



Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Instituto de Geociências
Departamento de Geologia
Área de Concentração: Geologia de Engenharia e Ambiental

**“APLICAÇÃO DO MODELO
ELASTOPLÁSTICO DE LADE KIM A UM PERFIL DE
INTEMPERISMO DE LEPTINITO”**

Tese de Doutorado

Vanessa Kfuri Vasconcelos

Orientador: Prof. PhD. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.

Novembro/2011

APLICAÇÃO DO MODELO ELASTOPLÁSTICO DE LADE KIM A UM PERFIL
DE INTEMPERISMO DE LEPTINITO

VANESSA KFURI VASCONCELOS

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO REQUISITO PARCIAL A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTORA EM CIÊNCIAS.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

ORIENTADOR: Prof. PhD. EURÍPEDES DO AMARAL VARGAS JUNIOR

RIO DE JANEIRO – RJ – BRASIL

NOVEMBRO 2011

FICHA CATALOGRÁFICA

VASCONCELOS, VANESSA KFURI

Aplicação do Modelo Elastoplástico de Lade Kim a um Perfil de Intemperismo de Leptinito [Rio de Janeiro] 2011.

IV, 165 p. 29,7 cm (Instituto de Geociências – UFRJ, D.Sc., Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2011).

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, realizada no Instituto de Geociências.

1. Perfil de Intemperismo 2. Leptinito 3. Modelo de Lade e Kim

I – IG/UFRJ

II – Título (série)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Vargas por tudo.

Ao Nelson Meirim por ter me apresentado ao D. Marta.

Á todo pessoal do CENPES, especialmente ao Marcos Dantas pelos ótimos ensaios.

Ao Armando Prestes por todo trabalho da calibração indireta e me ajudar a chegar até o final.

Ao Prof. Franklin por me fazer ver o mundo que não é possível ver a olho nu.

Á Raquel Velloso por toda ajuda com a calibração direta.

Ao Quintão, Prof. Emílio, Christina, Tarcísio e todo pessoal do Igeo UFRJ por todo o suporte.

Ao Julio por salvar as amostras do nível 3.

Ao Prof. Cláudio pela tentativa dos perfis do Costa Brava e Paquetá.

Ao Sandro pela segunda coleta de blocos.

Á meus pais e ao pequeno Hans por serem a razão de tudo.

Á amiga Elisa por não ter me deixado desistir.

Aos amigos Marcelo e Jailson, por serem os melhores.

Á todo pessoal da Eletrobrás, pelo suporte.

Ao Cnpq pelo suporte financeiro á parte inicial do trabalho.

RESUMO

RESUMO DA TESE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA/UFRJ COMO REQUISITO PARCIAL NECESSÁRIO A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS

APLICAÇÃO DO MODELO ELASTOPLÁSTICO DE LADE KIM A UM PERFIL DE INTEMPERISMO DE LEPTINITO

VANESSA KFURI VASCONCELOS

NOVEMBRO 2011

ORIENTADOR: Prof. PhD. EURÍPEDES DO AMARAL VARGAS JUNIOR

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

Este trabalho consiste em comparar três níveis de alteração do perfil de intemperismo de Leptinito do morro D. Marta, verificar se o modelo de Lade Kim se adequa aos três níveis de intemperismo, através da comparação das curvas numéricas e experimentais, e identificar se o modelo de Lade Kim atua como um modelo evolutivo, ou seja, se seus parâmetros apresentam alguma relação com o grau de intemperismo das rochas. Para tanto foram realizados ensaios hidrostáticos e triaxiais para os três níveis de alteração do Leptinito, calibrado o modelo de Lade Kim pelos métodos direto e inverso, e traçados gráficos da evolução dos parâmetros do modelo com a porosidade e com o peso específico da rocha, sendo estes utilizados como índices do grau de intemperismo.

ABSTRACT

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO GRADUATED PROGRAMME OF GEOLOGY/ UFRJ AS PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCE

APPLICATION OF LADE KIM ELASTOPLASTIC MODEL TO A LEPTINITE WEATHERING PROFILE

VANESSA KFURI VASCONCELOS

NOVEMBER 2011

THESIS SUPERVISOR: Prof. PhD. EURÍPEDES DO AMARAL VARGAS JUNIOR

SECTOR: GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL

This thesis intends to compare three weathering levels of Leptinite from D. Marta hill, verify if Lade Kim model fits the three weathered levels by comparison of numeric and experimental curves, and identify if Lade Kim model can be used as an evolutive model, meaning, if its parameters present any relation to the weathering grade of rocks. In order to do so, hydrostatics and triaxial tests were performed on the three weathered leptinite levels, Lade Kim model was calibrated by direct and inverse methods, and charts were plotted to evaluate the evolution of the model's parameters over porosity and specific gravity, with the last two being used as weathering grade indexes.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da Tese.....	2
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Intemperismo	3
2.1.1 <i>Intemperismo Físico</i>	3
2.1.2 <i>Intemperismo Químico</i>	5
2.1.3 <i>Fatores que controlam o intemperismo</i>	7
2.1.4 <i>Identificação, Classificação e Variação de Propriedades em Perfis de Intemperismo</i>	10
2.2 Modelo de Lade Kim	15
2.2.1 <i>Introdução</i>	15
2.2.2 <i>Deformações elásticas</i>	15
2.2.3 <i>Critério de Ruptura</i>	16
2.2.4 <i>Lei de Fluxo</i>	21
2.2.5 <i>Critério de Plastificação e Lei de Endurecimento/Amolecimento</i>	23
2.3 Trabalhos Correlatos	28
2.4 Introdução sobre a Análise Inversa	29
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Materiais e Procedimentos de Campo	30
3.1.1 <i>Generalidades</i>	30
3.1.2 <i>Leptinito do Morro D. Marta</i>	31
3.1.3 <i>Análise das Lâminas Petrográficas na Lupa</i>	35
3.2 Procedimentos de Laboratório.....	41
3.2.1 <i>Preparação de Corpos de Prova</i>	41
3.2.2 <i>Ensaio</i>	51
3.2.2.1 <i>Introdução</i>	51
3.2.2.2 <i>Caracterização</i>	52
3.2.2.3 <i>Ensaio Hidrostáticos</i>	53
3.2.2.4 <i>Ensaio Triaxiais de reaproveitamento das</i>	

amostras com 10MPa de tensão confinante sem pós pico	54
3.2.2.5 Ensaio Nível 1	56
3.2.2.6 Ensaio Nível 2	58
3.2.2.7 Ensaio Nível 3	61
3.3 Procedimentos Matemáticos.....	64
3.3.1 <i>Calibração do Modelo de Lade Kim pelo Método Direto</i>	64
3.3.1.1 Critério de Ruptura.....	64
3.3.1.2 Deformações Elásticas	67
3.3.1.3 Potencial Plástico	69
3.3.1.4 Lei de Endurecimento	71
3.3.1.5 Função de Plastificação.....	73
3.3.1.6 Parâmetros do Modelo – Método Direto.....	76
3.3.1.7 Curvas numéricas e curvas experimentais pelo Método Direto	77
3.3.2 <i>Calibração do Modelo de Lade Kim pelo Método Inverso</i>	81
3.3.2.1 Introdução	81
3.3.2.2 Parâmetros do Modelo – Método Inverso.....	87
3.3.2.3 Curvas numéricas e curvas experimentais pelo Método Inverso	87
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	92
4.1 Comparativo entre os níveis de alteração	92
4.1.1 <i>Ensaio Hidrostáticos</i>	92
4.1.2 <i>Ensaio Triaxiais com 10MPa de tensão confinante</i>	94
4.1.3 <i>Ensaio Triaxiais com 5MPa de tensão confinante</i>	96
4.1.4 <i>Ensaio Triaxiais com 2MPa de tensão confinante</i>	99
4.1.5 <i>Ensaio Uniaxiais</i>	101
4.1.6 <i>Envoltórias de Ruptura de Mohr Coulomb</i>	103
4.2 Adequação do Modelo de Lade Kim aos Níveis de Intemperismo	105
4.3 Relação dos Parâmetros de Lade Kim com o Intemperismo.....	109
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES	152
5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	153
ANEXO.....	154
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Esquema para classificação e descrição de maciços rochosos intemperizados (ISRM, 1981).	11
Tabela 2.2 Caracterização macroscópica de alteração do gnaisse facoidal do Rio de Janeiro; Barroso (1993).	11
Tabela 2.3 Caracterização macroscópica de alteração do leptinito do Rio de Janeiro; Barroso (1993).	12
Tabela 2.4 Caracterização macroscópica de alteração do kingizito do Rio de Janeiro; Barroso (1993).	12
Tabela 2.5 Variação dos índices físicos de um granito com o grau de intemperismo (Panitz, 2007).	13
Tabela 2.6 Variação dos parâmetros de um granito com o grau de intemperismo (Panitz, 2007).	14
Tabela 2.7 Variação das propriedades com o intemperismo para o gnaisse facoidal, (Menezes filho, 1993).	14
Tabela 2.8 Parâmetros do Modelo de Lade Kim	27
Tabela 3.1 Caracterização dos três níveis do Leptinito	53
Tabela 3.2 Ensaio realizado para o nível 1	56
Tabela 3.3 Ensaio realizado para o nível 1	58
Tabela 3.4 Ensaio realizado para o nível 3	61
Tabela 3.5 Parâmetros elásticos para os três níveis do Leptinito	63
Tabela 3.6 Parâmetros do Modelo de Lade Kim (método direto), N1, N2 e N3	77
Tabela 3.7 Parâmetros do Modelo de Lade Kim (método inverso), N1, N2 e N3	87
Tabela 3.8 Cálculo do erro para cada nível de intemperismo	91
Tabela 4.1 Parâmetros de Resistência para os três níveis do Leptinito	105
Tabela 4.2 Parâmetros de Lade Kim para solo residual de gnaisse (Laquini et al, 2007).	124
Tabela 4.3 Parâmetros de Lade Kim para porosidades arbitradas	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Translação das tensões principais ao longo do eixo hidrostático para incluir o efeito da resistência à tração de rochas no critério de ruptura (Lade e Kim; 1995).....	17
Figura 2.2 Translação da superfície de ruptura ao longo do eixo hidrostático no plano triaxial (Kim & Lade, 1984).	18
Figura 2.3 Efeito do parâmetro m sobre a curvatura da superfície de ruptura no plano triaxial. (Kim & Lade, 1984).....	18
Figura 2.4 Influência do parâmetro η_1 na inclinação da superfície de ruptura no plano triaxial (Kim & Lade, 1984).	19
Figura 2.5 Características das superfícies de ruptura no plano octaédrico quando $\eta_1/(I_1/p_a)^m$ é constante (Kim & Lade, 1984).....	20
Figura 2.6 Variação da forma das superfícies de ruptura no plano octaédrico ($m > 0$ e I_1/p_a é crescente (Kim & Lade, 1984).....	20
Figura 2.7 Contorno da superfície de potencial plástico	22
Figura 2.8 Contorno da superfície da Função de Plastificação	26
Figura 3.1 Vista geral da Comunidade Dona Marta (Google Maps).....	31
Figura 3.2 Vista do Plano Inclinado do Morro Dona Marta.....	31
Figura 3.3 Maciço de leptinito são do Dona Marta N1	32
Figura 3.4 Blocos de Rocha sã (de onde foram retiradas as amostras). Próximo à ecobarreira, morro Dona Marta.....	32
Figura 3.5 Maciço de rocha levemente intemperizada. Vista 1.....	33
Rua Oswaldo Seabra.	
Figura 3.6 Maciço de rocha levemente intemperizada. Vista 2. Rua Oswaldo Seabra.....	33
Figura 3.7 Maciço de rocha altamente intemperizada. Vista 1. Próximo ao Campo de Futebol.	34
Figura 3.8 Maciço de rocha altamente intemperizada. Vista 2. Próximo ao Campo de Futebol.	34
Figura 3.9 Local da retirada dos blocos na Comunidade Dona Marta, em amarelo N1, em azul N2 e em rosa N3	35
Figura 3.10 Lâminas petrográficas de cada um dos níveis de alteração.....	36
Figura 3.11 Lâmina petrográfica Nível 1 – Imagem 1	36

Figura 3.12 Lâmina petrográfica Nível 1 – Imagem 2	37
Figura 3.13 Lâmina petrográfica Nível 2 – Imagem 1	37
Figura 3.14 Lâmina petrográfica Nível 2 – Imagem 2	38
Figura 3.15 Lâmina petrográfica Nível 3 - Imagem 1	38
Figura 3.16 Lâmina petrográfica Nível 3 - Imagem 2	39
Figura 3.17 Níveis 1, 2 e 3 na lupa aumento 40x	40
Figura 3.18 Bloco Nível 1 – Imagem 1	41
Figura 3.19 Bloco Nível 1 – Imagem 2	42
Figura 3.20 Bloco Nível 2 – Imagem 1	42
Figura 3.21 Bloco Nível 2 – Imagem 2	43
Figura 3.22 Blocos Nível 3 – Imagem 1	43
Figura 3.23 Bloco Nível 3 – Imagem 2	44
Figura 3.24 Máquina de corte com barrilete amostrador BX	44
Figura 3.25 Blocos no nível 1 cortados para retirada de corpos de prova.....	45
Figura 3.26 Preparação dos corpos de prova.....	45
Figura 3.27 Corpos de Prova Nível 1	45
Figura 3.28 Corpos de Prova Nível 2	46
Figura 3.29 Evidência da Alteração Níveis 2 e 1 – Frontal.....	46
Figura 3.30 Evidência da Alteração Níveis 1 e 2 – Lateral.....	47
Figura 3.31 Alteração do nível 3	47
Figura 3.32 Tentativa de produção de corpos de prova do nível 3.....	48
Figura 3.33 Evidência da Alteração Níveis 1, 2 e 3	48
Figura 3.34 Congelamento dos blocos do nível 3 com nitrogênio	49
Figura 3.35 Aspecto dos blocos do nível 3.....	49
Figura 3.36 Blocos congelados.....	50
Figura 3.37 Marcação para moldagem dos corpos de prova	50
Figura 3.38 Usinagem dos corpos de prova	50
Figura 3.39 Aplicação da membrana termo retrátil para manutenção da consolidação dos blocos	51
Figura 3.40 Máquina de Ensaios MTS	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 Ensaio Hidrostáticos Níveis 1, 2 e 3	53
Gráfico 3.2 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico	
– Deformações Axiais x tensão desviadora	54
Gráfico 3.3 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico	
– Deformações Axiais x deformação volumétrica	54
Gráfico 3.4 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico	
– Deformações Laterais x tensão desviadora	55
Gráfico 3.5 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico	
– Deformações Volumétricas x tensão desviadora.....	55
Gráfico 3.6 Ensaio Nível 1 – Deformação Axial x Tensão Desviadora	56
Gráfico 3.7 Ensaio Nível 1 – Deformação Axial x Deformação Volumétrica	57
Gráfico 3.8 Ensaio Nível 1- Deformação Lateral x Tensão Desviadora	57
Gráfico 3.9 Ensaio Nível 1- Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora.....	58
Gráfico 3.10 Ensaio Nível 2 – Deformação Axial x Tensão Confinante.....	59
Gráfico 3.11 Ensaio Nível 2 – Deformação Axial x Deformação Volumétrica	59
Gráfico 3.12 Ensaio Nível 2 – Deformação Lateral x Tensão Desviadora	60
Gráfico 3.13 Ensaio Nível 2 – Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora	60
Gráfico 3.14 Ensaio Nível 3 – Deformação Axial x Tensão Confinante	61
Gráfico 3.15 Ensaio Nível 3 – Deformação Axial x Deformação Volumétrica	62
Gráfico 3.16 Ensaio Nível 3 – Deformação Lateral x Tensão Desviadora	62
Gráfico 3.17 Ensaio Nível 3 – Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora	63
Gráfico 3.18 Parâmetro “a” N1	64
Gráfico 3.19 Parâmetro “a” N2	65
Gráfico 3.20 Parâmetro “a” N3	65
Gráfico 3.21 Parâmetros de Ruptura N1	66
Gráfico 3.22 Parâmetros de Ruptura N2	66
Gráfico 3.23 Parâmetros de Ruptura N3	67
Gráfico 3.24 Parâmetros Elásticos N1	68
Gráfico 3.25 Parâmetros Elásticos N2.....	68
Gráfico 3.26 Parâmetros Elásticos N3.....	69
Gráfico 3.27 Parâmetros Potencial Plástico N1.....	70
Gráfico 3.28 Parâmetros Potencial Plástico N2.....	70

Gráfico 3.29 Parâmetros Potencial Plástico N3.....	71
Gráfico 3.30 Parâmetros de Endurecimento N1	72
Gráfico 3.31 Parâmetros de Endurecimento N2	72
Gráfico 3.32 Parâmetros de Endurecimento N3	73
Gráfico 3.33 Curva S_{xq} – N1	74
Gráfico 3.34 Função de Plastificação– Curvas $I_1 \times W_p$ – Parâmetro α – N1	
Gráfico 3.35 Curva S_{xq} – N2	74
Gráfico 3.36 Função de Plastificação– Curvas $I_1 \times W_p$ – Parâmetro α – N2	
Gráfico 3.37 Curva S_{xq} – N3	75
Gráfico 3.38 Função de Plastificação– Curvas $I_1 \times W_p$ – Parâmetro α – N3	76
Gráfico 3.39 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 1 -Método Direto	77
Gráfico 3.40 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Direto.....	78
Gráfico 3.41 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Direto	78
Gráfico 3.42 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Direto.....	79
Gráfico 3.43 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Direto	79
Gráfico 3.44 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Direto.....	80
Gráfico 3.45 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro a	82
Gráfico 3.46 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro η_1	83
Gráfico 3.47 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro p	84
Gráfico 3.48 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro h	85
Gráfico 3.49 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro λ	86
Gráfico 3.50 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Inverso.....	88
Gráfico 3.51 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Inverso	88
Gráfico 3.52 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Inverso	89
Gráfico 3.53 Curvas deformação axial x deformação volumétrica	

numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Inverso	89
Gráfico 3.54 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Inverso	90
Gráfico 3.55 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Inverso	90
Gráfico 4.1 Comparações das deformações axiais entre os níveis de alteração - Ensaios Hidrostáticos	92
Gráfico 4.2 Ensaio Hidrostático N1,N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica.....	92
Gráfico 4.3 Ensaio Hidrostático N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão	93
Gráfico 4.4 Ensaio Hidrostático N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão	93
Gráfico 4.5 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão Desviadora	94
Gráfico 4.6 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3–Deformação Axial x Deformação Volumétrica	95
Gráfico 4.7 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão Desviadora.....	95
Gráfico 4.8 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora	96
Gráfico 4.9 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão Desviadora	97
Gráfico 4.10 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica	97
Gráfico 4.11 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão Desviadora.....	98
Gráfico 4.12 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão desviadora	98
Gráfico 4.13 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão Desviadora	99
Gráfico 4.14 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica	100
Gráfico 4.15 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão Desviadora.....	100

Gráfico 4.16 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora	101
Gráfico 4.17 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão.....	101
Gráfico 4.18 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica.....	102
Gráfico 4.19 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão	102
Gráfico 4.20 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3–Deformação Volumétrica x Tensão.....	103
Gráfico 4.21 Envoltórias de Ruptura Níveis 1, 2 e 3.....	104
Gráfico 4.22 Comparativo dos níveis de alteração para o Leptinito e o Gnaisse Facoidal	105
Gráfico 4.23 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x Tensão desviadora, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 2MPa	106
Gráfico 4.24 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x deformação volumétrica, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 2MPa	106
Gráfico 4.25 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x Tensão desviadora, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 5MPa	107
Gráfico 4.26 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x deformação volumétrica, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 5MPa	107
Gráfico 4.27 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x Tensão desviadora, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 10MPa	108
Gráfico 4.28 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x deformação volumétrica, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 10MPa	108
Gráfico 4.29 Resistência na Ruptura x Porosidade	110
Gráfico 4.30 Resistência na Ruptura x Peso Específico.....	110
Gráfico 4.31 Parâmetro M x Porosidade	111
Gráfico 4.32 Parâmetro M x Peso Específico.....	111
Gráfico 4.33 Parâmetro λ x Porosidade.....	112
Gráfico 4.34 Parâmetro λ x Peso Específico	112
Gráfico 4.35 Parâmetro ν x Porosidade.....	113
Gráfico 4.36 Parâmetro ν x Peso Específico	113
Gráfico 4.37 Parâmetro η_1 x Porosidade.....	114
Gráfico 4.38 Parâmetro η_1 x Peso Específico	114
Gráfico 4.39 Parâmetro m x Porosidade.....	115
Gráfico 4.40 Parâmetro m x Peso Específico	115

Gráfico 4.41 Parâmetro a x Porosidade	116
Gráfico 4.42 Parâmetro a x Peso Específico	116
Gráfico 4.43 Parâmetro ψ_2 x Porosidade	117
Gráfico 4.44 Parâmetro ψ_2 x Peso Específico.....	117
Gráfico 4.45 Parâmetro μ x Porosidade.....	118
Gráfico 4.46 Parâmetro μ x Peso Específico	118
Gráfico 4.47 Parâmetro h x Porosidade.....	119
Gráfico 4.48 Parâmetro h x Peso Específico	119
Gráfico 4.49 Parâmetro α x Porosidade.....	120
Gráfico 4.50 Parâmetro α x Peso Específico	120
Gráfico 4.51 Parâmetro C x Porosidade	121
Gráfico 4.52 Parâmetro C x Peso Específico	121
Gráfico 4.53 Parâmetro p x Porosidade.....	122
Gráfico 4.54 Parâmetro p x Peso Específico	122
Gráfico 4.55 Parâmetro M x Porosidade com solo residual de gnaïsse	124
Gráfico 4.56 Parâmetro λ x Porosidade com solo residual de gnaïsse	124
Gráfico 4.57 Parâmetro v x Porosidade com solo residual de gnaïsse	125
Gráfico 4.58 Parâmetro η_1 x Porosidade com solo residual de gnaïsse	125
Gráfico 4.59 Parâmetro m x Porosidade com solo residual de gnaïsse.....	126
Gráfico 4.60 Parâmetro a x Porosidade com solo residual de gnaïsse	126
Gráfico 4.61 Parâmetro ψ_2 x Porosidade com solo residual de gnaïsse	127
Gráfico 4.62 Parâmetro μ x Porosidade com solo residual de gnaïsse.....	127
Gráfico 4.63 Parâmetro h x Porosidade com solo residual de gnaïsse	128
Gráfico 4.64 Parâmetro α x Porosidade com solo residual de gnaïsse.....	128
Gráfico 4.65 Parâmetro C x Porosidade com solo residual de gnaïsse	129
Gráfico 4.66 Parâmetro p x Porosidade com solo residual de gnaïsse	129
Gráfico 4.67 Parâmetro M x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	130
Gráfico 4.68 Parâmetro λ x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	130
Gráfico 4.69 Parâmetro v x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	131
Gráfico 4.70 Parâmetro η_1 x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	131

Gráfico 4.71 Parâmetro m x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	132
Gráfico 4.72 Parâmetro a x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	132
Gráfico 4.73 Parâmetro Ψ_2 x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	133
Gráfico 4.74 Parâmetro μ x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	133
Gráfico 4.75 Parâmetro h x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	134
Gráfico 4.76 Parâmetro α x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	134
Gráfico 4.77 Parâmetro C x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	135
Gráfico 4.78 Parâmetro p x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).....	135
Gráfico 4.79 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa.	138
Gráfico 4.80 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa.	138
Gráfico 4.81 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito - uniaxial. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.....	139
Gráfico 4.82 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – uniaxial. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.	139
Gráfico 4.83 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.	140
Gráfico 4.84 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.	140
Gráfico 4.85 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades	

arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.....	141
Gráfico 4.86 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.....	141
Gráfico 4.87 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.....	142
Gráfico 4.88 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.....	142
Gráfico 4.89 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito - uniaxial. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	143
Gráfico 4.90 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – uniaxial. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	143
Gráfico 4.91 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	144
Gráfico 4.92 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	144
Gráfico 4.93 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	145
Gráfico 4.94 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	145
Gráfico 4.95 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	146
Gráfico 4.96 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito	

– tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.....	146
Gráfico 4.97 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 1,35% e curvas experimentais do nível 1, porosidade 1,07%.	148
Gráfico 4.98 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 1,35% e curvas experimentais do nível 1,]porosidade 1,07%. ..	148
Gráfico 4.99 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 3,1% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.....	149
Gráfico 4.100 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 3,1% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.	149
Gráfico 4.101 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 4,6% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.	150
Gráfico 4.102 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 4,6% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%. ...	150
Gráfico 4.103 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 8% e curvas experimentais do nível 3, porosidade 5,95%.	151
Gráfico 4.104 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 8% e curvas experimentais do nível 3, porosidade 5,95%.....	151

LISTA DE SÍMBOLOS

α	parâmetro do modelo de Lade-Kim.
C	parâmetro da função de endurecimento do modelo de Lade-Kim.
C_e	matriz constitutiva elástica.
D	variável definida no modelo de Lade-Kim.
ε_{ij}	tensor de deformações.
η_1	parâmetro de ruptura do modelo de Lade-Kim.
F	função de plastificação.
g_p	função potencial plástico do modelo de Lade-Kim.
h	parâmetro do modelo de Lade-Kim.
I_1	primeiro invariante do tensor de tensão.
I_2	segundo invariante do tensor de tensão.
I_3	terceiro invariante do tensor de tensão.
K	função de endurecimento.
λ	fator de proporcionalidade da lei de fluxo.
m	parâmetro de ruptura do modelo Lade-Kim .
μ	parâmetro do modelo de Lade-Kim.
ν	coeficiente de Poisson.
ν_p	razão do incremento de deformação plástica do modelo de Lade-Kim.
p	parâmetro da função de endurecimento do modelo de Lade-Kim.
p_a	pressão atmosférica.
Ψ_1	variável definida no modelo de Lade-Kim.
Ψ_2	parâmetro do modelo de Lade-Kim.
q	parâmetro da superfície de escoamento do modelo de Lade-Kim.
Q	função potencial plástico.
ρ	variável definida no modelo de Lade-kim.
S	variável definida no modelo de Lade-Kim.
σ_1	tensão axial.
σ_2	tensão confinante.
σ_3	tensão confinante.
W_p	trabalho plástico.
ζ	variável definida no modelo de Lade-Kim.

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

As diferenças entre as propriedades geomecânicas de rochas em seus diferentes níveis de alteração são de extrema importância e aplicação na área de Geologia de Engenharia. Sabe-se que as rochas apresentam uma queda de resistência e um aumento da permeabilidade com a transição da rocha sã para a rocha alterada quando sofre o processo de intemperismo, entretanto estes fenômenos não são bem quantificados.

Conhecer a variação das propriedades de resistência com o grau de alteração da rocha, é fundamental para projetos de drenagem, obras de contenção, escavação de túneis e barragens, entre outras aplicações. A engenharia de petróleo também tem interesse no tema, uma vez que a injeção de ácidos em rochas carbonáticas promove degradação mineral como uma espécie de “intemperismo artificial”.

Não é conhecido na literatura um modelo constitutivo que atue de maneira evolutiva, ou seja, que possa ter seus parâmetros correlacionados com o grau de intemperismo, o que justifica a relevância e ineditismo do trabalho.

Este trabalho busca verificar se um mesmo modelo, neste caso o de Lade Kim pode ser aplicado tanto para rocha sã, quanto para rocha medianamente alterada e muito alterada, e ainda se há uma evolução dos parâmetros do modelo com o intemperismo. A aplicação de modelos numéricos permite simular o comportamento da rocha em diferentes condições, sem que seja necessária a retirada de muitas amostras, nem realizadas campanhas de ensaios muito extensas, o que tornaria as análises mais demoradas e caras, incompatíveis com projetos reais.

Foram retiradas amostras do Leptinito do morro D. Marta e realizados ensaios triaxiais e hidrostáticos suficientes para a obtenção dos parâmetros e calibração do modelo de Lade Kim em cada nível de alteração. Verificou-se para quais níveis de alteração as curvas tensão x deformação numéricas representam bem os dados experimentais. Avaliou-se também o comportamento dos parâmetros do modelo com a variação da porosidade e peso específico para os três níveis. Ao final, são traçadas curvas numéricas tensão x

deformação para valores de porosidade estimadas, sendo estas curvas numéricas calibradas a partir dos parâmetros de Lade Kim obtidos das curvas ajustadas.

1.2 Objetivos

Este trabalho pretende:

- Avaliar as diferenças de resistência e deformabilidade de 3 níveis de alteração do Leptinito do D. Marta.
- Verificar se o modelo de Lade Kim ajusta-se bem aos três níveis de intemperismo.
- Verificar se o modelo de Lade Kim pode ser aplicado como um modelo evolutivo, ou seja se há uma relação entre os parâmetros do modelo com o grau de intemperismo.

1.3 Organização da Tese

O capítulo 2 faz uma revisão bibliográfica abordando os principais conceitos relacionados ao intemperismo de rochas e as bases do modelo de Lade e Kim. O capítulo 3 discorre sobre os materiais e métodos, trabalhos de campo, laboratório e escritório. O capítulo 4 apresenta os resultados das comparações entre os níveis de alteração, comparações de curvas numéricas e experimentais, bem como análise da evolução dos parâmetros do modelo com o intemperismo. O capítulo 5 apresenta conclusões e sugestões para trabalhos futuros. No anexo encontram-se os códigos em MatLab utilizados na calibração direta.

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Intemperismo

O intemperismo consiste da transformação das rochas em materiais mais estáveis em condições físico-químicas diferentes daquelas em que elas se originaram.

As discontinuidades estruturais possuem um importante papel no desenvolvimento da morfologia dos perfis de intemperismo. Juntas de alívio ocasionam um zoneamento com uma marcada tendência de redução da intensidade do intemperismo com a profundidade. Este comportamento é influenciado pela densidade e direção das fraturas: quanto mais fraturada a rocha esteja, o intemperismo é mais complexo.

2.1.1 Intemperismo Físico

São todos os processos que causam desagregação das rochas, com separação dos grãos minerais antes coesos e com sua fragmentação, transformando a rocha inalterada em material descontínuo e friável. Os principais processos de intemperismo físico são (Azambuja, 1970):

- Variação de Temperatura

É o mais comum dos processos intempéricos de natureza física. São processos de desagregação mecânica devidos à variação de temperatura nos corpos rochosos. Todos os corpos se expandem quando aquecidos e se contraem quando resfriados. Desta forma, rochas submetidas a processo contínuo de expansão e contração, tendem a se fragmentar pelo enfraquecimento da sua estrutura. Além disso as rochas são formadas, em sua maioria, por diferentes minerais que têm coeficientes de dilatação volumétrica diferentes, ampliando assim os esforços destrutivos sobre as rochas, que ao se repetirem continuamente durante séculos e séculos, provocam a fragmentação da rocha.

Além da composição mineralógica, têm influência no intemperismo termal a cor e a granulometria da rocha. Assim, rochas mais escuras se aquecem mais, e desagregam mais facilmente. Do mesmo modo rochas de cor uniforme são menos susceptíveis de se

fragmentarem do que rochas de coloração variada. Rochas grosseiras se desintegram mais facilmente do que rochas de grãos pequenos.

O intemperismo físico é observado em quaisquer ambientes, embora seja favorecido em ambientes onde ocorrem fortes variações de temperatura, de clima seco e pouca ou nenhuma vegetação, ou seja, em ambientes áridos ou semi-áridos.

- Alívio de Pressão

Erosão e remoção de camadas sobrepostas, ou em aberturas de túneis, galerias e taludes.

- Crescimento de Cristais

A cristalização de sais ocorre quando os sais não são lixiviados, e sim solubilizados na água existente. Ao se dar a evaporação da água os sais se precipitam, e pressionam as paredes envolventes, se estiverem em fissuras rochosas.

As condições favoráveis a estes processos são a existência de pouca água e evaporação intensa, características de climas áridos e semi-áridos.

- Hidratação de Minerais

Cristais expansivos que aumentam de volume devido à hidratação, originando tensões internas. Ocorre por exemplo no congelamento da água inclusa em fraturas nas rochas. Ao se congelar a água aumenta em 9% o seu volume exercendo pressões da ordem de centenas de kg/cm^2 sobre as paredes envolventes, podendo fragmentá-las, principalmente se houver uma repetição contínua do processo.

Para que este processo ocorra, devem ser satisfeitas condições como a presença de poros e fendas na rocha, presença de água e temperaturas características de climas frios.

- Processos físico-biológicos

Raízes de árvores penetram nas fissuras e alargam ou trituram as paredes rochosas. Atividades de formigas, minhocas e roedores tornam o solo mais permeável.

