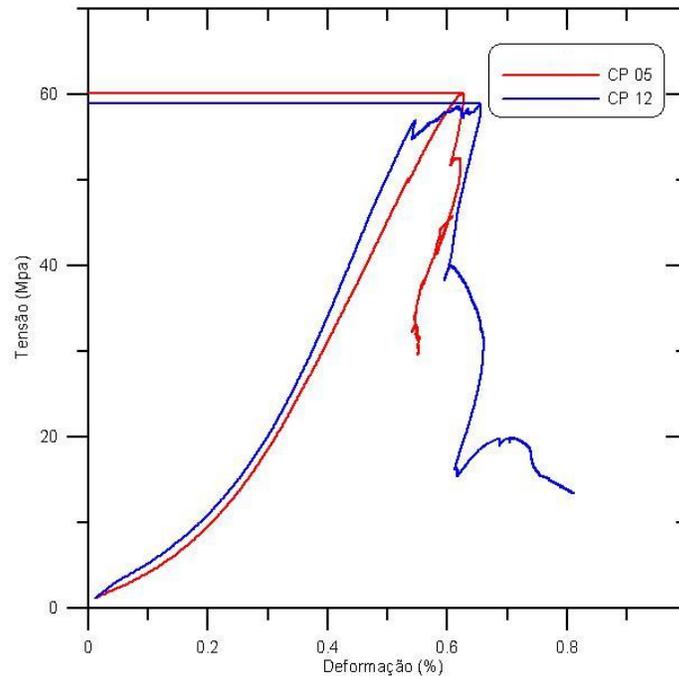


Figura 28.- Comportamento tensão-deformação dos corpos de prova 05 e 12 do arenito A

Segundo Wawersick & Fairhurst (1970) é possível distinguir entre duas classes de comportamento de rocha, sob compressão uniaxial além do pico de tensão máxima. Os autores acima definem os materiais de classe I como aqueles cujo comportamento é caracterizado por uma propagação estável de fraturas, tal que um trabalho externo deva ser realizado para que a amostra sofra uma posterior redução em sua capacidade de suportar a carga aplicada. Nos materiais de classe II ocorre uma propagação instável dessas fraturas em face da energia de deformação acumulada na rocha, que é suficiente para manter o crescimento de fissuras logo depois do pico de resistência tenha sido ultrapassado. O exemplo de este comportamento é apresentado na figura 28.

Para o caso das amostras ensaiadas elas apresentam o comportamento similar como aquele definido como tipo II (ver figura 29).

Os arenitos que apresentam algum tipo de cimentação, mesmo quando muito brandos, têm comportamento frágil e com trecho de pós-pico tipicamente de classe I. Isto ocorre provavelmente porque estas rochas têm rigidez baixa e não possibilitam que a máquina de testes acumule energia de deformação, sobretudo quando ensaiadas em sistemas rígidos e servo-controlados. Portanto, é aceitável supor que o comportamento de classe II seja se não característico mais provável em rochas de alta rigidez.

Fatores ligados às características da máquina de testes, às taxas de deformação aplicadas durante os ensaios, à geometria dos corpos de prova e à própria estrutura da rocha exercem significativa influência sobre a forma da curva tensão-deformação na região de pós-pico (Wawersick & Fairhurst, 1970; Hudson et al., 1972).

