

1 Introdução

Na literatura são encontrados diferentes mecanismos de ruptura conforme teoria e ensaios apresentado nas seguintes referências: [21], [22], [24] e [26]. Neste trabalho são destacados três diferentes formas de banda de cisalhamento ao redor de cavidade circular, sendo estas: *breakout* com formato de orelha de cachorro, *breakout* com formato de cúspide, cujo mecanismo de ruptura é por *splitting*, *breakout* com formato de uma espiral.

Para observar os diferentes mecanismos de ruptura ao redor de cavidade circular foram realizados ensaios biaxiais e ensaios em amostras cilíndricas de parede espessa, com arenito proveniente de afloramento de Botucatu. Foram realizadas tomografias antes e depois do ensaio a fim de verificar as deformações ao redor da cavidade impostas devido ao carregamento.

Nos ensaios biaxiais foram realizados cinco ensaios com carregamento axial, três ensaios com relação de tensões $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ de 2:1, um ensaio com relação de tensões $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ de 1:1 aproximadamente e um ensaio com relação de tensões $\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ de 3:1. Os três primeiros ensaios têm como finalidade obter formatos de banda de cisalhamento similar a orelha de cachorro. O quarto ensaio tem como finalidade obter formatos de banda de cisalhamento similar a um espiral e por fim o último ensaio espera observar uma banda cisalhante com formato de cúspide.

Para os ensaios de parede espessa, TWC, foram realizados seis ensaios cada dois com uma relação OD: ID, sendo estas 2:1, 3:1 e 4:1, também com a finalidade de observar diferentes mecanismos de rupturas. Conforme a relação OD/ID aumenta, o formato da banda cisalhante passe de côncava, mais similar ao formato de orelha de cachorro, para convexa, similar a cúspide. Como a célula utilizada neste ensaio permite a realização de tomografia durante o ensaio, foi

realizado acompanhamento em tempo real das deformações ao redor da cavidade, observadas ao longo dos ensaios, através de tomografia.

O segundo objetivo deste trabalho é encontrar formulações teóricas e modelos constitutivos que representem o modo de ruptura da cavidade circular, e utilizá-las nas simulações numéricas. Neste trabalho o comportamento mecânico do contínuo foi abordado de duas formas: i) Teoria clássica e ii) Modelo generalizado de Cosserat. A segunda abordagem, por dispor de um grau de liberdade extra, permite a reprodução numérica de algumas feições observadas ao redor das cavidades circulares em testes de laboratório de maneira mais realística. A teoria clássica de contínuo foi associada somente ao modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. Já para Cosserat, foram utilizados dois modelos constitutivos: Mohr-Coulomb e Bogdanova-Lippmann Modificado.

As simulações físicas realizadas em ensaios poliaxiais desenvolveram no meio, instabilidades e bifurcações, tal como a localização de deformações em bandas de cisalhamento de materiais granulares. A homogeneidade do material é perdida em certo estágio de deformação e estas heterogeneidades geradas têm comportamento vinculado à microestrutura do material [18].

O contínuo generalizado incorpora na teoria aspectos mecânico dos meios descontínuos não acessíveis no meio contínuo clássico, ou seja, na descrição do material, há parâmetros intrínsecos da partícula nas suas leis constitutivas [9] e em contrapartida não há a necessidade de descrever todas as discontinuidades do maciço como na abordagem descontínua, já que o problema em estudo é o da bifurcação e da localização da banda de cisalhamento, e nem o tempo computacional é tão elevado como nesta última abordagem.

E por fim, com as simulações físicas realizadas e a teoria postulada foram realizadas simulações numéricas, que têm por finalidade reproduzir o comportamento do material observado nestes ensaios. A ferramenta utilizada foi o Tectos versão 5.3, desenvolvida em projeto contratado pela Petrobras junto a Tecgraf/PUC.

Realizaram-se simulações numéricas para o contínuo clássico e de Cosserat. As simulações numéricas utilizaram elementos finitos, com técnica iterativa explícita da relaxação dinâmica com amortecimento global e técnica implícita com algoritmo de Newton_Raphson Modificado.

Na tentativa de representar de maneira similar o comportamento do arenito de Botucatu observado nos ensaios foram utilizados diferentes modelos constitutivos. O modelo utilizado para o contínuo clássico foi Mohr-Coulomb e para o contínuo de Cosserat foram utilizados os seguintes modelos: Mohr-Coulomb, Bogdanova e Lippmann modificado.

Para o modelo de Mohr-Coulomb, contínuo de Cosserat, foram realizadas duas simulações uma com h_i e G_c cinemático e outra com estático.

1.1. Conteúdo

Esta dissertação compõe-se de nove capítulos nos quais é apresentada a formulação teórica do contínuo generalizado, o princípio do trabalho virtual para o contínuo generalizado, a metodologia para realização e resultados dos ensaios de caracterização mecânica de rochas, metodologia e resultados dos ensaios de simulação física, metodologia e resultados da simulação numérica dos ensaios de simulação física realizados na célula poliaxial e considerações a cerca das simulações físicas e numéricas realizadas.

No segundo capítulo é apresentada a conceituação do contínuo generalizado, uma revisão teoria do princípio do trabalho virtual em especial para o contínuo mencionado acima.

No terceiro capítulo é apresentada uma breve formulação teórica apenas do ponto de vista elástico para o contínuo generalizado, o contínuo de Cosserat, da teoria do 2º gradiente e de tensões momento. O contínuo de Cosserat pressupõe que a partícula apresenta movimento de corpo rígido, sendo assim a partícula apresenta rotações livres e este contínuo possui grau de liberdade extra por isto. O contínuo referente à teoria do 2º gradiente pressupõe que a partícula está sujeita a mesma deformação do contínuo macroscópico. E isto resulta que o tensor relativo de terceira ordem corresponde à segunda derivada do deslocamento e da rotação do contínuo macroscópico, daí o nome da teoria do segundo gradiente. O contínuo referente à teoria de tensões-momento assume que a partícula tem movimento de corpo rígido e que a micro-rotação da partícula é igual à rotação do contínuo macroscópico [8].

No quarto capítulo é apresentada a revisão da formulação teórica para 2D do contínuo de Cosserat tanto para a formulação elástica tanto para a elastoplástica, onde é apresentado a formulação teórica para representar o comportamento de endurecimento e amolecimento que materiais geotécnicos podem apresentar [9].

No quinto capítulo é apresentada a metodologia utilizada nos ensaios de caracterização mecânica de rocha, de tomografia computadorizada, de granulometria e densidade. No sexto capítulo foram apresentados os resultados dos ensaios realizados de caracterização de rocha, densidade e granulometria.

No sétimo capítulo apresenta-se a metodologia e resultados da simulação física realizada em ensaios poliaxiais e cilíndrico de parede espessa.

No oitavo capítulo realiza-se simulação numérica a fim de representar o comportamento real que o maciço rochoso obteve no ensaio de simulação física na célula poliaxial.

No nono capítulo são apresentadas às considerações finais acerca do comportamento observado do maciço rochoso nos ensaios de simulação física e dos resultados obtidos na simulação numérica.