2.1.2 Intemperismo Químico

Os ambientes da superfície da Terra, caracterizados por pressões e temperatura baixas e riqueza de água e oxigênio é bastante distinta da maioria dos ambientes onde as rochas foram formadas. Esse desequilíbrio, através de uma série de reações químicas, acaba por transformar a rocha e seus minerais em outros minerais mais estáveis a este novo ambiente, mantendo-se inalteráveis até que o ambiente mude. (Azambuja, 1970).

O principal agente de intemperismo químico é a água, que infiltra e percola as rochas, sendo o seu efeito mais intenso na medida em que ela se acidifica devido à dissolução de CO_2 da atmosfera e à presença de ácidos orgânicos. A água da chuva dissolve o CO_2 da atmosfera, onde uma parte desse CO_2 se combina com a água formando ácido carbônico, que é facilmente dissociado.

Na decomposição química das rochas observa-se que a taxa de mobilidade relativa dos principais elementos químicos decresce a partir do cálcio e sódio para magnésio, potássio, silício, ferro e alumínio. Por isso as rochas que estão se decompondo tendem a perder principalmente os primeiros, e mostram um relativo enriquecimento nas proporções de óxidos de ferro, alumínio e silício.

Em termos mineralógicos isso significa que esses aspectos químicos controlam a seqüência de intemperismo dos minerais petrográficos. Essa seqüência é essencialmente inversa à ordem de cristalização de Bowen. Assim, de modo geral, os minerais mais susceptíveis á degradação são aqueles que se situam no topo da série, enquanto os mais resistentes situam-se gradativamente mais abaixo na série. O quartzo é extremamente resistente ao intemperismo.

O intemperismo químico compreende a decomposição química dos minerais primários das rochas, e a síntese (neoformação) de minerais secundários. A decomposição dos minerais primários das rochas resulta da ação separada ou simultânea de várias reações químicas: hidratação e hidrólise, dissolução, e oxidação e redução.

Deste modo, os principais processos de intemperismo químico são:

- Hidratação e Hidrólise

Os principais minerais formadores de rocha são os silicatos. Estes são como sais de um ácido fraco e uma base forte. A hidratação dos minerais ocorre pela neutralização das superfícies das partículas dos minerais pelas cargas elétricas das moléculas de água (dipolos). É uma reação química entre íons H^+ , provenientes da ionização da água, e cátions do mineral. O íon H^+ entra nas estruturas minerais, deslocando principalmente os cátions alcalinos (K^+ e Na^+) e alcalino-terrosos (Ca^{2+} e Mg^{2+}), que são liberados para a solução. A estrutura do mineral na interface sólido/solução de alteração acaba sendo rompida, liberando Si e Al na fase líquida. Esses elementos podem recombinar-se, resultando na neoformação de minerais secundários.

A hidrólise ocorre sempre na faixa de pH de 5 a 9. Se há maior ou menor percolação de água, os componentes solúveis são eliminados completa ou parcialmente, resultando, respectivamente, na hidrólise total ou parcial. No caso dos feldspatos potássicos na superfície do mineral, os íons H^+ substituem os íons K^+ . O restante do mineral não é mais estável depois desta substituição, resultando na continuação da sua decomposição hidrolítica. Na hidrólise parcial, em condições de drenagem menos eficientes, parte da Si permanece no ambiente de intemperismo; o K pode ser total ou parcialmente eliminado. Esses elementos reagem com o Al formando aluminossilicatos hidratados (argilominerais), como, por exemplo, a caulinita, no caso de remoção total do K.

Na hidrólise total, 100% da Si e do K são eliminados. A Si, embora seja pouco solúvel nesta faixa de pH, pode ser totalmente eliminada em condições de pluviosidade alta e drenagem eficiente.

- Dissolução

Os minerais estão sujeitos à dissolução, ou seja, a sua solubilização, podendo essa solução pode precipitar em outro ambiente. Pode ocorrer a solubilização completa de alguns minerais por ácidos.

Os carbonatos, por exemplo, são minerais muito susceptíveis a esse tipo de reação. Em se tratando de água pura, a dissolução dos carbonatos é mínima. Entretanto, se houver CO₂ dissolvido na água, a calcita transforma-se em bicarbonato de cálcio. O bicarbonato de cálcio é cerca de 30 vezes mais solúvel em água do que o carbonato de cálcio (calcita), intensificando dessa forma a dissolução dos carbonatos. Esse tipo de reação ocorre mais comumente em terrenos calcários, levando à formação de relevos cársticos.

- Oxidação e Redução

Alguns minerais podem estar presentes em mais de um estado de oxidação, como o ferro nos minerais ferromagnesianos, como a biotita, anfibólios, piroxênios, e olivinas. Quando há a mudança do estado de oxidação de um elemento, normalmente através de reação com o oxigênio, essa reação produz a destruição da estrutura cristalina do mineral, afetando comumente rochas cujos minerais contém ferro ferroso (Fe²⁺), que se oxida em ferro férrico (Fe³⁺). Diz-se que tais rochas "enferrujam" na presença de umidade, já que a reação é acompanhada por uma mudança de cor das superfícies alteradas, para avermelhado ou amarelado.

2.1.3 Fatores que controlam o intemperismo

- Material de Origem

O material de origem é constituído por minerais com diferentes graus de suscetibilidade ao processo de intemperismo. Deste modo, admitindo que diferentes tipos de rochas tenham sido submetidos aos mesmos processos de intemperismo, cada tipo de rocha tem sua curva de alteração no tempo, sendo as rochas mais básicas mais rapidamente suscetíveis aos processos intempéricos.

As características das rochas que influenciam a sua alteração devem ser avaliadas quanto à sua importância relativa no intemperismo. Desse modo, ao se avaliar a resistência de uma rocha ao intemperismo devem ser consideradas as seguintes características:

- composição mineralógica;
- textura;
- estrutura.

Os minerais apresentam diferenças quanto à resistência ao intemperismo, e assim também as rochas de diferentes composições apresentarão diferenças. Como regra geral, a resistência à alteração é inversa à ordem de cristalização da série de Bowen. Assim, por exemplo, os silicatos ferromagnesianos são mais susceptíveis à alteração do que os demais silicatos.

O tamanho dos minerais na rocha (textura) também influencia a sua resistência ao intemperismo, uma vez que quanto mais grosseira a granulometria da rocha, mais facilmente ela se intemperizará, se os demais atributos forem similares.

A presença de estruturas tais como, xistosidade, foliação gnáissica, estratificação, vesículas, etc, tende a facilitar o intemperismo de uma rocha em relação àquelas que tenham estrutura homogênea.

As rochas tendem a se desagregar segundo suas isoterms (linhas de igual aquecimento), ou “isolinhas” de fraqueza. Assim se a rocha tiver inicialmente uma forma poliédrica qualquer (situação comum, devido ao fraturamento generalizado de grande parte das rochas), ela tende a se intemperizar primeiro nos vértices, seguidos das arestas, e então no restante das faces, assumindo assim uma forma arredondada. Esse sólido arredondado por sua vez, tende a se descamar em cascas concêntricas tal como se verifica numa cebola. Esta feição recebe o nome de esfoliação esferoidal. A esfoliação esferoidal é comumente observada em rochas de estrutura maciça e granulação uniforme.

- **Clima**

Os elementos do clima que mais influenciam o intemperismo são: radiação solar (calor), precipitação pluvial (água) e pressão atmosférica (vento). O calor influi diretamente nas atividades das reações químicas e processos biológicos que ocorrem no perfil de intemperismo. O processo de intemperismo químico é mais rápido em climas quentes que

em climas frios, pois as chuvas intensas erodem o solo e escoam, promovendo a lixiviação, enquanto que para as chuvas mais fracas, de longa duração, ocorre a infiltração.

A formação de um tipo de argilomineral formado pelos processos de intemperismo depende da temperatura e da quantidade de chuva. Esse fenômeno explica o aumento da ocorrência de solo lateríticos nas proximidades do Equador já que as fortes precipitações e as elevadas temperaturas favorecem a formação de caulín e óxidos.

Os processos de intemperismo físico e químico não ocorrem isoladamente, mas simultaneamente. Conforme as condições climáticas podem predominar os processos de intemperismo físico ou os de intemperismo químico. Em climas secos (frios ou quentes) predomina o intemperismo físico; em climas úmidos predomina o intemperismo químico.

- Relevo

A água pluvial, no relevo pouco movimentado, encontra condições favoráveis para infiltrar no solo, e o escoamento superficial não é tão acentuado. Por outro lado, no relevo mais movimentado, o escoamento superficial é maior do que a infiltração. Nas regiões mais úmidas, os solos que ocorrem em relevo pouco movimentado são em geral mais profundos do que nas áreas com declive acentuado.

- Organismos vivos

Os organismos compreendem a microflora, a microfauna, a macroflora, a macrofauna e o homem. A microflora morta libera CO_2 e reduz o pH, ocasionando a formação de ácidos orgânicos. A macroflora protege os solos dos efeitos erosivos. A micro e macro fauna agem no perfil de solo como uma ação escavadora, criando galerias no solo e, em consequência aumentando a circulação de ar. Finalmente, o homem pode agir através de certas práticas de manejo, tais como: a drenagem, calagem e adubação.

- Tempo

O tempo também é um fator importante na formação dos produtos de alteração. Nos estágios iniciais do intemperismo pode ocorrer a presença de metais alcalinos e alcalino-

terrosos e conseqüentemente desenvolverem-se em um determinado tipo de produto de alteração. Depois de um longo período de tempo, os álcalis terão sido removidos por lixiviação e se formarão um outro tipo de produto de alteração, com características diferentes do primeiro. Deste modo, os produtos de alteração de uma determinada rocha são diferentes nos estágios inicial e final do intemperismo. Em geral nos primeiros estágios do intemperismo há predominância do intemperismo físico, que entre outras alterações, produz uma diminuição do tamanho das partículas e aumento da superfície útil para um ataque químico. Assim, o intemperismo químico tende a ser mais importante nos estágios finais de alteração.

2.1.4 Identificação, Classificação e Variação de Propriedades em Perfis de Intemperismo

Busca-se delimitar zonas que apresentem as mesmas características dentro de um maciço rochoso submetido a um processo de intemperismo, deste modo, é difícil definir de uma forma precisa, por exemplo, o limite da rocha alterada com o solo residual.

Os sistemas de classificação dos perfis apresentam diferentes estados de intemperismo e separam os perfis verticais em diferentes zonas. Entre os sistemas mais utilizados, destacam-se as recomendações da Geological Society (1977), ISRM (1981) e IAEG (1981). A ISRM (1981) é uma das mais aceitas, e sugere um esquema próprio para a classificação de maciços rochosos alterados, podendo ser modificada e subdividida no caso de situações particulares. (Barroso, 1993). A tabela 2.1 apresenta a classificação da ISRM para maciços rochosos intemperizados.

TERMO	DESCRIÇÃO	CLASSE
SÃ	Nenhum sinal visível de alteração da matriz; talvez leve descoloração ao longo das descontinuidades principais.	I
LEVEMENTE INTEMPERIZADO	Descoloração indica intemperismo da matriz da rocha e de superfícies de descontinuidades. Toda a matriz da rocha pode estar descolorida pelo intemperismo e pode estar algo mais branda externamente do que na sua condição sã.	II
MEDIANAMENTE INTEMPERIZADO	Menos da metade da matriz da rocha está decomposta e/ou desintegrada a condição do solo. Rocha sã ou descolorida esta presente formando um arcabouço descontínuo ou como núcleos de rocha.	III
ALTAMENTE INTEMPERIZADO	Mais da metade da matriz rochosa está decomposta e/ou desintegrada a condição do solo. Rocha sã ou descolorida está presente formando um arcabouço descontínuo ou formando núcleos de rocha.	IV

COMPLETAMENTE INTEMPERIZADO	Toda a matriz da rocha está descomposta e/ou desintegrada a condição de solo. A estrutura original do maciço está em grande parte preservada.	V
SOLO RESIDUAL	Toda a rocha está convertida em solo. A estrutura do maciço e da matriz da rocha está destruída. Há uma grande variação de volume, mas o solo não foi significativamente transportado.	VI

Tabela 2.1 Esquema para classificação e descrição de maciços rochosos intemperizados (ISRM, 1981).

Barroso (1993) alia a classificação da ISRM com observações de campo na identificação dos estágios de alteração de perfis de intemperismo de Gnaiss Facoidal, Leptinito e Kinzigito, conforme as tabelas 2.2, 2.3 e 2.4.

ESTÁGIO DE ALTERAÇÃO	GNAISSE FACOIDAL
ROCHA SÃ (I)	Todos os minerais estão íntegros perante a observação macroscópica, apenas os feldspatos podem estar com o brilho levemente reduzido. A rocha rompe com extrema dificuldade, necessitando-se de mais de um golpe com o martelo para lascá-la ou quebrá-la. Neste estágio a rocha não pode ser escavada manualmente. Com o uso do canivete pode-se apenas arranhar os minerais mais macios como a biotita. Não se consegue arrancar nenhum mineral do arcabouço da rocha.
LEVEMENTE INTEMPERIZADA (II)	Os feldspatos perdem seu brilho, enquanto as biotitas e granadas apresentam uma acentuada redução do mesmo e da cor original. A rocha pode ser quebrada com diversos golpes de martelo geológico, não sendo possível escavá-la manualmente. As granadas já podem ser arranhadas com dificuldade pelo canivete, embora nenhum mineral possa ser arrancado da rocha.
MODERADAMENTE INTEMPERIZADA (III)	Os feldspatos apresentam-se totalmente descoloridos e, eventualmente argilizados na superfície. Biotitas e granadas apresentam acentuada alteração da cor, sendo que esta última possui claros sinais de oxidação. A ponta do martelo geológico produz entalhe na rocha, que ainda não pode ser escavada manualmente. Feldspatos, biotitas e granadas são arranhados pelo canivete, os dois últimos mais facilmente. Neste estágio algumas biotitas e granadas já podem ser arrancadas da matriz.
ALTAMENTE INTEMPERIZADA (IV)	A exceção do quartzo, todos os minerais estão alterados. As granadas estão muito oxidadas e argilizadas. Os feldspatos apresentam-se argilizados em superfície. O golpe do martelo desagrega parcialmente a rocha, e uma pá ou espátula são capazes de escavá-la com grande dificuldade. Todos os minerais, excluindo-se o quartzo, podem ser arranhados pelo canivete, sendo que a granada pode ser arranhada pela unha. O canivete é capaz de produzir um sulco profundo sobre a matriz e grande parte dos minerais podem ser arrancados da amostra.

Tabela 2.2 Caracterização macroscópica de alteração do gnaiss facoidal do Rio de Janeiro; Barroso (1993).

ESTÁGIO DE ALTERAÇÃO	LEPTINITO
ROCHA SÃ (I)	Os minerais apresentam-se sem alterações perceptíveis, eventualmente os feldspatos podem estar com o brilho levemente reduzido. São necessários vários golpes do martelo geológico para quebrar a rocha. Não é possível escavá-la manualmente. Apenas a biotita pode ser arranhada pelo canivete. Nenhum mineral pode ser arrancado do arcabouço da rocha. Os testemunhos Nx obtidos no laboratório não podem ser quebrados com as mãos.
LEVEMENTE INTEMPERIZADA (II)	Os feldspatos, biotitas e granadas mostram redução do brilho vítreo original. As biotitas e as granadas sofrem também mudança de cor. A primeira torna-se acinzentada e a segunda ocre. A rocha é quebrada com diversos golpes do martelo geológico. Não é possível escavá-la manualmente ou com o auxílio de pás ou espátulas. As granadas e os feldspatos têm sua dureza reduzida, é possível riscá-los com dificuldade pelo canivete. Apenas a biotita pode ser eventualmente arrancada da rocha. Testemunhos Nx não são quebrados com as mãos.
MODERADAMENTE INTEMPERIZADA (III)	Os feldspatos estão descoloridos e argilizados na superfície. Biotitas e granadas revelam acentuada mudança de cor e claros sinais de oxidação. A ponta do martelo geológico produz entalhe raso na superfície da rocha, não sendo possível escavá-la manualmente. Com exceção do quartzo, todos os minerais são riscáveis pelo canivete, biotitas e granadas mais facilmente. Testemunhos Nx não são quebrados com as mãos.
ALTAMENTE INTEMPERIZADA (IV)	O único mineral que permanece inalterado é o quartzo. Feldspatos, biotitas e granadas estão argilizados, embora não totalmente. O golpe do martelo produz desagregação parcial da amostra, que neste estágio já pode ser escavada por uma pá ou espátula com grande dificuldade. Todos os minerais, excluindo-se o quartzo, podem ser riscados facilmente pelo canivete. Os minerais já podem ser arrancados pelo canivete. Não se obteve testemunhos Nx neste estágio.

Tabela 2.3 Caracterização macroscópica de alteração do leptinito do Rio de Janeiro; Barroso (1993).

ESTÁGIO DE ALTERAÇÃO	KINZIGITO
ROCHA SÃ (I)	Os minerais mantêm seu brilho, cor e dureza originais. Não é possível retirar grãos ou escavar a matriz rochosa.
LEVEMENTE INTEMPERIZADA (II)	Os feldspatos perdem parte de seu brilho. Biotitas e granadas poderiam se apresentar medianamente oxidados. É possível retirar grãos da matriz rochosa.
MODERADAMENTE INTEMPERIZADA (III)	A transformação de feldspato em argila é mais intensa em superfície. A rocha é muito friável e poderia ser facilmente escavada com a mão. Grãos podem ser retirados da matriz sem dificuldade. Óxidos de ferro produto da alteração das granadas e biotitas estão presentes e poderiam criar partes duras. É possível escavar a matriz rochosa com um canivete.
ALTAMENTE INTEMPERIZADA (IV)	Os feldspatos estão completamente transformados em argilas. Não é possível identificar todos os minerais, mas os grãos de quartzo e de biotita/vermiculita estão envolvidos dentro de uma matriz argilosa fortemente oxidada. Extremamente friável, facilmente escavável pela mão. A matriz rochosa está mais oxidada que em outros níveis de intemperismo.

Tabela 2.4 Caracterização macroscópica de alteração do kingizito do Rio de Janeiro; Barroso (1993).

As tabelas 2.5 e 2.6 apresentam os valores para peso específico aparente seco, índice de absorção, porosidade, velocidade ultrassônica, dureza Schmidt, resistência de ponta, resistência à compressão simples, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, para o granito em cinco estágios de alteração. Esses valores comportam-se de forma decrescente com o processo de intemperismo. (Panitz, 2007)

Descrição	Grau de Intemperismo	Localização	Peso específico dos grãos g/cm ³	Peso específico aparente seco g/cm ³	Índice de absorção %	Porosidade Efetiva %	Porosidade Total	Velocidade Ultrassônica (seco)
Granito São	I	São	2,65	2,61	0,13	0,27	1,56	5.400
Granito Parcialmente Alterado	II _{i-iii}	Centro inalterado do bloco II _i	ND	2,61	0,20	0,84	ND	4.940
		Extremidade inalterado do II _{ii}	ND	2,61	0,24	0,91	ND	5.030
		Centro inalterado do bloco II _{ii}	2,65	2,58	0,48	1,47	2,45	4.690
		Amostra total II _{ii} , 90% alterado	ND	2,56	0,92	2,78	ND	4.130
Granito Completamente Alterado	II _{iv}	Bloco II _{iv} completamente alterado	ND	2,52	1,24	3,76	4,64	3.750
		Bloco II _{iv} completamente alterado	ND	2,52	1,32	3,78	ND	3.670
Granito Friável	III-IV	Centro do Bloco III	2,65	2,51	3,37	4,89	5,44	3.100
		Centro do Bloco IV	ND	2,33	4,85	9,59		2.300
Solo Granítico	V	Solo fracamente cimentado	2,63	2,03	9,6	20,3	22,8	780
		Solo fracamente cimentado	ND	2,00	11,8	20,2	ND	650
		Solo friável intacto	2,62	1,99	11,1	22,1	24,1	ND
		Solo friável intacto	2,63	1,89	ND	ND	28,1	ND

Tabela 2.5 Variação dos índices físicos de um granito com o grau de intemperismo (Panitz, 2007).

Descrição	Grau de Intemperismo	Localização	Resistência à compressão simples (seco)MPa	Módulo de Elasticidade Tangente x 10 ⁴ MPa	Coeficiente de Poisson (1 ciclo)	Resistência de Ponta (seco) MPa	Dureza Schmidt SHV
Granito São	I	São	282	6,95	0,25	10,0	64
Granito Parcialmente Alterado	II _{i-iii}	Centro inalterado do bloco II _i	288	5,76	0,19	11,0	65
		Extremidade inalterado do II _{ii}	283	6,12	0,24	10,6	65

		Centro inalterado do bloco II _{ii}	251	5,19	0,21	9,2	58
		Amostra total II _{ii} , 90% alterado	219	4,02	ND	6,5	56
Granito Completamente Alterado	II _{iv}	Bloco II _{iv} completamente alterado	197	3,25	ND	6,3	52
		Bloco II _{iv} completamente alterado	187	2,99	0,19	5,2	50
Granito Friável	III-IV	Centro do Bloco III	123	2,28	ND	3,3	48
		Centro do Bloco IV	58	1,27	0,27	1,7	39
Solo Granítico	V	Solo friável intacto	11	0,15	ND	0,3	24
		Solo friável intacto	ND	ND	ND	0,1	15

Tabela 2.6 Variação dos parâmetros de um granito com o grau de intemperismo (Panitz, 2007).

A tabela 2.7 mostra como as propriedades do gnaisse facoidal se alteram com o nível de intemperismo. (Menezes filho, 1993).

Nível de alteração	Porosidade (%)		Peso Específico (kN/m ³)		Resistência Compressão Simples (MPa)	
	min	max	min	max	min	max
N1	0,60	1,03	26,20	26,70	46	88
N2	1,44	1,85	26	26,40	20,50	41
N3	2,95	4,61	25,10	25,70	14,50	28,20
N4	5,74	7,77	23,50	24,50	4,45	7,90

Tabela 2.7 Variação das propriedades com o intemperismo para o gnaisse facoidal, (Menezes filho, 1993).

2.2 Modelo de Lade Kim

2.2.1 Introdução

Modelos matemáticos devem ser capazes de reproduzir a resposta observada de um determinado meio, sendo seus parâmetros obtidos através de ensaios de laboratório. Os resultados do modelo devem reproduzir os resultados obtidos experimentalmente para que este seja considerado adequado. Neste trabalho, um dos objetivos é verificar se o mesmo modelo é capaz de representar bem o comportamento de uma rocha em seus vários níveis de alteração.

A teoria matemática da plasticidade é constituída principalmente por dois aspectos: a definição do critério de plastificação e o cálculo das deformações plásticas após o escoamento. O critério de plastificação pode ser definido como a combinação de estados de tensão que delimitam a ocorrência de deformações puramente elásticas. Para definição do limite elástico, sob estados de tensão multiaxiais, torna-se necessário definir uma expressão matemática em termos de tensões. O estabelecimento dessa expressão, denominada critério de plastificação é, normalmente, baseado em observações experimentais.

No modelo de Lade Kim os incrementos totais de deformação observados em um material quando carregado são divididos em componentes elásticos e plásticos. (Lade e Kim; 1995).

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p. \quad (2.1)$$

Estas deformações são calculadas separadamente, sendo as deformações elásticas calculada pela Lei de Hooke e as deformações plásticas por uma lei plástica tensão x deformação, ambas expressas em termos de tensões efetivas.

2.2.2 Deformações elásticas

Os incrementos de deformação elástica, recuperáveis com o descarregamento são calculados com a lei de Hooke, utilizando a variação não linear do módulo de Young com o estado de tensão. O valor do coeficiente de Poisson é limitado entre 0 e 0,5 para a maioria

dos materiais, e é assumido constante. A expressão do módulo de Young foi concebido baseado em princípios da conservação de energia, e pode ser expresso como se segue:

$$E = Mp_a \left[\left(\frac{I_1}{p_a} \right)^2 + R \frac{J_2'}{p_a^2} \right] \quad (2.2)$$

Onde:

$$R = 6 \frac{1+\nu}{1-2\nu} \quad (2.3)$$

E I_1 é o primeiro invariante do tensor de tensões e J_2' é o segundo invariante do tensor de tensões desviadoras, dados como:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2.4)$$

$$J_2' = \frac{1}{6} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (2.5)$$

O parâmetro p_a é a pressão atmosférica expressa na mesma unidade de E , I_1 , e J_2' e M e λ são constantes adimensionais. Os parâmetros ν , M e λ podem ser obtidos a partir de ensaios de compressão triaxial e o modelo pode ser usado para materiais com coesão efetiva. (Lade e Kim; 1995)

2.2.3 Critério de Ruptura

No modelo de Lade Kim o critério de ruptura é expresso em função do primeiro e terceiro invariantes de tensão:

$$\left[\frac{I_1^3}{I_3} - 27 \right] \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^m = \eta_1 \quad (2.6)$$

Onde I_1 é dado pela equação 2.4 e

$$I_3 = \sigma_x \sigma_y \sigma_z + \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} + \tau_{yx} \tau_{zy} \tau_{xz} - (\sigma_x \tau_{yz} \tau_{zy} + \sigma_y \tau_{zx} \tau_{xz} + \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yx}) \quad (2.7)$$

Os parâmetros η_1 e m são constantes adimensionais. No domínio das tensões principais o critério de ruptura tem a forma de uma bala axissimétrica apontada para a

origem do eixo das tensões e a seção transversal com a forma de um triângulo com bordas arredondadas.

Para incluir a coesão efetiva e a tração a que podem ser submetidos rocha e concreto é feita a translação das tensões principais ao longo do eixo hidrostático (figura 2.1). Desta forma uma tensão constante $a \cdot p_a$ é adicionada às tensões normais antes da substituição na equação 2.6.

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} + \delta_{ij} a p_a \quad (2.8)$$

Onde a é um parâmetro adimensional e δ_{ij} é o delta de Kronecker. O valor de $a \times p_a$ reflete o efeito de resistência à tração do material. Os três parâmetros do material η_1 , m e a podem ser determinados a partir de ensaios de compressão triaxial. (Lade e Kim; 1995).

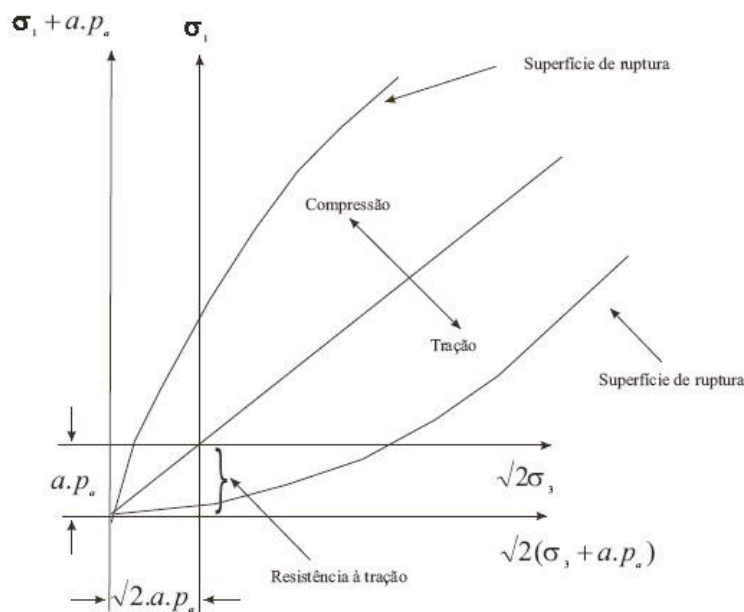


Figura 2.1 Translação das tensões principais ao longo do eixo hidrostático para incluir o efeito da resistência à tração de rochas no critério de ruptura (Lade e Kim; 1995).

A figura 2.2 mostra a influência do parâmetro a na translação da superfície de ruptura ao longo do eixo hidrostático.

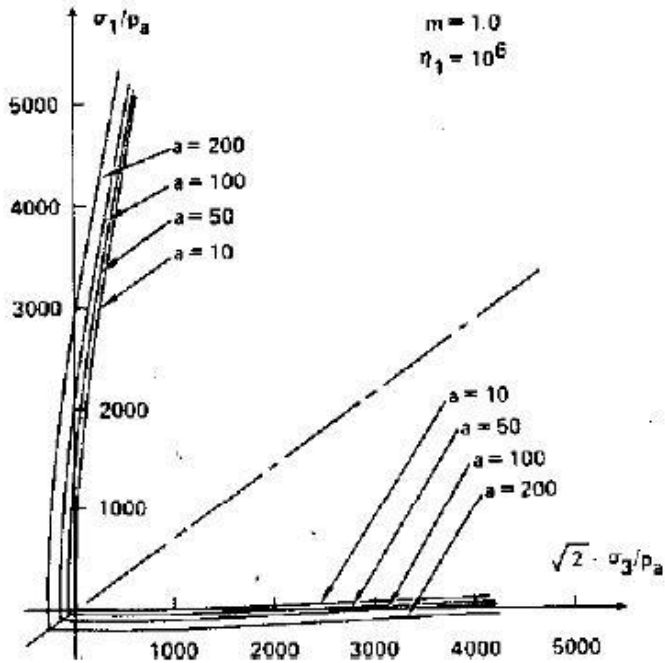


Figura 2.2 Translação da superfície de ruptura ao longo do eixo hidrostático no plano triaxial (Kim & Lade, 1984).

A figura 2.3 mostra a influência do parâmetro m na curvatura da superfície de ruptura.

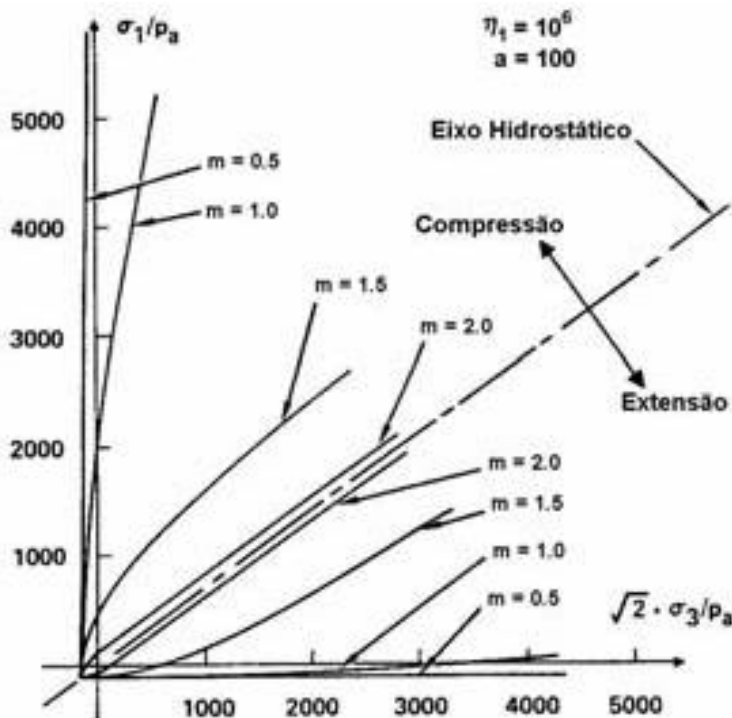


Figura 2.3 Efeito do parâmetro m sobre a curvatura da superfície de ruptura no plano triaxial. (Kim & Lade, 1984).

A figura 2.4 mostra a influência do parâmetro η_1 na inclinação da superfície de ruptura.

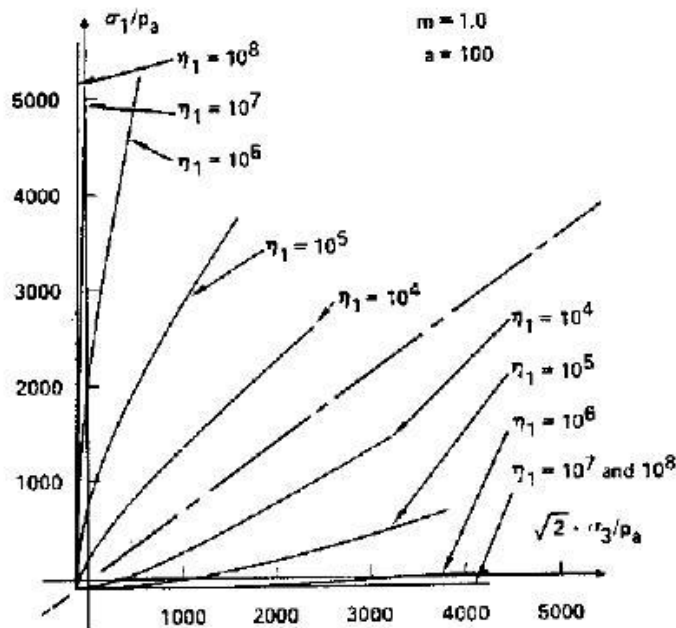


Figura 2.4 Influência do parâmetro η_1 na inclinação da superfície de ruptura no plano triaxial (Kim & Lade, 1984).