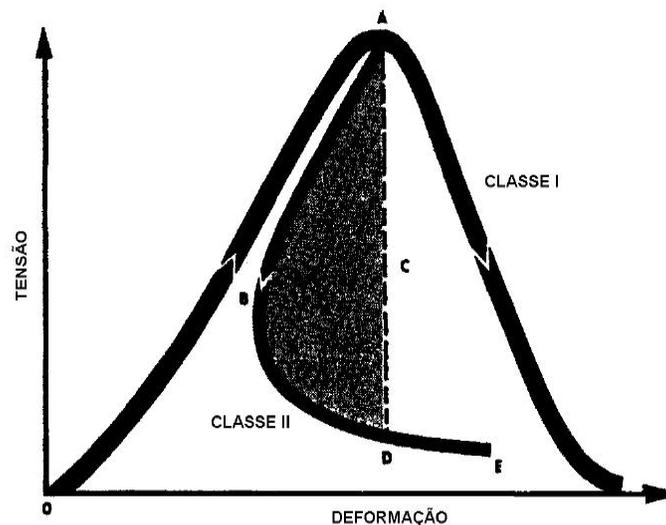


Figura 29.- Classificação do comportamento tensão-deformação de rochas sob compressão uniaxial durante o amolecimento. Wawersick & Fairhurst (1970)

A figura 30 mostra o modo de ruptura encontrado para o CP05 (ruptura por cisalhamento)



Figura 30.- Corpo de prova # 5. Logo após do ensaio UCS

Logo após determinar o valor da resistência à compressão uniaxial, foram definidos os trechos de descarregamento – recarregamento com o objetivo de conhecer melhor o comportamento elasto-plástico da rocha.

A Figura 31 apresenta o comportamento tensão-deformação encontrada para os CPs 08 e 10.

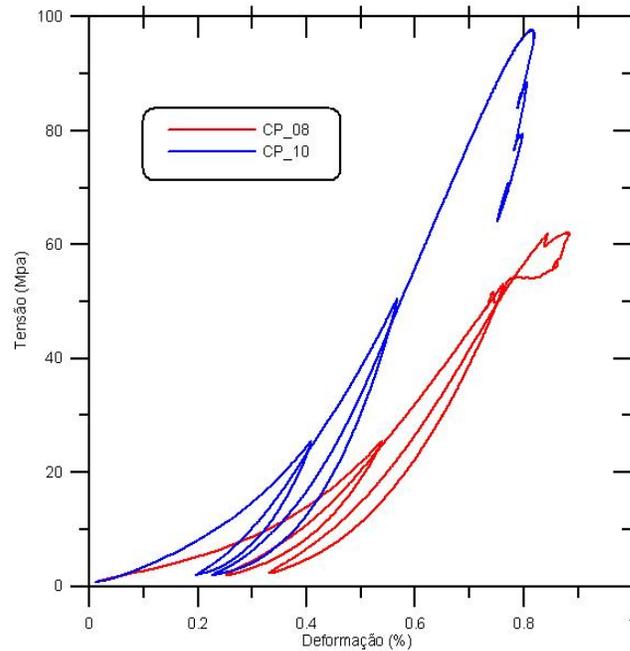


Figura 31.- Comportamento tensão-deformação com ciclos de descarregamento e re-carregamento

Como se pode observar, além das amostras terem valores de resistência máximas bem diferentes, o CP 10 atingiu quase 100 (Mpa), no entanto o CP 08 alcançou a resistência observada nas amostras previamente ensaiadas, 60 (Mpa).

Só uma parte da deformação produzida no carregamento é recuperada no descarregamento seguinte. Comparando as deformações permanentes em cada amostra, observa-se como para o mesmo nível de tensões o CP 08 tem maiores deformações plásticas do que o CP 10.

A recuperação no descarregamento deve-se à energia elástica armazenada nas partículas ao carregar a rocha. No entanto existe um deslizamento inverso entre as partículas ao descarregar, Lambe & Whitman (1969)

Para tensões inferiores à máxima do primeiro ciclo de carga, o arenito tem uma rigidez ainda maior ao voltar a carregar, já que grande parte do deslizamento potencial entre as partículas foi produzida no primeiro ciclo. Ao passar a tensões maiores do primeiro ciclo, a curva tensão-deformação é praticamente a mesma.

Goodman (1989) afirma a dificuldade de definir exatamente o que significa E e ν já que não é simplesmente a tangente da curva virgem (Ver figura 32). Por isso a recomendação de determinar os parâmetros elásticos da curva de recarregamento.