As figuras 2.5 e 2.6 mostram o comportamento das superfícies de ruptura no plano octaédrico, onde I_1 é constante.

Para $m = 0$, aumentos nos valores de η_1 mudam a forma da superfície de ruptura, de circular para triangular com vértices arredondados.

Se $m > 0$ a forma das superfícies não varia, desde que a razão $\eta_1 / (I_1/p_a)^m$ seja mantida constante.

Por outro lado, se $m > 0$ e a razão $\eta_1 / (I_1/p_a)^m$ não é constante, o aumento da razão I_1/p_a faz com a forma das superfícies de ruptura no espaço octaédrico passe de triangular para circular.

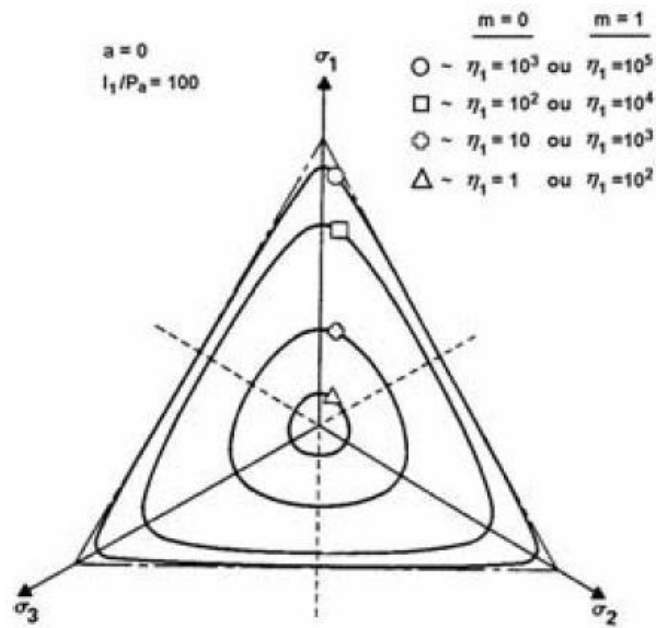


Figura 2.5 Características das superfícies de ruptura no plano octaédrico quando $\eta_1/(I_1/p_a)^m$ é constante (Kim & Lade, 1984).

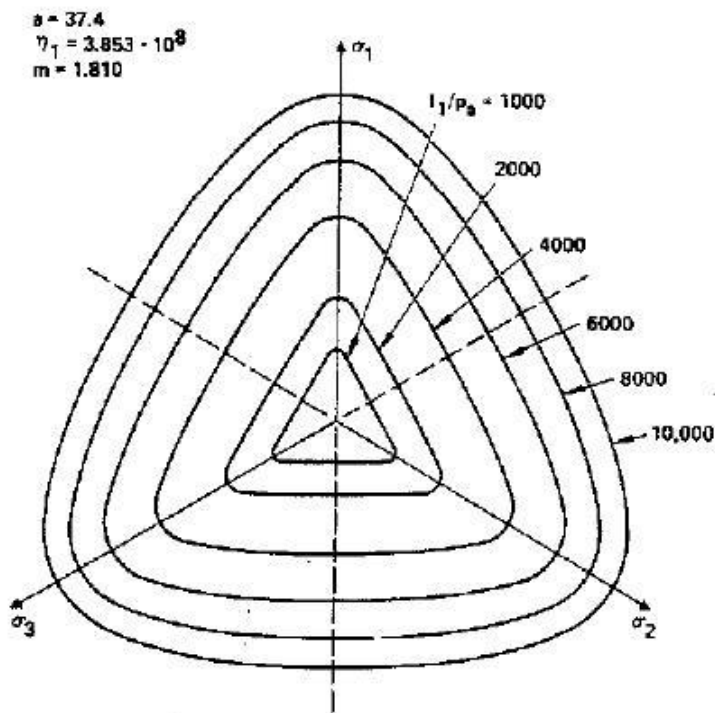


Figura 2.6 Variação da forma das superfícies de ruptura no plano octaédrico $m > 0$ e I_1/p_a é crescente (Kim & Lade, 1984).

2.2.4 Lei de Fluxo

Os incrementos de deformação plástica são calculados pela lei de fluxo:

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda_p \cdot \frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2.9)$$

Onde g_p é a função potencial plástico e $d\lambda_p$ é um fator escalar de proporcionalidade. A função potencial plástico do modelo é escrita em função dos três invariantes de tensão:

$$g_p = \left[\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} + \psi_2 \right] \left[\frac{I_1}{P_a} \right]^\mu \quad (2.10)$$

Onde I_1 e I_3 são dados pelas equações 2.4 e 2.7, respectivamente, e o segundo invariante de tensão é definido como:

$$I_2 = \tau_{xy}\tau_{yx} + \tau_{yz}\tau_{zy} + \tau_{zx}\tau_{xz} - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) \quad (2.11)$$

Os parâmetros ψ_2 e μ são constantes adimensionais que podem ser determinados a partir de ensaios de compressão triaxiais. O parâmetro ψ_1 é relacionado como parâmetro m do critério de ruptura conforme a equação:

$$\psi_1 = 0.00155 \times m^{-1.27} \quad (2.12)$$

O parâmetro ψ_1 age como um fator de ponderação entre a forma triangular (do termo I_3) e a forma circular (do termo I_2) da superfície de potencial plástico. O parâmetro ψ_2 controla a interseção das superfícies de plastificação com o eixo hidrostático, e o expoente μ determina a curvatura das superfícies. As superfícies de potencial plástico são mostradas na figura 2.7, com a forma parecida, mas não idêntica á das superfícies de ruptura.

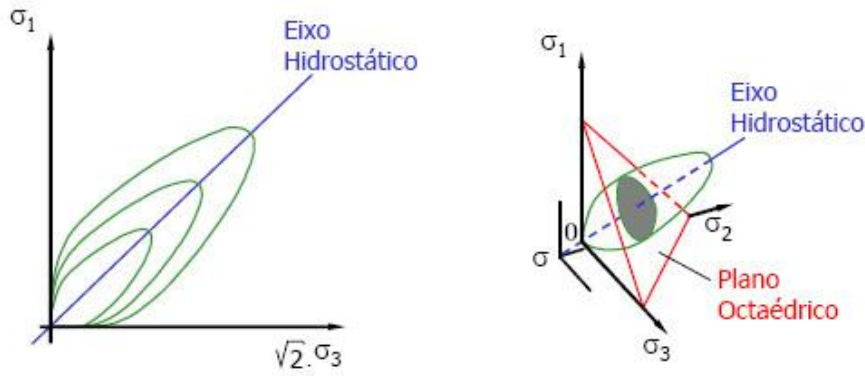


Figura 2.7 Contorno da superfície de potencial plástico

As derivadas de g_p com as tensões são:

$$\frac{\partial g_p}{\partial \sigma_{ij}} = \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^\mu \left\{ \begin{array}{l} G - (\sigma_y + \sigma_z) \frac{I_1^2}{I_2^2} - \psi_1 (\sigma_y \sigma_z - \tau_{yz}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_z + \sigma_x) \frac{I_1^2}{I_2^2} - \psi_1 (\sigma_z \sigma_x - \tau_{zx}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ G - (\sigma_x + \sigma_y) \frac{I_1^2}{I_2^2} - \psi_1 (\sigma_x \sigma_y - \tau_{xy}^2) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \frac{I_1^2}{I_2^2} \tau_{yz} - 2 \psi_1 (\tau_{xy} \tau_{zx} - \sigma_x \tau_{yz}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \frac{I_1^2}{I_2^2} \tau_{zx} - 2 \psi_1 (\tau_{xy} \tau_{yz} - \sigma_y \tau_{zx}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \\ 2 \frac{I_1^2}{I_2^2} \tau_{xy} - 2 \psi_1 (\tau_{yz} \tau_{zx} - \sigma_z \tau_{xy}) \frac{I_1^3}{I_3^2} \end{array} \right. \quad (2.13 \text{ a-f})$$

Onde:

$$G = \psi_1 (\mu + 3) \frac{I_1^2}{I_3} - (\mu + 2) \frac{I_1}{I_2} + \frac{\mu}{I_1} \psi_2. \quad (2.14)$$

Essas derivadas são usadas para se obterem os incrementos de deformações plásticas da equação 2.9.

Uma vez que o parâmetro ψ_1 é calculado, os outros parâmetros ψ_2 e μ , podem ser determinados por dados de ensaios de compressão triaxial. Para tanto a relação entre os incrementos de deformação plástica é definida como:

$$v_p = - \frac{d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p} \quad (2.15)$$

Em que $d\varepsilon_{1p}$ e $d\varepsilon_{3p}$ são o maior e o menor incremento de deformação plástica respectivamente, obtidos de ensaios de compressão triaxial. Substituindo as Equações (2.9) e (2.13) para os incrementos de deformação plástica sob condições de compressão triaxial ($\sigma_2 = \sigma_3$) na equação 2.15, obtém-se:

$$\xi_y = \frac{1}{\mu} \xi_x - \psi_2 \quad (2.16)$$

Onde:

$$\xi_x = \frac{1}{1+v_p} \left\{ \frac{I_1^3}{I_2^2} (\sigma_1 + \sigma_3 + 2v_p\sigma_3) + \psi_1 \frac{I_1^4}{I_3^2} (\sigma_1\sigma_3 + v_p\sigma_3^2) \right\} - 3\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} + 2 \frac{I_1^2}{I_2} \quad (2.17)$$

E,

$$\xi_y = \psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \quad (2.18)$$

Deste modo, $1/\mu$ e $-\psi_2$ na equação 2.16 pode ser determinado por regressão linear entre ξ_x e ξ_y calculados de diversos pontos experimentais. (Lade e Kim; 1995)

2.2.5 Critério de Plastificação e Lei de Endurecimento/Amolecimento

As superfícies de plastificação são derivadas de superfícies de constante trabalho plástico. A Função de Plastificação no modelo de Lade Kim é expressa como se segue:

$$f_p = f'_p(\sigma) - f''_p(W_p) = 0 \quad (2.19)$$

Na qual:

$$f'_p = \left[\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right] \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^h \cdot e^q \quad (2.20)$$

Onde h é constante e q varia de zero no eixo hidrostático até a unidade na superfície de ruptura.

Para o endurecimento:

$$f''_p = \left[\frac{1}{D} \right]^{1/\rho} \left[\frac{W_p}{p_a} \right]^{1/\rho} \quad (2.21)$$

Onde D e ρ serão definidos a seguir. As expressões para I_1 , I_2 e I_3 na equação 2.20 são dadas pelas equações 2.4, 2.11 e 2.7 respectivamente.

O parâmetro ψ_1 age como um fator de ponderação entre a forma triangular (do termo I_3) e a forma circular (do termo I_2) assim como na expressão de potencial plástico (equação 2.10). O parâmetro constante h é determinado com base no fato do trabalho plástico ser constante ao longo da superfície de plastificação. Deste modo, entre dois pontos de tensão, A no eixo hidrostático e B na superfície de ruptura, a seguinte expressão é obtida para h:

$$h = \ln \frac{\left[\psi_1 \frac{I_{1B}^3}{I_{3B}} - \frac{I_{1B}^2}{I_{2B}} \right] e}{27\psi_1 + 3} \bigg/ \ln \frac{I_{1A}}{I_{1B}} \quad (2.22)$$

Onde e é a base do logaritmo neperiano.

O valor de q varia com o nível de tensão S, definido como:

$$S = f_n / \eta_1 = \frac{1}{\eta_1} (I_1^3 / I_3 - 27) \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^m \quad (2.23)$$

Onde f_n é o lado esquerdo da equação 2.6 e η_1 é o valor de f_n na ruptura. O nível de tensão S varia de zero no eixo hidrostático até a unidade na superfície de ruptura.

O valor de q pode agora ser determinado de dados de ensaio de acordo com:

$$q = \ln \frac{\left[\frac{W_p}{D p_a} \right]^{1/\rho}}{\left[\psi_1 \frac{I_1^3}{I_3} - \frac{I_1^2}{I_2} \right] \left[\frac{I_1}{p_a} \right]^h} \quad (2.24)$$

E a variação de q com S é expressa como:

$$q = \frac{\alpha S}{1 - (1 - \alpha)S} \quad (2.25)$$

Onde α é constante.

Na equação 2.21 os valores de D e ρ são constantes para um dado material. Deste modo f_p'' varia apenas com o trabalho plástico. Os valores de D e ρ são dados por:

$$\rho = p/h \quad (2.26)$$

E

$$D = \frac{C}{(27 \psi_1 + 3)^p} \quad (2.27)$$

Onde C e p são usados para modelar o trabalho plástico durante a compressão isotrópica:

$$W_p = C p_a \left(\frac{I_1}{p_a} \right)^p \quad (2.28)$$

As superfícies de plastificação tem a forma de gotas assimétricas e são como triângulos com arestas arredondadas na seção transversal, como mostrado na figura 2.8. Conforme o trabalho plástico cresce, as superfícies isotrópicas inflam até que o ponto de tensão alcance a superfície de ruptura.

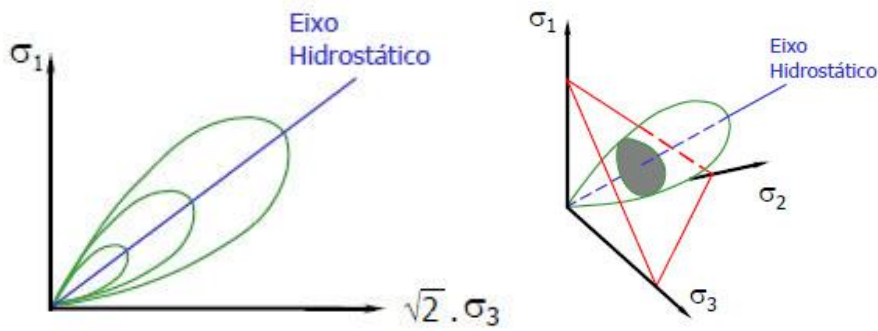


Figura 2.8 Contorno da superfície da Função de Plastificação

A relação entre f_p e W_p é descrita por uma função que cresce monotonicamente e cujo gradiente decresce com o incremento do trabalho plástico.

Para o amolecimento a superfície de plastificação decai isotropicamente de acordo com a função exponencial;

$$f_p^n = A e^{-B \cdot (W_p/p_a)} \quad (2.29)$$

Onde A e B são constantes positivas a serem determinadas com base no gradiente da curva de endurecimento no ponto de ruptura.

Usando a expressão para o potencial plástico na equação 2.10, a relação entre incremento de trabalho plástico e o fator escalar de proporcionalidade $d\lambda_p$ na equação 2.9 pode ser expressa como:

$$d\lambda_p = \frac{dW_p}{\mu g_p} \quad (2.30)$$

Onde o incremento de trabalho plástico pode ser determinado por diferenciação das equações de endurecimento e amolecimento. Para o endurecimento a equação 2.21 produz:

$$dW_p = D p_a \rho f_p^{-1} df_p \quad (2.31)$$

E para o amolecimento:

$$dW_p = - \left[\frac{1}{B} \right] p_a f_p^{-1} df_p \quad (2.32)$$

Onde df_p é negativo durante o amolecimento.

Combinando as equações 2.31 e 2.32 com a equação 2.30 e substituindo-as juntamente com as equações 2.13a-f na equação 2.9 obtém-se a expressão para os incrementos de deformação plástica. (Lade e Kim; 1995).

A condição de irreversibilidade requer que o trabalho plástico seja positivo toda vez que uma mudança na deformação plástica ocorra, deste modo, a superfície de potencial plástico é convexa com as tensões originais.

Dado que $(I_1^3/I_3) > 27$ e $(I_1^2/I_2) > 3$ e (I_1/p_a) sejam sempre positivos, a condição de irreversibilidade, que deve ser trasladada com as tensões para materiais coesivos, exige que: (Lade, 1994).

$$\mu > 0 \quad (2.33)$$

$$\Psi_2 > -(27 \cdot \Psi_1 + 3) \quad (2.34)$$

A tabela 2.8 apresenta os parâmetros do modelo de Lade Kim

Componentes do Modelo	Parâmetros
Deformações Elásticas	M, λ, ν
Critério de Ruptura	η_1, m, a
Potencial Plástico	Ψ_2, μ
Função de Plastificação	h, α
Leis de Endurecimento/Amolecimento	C, p

Tabela 2.8 Parâmetros do Modelo de Lade Kim

Deste modo, o modelo requer doze parâmetros para os materiais com coesão efetiva. Esses parâmetros podem ser determinados por meio de, no mínimo, três ensaios de compressão triaxial drenados e um ensaio de compressão hidrostática.

2.3 Trabalhos Correlatos

Alguns outros modelos constitutivos vêm sendo desenvolvidos para considerar a degradação da rocha por ataques químicos.

Gutierrez (2010) ajusta um modelo onde são calculadas matrizes de degradação elásticas, elastoplásticas e viscoplásticas, para considerar a redução da rigidez elástica, da resistência ao cisalhamento e o maior colapso de poros respectivamente, quando o fluido de saturação da rocha se altera.

O modelo de deformações viscoplásticas se baseia em “linhas de tempo de referência” que estão relacionadas ao índice de vazios, fortemente afetado pelo ataque químico feito pela água. Observou então quais parâmetros do modelo eram alterados pela variação da saturação de água, e introduziu o grau de saturação de água no cálculo dos parâmetros sensíveis, obtendo resultados satisfatórios na comparação do modelo com os dados experimentais. Considerando que o ataque químico da água às rochas é um dos principais fatores responsáveis pelo intemperismo, modelo semelhante pode ser utilizado.

Nova (2003) propõe um modelo elastoplástico onde a variação do comportamento de rochas intemperizadas possa ser adequadamente representado. Um exemplo é a passagem do comportamento dúctil na rocha sã, para o comportamento frágil na rocha alterada.

O modelo é uma adaptação para modelos de materiais não cimentados e assume que o intemperismo não afeta algumas propriedades do material, como o módulo elástico e o ângulo de atrito. Uma das variáveis propostas leva em conta a cimentação interparticular, que neste modelo é separada em degradação por efeitos mecânicos e não mecânicos (degradação química, temperatura, viscosidade). É proposta uma função escalar que condensa todos estes efeitos não mecânicos que causam a queda da resistência dos contatos interparticulares da rocha. Este estudo foi feito comparando ensaios de rochas com e sem percolação de ácido, simulando o ataque químico.

2.4 Introdução sobre a Análise Inversa

O procedimento matemático da análise inversa consiste basicamente na formulação de uma função objetivo, que mede a diferença entre os valores medidos no laboratório e aqueles calculados pelo modelo, e a seleção de uma estratégia de otimização que possibilite a procura do mínimo da função objetivo, ou seja, a menor diferença entre valores medidos e calculados.

Uma definição apropriada da função objetivo é crucial para o sucesso da otimização. Devido à variabilidade das respostas de um experimento é importante identificar e incluir na função objetivo os dados relevantes aos parâmetros do modelo que vão ser otimizados, uma vez que a função objetivo é aquela que avalia para um dado conjunto de parâmetros p a diferença entre valores experimentais e previstos. Funções objetivas bastante utilizadas são baseadas no método dos mínimos quadrados e no método Bayesiano, que foi o caso deste trabalho.

Os algoritmos de otimização procuram o valor mínimo da função objetivo, e portanto trata-se de um processo iterativo, onde para iniciar a minimização o usuário fornece uma estimativa inicial do conjunto de parâmetros p_0 .

Estes algoritmos normalmente não atingem exatamente a solução, mas geram uma sequência de pontos cujo limite converge ao ponto ótimo. Na prática, termina-se o processo da otimização quando o ponto está suficientemente perto da solução, levando em consideração algum critério de parada. Se satisfeito o critério, o processo iterativo é interrompido, caso contrário, o processo continua.

Os algoritmos de otimização utilizam uma matriz de derivadas de segunda ordem da função objetivo com relação ao vetor de parâmetros, a chamada matriz Hessiana. Entretanto, muitas vezes este cálculo exige intenso esforço computacional, e são utilizadas aproximações no cálculo da Hessiana, como por exemplo informações disponíveis da primeira derivada ou de iterações anteriores, que são os chamados métodos quase-Newton, como o algoritmo de otimização de Levenberg –Marquardt.

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e Procedimentos de Campo

3.1.1 Generalidades

Existem poucos perfis de alteração disponíveis no Rio de Janeiro, tanto por não serem adequados para este trabalho, tanto por dificuldades de acesso e segurança. Perfis de gnaisses, que são predominantes no Rio de Janeiro, em geral não atendem aos objetivos desta pesquisa, pelas razões a seguir:

- Podem apresentar forte orientação mineralógica, com uma anisotropia acentuada que influenciaria as propriedades de resistência. Podem apresentar uma variação granulométrica muito grande dos minerais, o que seria um problema na escala das amostras, isto é, uma amostra poderia conter um mineral muito grande, que não seria representativo do maciço todo;
- A ação do intemperismo químico e físico no local pode proporcionar uma rápida formação de solo, existindo apenas o horizonte de rocha sã e o de solo, sendo que este trabalho não contempla o horizonte de solo.

Deste modo o perfil de Leptinito do morro Dona Marta atende aos objetivos deste trabalho, pois embora o perfil seja gnaissico, apresenta granulometria relativamente homogênea, com pouca orientação mineralógica e pelo menos três horizontes bem definidos. A figura 3.1 apresenta uma vista geral do Morro D. Marta

O morro Dona Marta tem seu relevo caracterizado por uma subida suave, seguida pelo trecho mais alto com bastante declividade, conforme observa-se pelo ângulo do plano inclinado (bonde do Dona Marta), na figura 3.2.



Figura 3.1 Vista geral da Comunidade Dona Marta (Google Maps)



Figura 3.2 Vista do Plano Inclinado do Morro Dona Marta

3.1.2 Leptinito do Morro D. Marta

Os leptinitos são gnaisses leucocráticos, ácido (teor de sílica >65%) com grão fino até médio, escassamente folheado, sendo comumente encontrado com textura grosseira ou cortado por pegmatitos e aplitos. Sua mineralogia é bastante pobre composta por quartzo (51%), feldspatos alcalinos (43,3%), plagioclásio, e quantidades menores de biotita e granada (1,6%). Ocupam principalmente as encostas dos morros de Santa Teresa, Laranjeiras e Corcovado na cidade do Rio de Janeiro.

Neste trabalho foi utilizada a classificação da ISRM aliada às observações de campo na identificação e classificação do maciço de Leptinito do Morro Dona Marta.

Maciço classe I – Rocha Sã - Os minerais mantêm seu brilho, cor e dureza originais de acordo com as figuras 3.3 e 3.4. Não é possível retirar grãos ou escavar a matriz rochosa. Neste trabalho todos os corpos de prova e ensaios deste nível são denominados Nível 1.



Figura 3.3 Maciço de leptinito são do Dona Marta N1



Figura 3.4 Blocos de Rocha são (de onde foram retiradas as amostras). Próximo à ecobarreira, morro Dona Marta

Maciço Classe II – Rocha Levemente Intemperizada Os feldspatos perdem seu brilho, enquanto as biotitas tornam-se acinzentadas e as granadas tornam-se ocre. A rocha

pode ser quebrada com diversos golpes de martelo geológico, não sendo possível escavá-la manualmente. As granadas já podem ser arranhadas com dificuldade pelo canivete, embora nenhum mineral possa ser arrancado da rocha. Ver figuras 3.5 e 3.6. Neste trabalho todos os corpos de prova e ensaios deste nível são denominados Nível 2.



Figura 3.5 Maciço de rocha levemente intemperizada. Vista 1. Rua Oswaldo Seabra.



Figura 3.6 Maciço de rocha levemente intemperizada. Vista 2. Rua Oswaldo Seabra.

Maciço Classe IV – Rocha Altamente Intemperizada – Grande parte da matriz rochosa está decomposta, com os feldspatos, biotitas e granadas bastante argilizados, Figuras 3.7 e 3.8 Sendo as amostras facilmente quebradas por golpes do martelo geológico. Neste trabalho todos os corpos de prova e ensaios deste nível são denominados Nível 3.



Figura 3.7 Maciço de rocha altamente intemperizada. Vista 1. Próximo ao Campo de Futebol.



Figura 3.8 Maciço de rocha altamente intemperizada. Vista 2. Próximo ao Campo de Futebol.

A figura 3.9 apresenta o ponto de retirada dos blocos. O ponto de retirada de rocha sã (N1 em amarelo) no Dona Marta encontra-se em praça conhecida como campo da arena, próximo ao muro (ecobarreira), aproximadamente na cota da estação 4 do plano inclinado, em cota mais abaixo que os demais locais. Coordenadas: 22°54'56"S 43°12'42"W

O ponto de retirada de rocha levemente intemperizada (N2 em azul) encontra-se

acima da estação 5 do plano inclinado, ao lado da quadra de futebol e pouco abaixo do batalhão policial. A figura mostra os locais de retirada dos blocos. Coordenadas: 22°56'51"S 43°11'38"W

O ponto de retirada de rocha altamente intemperizada (N3 em rosa) encontra-se acima do batalhão policial, às margens da Rua Osvaldo Seabra que dá acesso ao bairro de Laranjeiras. Coordenadas: 22°59'52"S 43°13'36"W



Figura 3.9 Local da retirada dos blocos na Comunidade Dona Marta, em amarelo N1, em azul N2 e em rosa N3

3.1.3 Análise das Lâminas Petrográficas na Lupa

Foram feitas lâminas petrográficas (figura 3.10) para cada um dos três níveis de alteração, e analisadas na lupa (aumento de 125x).

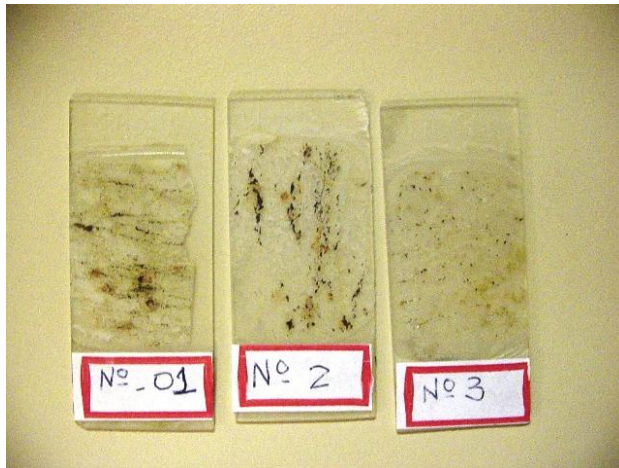


Figura 3.10 Lâminas petrográficas de cada um dos níveis de alteração

No nível 1 observa-se nitidamente a presença dos K feldspatos (microclinas) íntegros, com suas tramas características. Há um grande contato entre grãos. A amostra, olhada na lupa apresenta-se como uma massa sólida. (Figuras 3.11 e 3.12).

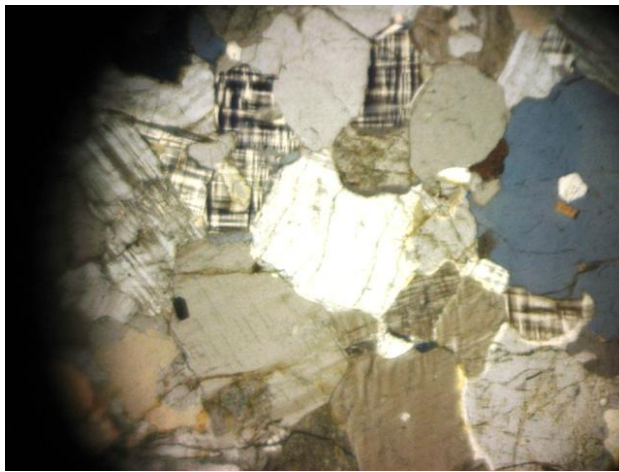


Figura 3.11 Lâmina petrográfica Nível 1 – Imagem 1

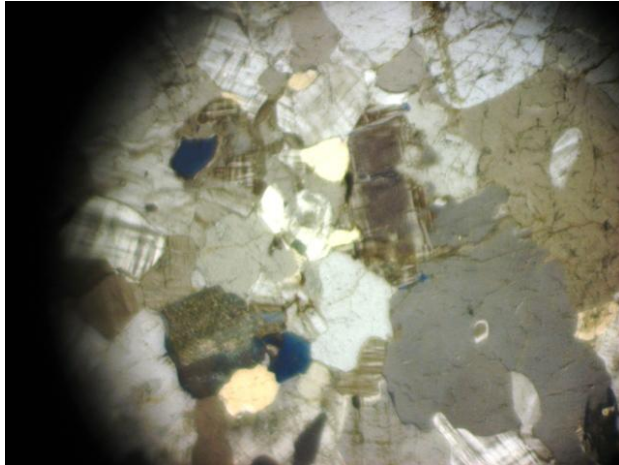


Figura 3.12 Lâmina petrográfica Nível 1 – Imagem 2

Para o nível 2, apesar do aspecto macroscópico não parecer tão intemperizado, as lâminas indicam que este nível apresenta uma forte perda de contato entre os grãos, com o aparecimento de vazios e portanto aumento de porosidade, além de várias micro fraturas nos minerais. Os feldspatos perdem seus álcalis com o intemperismo, as tramas das microclinas não são tão nítidas e os quartzos de maior tamanho se apresentam bastante micro fraturados. Mais do que a própria degradação química dos minerais, a perda de contato entre os grãos e o micro fraturamento, parecem comandar o comportamento do nível 2, uma vez que na lupa já é possível observar uma individualização dos minerais. (Figuras 3.13 e 3.14).

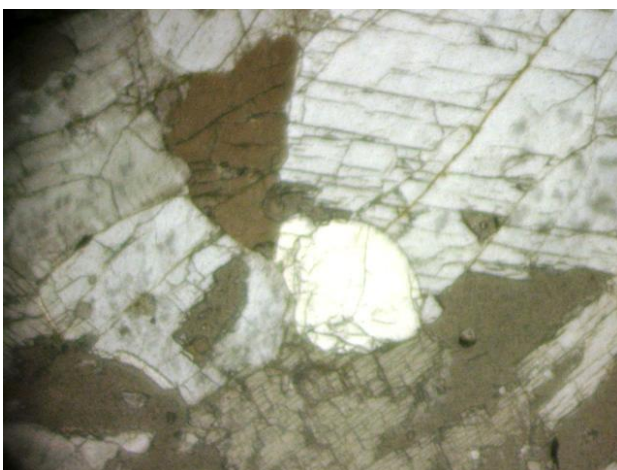


Figura 3.13 Lâmina petrográfica Nível 2 – Imagem 1

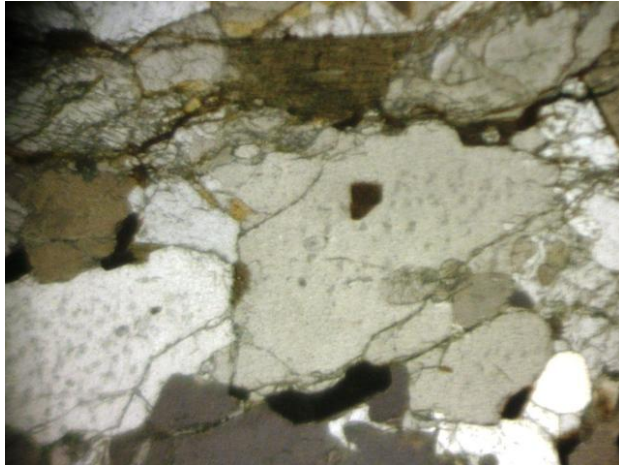


Figura 3.14 Lâmina petrográfica Nível 2 – Imagem 2

Para o nível 3, a análise da amostra na lupa apresenta uma massa aparentemente homogênea, não sendo possível distinguir os minerais. Observam-se grãos de quartzo e uma cimentação silicosa, pouco argilosa, que possivelmente é o que confere a resistência ao material. Os quartos estão totalmente micro fraturados e as granadas intemperizadas, restando a presença de ferro. (Figuras 3.15 e 3.16)

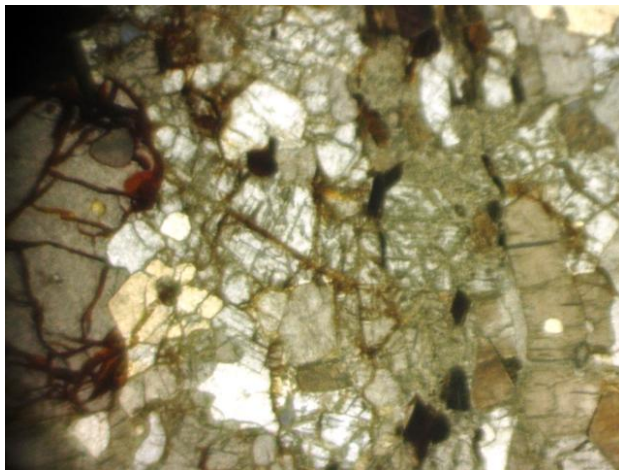


Figura 3.15 Lâmina petrográfica Nível 3 - Imagem 1

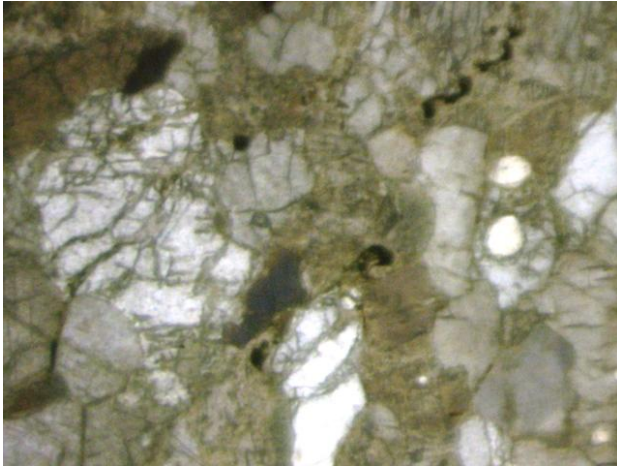


Figura 3.16 Lâmina petrográfica Nível 3 - Imagem 2

A figura 3.17 mostra o aspecto das amostras na lupa, com uma individualização maior dos minerais no nível 2 e a alta intemperização do nível 3.