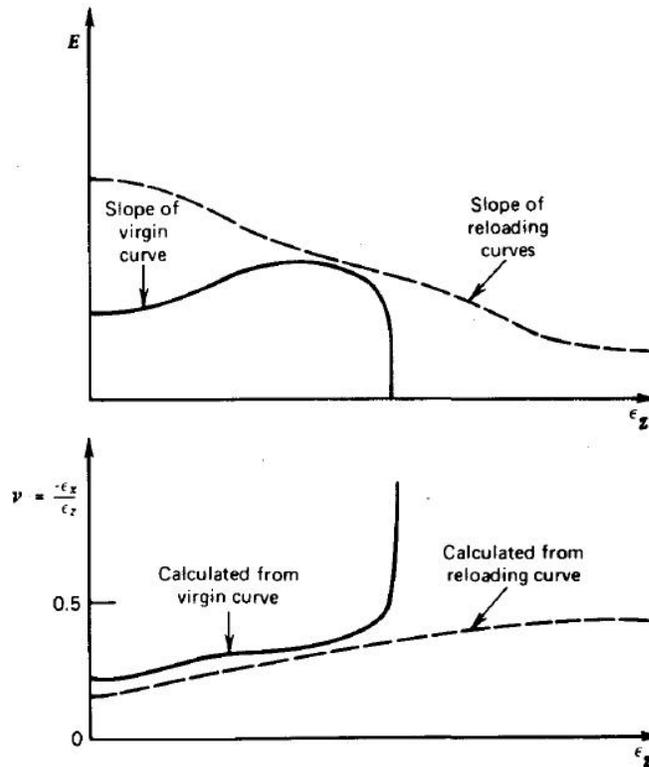


Figura 32.- Curva virgem (traços) e curva re-carregada (continua) para a determinação dos parâmetros elásticos (Goodman, 1989)

Os valores dos coeficientes de elasticidade são determinados a partir das Figuras 31 e 33.

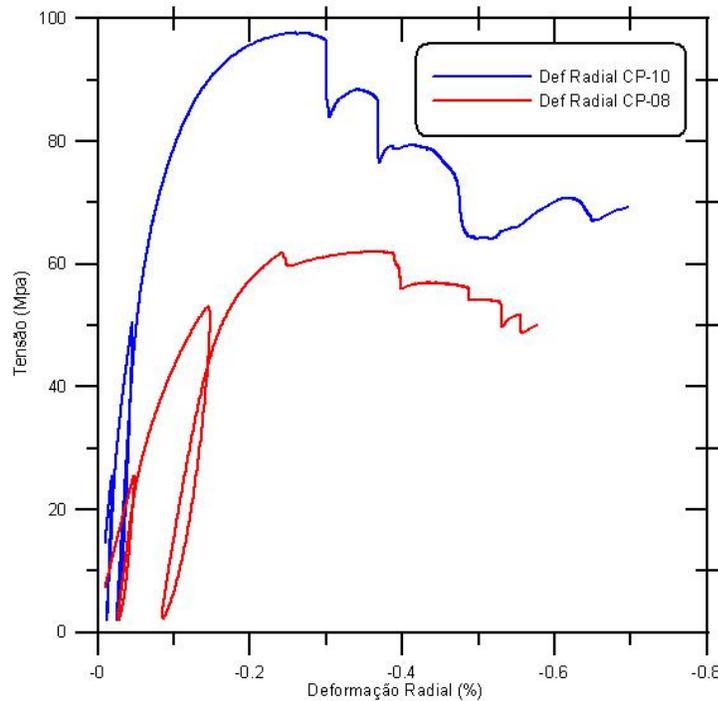


Figura 33.- Comportamento tensão-deformação radial para o cálculo da relação de Poisson

Assim foram estabelecidos os valores de $20E3$ (Mpa) / $2,96E6$ (psi) para o módulo de elasticidade e de 0,22 para o módulo de Poisson. Em dois dos ensaios observou-se a repetibilidade dos resultados.

Existem problemas que envolvem a determinação dos módulos de elasticidade em amostras pequenas. Primeiro, o fato dos extensômetros ficar em o centro da amostra com o comprimento tão pequeno. Adicionalmente, os *caps* afetam a medição. O comprimento da amostra não é tão grande para não garantir o efeito dos *caps*.

5.2.

Resultados dos ensaios com cilindros de paredes espessas (TWC)

Como foi comentado no capítulo anterior, o ensaio *TWC* foi executado em sua forma mais simples, com monitoração das pressões externas e deslocamento do raio externo e sem considerar fluxo.

van den Hoek (1992) propõe que a resistência do cilindro de paredes espessas na ausência de pressão interna pode ser usada como uma estimativa

do carregamento requerido para produzir a falha inicial de uma perfuração em campo.

Foram realizados três ensaios utilizando cilindros de parede espessa. A Figura 34 mostra o resultado encontrado com o CP01.

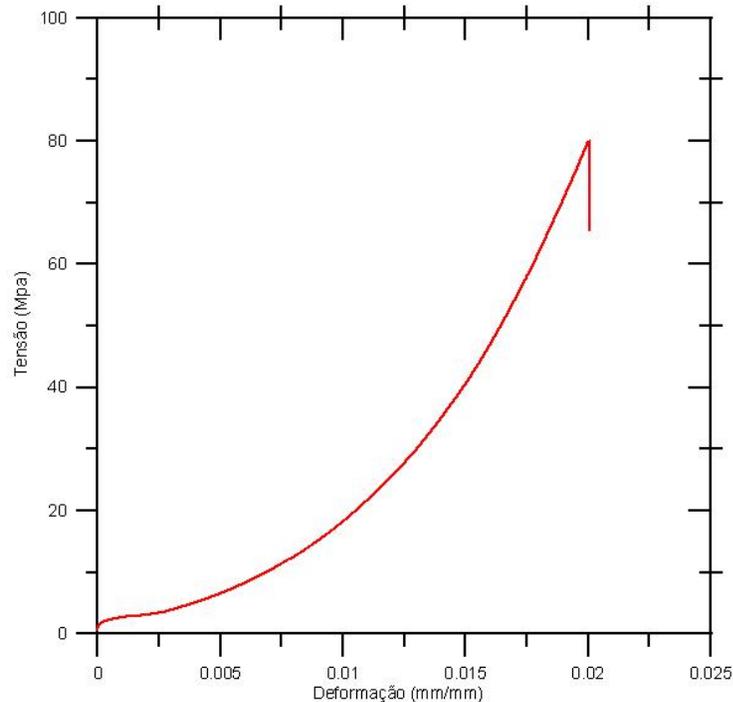


Figura 34.- Comportamento tensão-deformação do CP01 obtido com ensaio em cilindro de parede espessa.

Como pode ser visto o ensaio não foi concluído, já que a célula chegou ao carregamento máximo, 80 (Mpa), e a amostra não rompeu. O ensaio teve que ser interrompido e foram avaliados os motivos para que isto tenha ocorrido.

O CP01 teve sua geometria alterada para uma relação de diâmetros ID:OD 2:1. Isto foi feito com o objetivo de procurar alcançar o valor máximo de resistência da rocha naquelas condições.

Paralelamente aos ensaios foram feitas análises numéricas para sua simulação. Estas análises foram realizadas diferentes relações ID:OD 3:1 e 2:1, porém, mantendo as características do ensaio para observar o comportamento das tensões ao redor do furo. Para isso foi usado o programa de elementos finitos Abaqus; detalhes deste análise serão descrito no próximo capítulo, todavia os resultados comparativos de ambas geometrias se apresentam na seguinte figura.