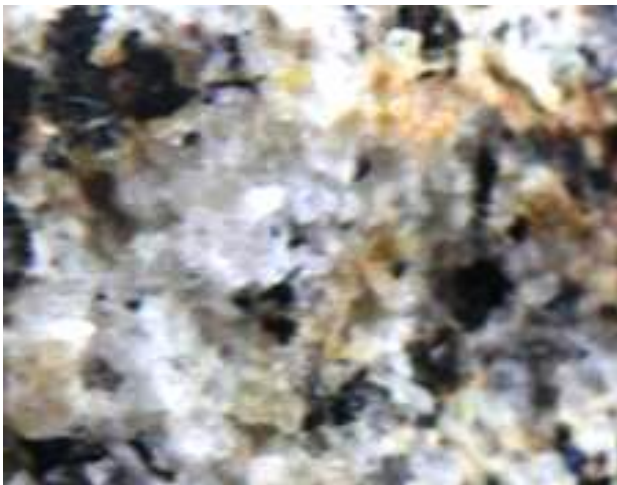


Figura 3.17 Níveis 1, 2 e 3 na lupa aumento 40x

3.2 Procedimentos de Laboratório

3.2.1 Preparação de Corpos de Prova

Foram coletados blocos de cada um dos horizontes de rocha (sã, levemente intemperizada, altamente intemperizada) da Comunidade Dona Marta. Estes blocos foram levados para o Laboratório de Mecânica das Rochas do Departamento de geologia da UFRJ, onde foram extraídos corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 42mm (padrão BX), e relação altura/diâmetro em torno de 2,5, sendo verificadas as condições de rugosidade e paralelismo entre topo e base, de acordo com as recomendações da ISRM (1981).

As figuras 3.18 e 3.19 mostram os blocos do nível 1 coletados em campo para a retirada de corpos de prova.



Figura 3.18 Bloco Nível 1 – Imagem 1



Figura 3.19 Bloco Nível 1 – Imagem 2

As figuras 3.20 e 3.21 mostram os blocos do nível 2 coletados em campo para a retirada de corpos de prova.



Figura 3.20 Bloco Nível 2 – Imagem 1



Figura 3.21 Bloco Nível 2 – Imagem 2

As figuras 3.22 e 3.23 mostram os blocos do nível 3 coletados em campo para a retirada de corpos de prova.



Figura 3.22 Blocos Nível 3 – Imagem 1

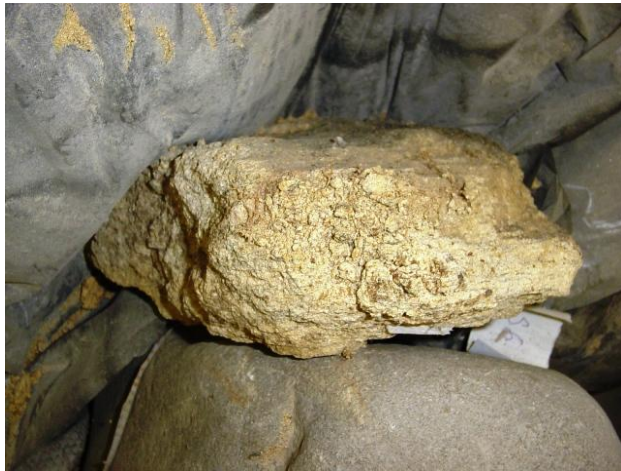


Figura 3.23 Bloco Nível 3 – Imagem 2

A figura 3.24 mostra o equipamento (Laboratório de Mecânica de Rochas – UFRJ) utilizado para a retirada de corpos de prova dos blocos.



Figura 3.24 Máquina de corte com barrilete amostrador BX

As figuras 3.25 e 3.26 mostram a preparação dos corpos de prova.



Figura 3.25 Blocos no nível 1 cortados para retirada de corpos de prova



Figura 3.26 Preparação dos corpos de prova

As figuras 3.27 e 3.28 mostram os corpos de prova obtidos para os níveis 1 e 2.



Figura 3.27 Corpos de Prova Nível 1



Figura 3.28 Corpos de Prova Nível 2

As figuras 3.29 e 3.30 mostram a diferença de alteração dos níveis 1 e 2, diferenças de cor e alteração mineral. Nota-se que os corpos de prova dos níveis 1 e 2 apresentam direção da foliação paralela á direção do carregamento principal.



Figura 3.29 Evidência da Alteração Níveis 2 e 1 - Frontal



Figura 3.30 Evidência da Alteração Níveis 1 e 2 – Lateral

As figuras 3.31 e 3.32 mostram as condições de alteração do nível 3 e a tentativa de produção de corpos de prova para esse nível.



Figura 3.31 Alteração do nível 3



Figura 3.32 Tentativa de produção de corpos de prova do nível 3

A figura 3.33 mostra a diferença entre os três níveis de alteração para o Leptinito do D. Marta.



Figura 3.33 Evidência da Alteração Níveis 1, 2 e 3

Devido á vibração excessiva do equipamento de corte, não foi possível obter corpos de prova do nível 3, pois estes se desintegravam. Para o aproveitamento dos blocos do nível 3 foi feito no Laboratório de Estruturas da UFRJ o congelamento com nitrogênio dos blocos.

Primeiramente foram verificados os planos de fratura e a parte mais consolidada foi cortada em pequenos blocos. Estes cubos foram então congelados, em seguida procedeu-se á marcação e a retificação dos testemunhos, isto é, foram usinados para que ficassem com o

formato e medidas dos corpos de prova. Em seguida colocaram-se caps de madeira em cada uma das faces dos cilindros e aplicou-se a membrana termo retrátil para a manutenção da consolidação dos corpos de prova e seu transporte até o Laboratório de Mecânica de Rochas do CENPES para ensaios.

Com esta técnica conseguiu-se portanto representar o nível mais alterado. As Figuras 3.34 até 3.39 mostram esse processo. Nota-se que os corpos de prova do nível 3 apresentam direção da foliação transversal á direção do carregamento principal.



Figura 3.34 Congelamento dos blocos do nível 3 com nitrogênio

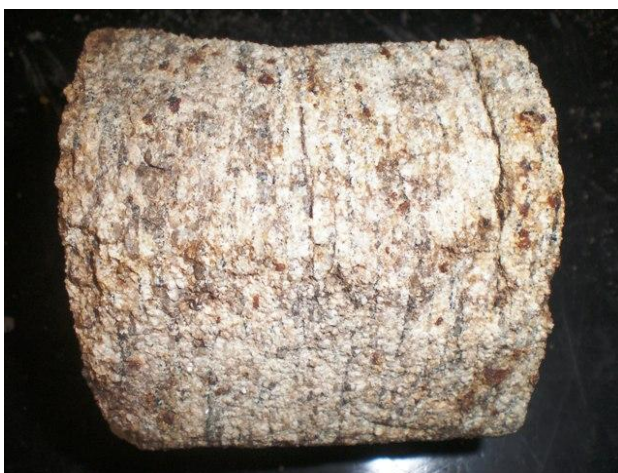


Figura 3.35 Aspecto dos blocos do nível 3



Figura 3.36 Blocos congelados



Figura 3.37 Marcação para moldagem dos corpos de prova



Figura 3.38 Usinagem dos corpos de prova



Figura 3.39 Aplicação da membrana termo retrátil para manutenção da consolidação dos blocos

3.2.2 Ensaios

3.2.2.1 Introdução

Os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas do Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES), no Rio de Janeiro. Foi utilizada uma máquina de ensaios servo-controlada MTS, modelo 315.02, com rigidez de 10 GN/m e capacidade de 2700 KN em compressão (Figura 3.40). Para as medidas das deformações axial e radial foram utilizados extensômetros elétricos modelos 632.11C-20 (axial) e 632.92C-03 (radial), cujas sensibilidades são de 2,386 mV/V (axial) e 0,765 mV/V (radial).



Figura 3.40 Máquina de Ensaio MTS

- Nos ensaios triaxiais N1-1, N2-1, N3-1 foram feitos reaproveitamentos das amostras utilizadas nos ensaios hidrostáticos para obter uma estimativa inicial das resistências. Estes ensaios não foram utilizados nas calibrações pelas amostras já terem sido afetadas pelos ensaios hidrostáticos.
- Todos os corpos de prova (de todos os níveis de alteração) foram recarregados até próximo a tensão de pico. Antes que a rocha rompesse, o controle da máquina era trocado, do controle de força para o controle de deformação para que pudesse ser caracterizado o pós pico.

3.2.2.2 Caracterização

Foram feitos ensaios de porosidade e peso específico da rocha para 2 corpos de prova para os níveis 1 e 2. Para o nível 3 foi feito apenas um ensaio devido á degradação das amostras com o vácuo. O fluido utilizado para a saturação no cálculo da porosidade foi a água destilada com massa específica de 1000kg/m^3 . A tabela 3.1 apresenta os resultados.

Nível	Massa seca (kg)	Massa saturada (kg)	Volume poroso (m ³)	Volume amostra (m ³)	Porosidade (%)	Porosidade média (%)	Peso específico (kN/m ³)	Peso específico médio (kN/m ³)
1	0,2325	0,2335	1,0 x10 ⁻⁶	89,1x10 ⁻⁶	1,12	1,07	26,09	26,10
	0,2333	0,2342	0,9 x10 ⁻⁶	89,4 x10 ⁻⁶	1,01		26,10	
2	0,2004	0,2017	1,3 x10 ⁻⁶	77,6 x10 ⁻⁶	1,68	1,68	25,82	25,79
	0,1999	0,2012	1,3 x10 ⁻⁶	77,6 x10 ⁻⁶	1,68		25,76	
3	0,2001	0,2050	4,9 x10 ⁻⁶	82,3 x10 ⁻⁶	5,95	5,95	24,31	24,31

Tabela 3.1 Caracterização dos três níveis do Leptinito

3.2.2.3 Ensaios Hidrostáticos

Foram realizados ensaios hidrostáticos idênticos para os níveis, 1, 2 e 3, carregando-se até 10MPa, em seguida descarregando-se até 0MPa, recarregando-se até 20MPa, descarregando até 0MPa, recarregando-se até 30MPa e descarregando até 0MPa.

Para o nível 3 no terceiro ciclo de recarregamento em 27MPa houve um vazamento e o ensaio foi interrompido. Ao retirar a amostra da célula triaxial observou-se que a membrana rasgou na interface amostra-cap inferior, devido ao atrito com o corpo de prova.

O gráfico 3.1 apresenta os resultados dos ensaios hidrostáticos.

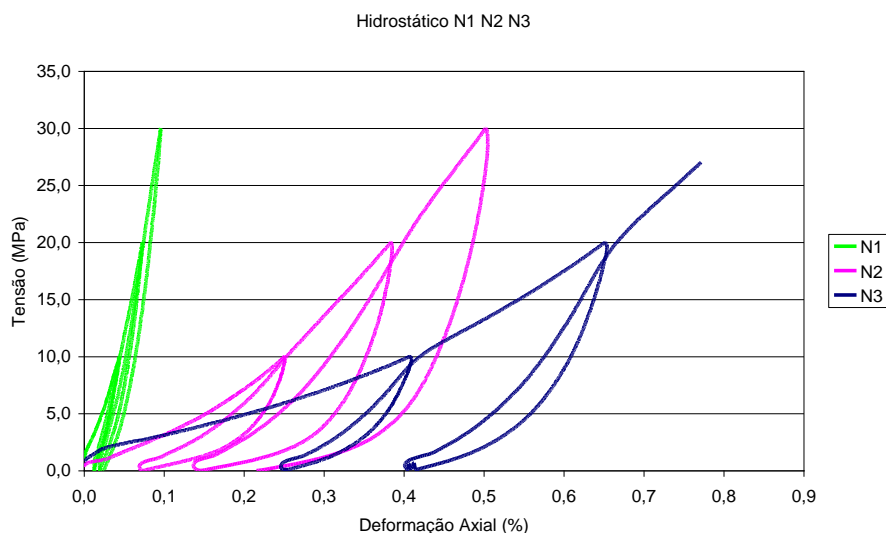


Gráfico 3.1 Ensaios Hidrostáticos Níveis 1, 2 e 3

3.2.2.4 Ensaios Triaxiais de reaproveitamento das amostras com 10MPa de tensão confinante sem pós pico

Os gráficos 3.2 a 3.5 mostram os resultados dos ensaios triaxiais com 10MPa de tensão confinante feitos com as amostras reaproveitadas dos ensaios hidrostáticos.

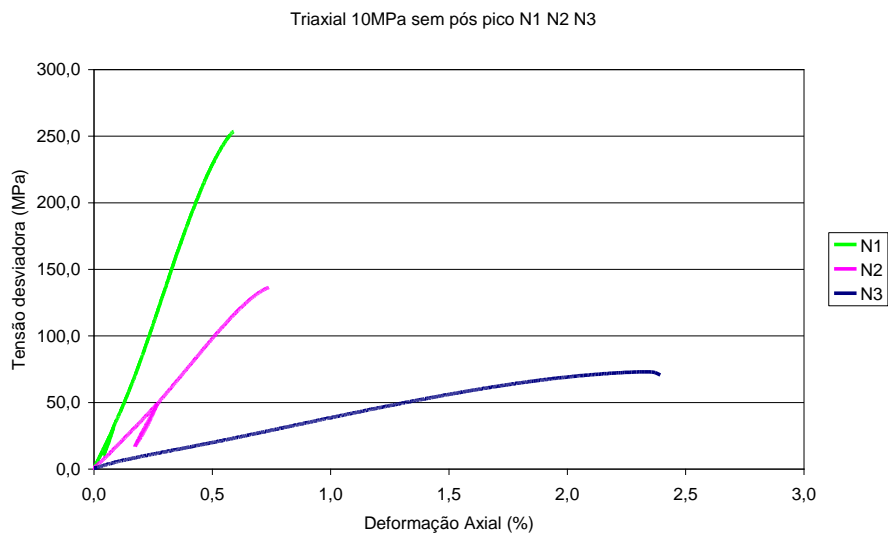


Gráfico 3.2 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico – Deformações Axiais x tensão desviadora

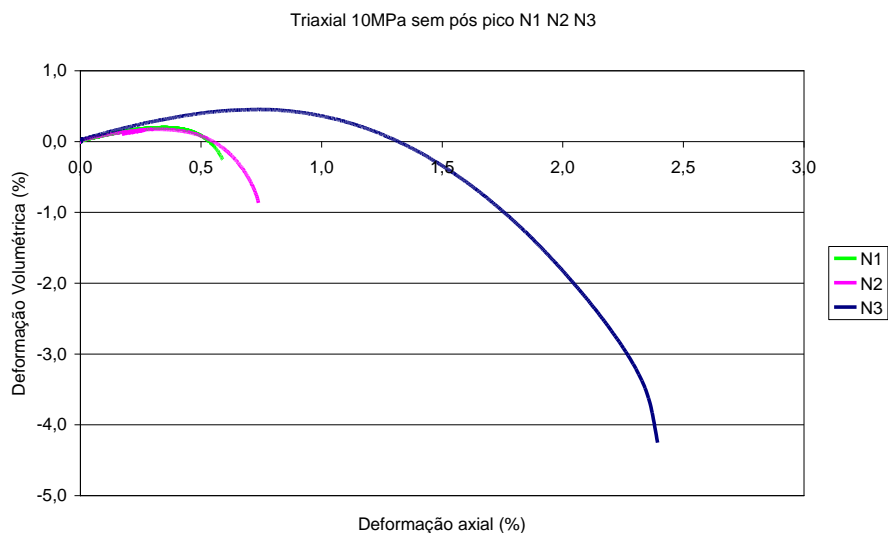


Gráfico 3.3 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico – Deformações Axiais x deformação volumétrica

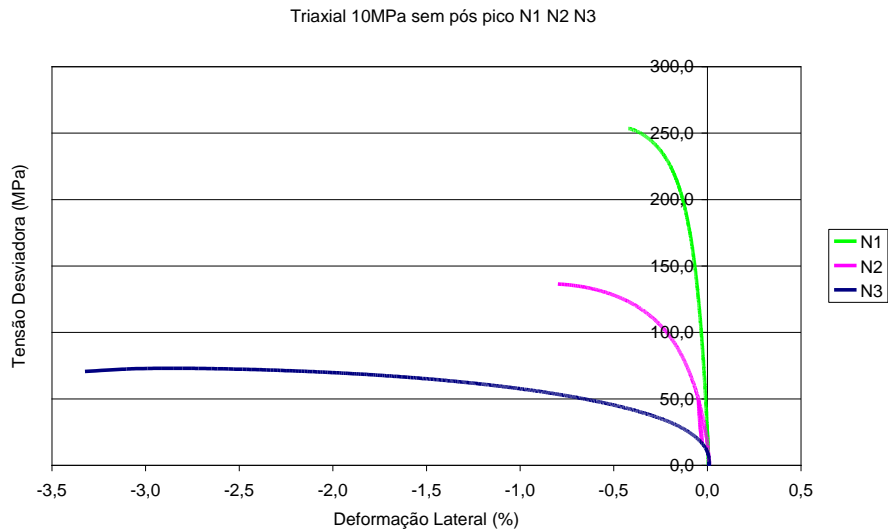


Gráfico 3.4 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico – Deformações Laterais x tensão desviadora

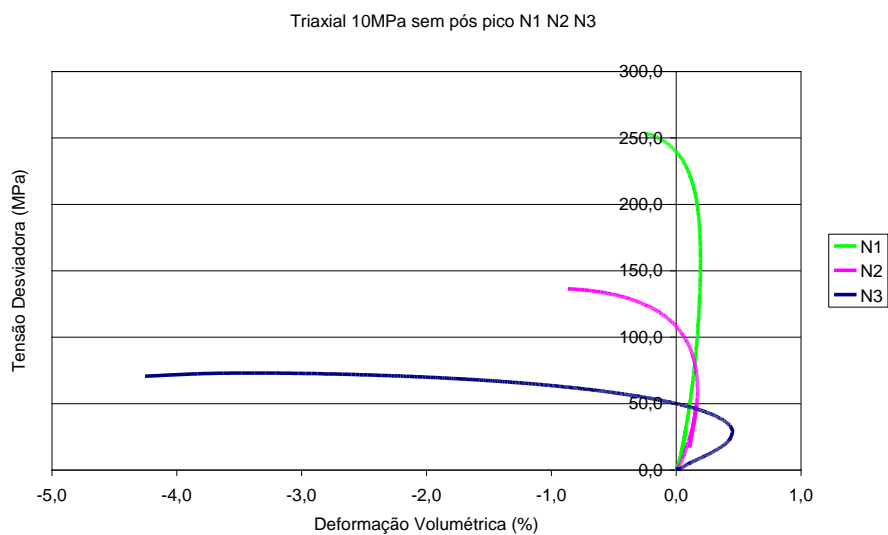


Gráfico 3.5 Ensaio Triaxial (Conf. 10 MPa) N1, N2 e N3 sem pós pico – Deformações Volumétricas x tensão desviadora

Para estes ensaios obteve-se como tensão de ruptura 253 MPa para o nível 1, 136 MPa para o nível 2 e 73 MPa para o nível 3 com tensão confinante de 10MPa.

3.2.2.5 Ensaios Nível 1

A tabela 3.2 indica os ensaios realizados para o nível 1

Ensaio	Tipo	Tensão Confinante (MPa)	carregamento	descarregamento
N1-1	triaxial	10	até 30 MPa	até 10 MPa
N1-2	triaxial	10	até 148 MPa	até 45 MPa
N1-3	triaxial	5	até 137 MPa	até 63 MPa
N1-4	triaxial	2	até 93 MPa	até 37 MPa
N1-5	uniaxial	0	até 81 MPa	até 24 MPa

Tabela 3.2 Ensaios realizados para o nível 1.

- Não foi possível caracterizar o pós pico do ensaio uniaxial N1-5 devido á ruptura do corpo de prova.

Os gráficos 3.6 a 3.9 mostram os resultados dos ensaios realizados para o nível 1.

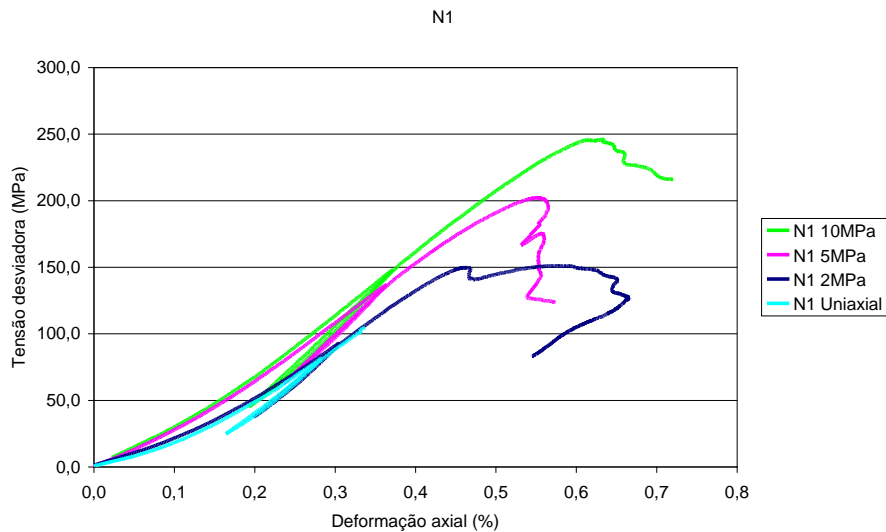


Gráfico 3.6 Ensaios Nível 1 – Deformação Axial x Tensão Desviadora

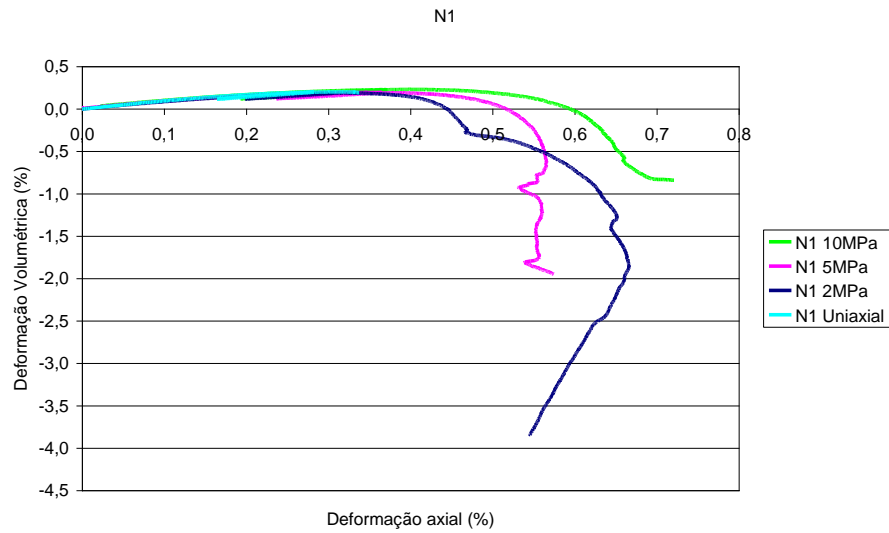


Gráfico 3.7 Ensaio Nível 1 – Deformação Axial x Deformação Volumétrica

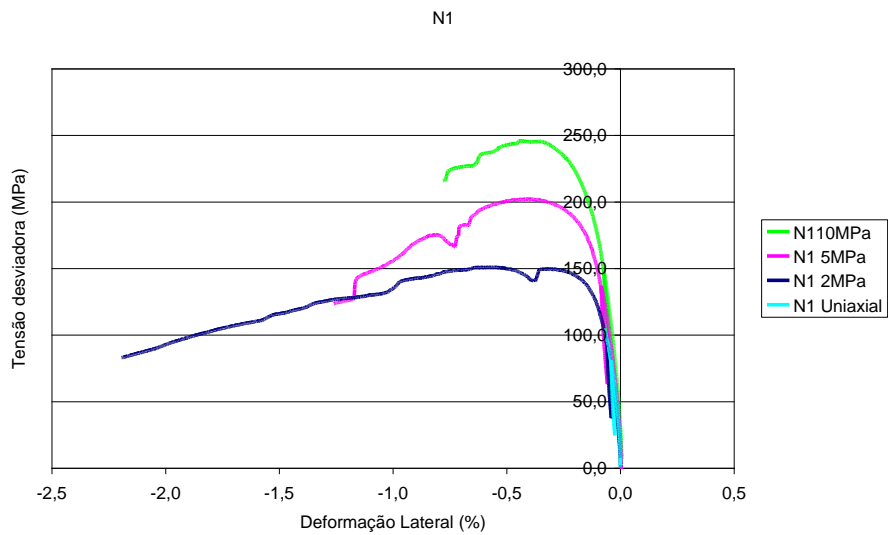


Gráfico 3.8 Ensaio Nível 1- Deformação Lateral x Tensão Desviadora

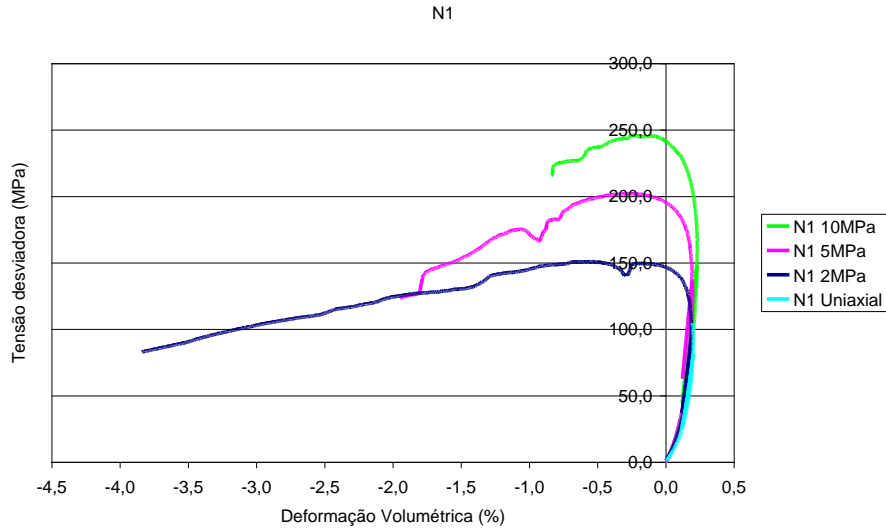


Gráfico 3.9 Ensaio Nível 1- Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora

3.2.2.6 Ensaio Nível 2

A tabela 3.3 indica os ensaios realizados para o nível 2

Ensaio	Tipo	Tensão Confinante (MPa)	carregamento	descarregamento
N2-1	triaxial	10	até 50 MPa	até 20 MPa
N2-2	triaxial	10	até 70 MPa	até 20 MPa
N2-3	triaxial	5	até 71 MPa	até 30 MPa
N2-4	triaxial	2	até 46 MPa	até 18 MPa
N2-5	uniaxial	0	até 16 MPa	até 5 MPa

Tabela 3.3 Ensaio realizados para o nível 1.

Os gráficos 3.10 a 3.13 mostram os resultados dos ensaios realizados para o nível 2. Nota-se que para 5MPa de tensão confinante a amostra apresentou-se mais rígida que os demais.

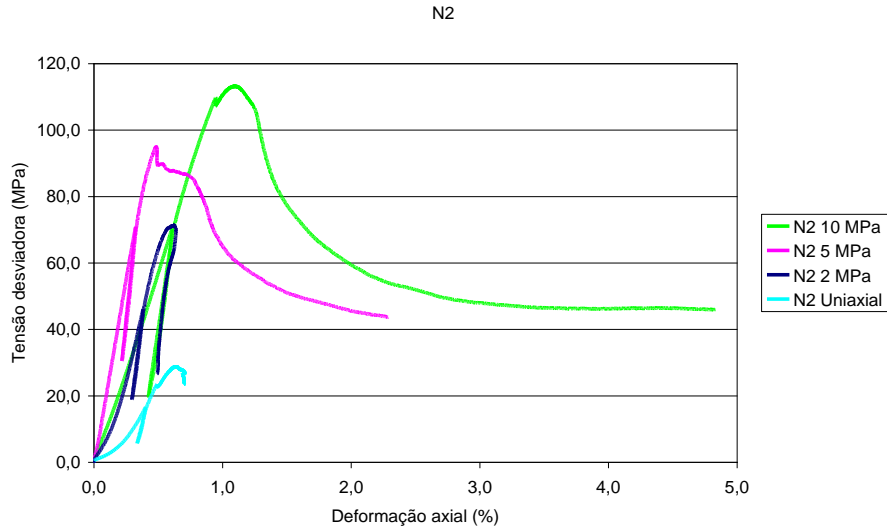


Gráfico 3.10 Ensaio Nível 2 – Deformação Axial x Tensão Confinante

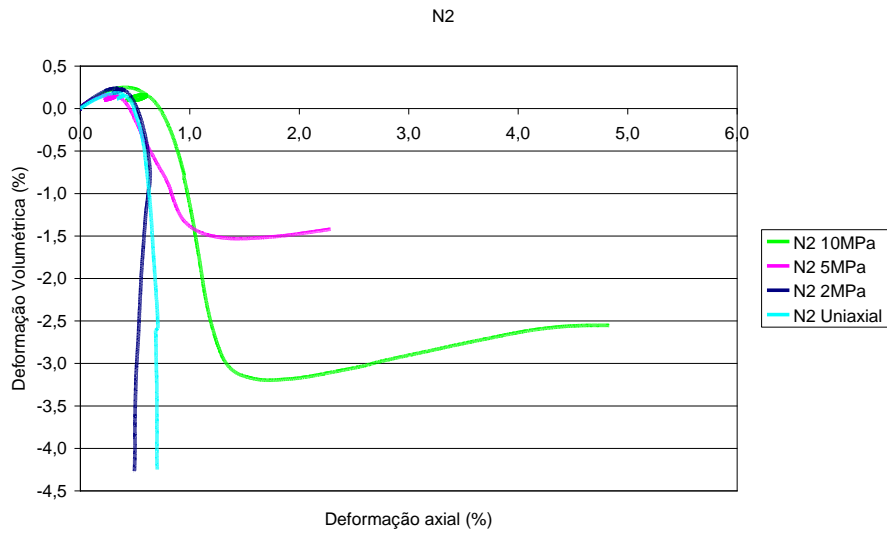


Gráfico 3.11 Ensaio Nível 2 – Deformação Axial x Deformação Volumétrica

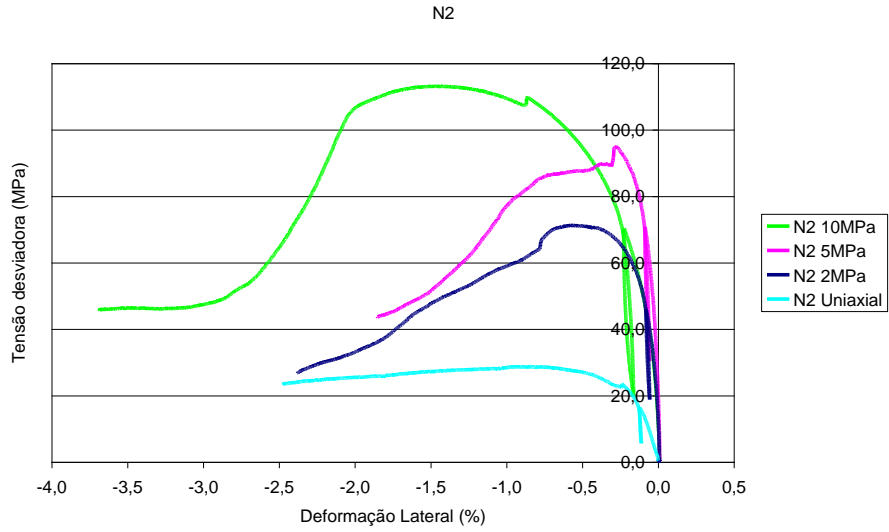


Gráfico 3.12 Ensaios Nível 2 – Deformação Lateral x Tensão Desviadora

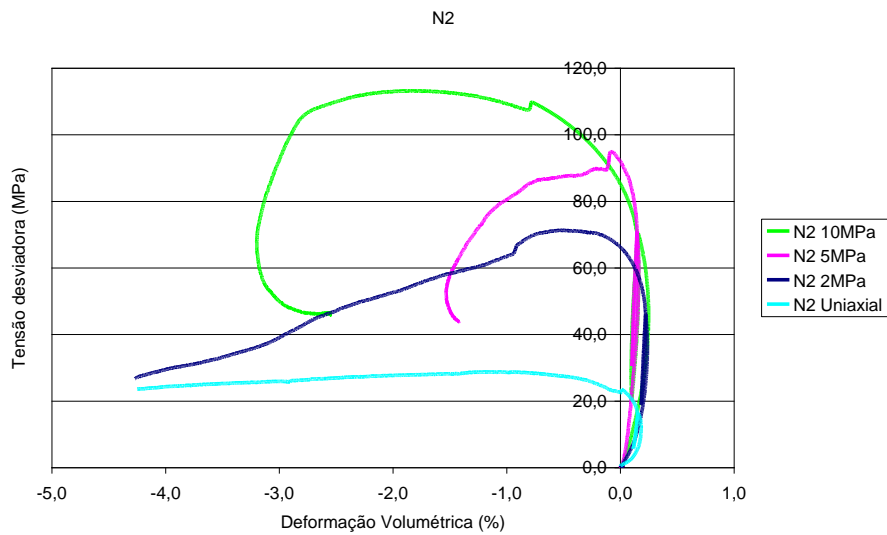


Gráfico 3.13 Ensaios Nível 2 – Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora

3.2.2.7 Ensaios Nível 3

A tabela 3.4 indica os ensaios realizados para o nível 3

Ensaio	Tipo	Tensão Confinante (MPa)	carregamento	descarregamento
N3-1	triaxial	10	Até a ruptura	Não houve
N3-2	triaxial	10	até 40 MPa	até 10 MPa
N3-3	triaxial	5	até 29 MPa	até 14 MPa
N3-4	triaxial	2	até 23 MPa	até 9 MPa
N3-5	uniaxial	0	até 8 MPa	até 3 MPa

Tabela 3.4 Ensaios realizados para o nível 3.

Não foi feito ciclo de recarregamento para o ensaio N3-1.

Os gráficos 3.14 a 3.17 mostram os resultados dos ensaios realizados para o nível 3.

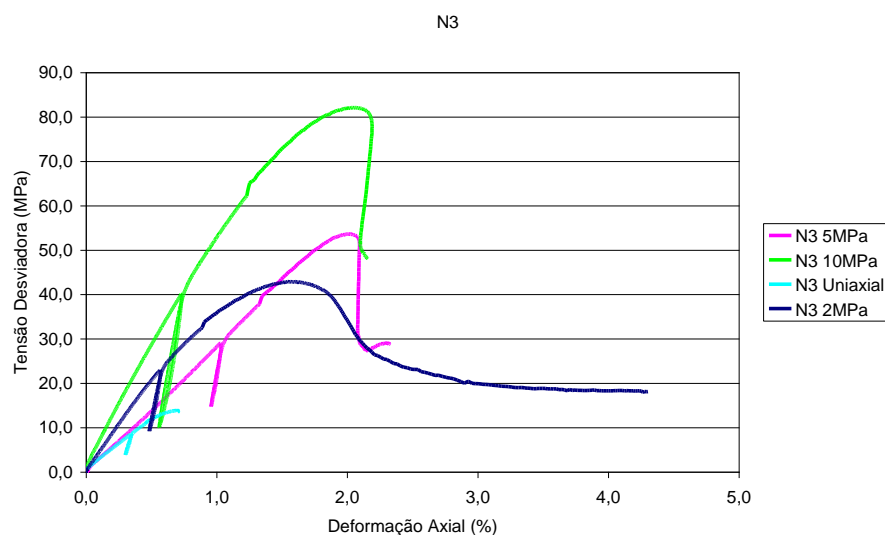


Gráfico 3.14 Ensaios Nível 3 – Deformação Axial x Tensão Confinante

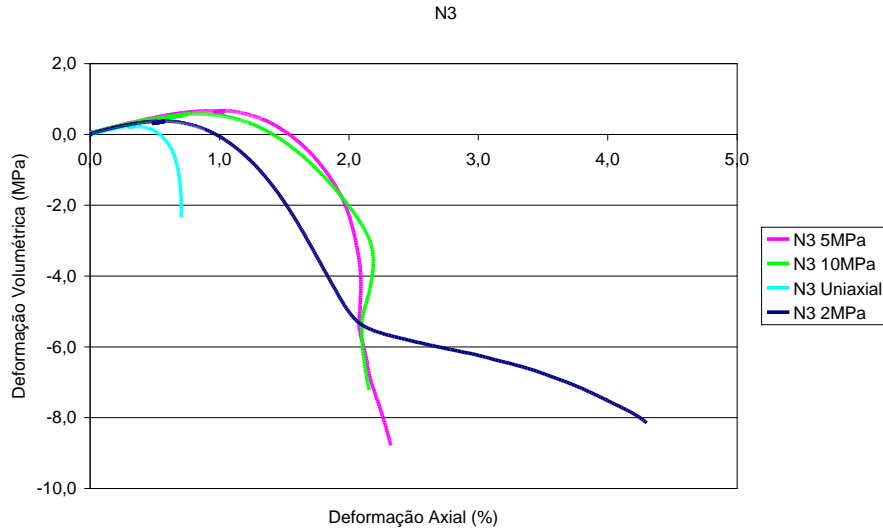


Gráfico 3.15 Ensaio Nível 3 – Deformação Axial x Deformação Volumétrica

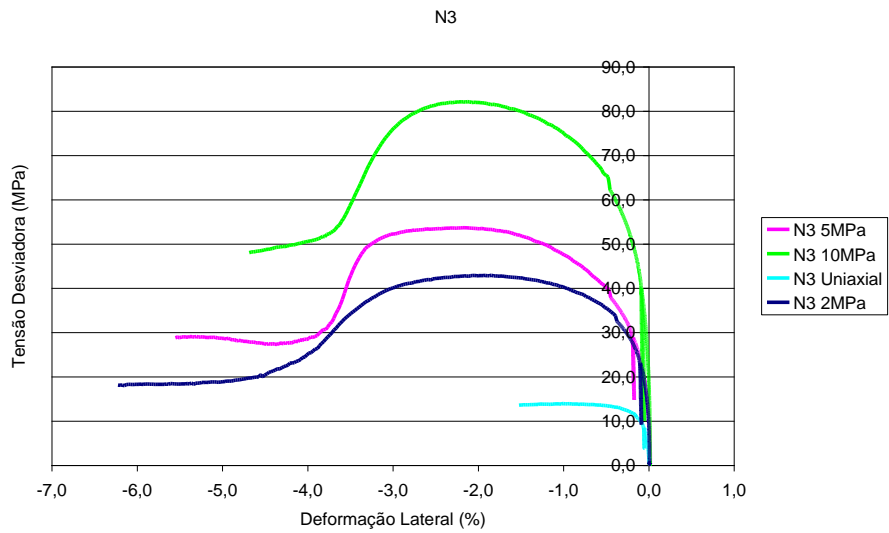


Gráfico 3.16 Ensaio Nível 3 – Deformação Lateral x Tensão Desviadora

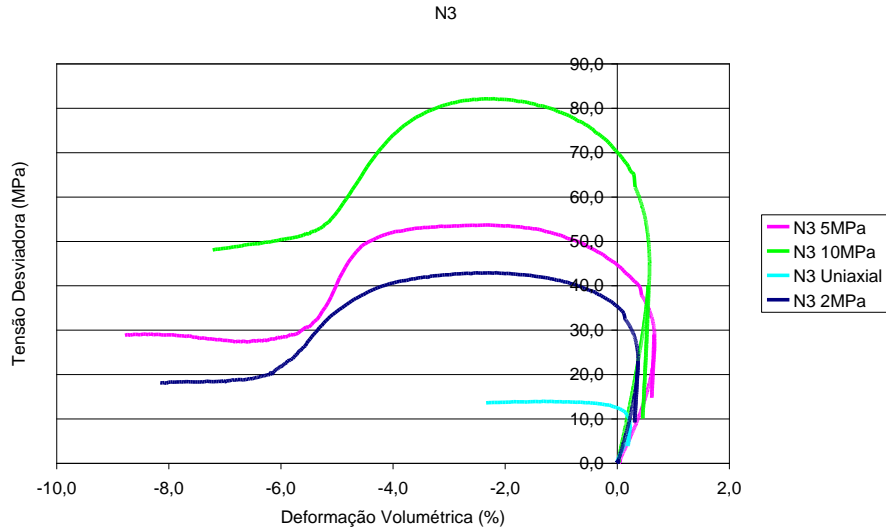


Gráfico 3.17 Ensaio Nível 3 – Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora

A tabela 3.5 mostra os parâmetros elásticos obtidos pelos resultados de ensaios no trecho de recarregamento das curvas.

		E (GPa)	ν
N1	Uniaxial	46	0,12
	Conf. 2MPa	51	0,19
	Conf. 5MPa	57	0,14
	Conf. 10MPa	56	0,12
N2	Uniaxial	15	0,22
	Conf. 2MPa	30	0,20
	Conf. 5MPa	36	0,27
	Conf. 10MPa	26	0,23
N3	Uniaxial	10	0,18
	Conf. 2MPa	14	0,16
	Conf. 5MPa	16	0,13
	Conf. 10MPa	16	0,16

Tabela 3.5 Parâmetros elásticos para os três níveis do Leptinito

3.3 Procedimentos Matemáticos

3.3.1 Calibração do Modelo de Lade Kim pelo Método Direto

Para a calibração e utilização do modelo de Lade Kim pelo método direto foram utilizados os Programas MatLab 7.0. e Excel 2003. Todos os valores de σ e p_a estão em MPa.

3.3.1.1 Critério de Ruptura

Para incluir o efeito de coesão presente nas rochas sobre a resistência à tração, é feita a translação dos eixos de tensão principal ao longo do eixo hidrostático. A translação é realizada somando-se uma tensão constante dada por $a \times p_a$, às tensões normais .

O parâmetro a foi obtido ajustando-se uma reta de Mohr Coulomb para os resultados dos quatro ensaios (σ_1 na ruptura) para cada nível e assim obteve-se pelo coeficiente linear a resistência á compressão simples. Estimou-se a razão de 12,1 entre a resistência á compressão simples e a resistência á tração (Goodman, 1989). A partir daí todos os cálculos envolvendo tensões foram transladados da parcela $p \cdot a$.

Os gráficos 3.18, 3.19 e 3.20 mostram a envoltória de ruptura para determinação do intercepto e determinação do parâmetro a para os níveis 1, 2 e 3.

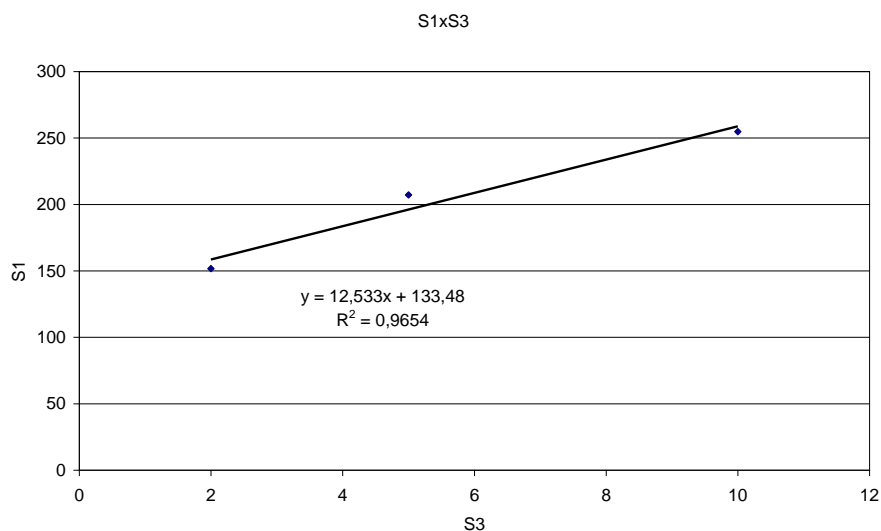


Gráfico 3.18 Parâmetro “a” N1

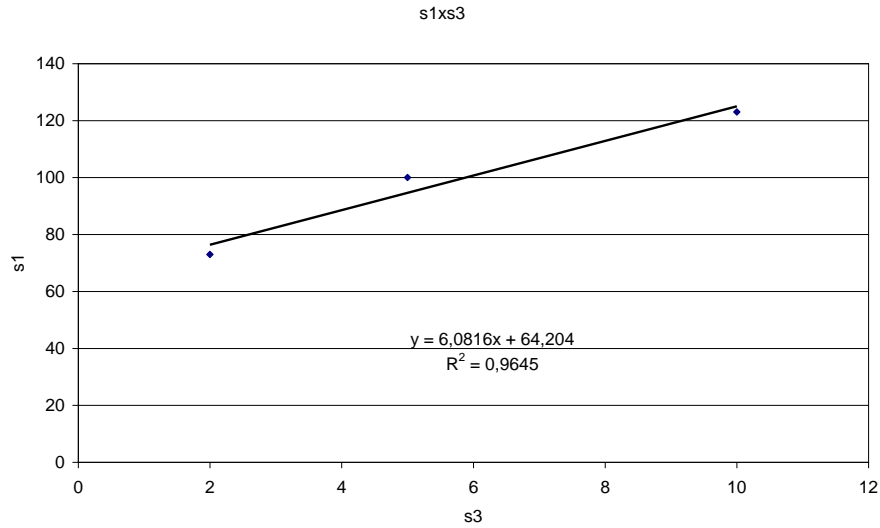


Gráfico 3.19 Parâmetro "a" N2

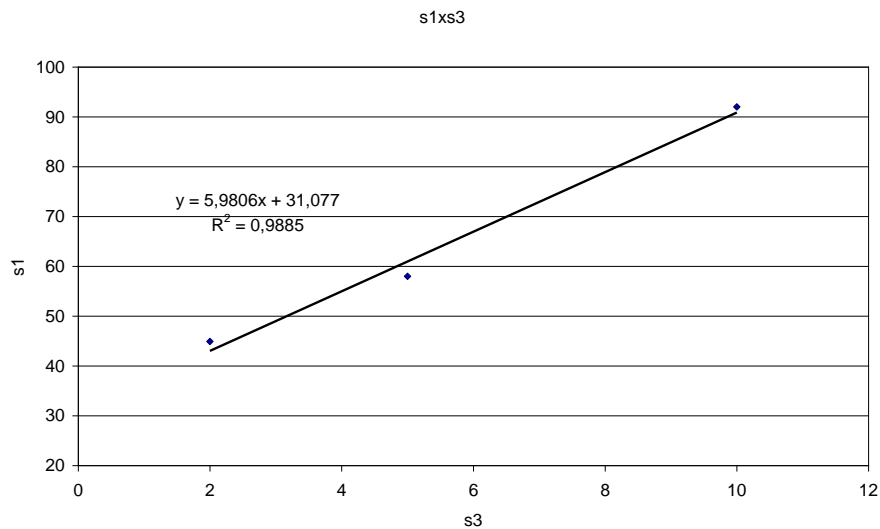


Gráfico 3.20 Parâmetro "a" N3

Nota-se que os três níveis apresentaram bom coeficiente de correlação para as retas de ajuste.

- Ajustando-se uma reta que melhor se ajusta aos pontos calculados por $\log(I_1^3/I_3 - 27) = \log(n_1) + m \cdot \log(p_a/I_1)$
- o parâmetro m do critério de ruptura é dado pelo coeficiente angular e o valor de η_1 é dado por $10^{\text{coeficiente linear da reta}}$.

Os gráficos 3.21, 3.22 e 3.23 mostram a obtenção dos parâmetros de ruptura para os níveis 1, 2 e 3.

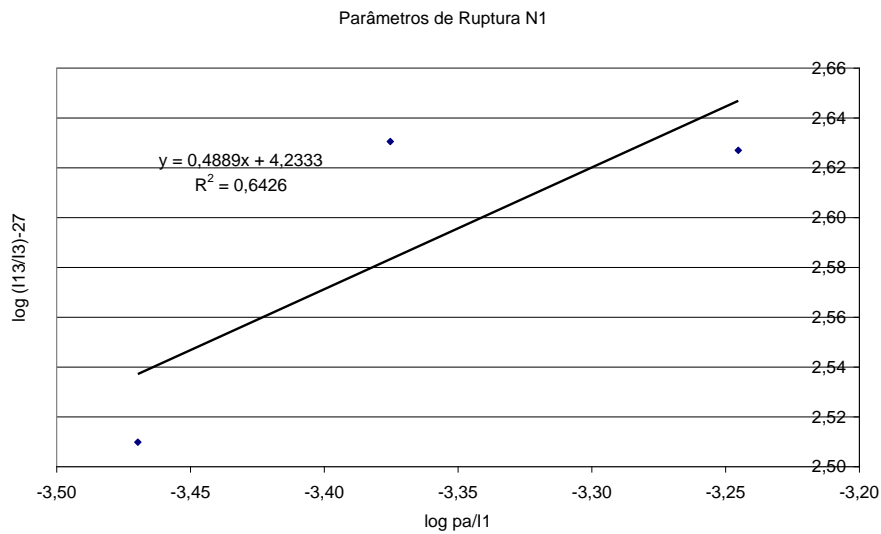


Gráfico 3.21 Parâmetros de Ruptura N1

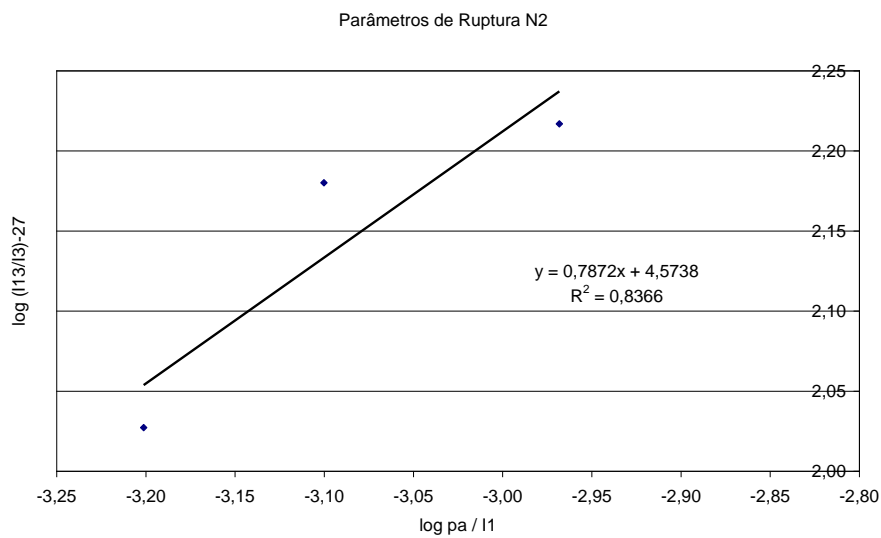


Gráfico 3.22 Parâmetros de Ruptura N2

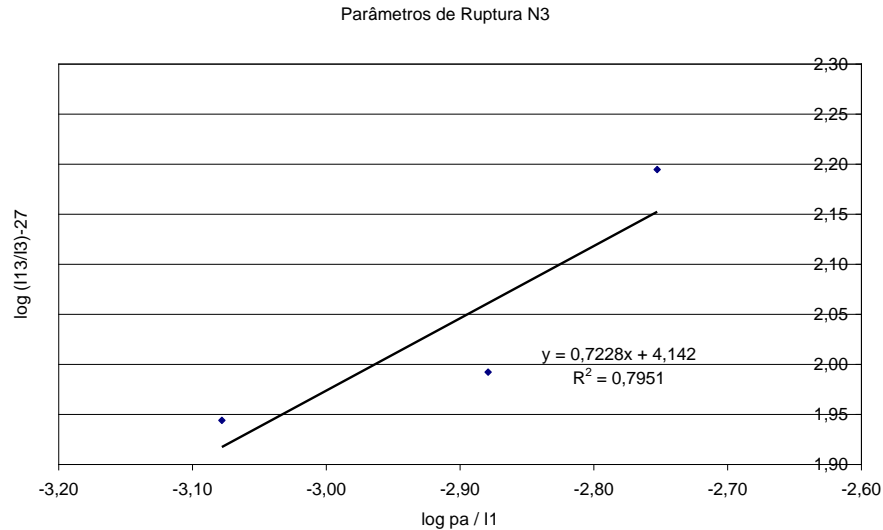


Gráfico 3.23 Parâmetros de Ruptura N3

3.3.1.2 Deformações Elásticas

- Coeficiente de Poisson – Os valores assumidos foram a média de todos os ensaios triaxiais para cada nível de alteração de acordo com os valores calculados na tabela 3.5.
- Foram utilizados apenas os trechos de descarregamento e recarregamento de cada ensaio triaxial.
- Parâmetros elásticos M e λ obtidos pelo melhor ajuste da reta utilizando os pontos de calibração de todos os ensaios, sendo o parâmetro λ dado pelo coeficiente angular e o valor de M é dado por 10^{λ} coeficiente linear da reta.

Os gráficos 3.24, 3.25 e 3.26 mostram a obtenção dos parâmetros elásticos para os níveis 1, 2 e 3.

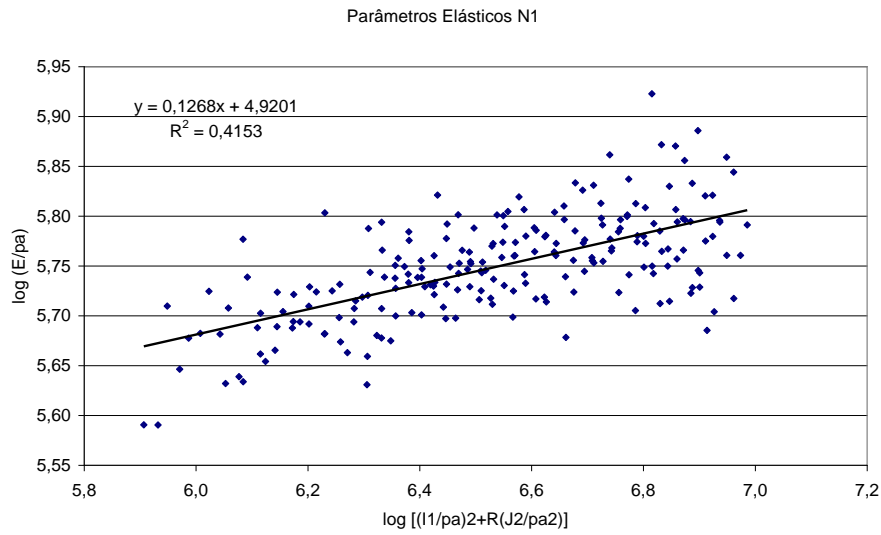


Gráfico 3.24 Parâmetros Elásticos N1

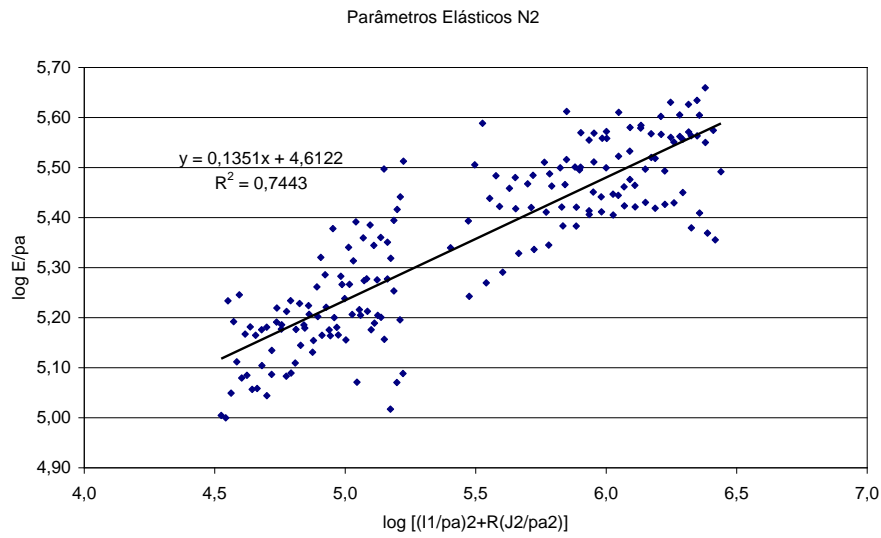


Gráfico 3.25 Parâmetros Elásticos N2

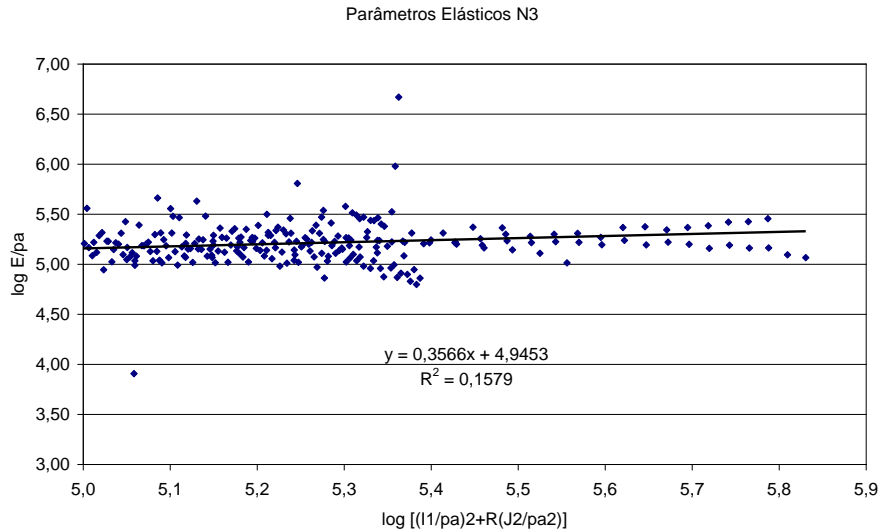


Gráfico 3.26 Parâmetros Elásticos N3

3.3.1.3 Potencial Plástico

- Calculam-se as deformações elásticas e em seguida as deformações plásticas para cada nível de alteração e para cada ensaio triaxial realizado, isto é, para 2, 5 e 10 MPa de tensão confinante.
- M e λ são os parâmetros elásticos.
- Para cada ensaio triaxial foram excluídos o trechos de descarregamento e o pós ruptura.
- Foram utilizados apenas 1 ponto a cada 10 leituras realizadas para facilitar o entendimento dos gráficos.
- Calcula-se v_p e ξ_x , ξ_y para cada ensaio triaxial, para o cálculo dos parâmetros plota-se os dados dos três ensaios CTC juntos e ajusta-se a melhor reta.
- obtém-se $1/\mu$ pelo coeficiente angular desta reta e $-\psi_2$ pelo valor do coeficiente linear.

Os gráficos 3.27, 3.28 e 3.29 mostram a obtenção dos parâmetros do potencial plástico para os níveis 1, 2 e 3.

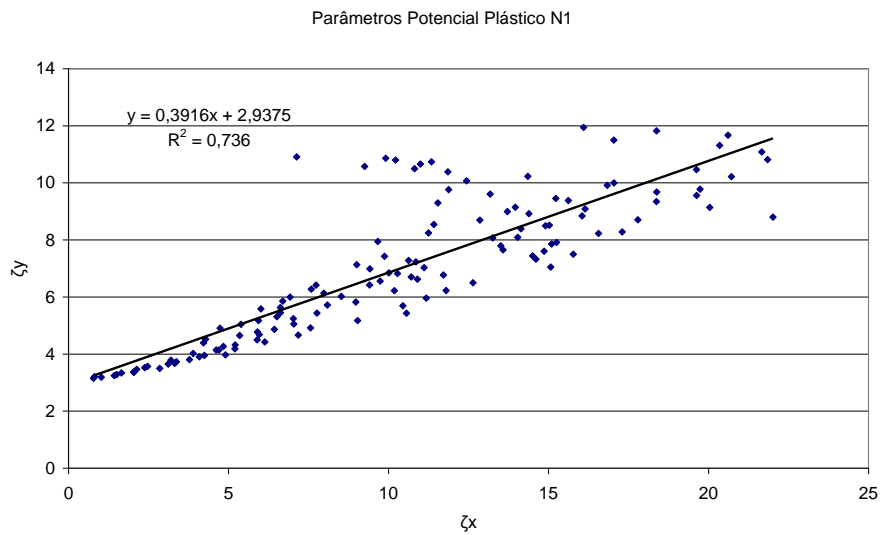


Gráfico 3.27 Parâmetros Potencial Plástico N1

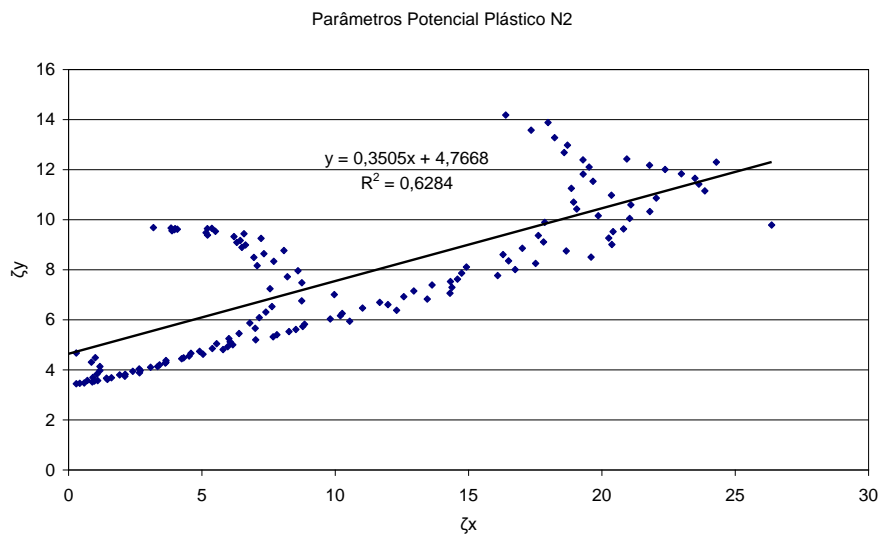


Gráfico 3.28 Parâmetros Potencial Plástico N2

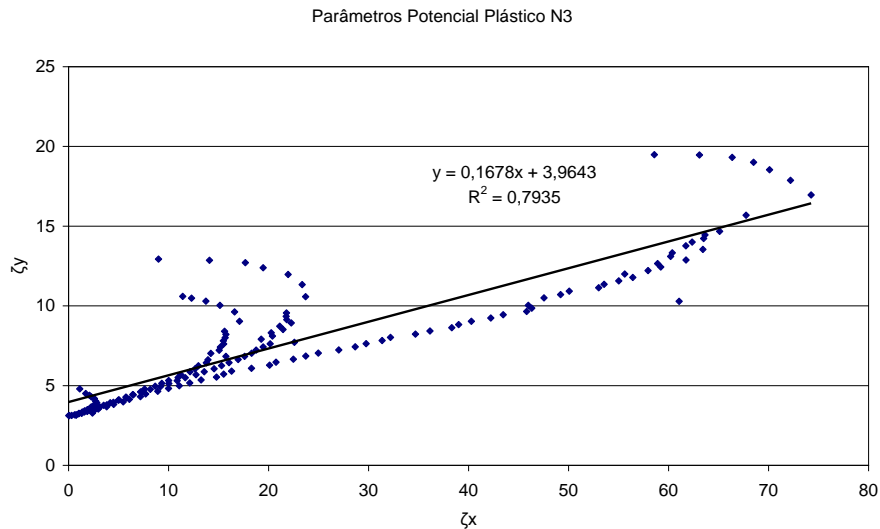


Gráfico 3.29 Parâmetros Potencial Plástico N3

Observa-se que visualmente os dados experimentais dos níveis 2 e 3 não apresentaram um bom ajuste para o potencial plástico, sendo que o ajuste piora com o aumento da tensão confinante (10MPa) para os três níveis.