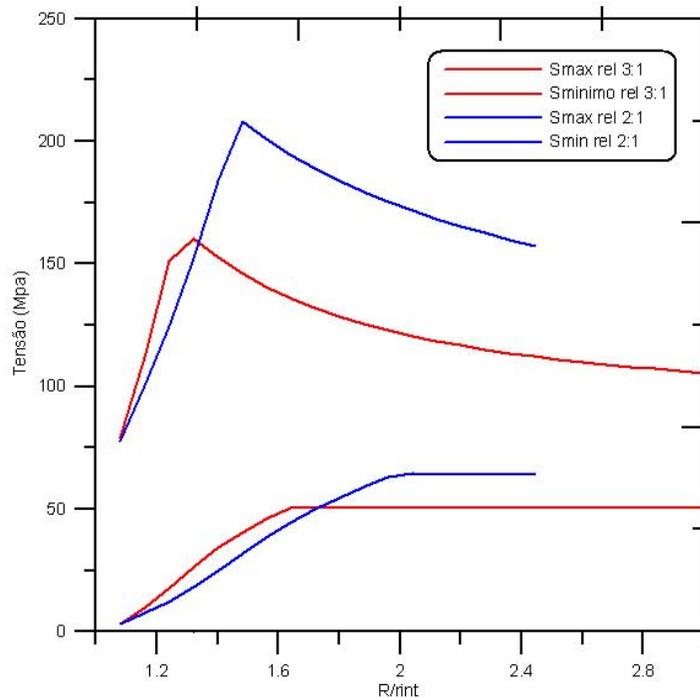


Figura 35.- Tensões máxima e mínima ao longo do raio obtido de simulações numéricas de ensaios de cilindros de parede espessa.

Pode se observar como o nível de tensões no interior da rocha atinge valores de quase dois e três vezes a tensão aplicada no exterior para a geometria 3:1 e 2:1 respectivamente. Sendo que no caso do primeiro ensaio não foi o suficiente para colapsar a rocha. É importante ressaltar que embora a simulação mostre a plastificação do furo, o corpo de prova não deu sinais de amolecimento nem sequer no momento de modificar a geometria do mesmo.

Os resultados obtidos da análise numérica foram comparados com uma solução analítica detalhada no Apêndice A. A figura 36 mostra a boa concordância entre a solução numérica e a solução analítica. Na mesma figura compara-se o uso dos modelos Mohr-Coulomb e Drucker Prager; notando-se neste ultimo uma maior plastificação do raio para um mesmo nível de tensão.

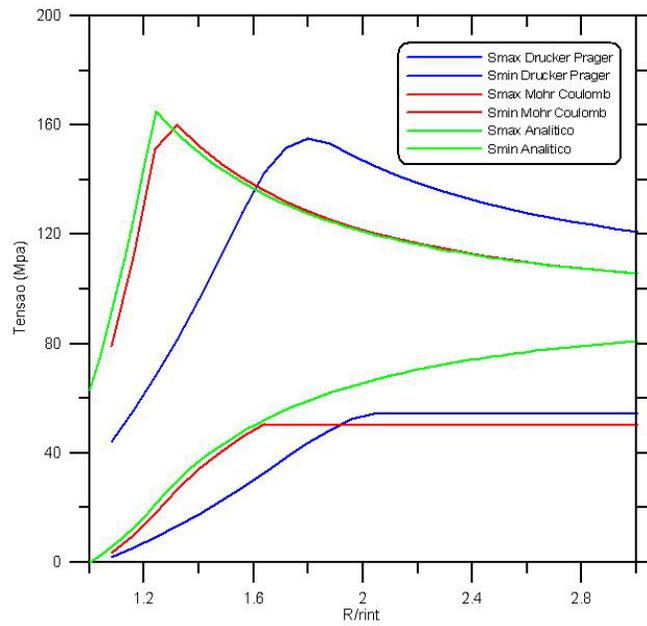


Figura 36.- Comparação das tensões máximas e mínimas do modelo analítico e numérico ao longo do raio

O ensaio com a relação de diâmetros 2:1 foi feito e o resultado é apresentado na Figura 37.

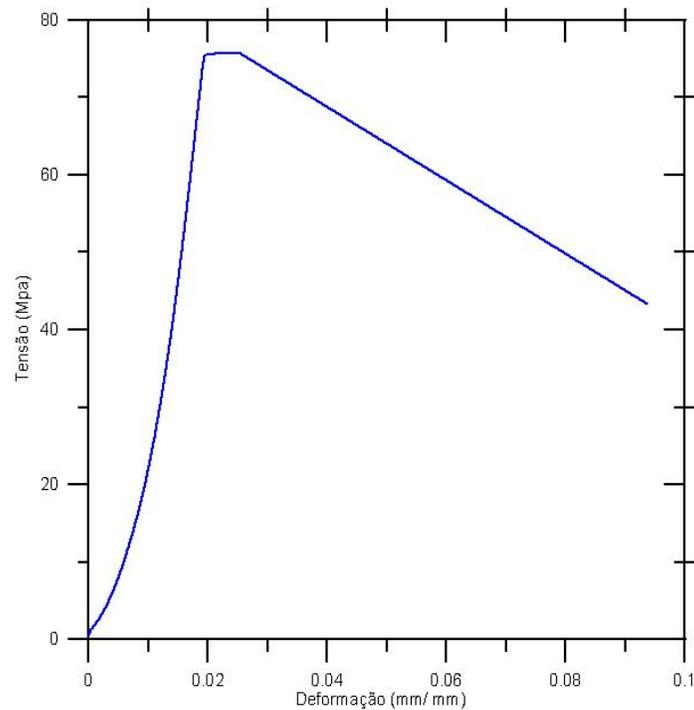


Figura 37.- Comportamento tensão-deformação do CP01 obtido com ensaio em cilindro de paredes espessas com relação de diâmetros 2:1

Neste caso o colapso da rocha foi atingido para um valor de pressão externa de 75 (Mpa). Por outro lado se apresenta a ruptura do arenito ensaiado da figura 35

Wu e Tan (2000) definiram que a grande diferença entre o valor UCS e o *TWC*, é basicamente porque, a resistência do material no ensaio UCS é unicamente uma medida da resistência do material cimentante (devido às condições do ensaio, sem confinamento), no entanto, no caso do ensaio *TWC*, a resistência ao colapso é uma combinação da resistência do material cimentante e a resistência dos grãos de areia (devido à tensão deviadora).

Segundo a bibliografia, Wu & Tan (2000), a resistência reportada do *TWC* corresponde as tensões tangenciais no diâmetro interno do furo que excede a resistência à compressão simples (UCS) por um fator de 2 a 5. Nestes ensaios, a relação ou fator entre *TWC* e UCS obtida para amostras de 8 mm de diâmetro interno foi de 4,5 (arenito de Berea) e um fator de 9 para arenitos do Mar do Norte. Os autores sugerem que esta diferença seja devida à dependência do Modulo de Young pelas tensões confinantes o que causa que o ponto da tensão tangencial máxima se desloque da parede ao interior da rocha. No caso dos ensaios executados a relação diminui para 1,15 tendo em conta que o diâmetro interno é de 19 mm.



Figura 38.- Falha da rocha no ensaio do cilindro ôco

Outro fator importante observado nesta amostra foi o tipo de falha apresentada (figura 38). Segundo o estudo feito por Papamichos (2008) a produção de areia aumenta rapidamente com o acréscimo das tensões externas, devido ao rápido desenvolvimento da falha tipo fenda. A razão desta rápida evolução deve-se ao fato da rocha falhar como grãos independentes ou

pequenas estruturas as quais não tem a possibilidade para formar arcos estáveis.

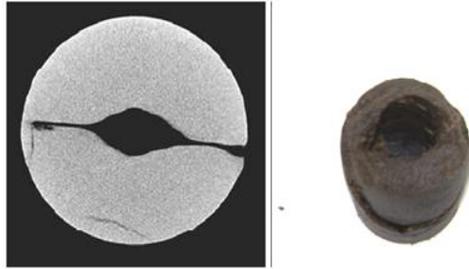


Figura 39 Comparação do tipo de falha do trabalho de Papamichos com o ensaio *TWC*

Foram feitos mais dois ensaios e a figura 39 apresenta o comportamento nos corpos de prova 3 y 4, sendo notável a similaridade das curvas e o valor de *TWC* atingido.