3.3.1.4 Lei de Endurecimento

- Para cada ensaio hidrostático (N1, N2 e N3) foram excluídos os trechos de descarregamento-recarregamento, e o trecho inicial do ensaio muito rígido. Foi também utilizado um ponto a cada 10 leituras para facilitar o entendimento do gráfico.
- Calculam-se as deformações plásticas e em seguida o trabalho plástico para cada nível de alteração
- M e λ encontrados são os parâmetros elásticos.
- Plotam-se o gráfico $I_1/p_a \times W_p/p_a$ e ajusta-se a melhor curva aos pontos. Os parâmetros C e p são a constante e o expoente da curva ajustada respectivamente.

Os gráficos 3.30, 3.31 e 3.32 mostram a obtenção dos parâmetros de endurecimento para os níveis 1, 2 e 3.

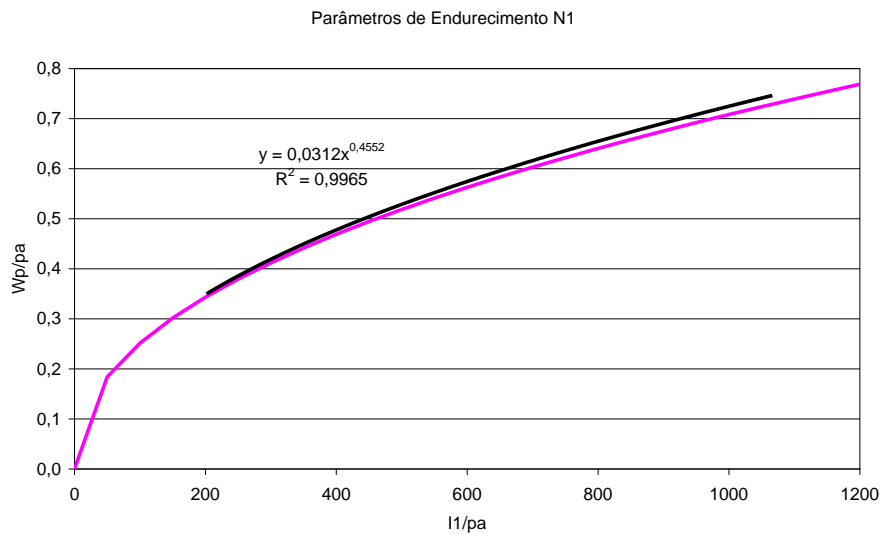


Gráfico 3.30 Parâmetros de Endurecimento N1

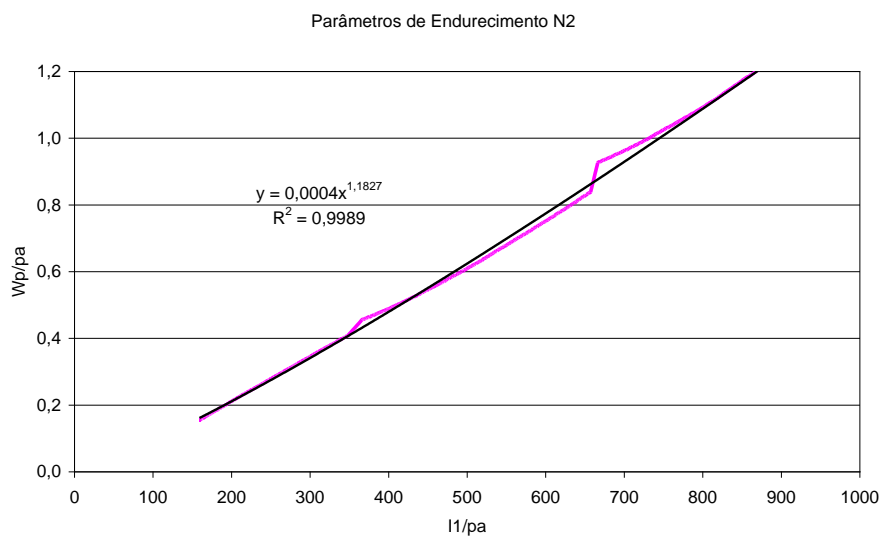


Gráfico 3.31 Parâmetros de Endurecimento N2

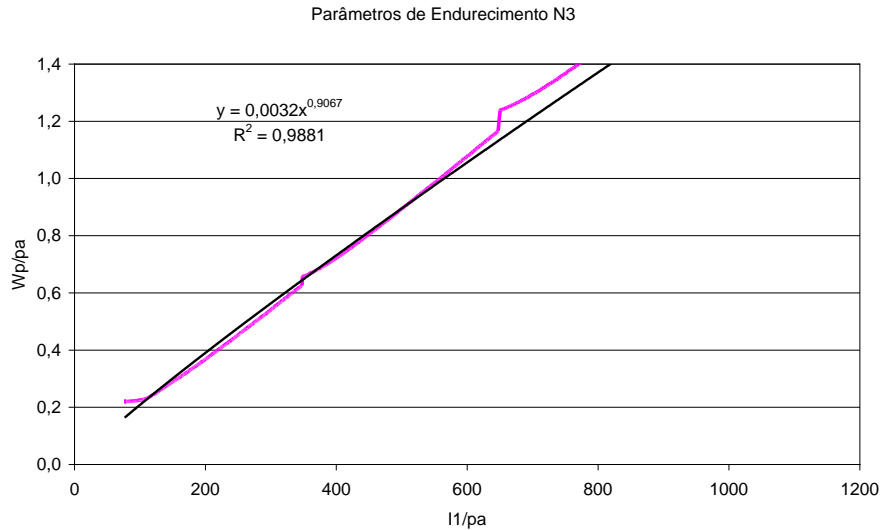


Gráfico 3.32 Parâmetros de Endurecimento N3

3.3.1.5 Função de Plastificação

- Primeiramente calculou-se o trabalho plástico até a ruptura para todos os níveis de alteração e todos os ensaios triaxiais.
- Em seguida calculou-se o trabalho plástico na ruptura (máximo) calculado para cada ensaio (para o cálculo de I_{1a} , equação 2.22) no passo anterior. Assumiu-se h como uma média dos valores encontrados.

Os valores de h resultaram muito diferente para os ensaios, o que indica que o modelo não ajusta bem os pontos.

- Com os valores de h , trabalho plástico e parâmetros obtidos nos passos anteriores, calcula-se então S e q para cada ensaio (uniaxial, 2, 5 e 10MPa de tensão confinante) e para cada nível de alteração. Esses pontos deveriam ajustar uma parábola de onde se retira q para $S=0.8$ e o parâmetro α é:

$$\alpha = \frac{1-S}{S} \cdot \frac{q}{1-q} = \frac{1}{4} \cdot \frac{q_{80}}{1-q_{80}}$$

Entretanto, para nenhum dos 3 níveis de alteração e para todos os ensaios as curvas Sxq não foram satisfatórias, de modo que se supõe que o critério de plastificação do

modelo de Lade Kim não é o mais adequado para o ajuste dos dados. Os gráficos 3.33, 3.35 e 3.37 mostram as curvas Sxq para a obtenção do parâmetro α para os níveis 1, 2 e 3.

Deste modo, para obtenção do parâmetro α foi feito um ajuste das curvas $W_p \times I_1$ calculadas pelos pontos experimentais com as curvas $W_p \times I_1$ calculadas através dos parâmetros, ou seja, calculou-se um W_p com valores de q calculados a partir de valores de α . Desta forma, foi ajustado um α que promovesse a maior coincidência destas curvas. Os gráficos 3.34, 3.36 e 3.38 mostram as curvas $I_1 \times W_p$ numéricas e experimentais utilizadas para a calibração do parâmetro α para os níveis 1, 2 e 3.

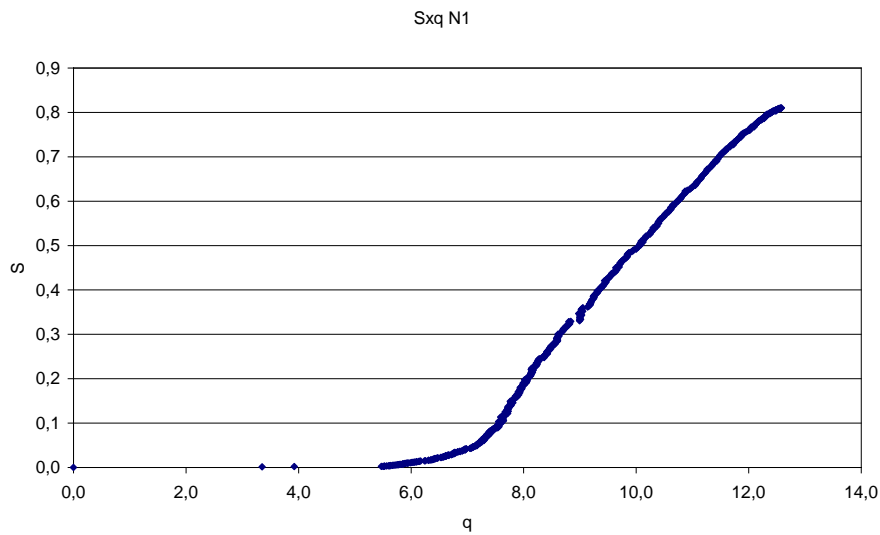


Gráfico 3.33 Curva Sxq - N1

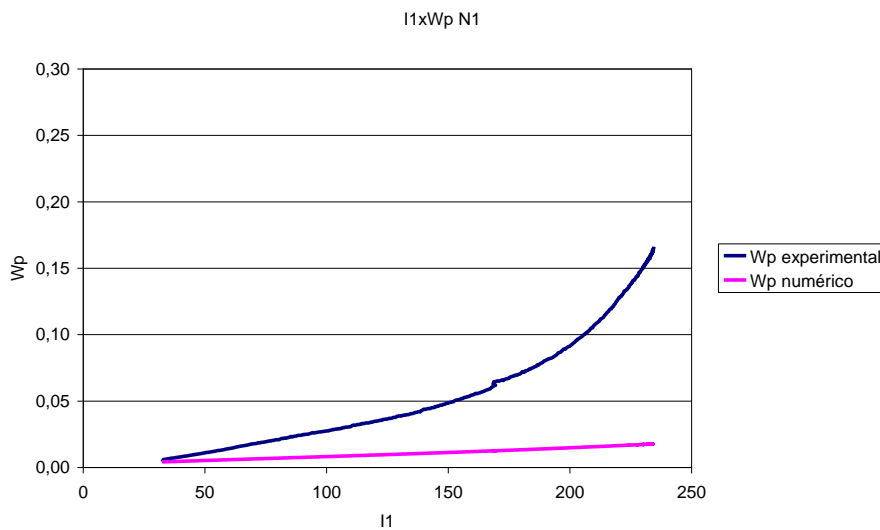


Gráfico 3.34 Função de Plastificação- Curvas $I_1 \times W_p$ - Parâmetro α - N1

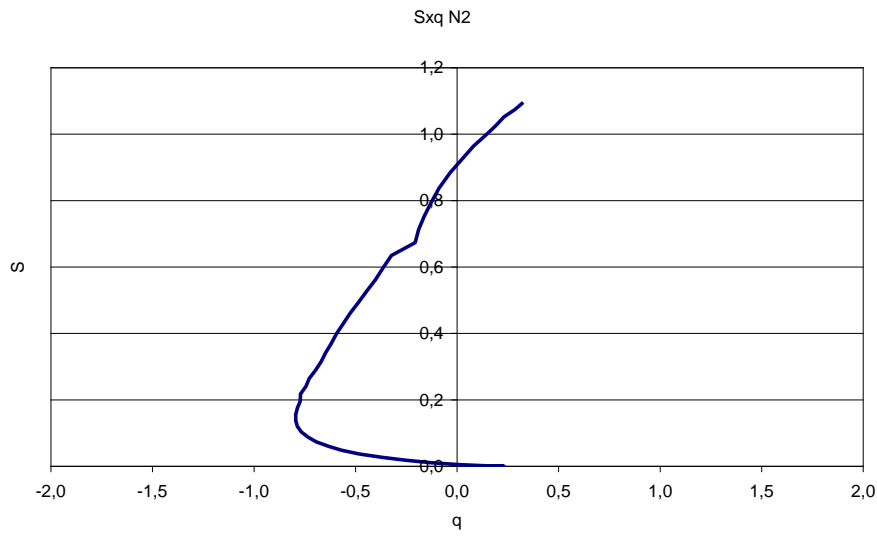


Gráfico 3.35 Curva S_{xq} – N2

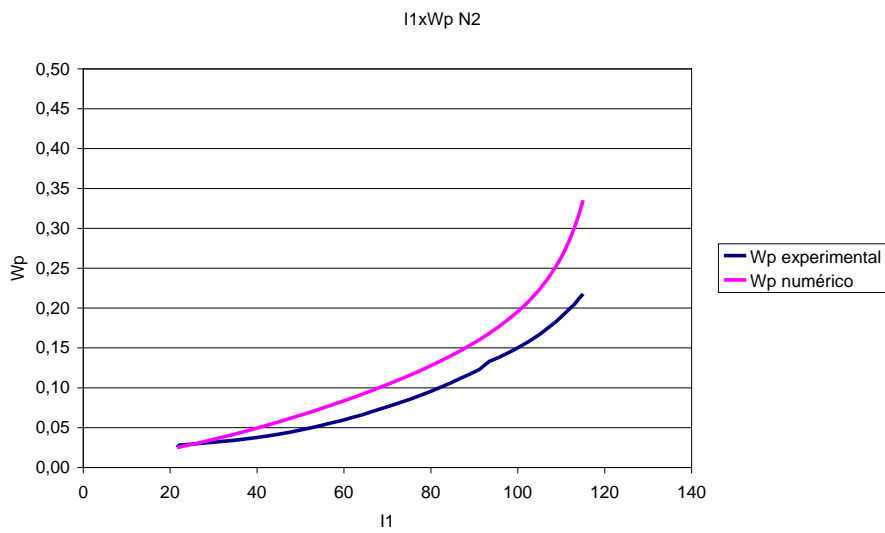


Gráfico 3.36 Função de Plastificação– Curvas $I_1 \times W_p$ – Parâmetro α – N2

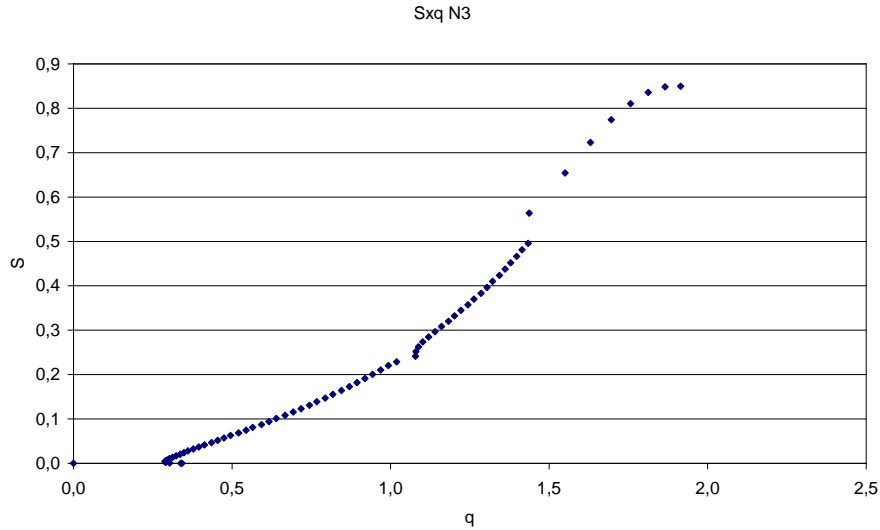


Gráfico 3.37 Curva Sxq – N3

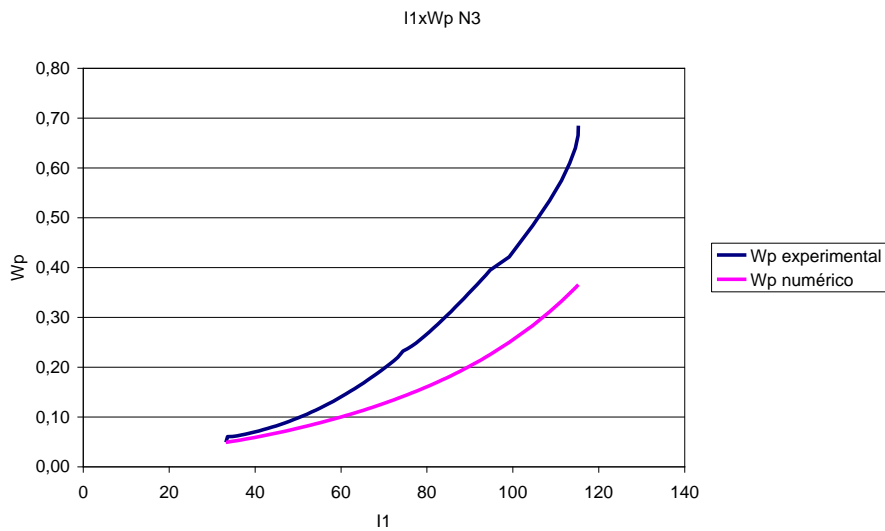


Gráfico 3.38 Função de Plastificação– Curvas $I_1 \times W_p$ – Parâmetro α – N3

3.3.1.6 Parâmetros do Modelo – Método Direto

A tabela 3.6 mostra os parâmetros do modelo de Lade e Kim obtidos pela calibração direta.

Parâmetros	N1	N2	N3
M	83.176	40.738	87.096
λ	0,126	0,135	0,351
ν	0,15	0,23	0,16
η_1	17.100	37.153	13.803

m	0,4889	0,78	0,72
a	67,3	53,1	25,6
Ψ_2	-2,9	-4,7	-4,1
μ	2,56	2,85	4,00
h	2,02	2,47	1,39
α	1	0,3	0,9
C	0,0312	0,0004	0,0032
p	0,45	1,18	0,90

Tabela 3.6 Parâmetros do Modelo de Lade Kim (método direto), N1, N2 e N3

3.3.1.7 Curvas numéricas e curvas experimentais pelo Método Direto

Os gráficos 3.39 e 3.40 mostram as curvas numéricas e experimentais para o nível 1 calibradas pelo método direto.

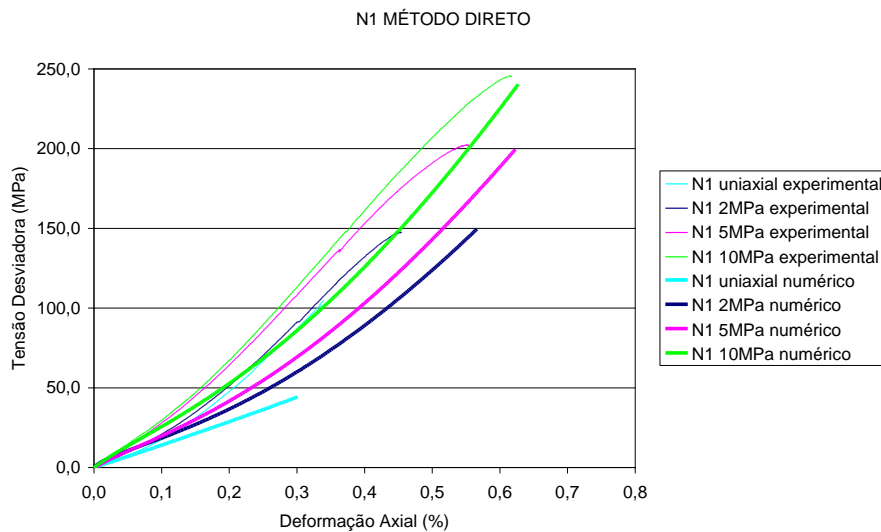


Gráfico 3.39 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Direto

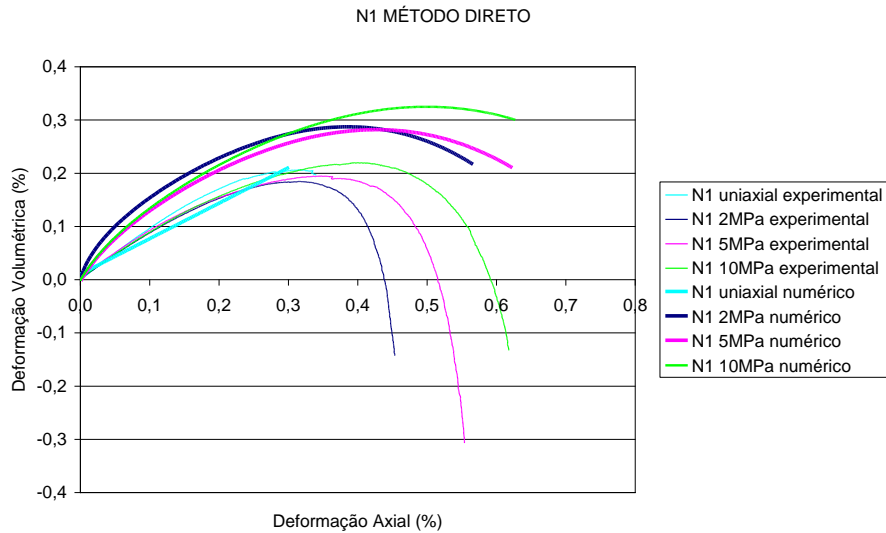


Gráfico 3.40 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Direto

Os gráficos 3.41 e 3.42 mostram as curvas numéricas e experimentais para o nível 2 calibradas pelo método direto.

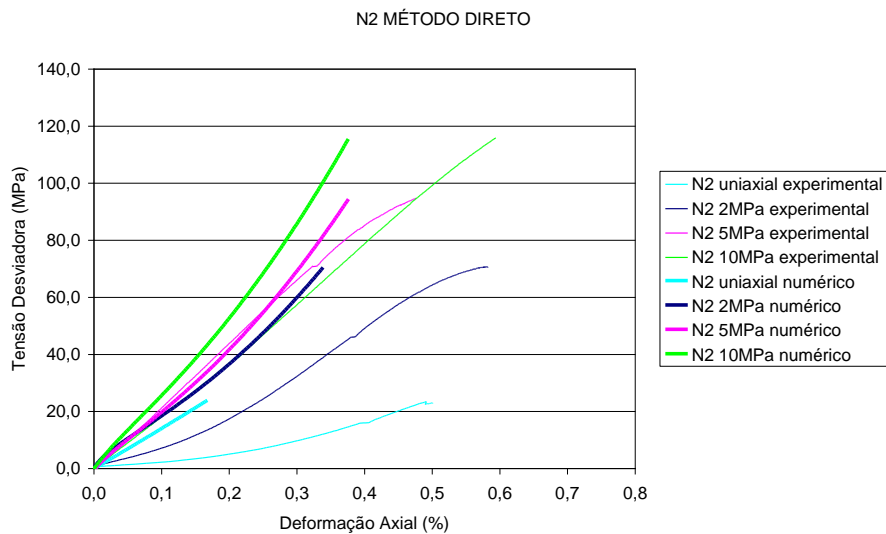


Gráfico 3.41 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Direto

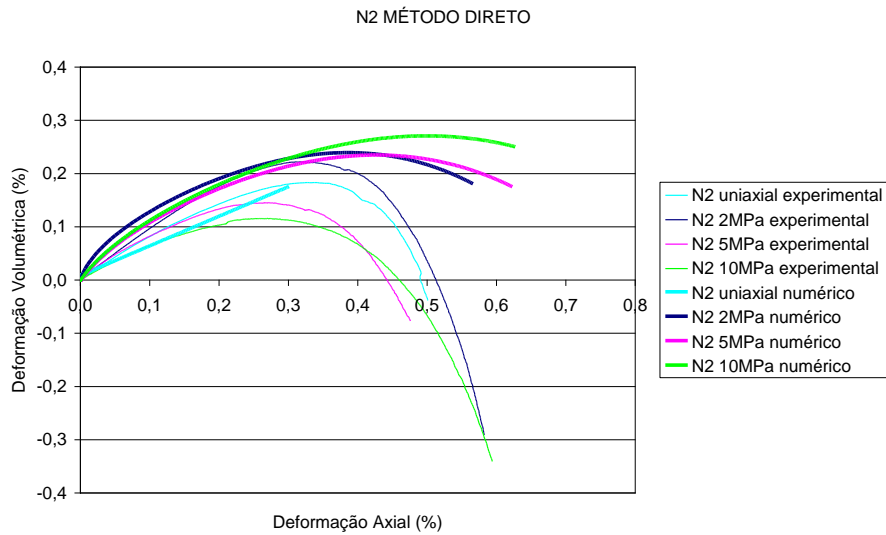


Gráfico 3.42 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Direto

Os gráficos 3.34 e 3.44 mostram as curvas numéricas e experimentais para o nível 3 calibradas pelo método direto.

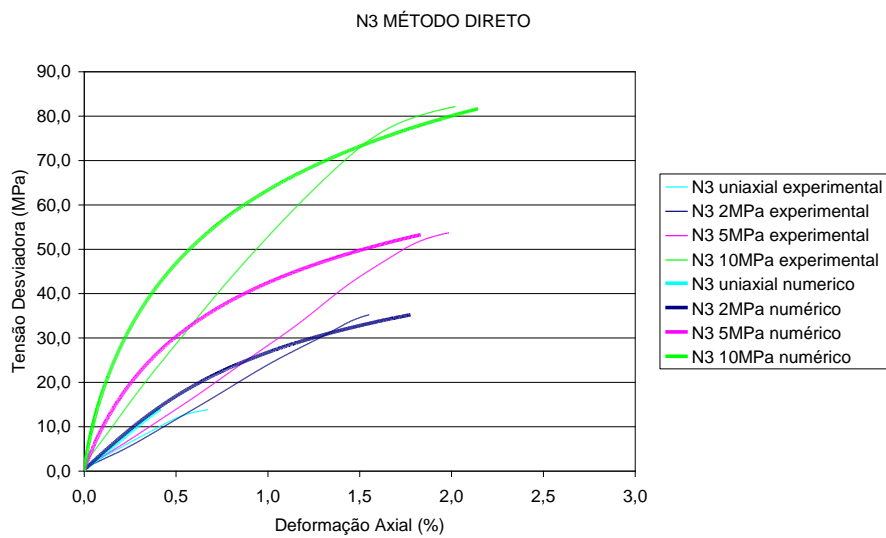


Gráfico 3.43 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Direto

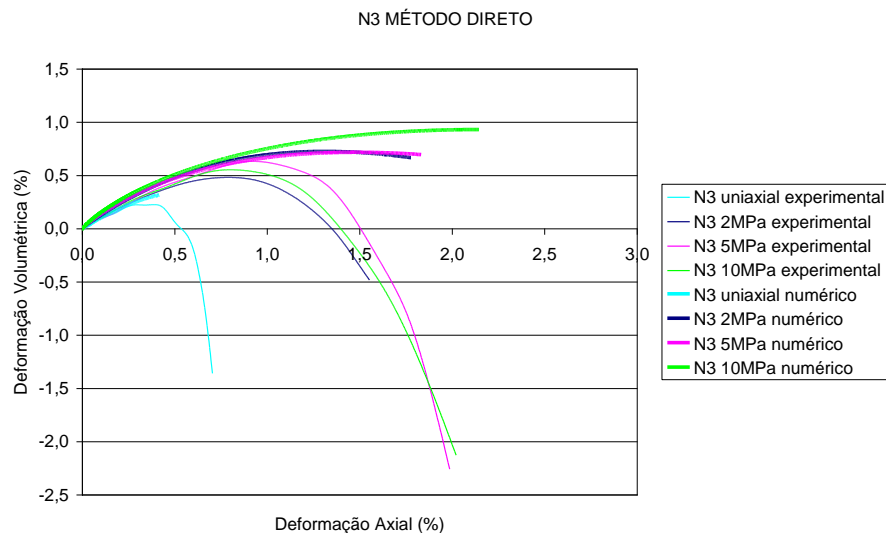


Gráfico 3.44 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Direto

Em uma análise visual das curvas, considerando-se a escala de observação, (tensões maiores para o nível 1, eixo y) observa-se que:

- O nível 1 apresentou as melhores relações entre as curvas numéricas e experimentais, para todos os níveis de tensão confinante.
- O nível 2 apresenta uma melhor relação entre as curvas experimentais e numéricas para 5MPa de tensão confinante, e as curvas com tensões confinantes mais baixas apresentam resultados piores.
- O nível 3 aparentemente apresenta um maior afastamento entre as curvas numéricas e experimentais, para os níveis de tensão confinante mais baixos.
- As curvas volumétricas numéricas apresentaram valores mais altos que os experimentais para todos os valores de tensões confinantes e modo geral não ajustaram bem os pontos experimentais. Os níveis 2 e 3 ajustaram bem apenas o trecho inicial da curva volumétrica.

3.3.2 Calibração do Modelo de Lade Kim pelo Método Inverso

3.3.2.1 Introdução

A calibração tradicional realizada na sessão anterior foi feita pelo método direto, isto é, com os dados de ensaio, obtém-se os parâmetros, aplicam-se as equações e obtém-se as deformações calculadas pelo modelo. Nesta etapa será utilizada a análise inversa.

A função objetivo utilizada foi:

$$f = (\epsilon_{\text{mod1}} - \epsilon_{\text{exp1}})^2 + (\epsilon_{\text{mod2}} - \epsilon_{\text{exp2}})^2 + (\epsilon_{\text{mod3}} - \epsilon_{\text{exp3}})^2 \dots$$

onde os índices são dados pelos resultados de cada ensaio.

Neste trabalho, não foram utilizados métodos determinísticos pela dificuldade destes em encontrar o mínimo global da função objetivo. Foi utilizada uma otimização estocástica por termalização, denominada simulated annealing que apesar de ser mais lenta, é mais competente em varrer os mínimos locais, não ficando estagnada nestes, em busca do mínimo global. Esta etapa foi calibrada por Armando de Menezes Filho com um código em Fortran.

O ajuste do conjunto de parâmetros é bastante complexo, uma vez que varia com os ensaios utilizados na calibração, ou seja, a cada ensaio incluído obtém-se um conjunto diferente de parâmetros. Os parâmetros iniciais utilizados foram os obtidos da calibração pelo método direto.

Para os níveis 1, 2 e 3 foram feitas 500, 1000 e 2000 iterações respectivamente na busca do valor mais próximo ao ideal para cada parâmetro. Observa-se pelos gráficos 3.45 a 3.49 que a otimização alcançou um ajuste bastante fino dos parâmetros, com precisão na casa dos decimais.