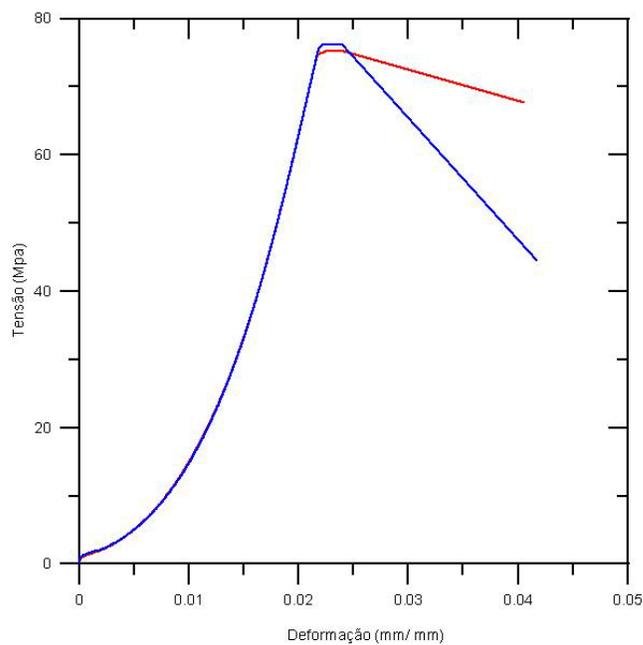


Figura 40.- Comportamento tensão-deformação do ensaio *TWC*.
CP 03 e CP 04

Para saber se os resultados obtidos encontravam-se em um intervalo aceitável, optou-se por colocá-los junto com correlações e dados coletados (ver figura 39) de diferentes literaturas. Tronvoll (1997)

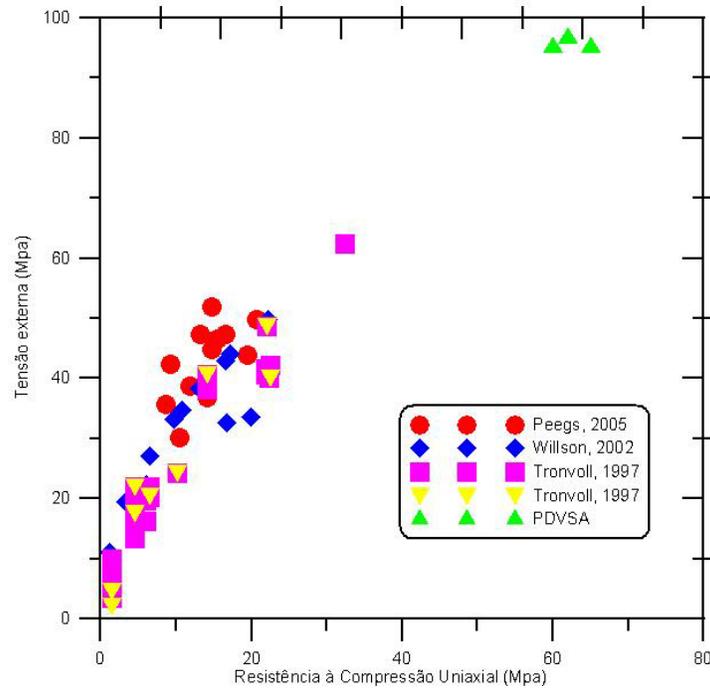


Figura 41.- Comparação dos resultados do *TWC* em função da resistência à Compressão Uniaxial.

A Figura 41 mostra que os valores de resistência obtidos com os ensaios de compressão simples e cilindros de parede espessa nos arenitos A são mais elevados dos que aqueles reportados na literatura, mas parecem se enquadrar na tendência geral aparente. Isto confirma o que foi mencionado anteriormente, tanto as condições do poço quanto as características da rocha fazem este estudo particularmente atípico