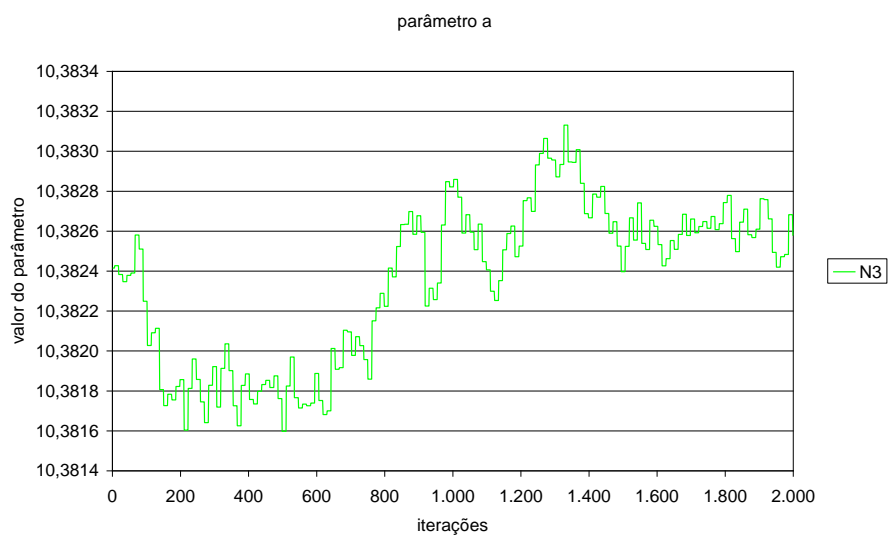
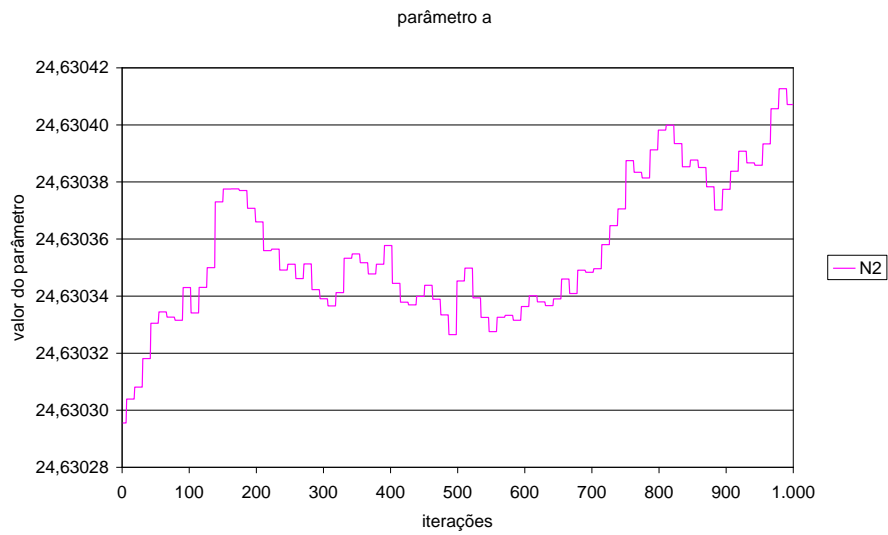
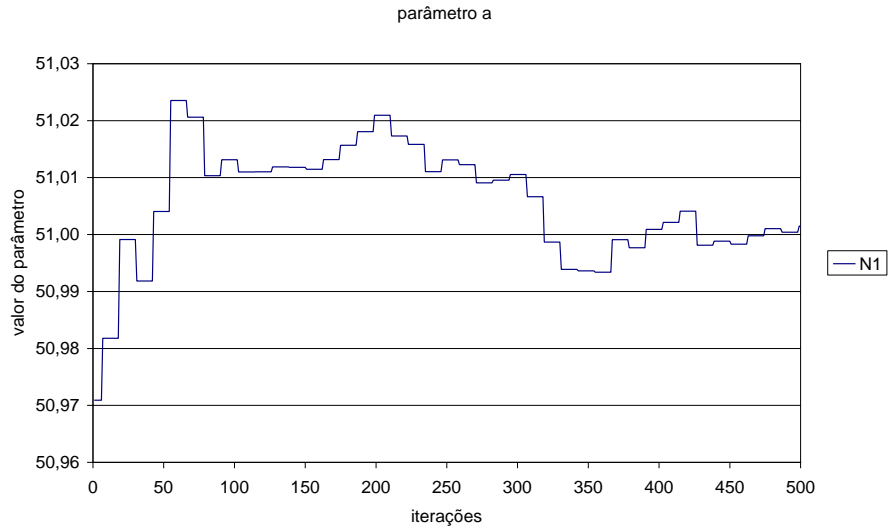


Gráfico 3.45 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro a

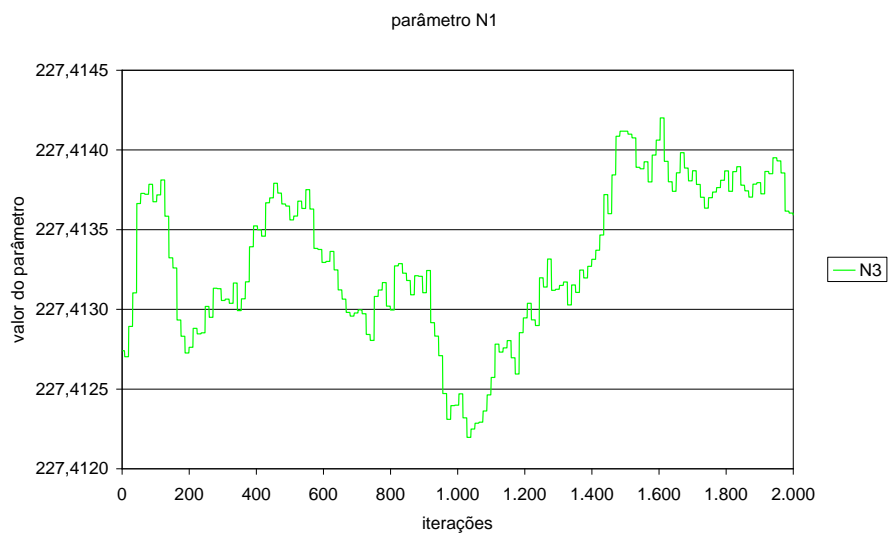
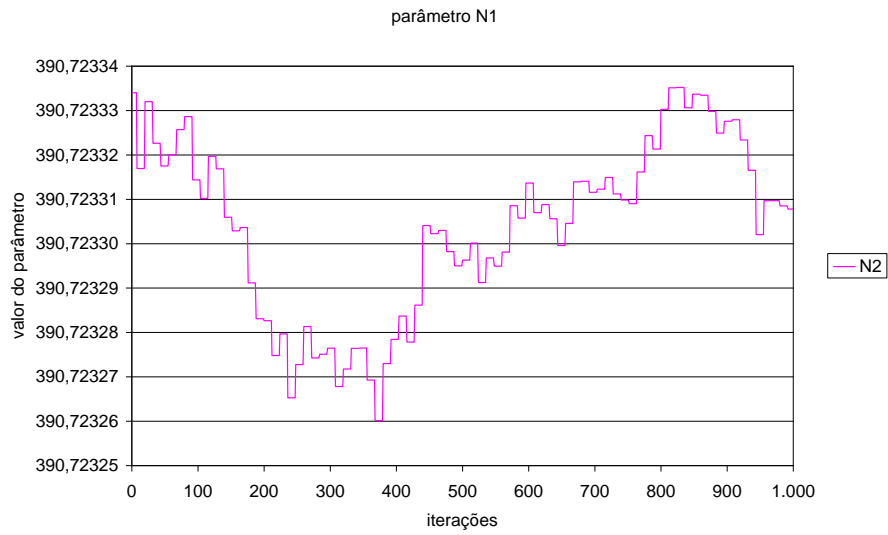
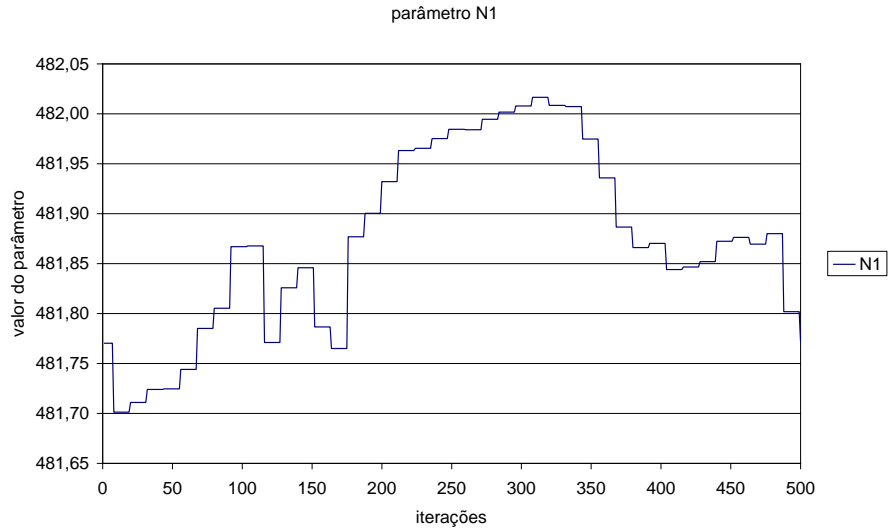


Gráfico 3.46 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro η_1

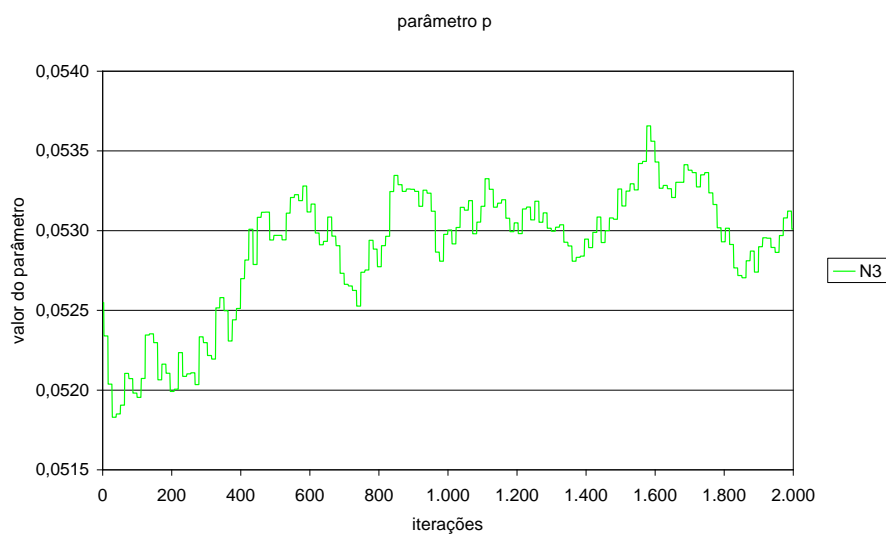
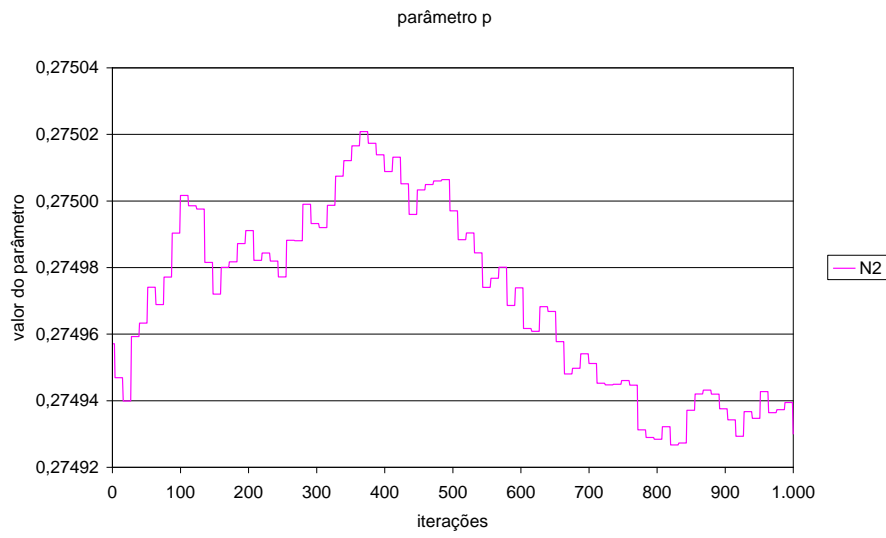
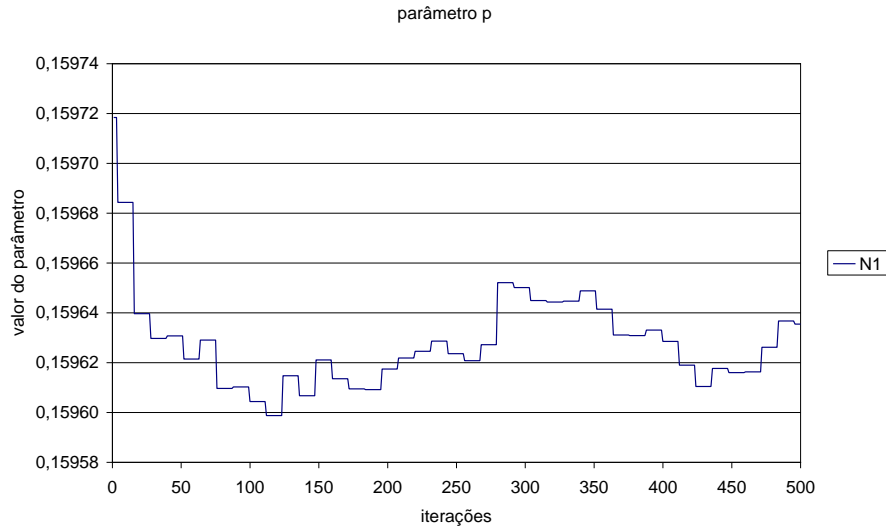


Gráfico 3.47 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro p

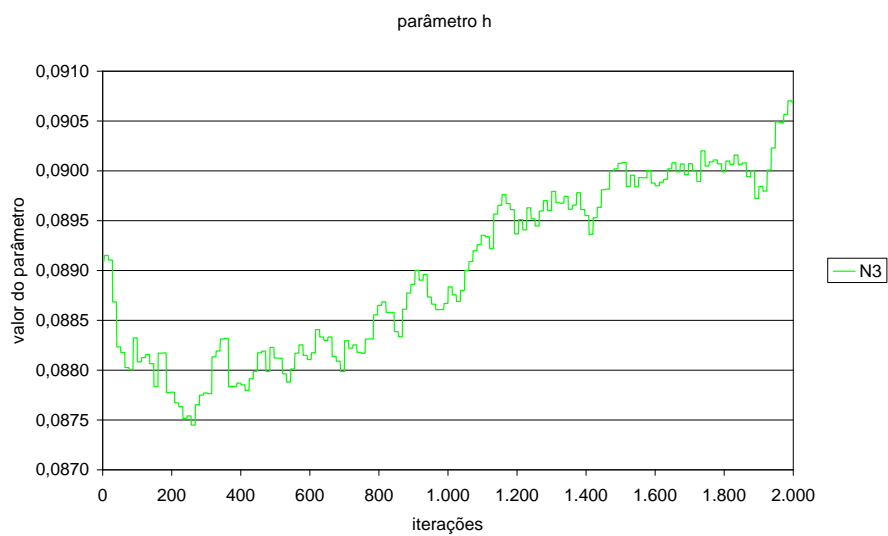
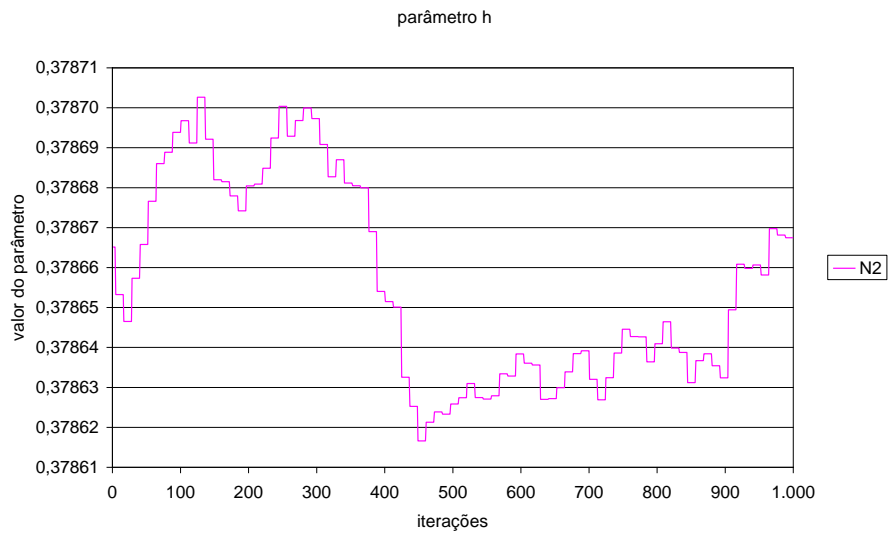
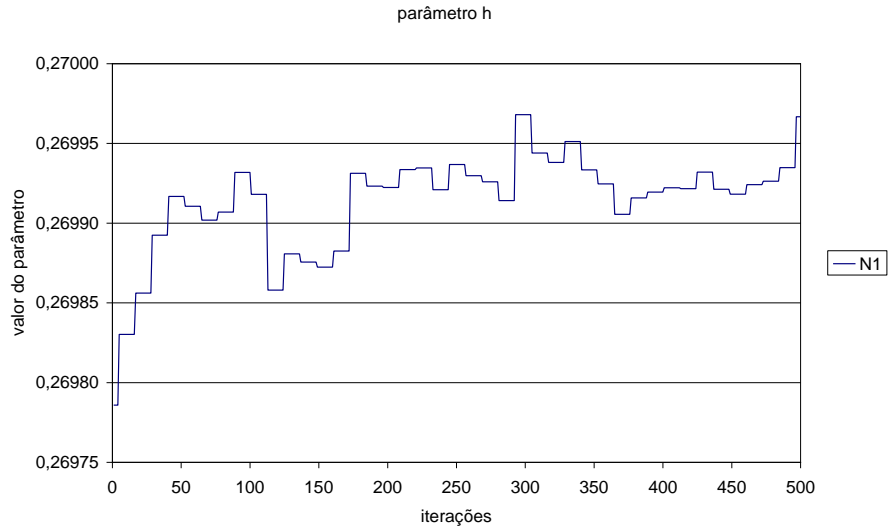


Gráfico 3.48 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro h

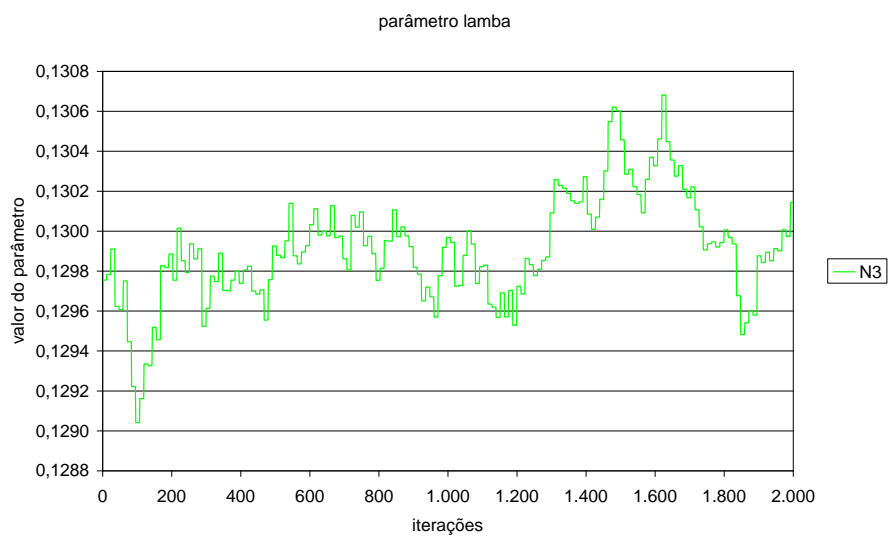
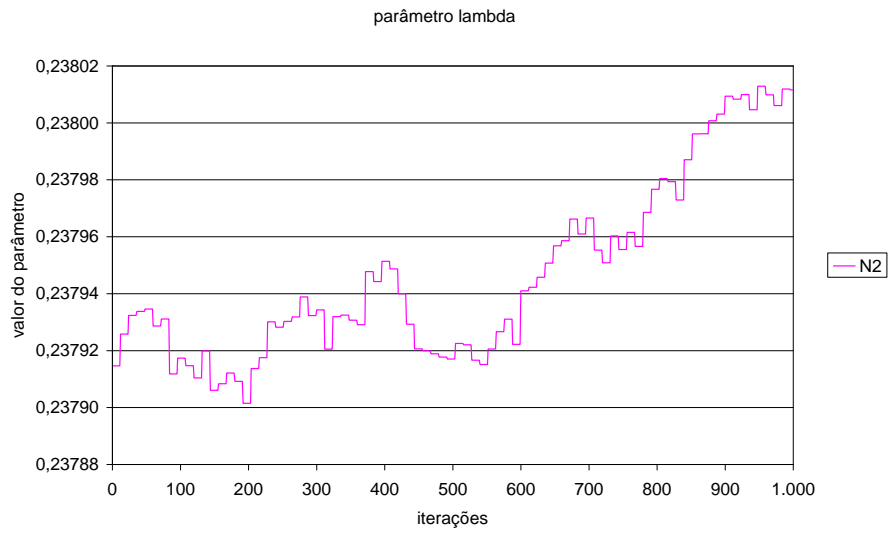
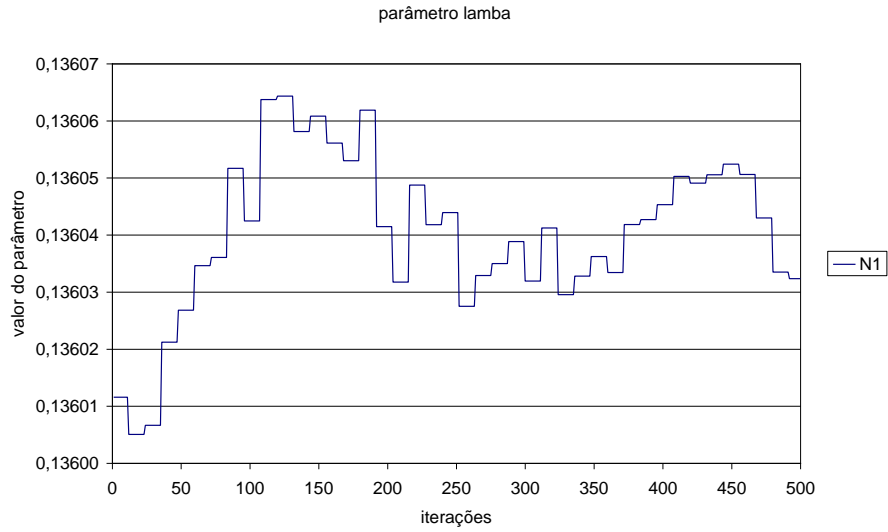


Gráfico 3.49 Iterações Níveis 1, 2 e 3 Parâmetro λ

3.3.2.2 Parâmetros do Modelo – Método Inverso

Os parâmetros obtidos pela calibração inversa estão listados na tabela 3.7 a seguir:

Parâmetros	N1	N2	N3
M	71.601	8.370	7.000
λ	0,136	0,238	0,130
ν	0,139	0,224	0,046
η_1	481,77	390,72	227,41
m	0,042	0,040	0,016
a	51,0	24,6	10,3
Ψ_2	-4,84	-2,62	-0,53
μ	3,05	0,52	0,66
h	0,26	0,37	0,09
α	1,0	0,9	0,4
C	0,00050	0,00009	0,00500
p	0,159	0,274	0,0530

Tabela 3.7 Parâmetros do Modelo de Lade Kim (método inverso), N1, N2 e N3

3.3.2.3 Curvas numéricas e curvas experimentais pelo Método Inverso

Os gráficos 3.50 e 3.51 mostram as curvas numéricas e experimentais para o nível 1 calibradas pelo método inverso.

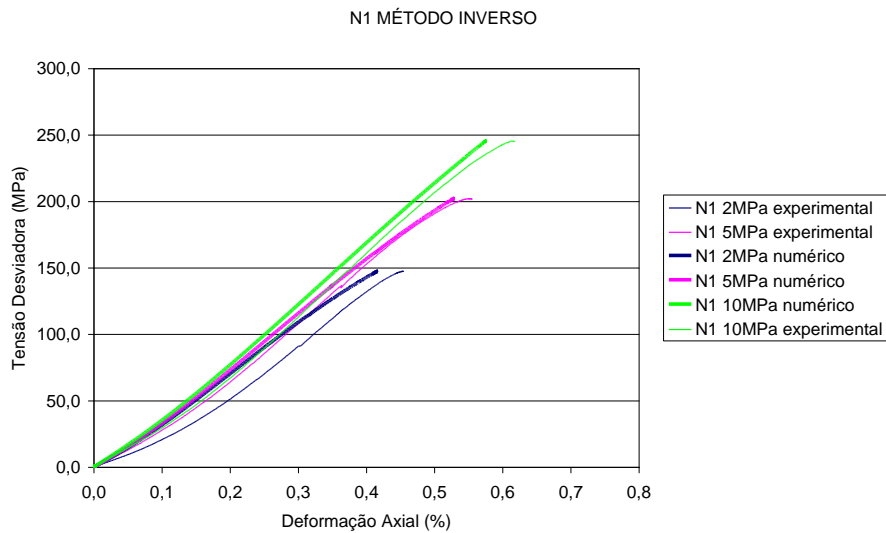


Gráfico 3.50 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Inverso

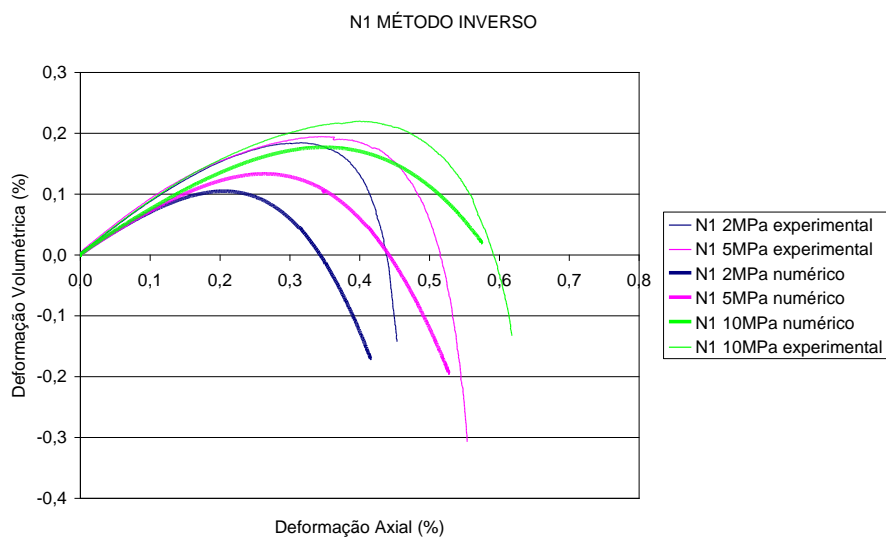


Gráfico 3.51 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 1 - Método Inverso

Os gráficos 3.52 e 3.53 mostram as curvas numéricas e experimentais para o nível 2 calibradas pelo método inverso.

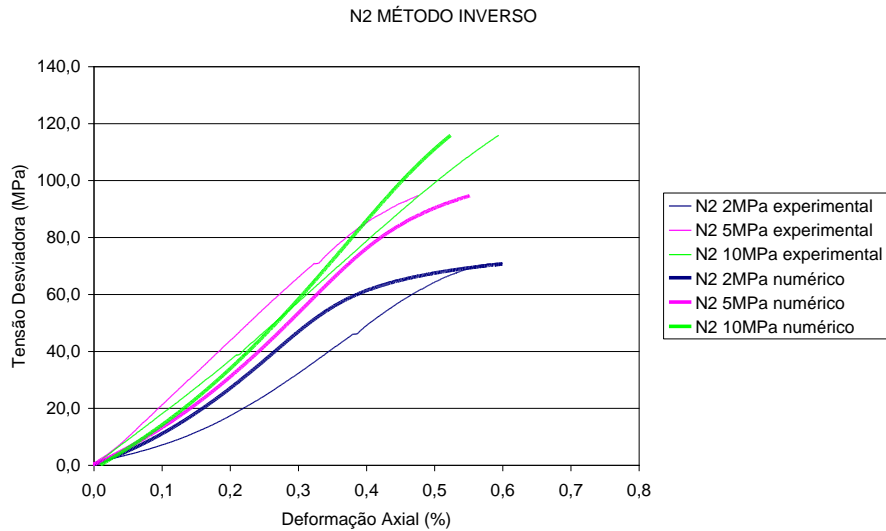


Gráfico 3.52 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Inverso

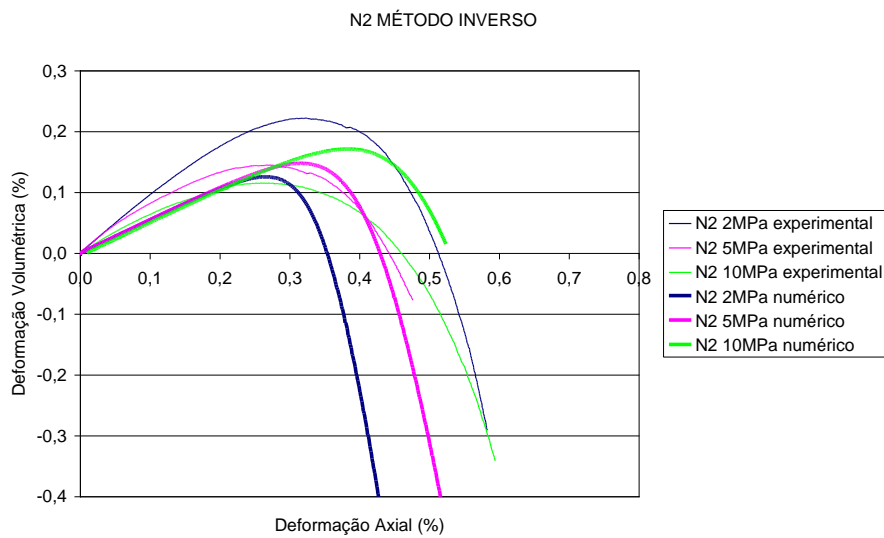


Gráfico 3.53 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 2 - Método Inverso

Os gráficos 3.54 e 3.55 mostram as curvas numéricas e experimentais para o nível 3 calibradas pelo método inverso.

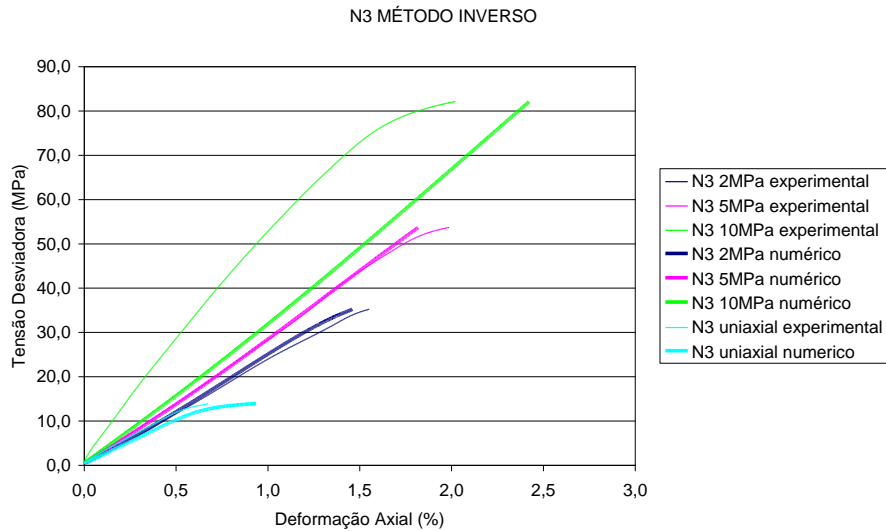


Gráfico 3.54 Curvas tensão x deformação numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Inverso

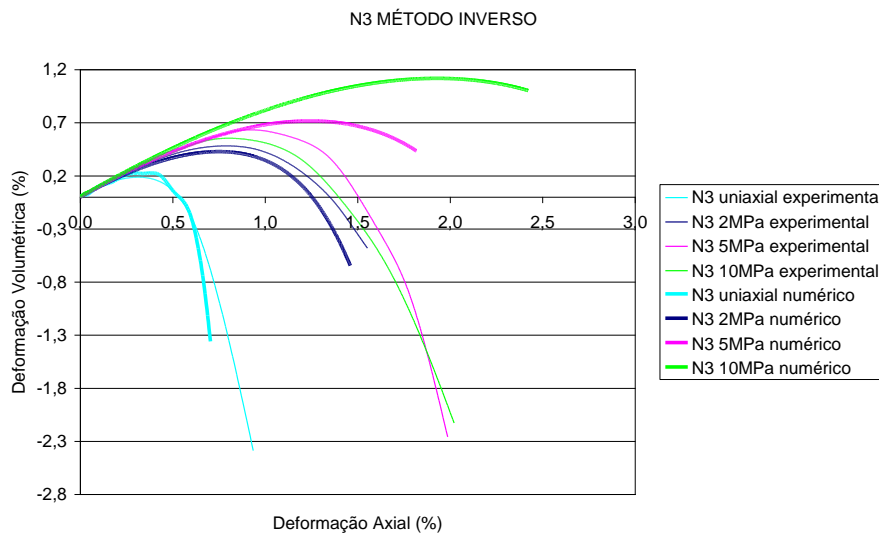


Gráfico 3.55 Curvas deformação axial x deformação volumétrica numéricas e experimentais para o nível 3 - Método Inverso

Em uma avaliação visual das curvas observa-se que:

- Modo geral, os gráficos volumétricos sempre são piores que os de tensão x deformação, devido provavelmente á variação de concentração e volume de dados positivos e negativos.

- Para o nível 1 há um ajuste bastante bom entre as curvas teóricas e experimentais para todos os valores de tensão confinante dos gráficos tensão x deformação. Para as curvas volumétricas os resultados não são tão bons, apresentando uma sutil melhora com o aumento da tensão confinante, apresentando sistematicamente valores numéricos menores que os experimentais, exceto para uma das curvas de 10MPa de tensão confinante.
- Para o nível 2 a curva tensão x deformação que ajustou melhor os valores experimentais foi a curva de 10MPa, enquanto que para as curvas volumétricas o nível 2 aparentemente apresentou melhor ajuste que os níveis 1 e 3.
- Para o nível 3, as curvas tensão deformação ajustaram bastante bem, exceto para a curva de 10 MPa, onde os valores de deformação numérica foram maiores que as deformações experimentais. Esta diferença aumenta sutilmente com o aumento da tensão desviadora. Para as curvas volumétricas o ajuste é bastante bom para as curvas de mais baixas tensões confinantes, sendo bastante bom para o uniaxial e 5MPa, e piorando para as mais altas. Exceto para a curva de 5MPa de confinante as demais apresentaram valores numéricos maiores que os experimentais, e que pioram com o aumento das deformações axiais.

O erro, dado pela diferença entre as curvas numéricas e experimentais de todos os ensaios (tabela 3.8) indica que o nível de intemperismo 1, apresentou a melhor otimização e portanto o conjunto de parâmetros mais adequado.

	erro
N1	0,01890
N2	0,02949
N3	1,21800

Tabela 3.8 Cálculo do erro para cada nível de intemperismo

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Comparativo entre os níveis de alteração

4.1.1 Ensaio Hidrostáticos

Os gráficos 4.1 a 4.4 mostram a comparação entre os três níveis de alteração para as deformações axiais, laterais e volumétricas no ensaio hidrostático.

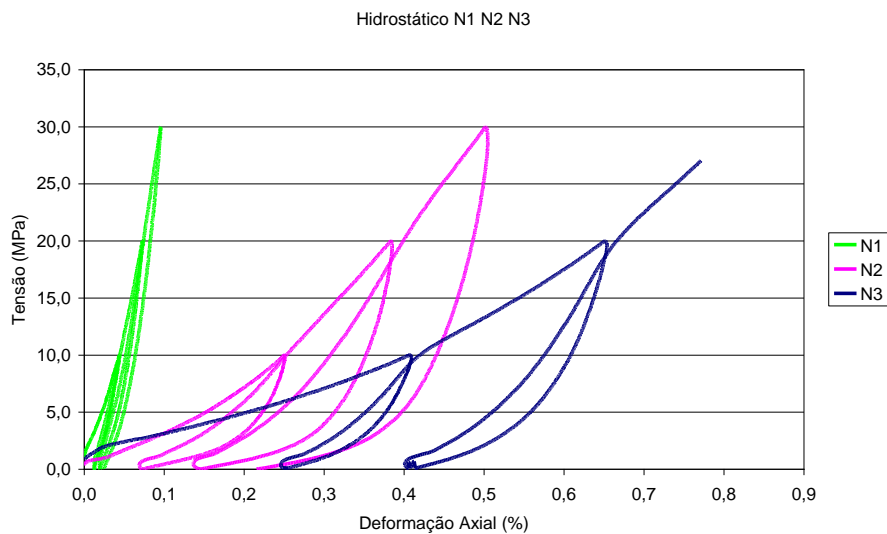


Gráfico 4.1 Comparações das deformações axiais entre os níveis de alteração - Ensaio Hidrostáticos

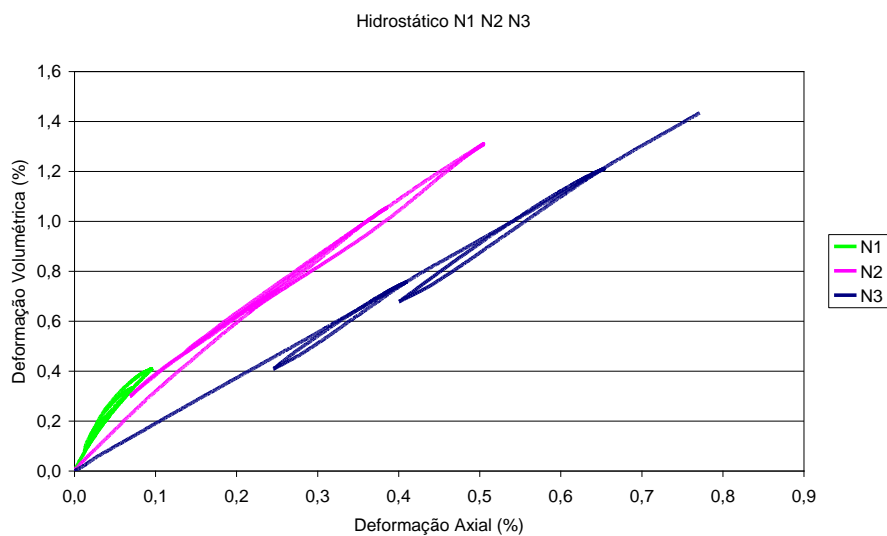


Gráfico 4.2 Ensaio Hidrostático N1,N2 e N3- Deformação Axial x Deformação Volumétrica

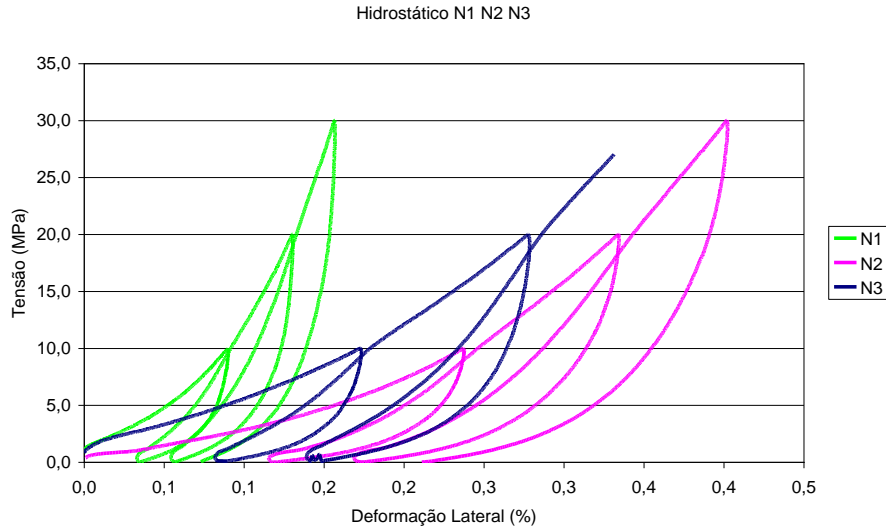


Gráfico 4.3 Ensaio Hidrostático N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão

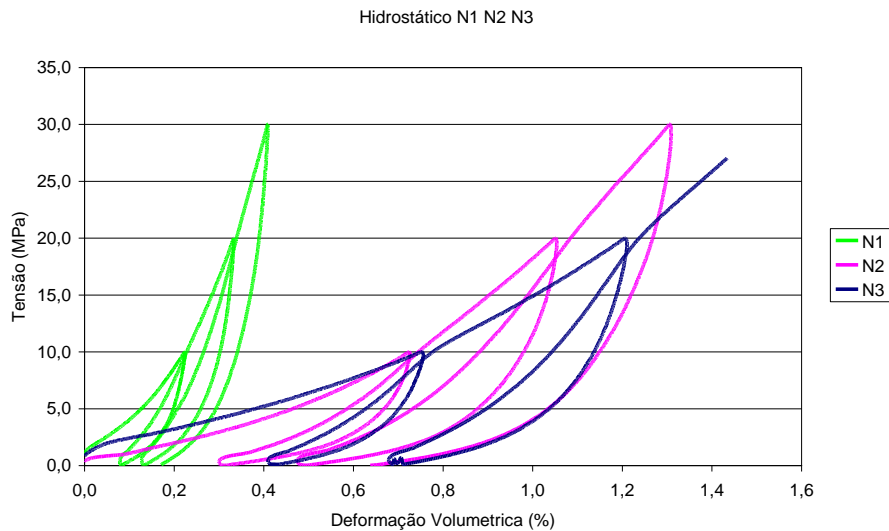


Gráfico 4.4 Ensaio Hidrostático N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão

- Observa-se que quanto maiores as tensões maiores são as diferenças de deformações axiais entre os níveis 1 e 2, e que a diferença entre estes níveis é maior que entre os níveis 2 e 3. Este queda acentuada de resistência para o nível 2 não era esperada, uma vez que em um nível macroscópico, as amostras não apresentam-se tão degradadas como para o nível 3. Para os descarregamentos, observa-se uma maior variação das deformações axiais para o nível 2 que para o nível 1 e para o nível 3.

- O comportamento do nível de intemperismo 2 é bastante mais próximo do nível de intemperismo 3, em aspecto das curvas, tanto para deformações axiais quanto laterais.

4.1.2 Ensaios Triaxiais com 10MPa de tensão confinante

Os gráficos 4.5 a 4.8 mostram a comparação entre os três níveis de alteração para as deformações axiais, laterais e volumétricas no ensaio triaxial com 10MPa de tensão confinante.

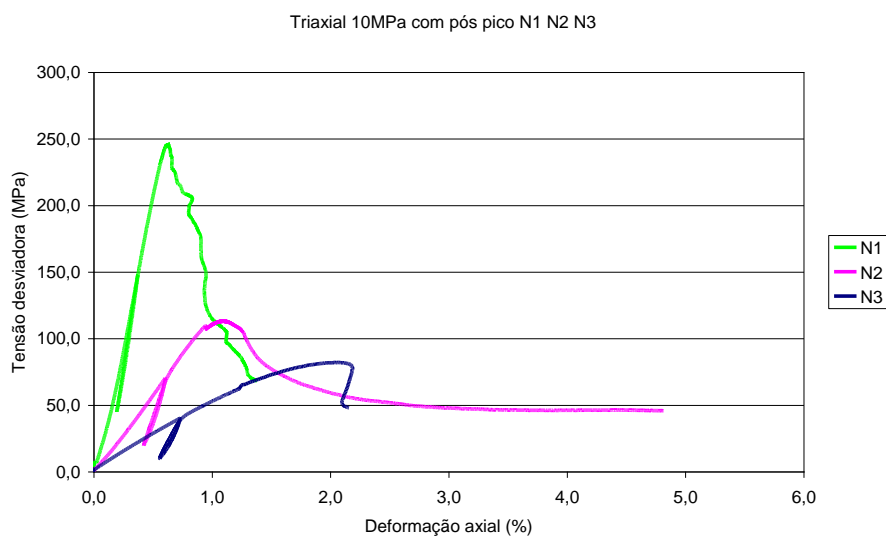


Gráfico 4.5 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3–
Deformação Axial x Tensão Desviadora

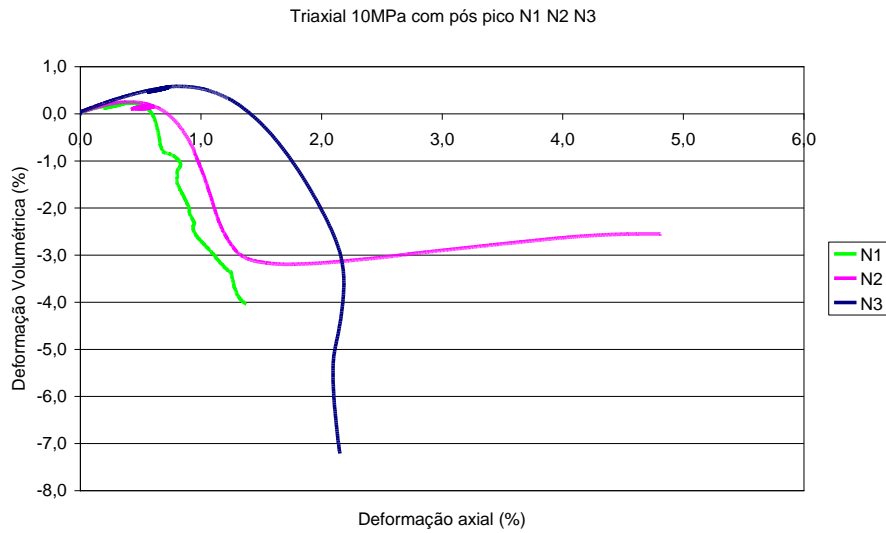


Gráfico 4.6 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3–Deformação Axial x Deformação Volumétrica

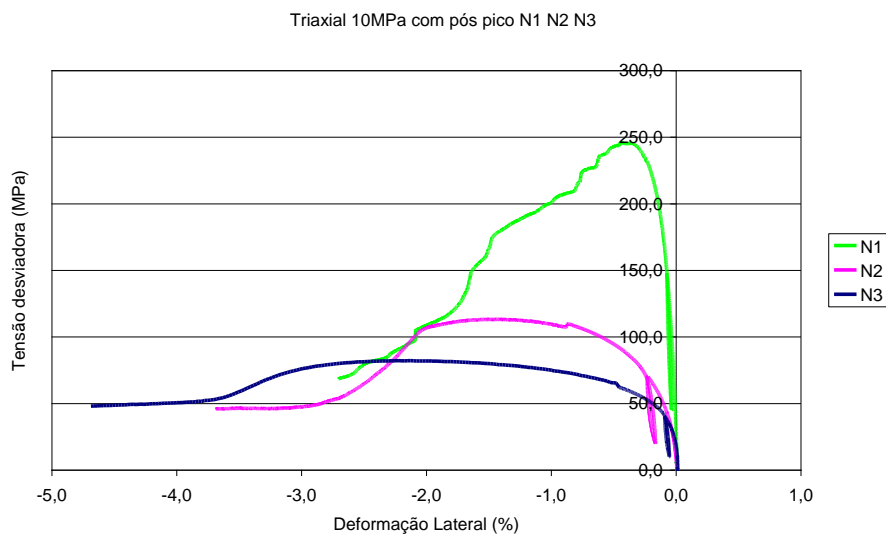


Gráfico 4.7 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3–Deformação Lateral x Tensão Desviadora

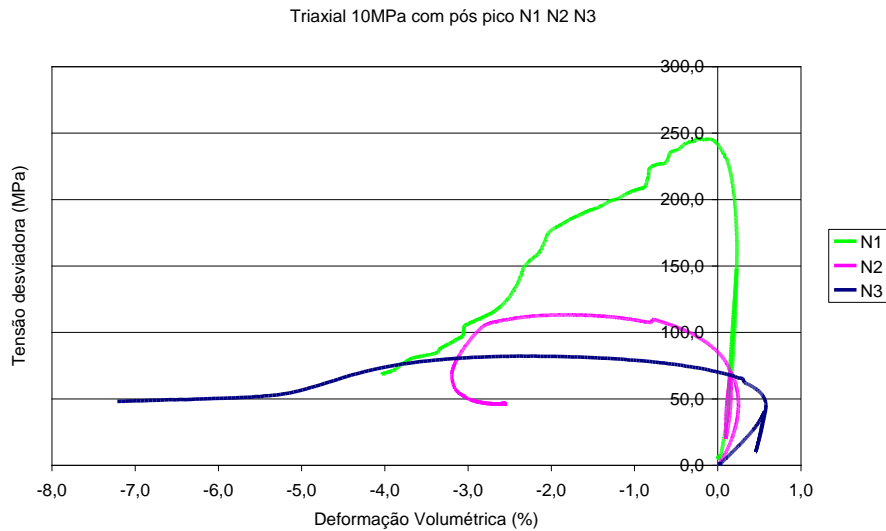


Gráfico 4.8 Ensaio Triaxial com 10MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora

- Nota-se a diferença da resistência de pico do nível 1 (242 MPa) para as resistências dos níveis 2 (123 MPa) e 3 (82 MPa). Mais uma vez o nível 2 aproximando-se mais do nível 3 que do nível 1.

4.1.3 Ensaios Triaxiais com 5MPa de tensão confinante

Os gráficos 4.9 a 4.12 mostram a comparação entre os três níveis de alteração para as deformações axiais, laterais e volumétricas no ensaio triaxial com 5MPa de tensão confinante.

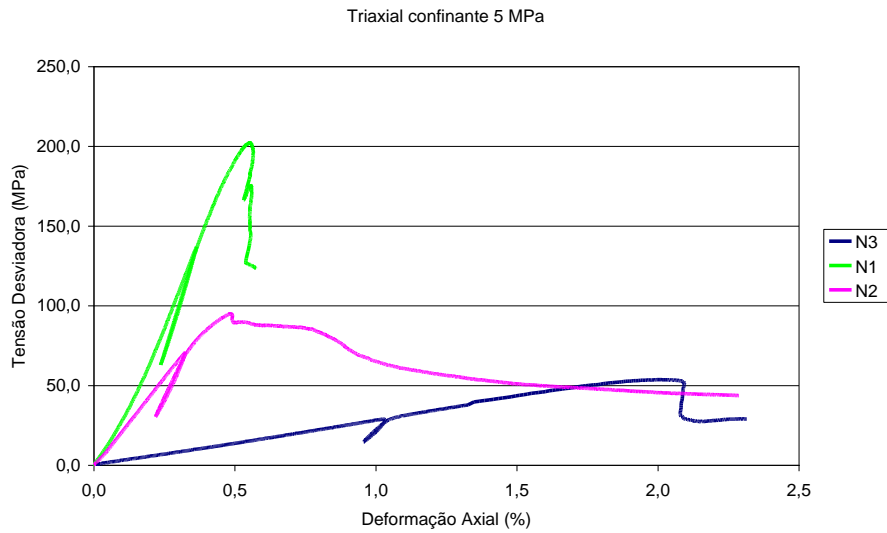


Gráfico 4.9 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão Desviadora

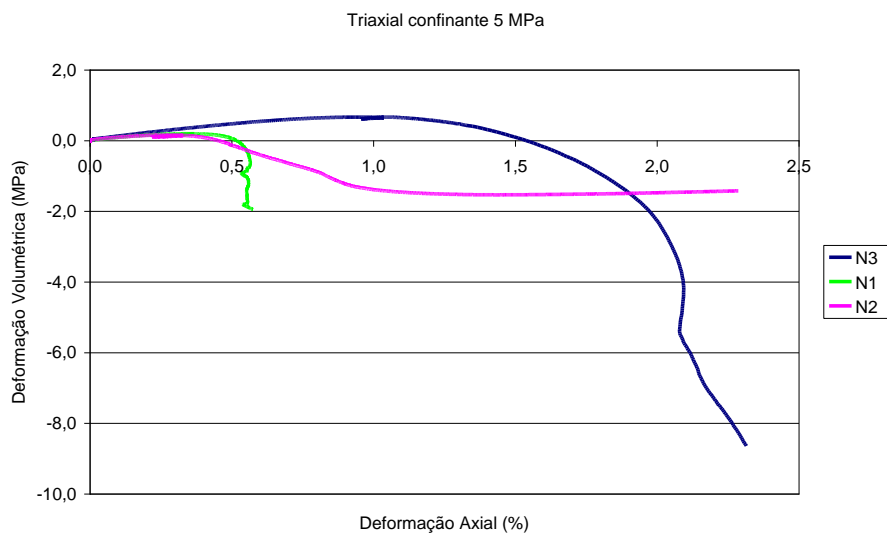


Gráfico 4.10 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica

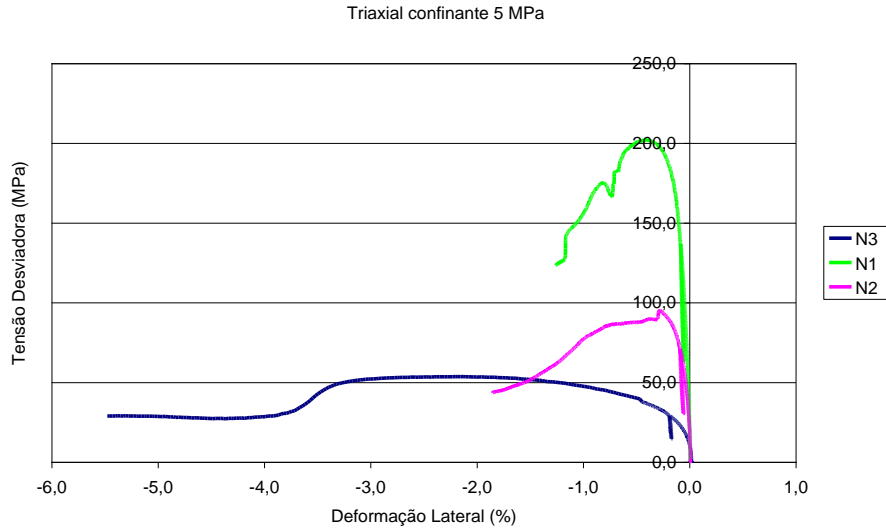


Gráfico 4.11 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão Desviadora

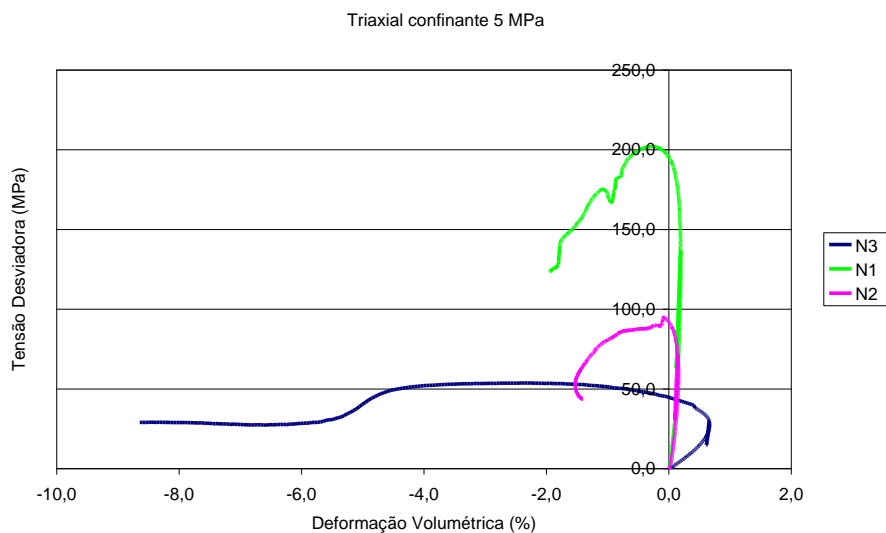


Gráfico 4.12 Ensaio Triaxial com 5MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão desviadora

- Para 5MPa de tensão confinante já tinha sido observado que o nível 2 apresentava-se mais rígido, aproximando-se mais do comportamento de deformabilidade do nível 1. Entretanto as resistências de pico foram 202 MPa, 95 MPa e 53MPa respectivamente para os níveis 1, 2 e 3. Observa-se ainda uma maior queda de resistência de pico do nível 1 para o nível 2, que do nível 2 para o nível 3, (107 MPa N1-N2 e 42 MPa N2-N3), assim como observado para tensões confinantes de 10MPa.

- O comportamento das deformações laterais para 5MPa de tensão confinante apresenta-se semelhante para os níveis 1 e 2, e bastante diferente para o nível 3, onde pequenos acréscimos de tensão geram um grande aumento de deformação lateral. Diferentemente dos gráficos para 10MPa de tensão confinante onde os níveis 2 e 3 apresentam um comportamento mais aproximado, sugerindo que a comportamento do nível 2 se aproxima do nível 1 com o aumento da tensão confinante.

4.1.4 Ensaios Triaxiais com 2MPa de tensão confinante

Os gráficos 4.13 a 4.16 mostram a comparação entre os três níveis de alteração para as deformações axiais, laterais e volumétricas no ensaio triaxial com 2MPa de tensão confinante.

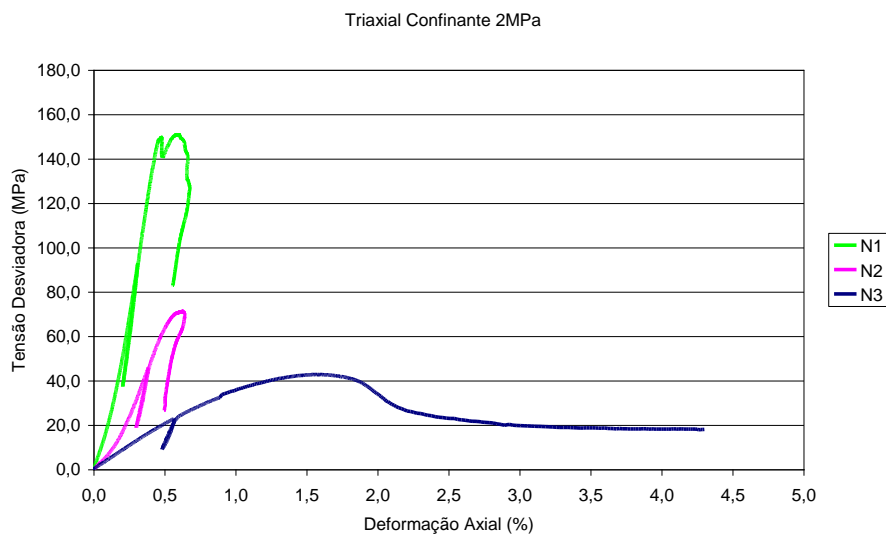


Gráfico 4.13 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão Desviadora

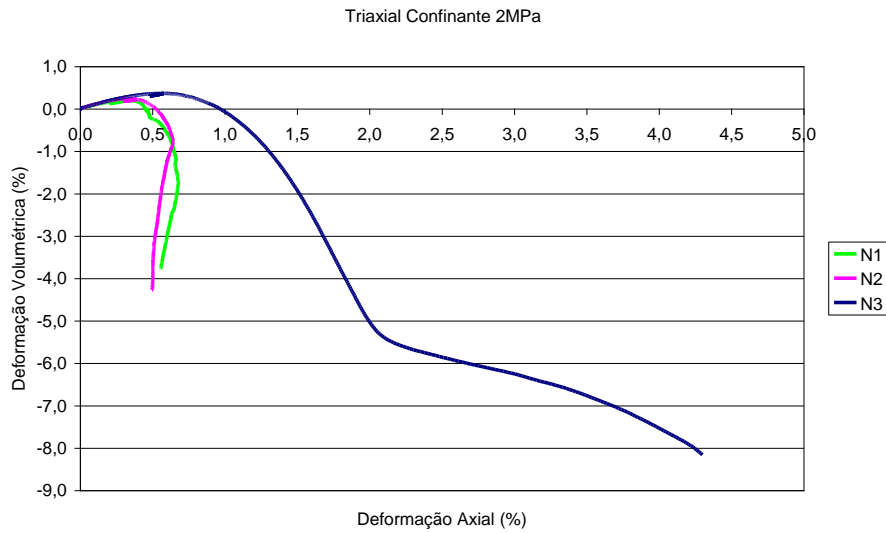


Gráfico 4.14 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica

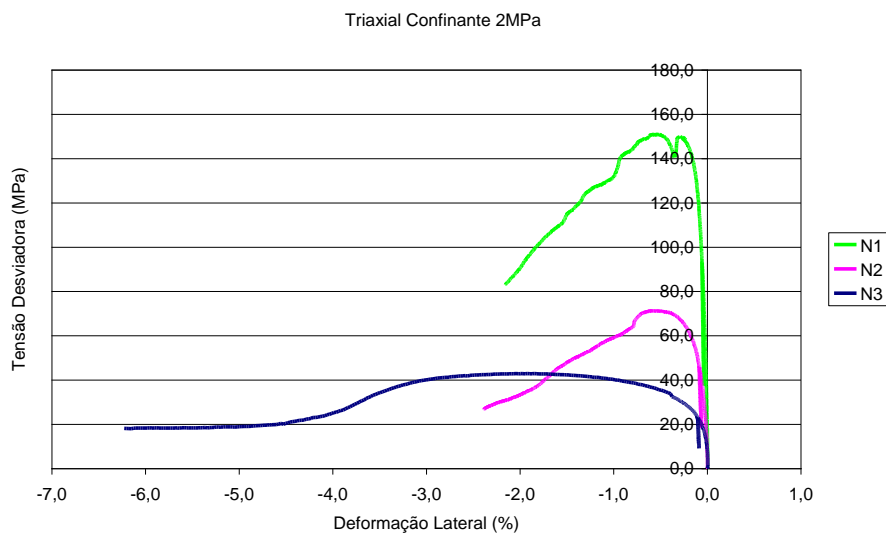


Gráfico 4.15 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão Desviadora

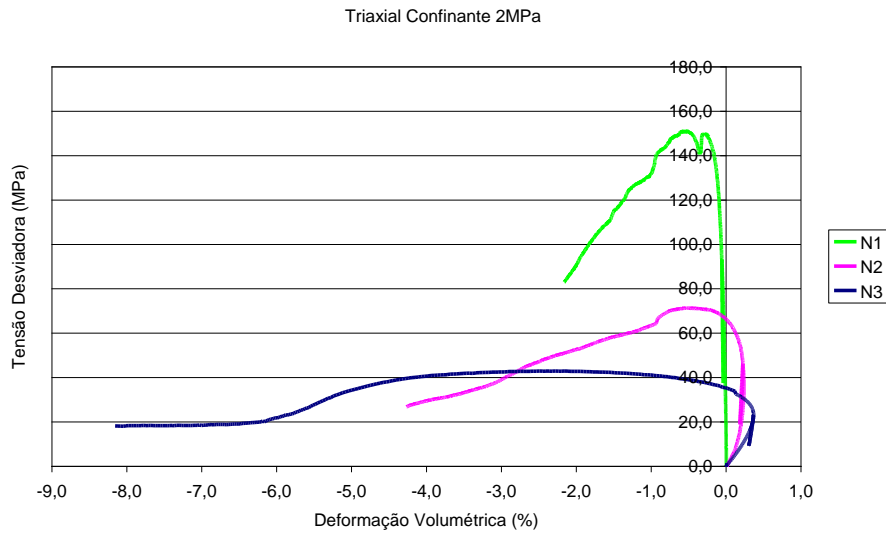


Gráfico 4.16 Ensaio Triaxial com 2MPa de tensão confinante N1, N2 e N3– Deformação Volumétrica x Tensão Desviadora

- As resistências de pico foram 150MPa, 73 MPa e 42,9MPa respectivamente para os níveis 1, 2 e 3. Mais uma vez observa-se uma queda de resistência maior do nível 1 para o 2, que do nível 2 para o 3.

4.1.5 Ensaio Uniaxiais

Os gráficos 4.17 a 4.20 mostram a comparação entre os três níveis de alteração para as deformações axiais, laterais e volumétricas no ensaio uniaxial.

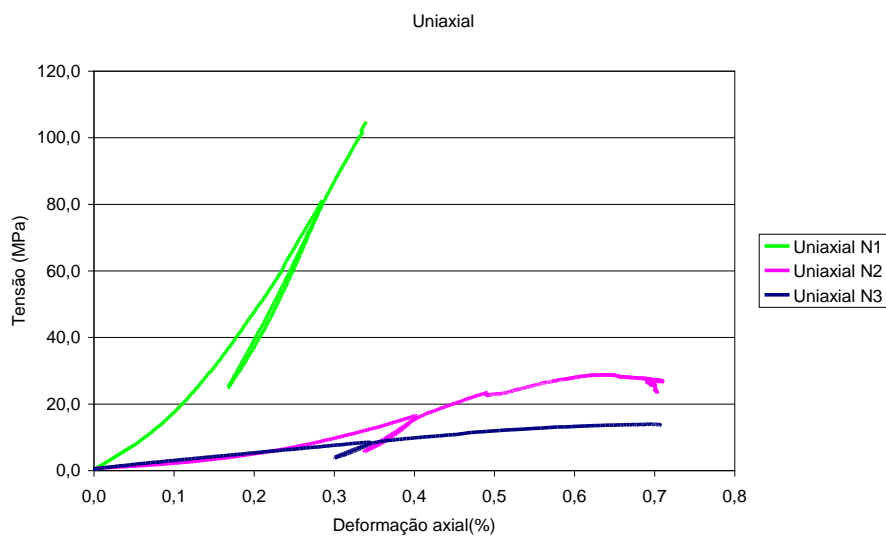


Gráfico 4.17 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3– Deformação Axial x Tensão

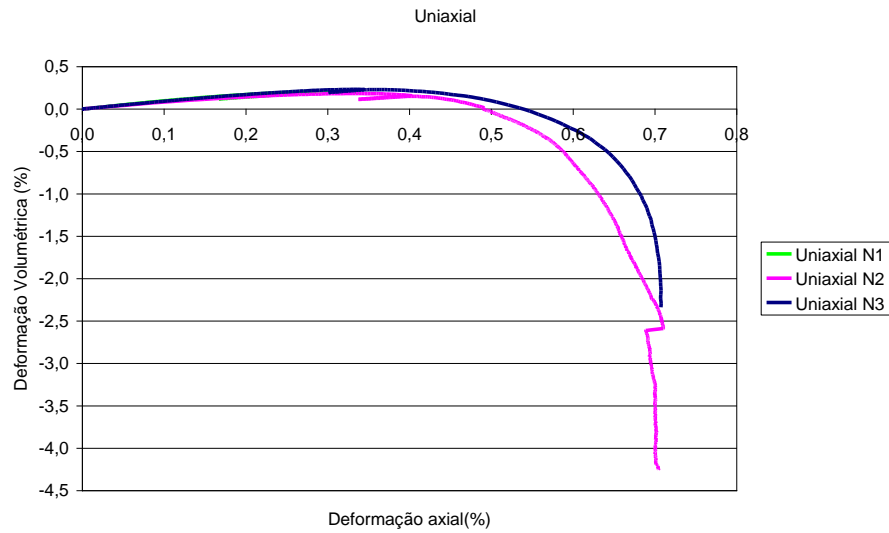


Gráfico 4.18 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3– Deformação Axial x Deformação Volumétrica

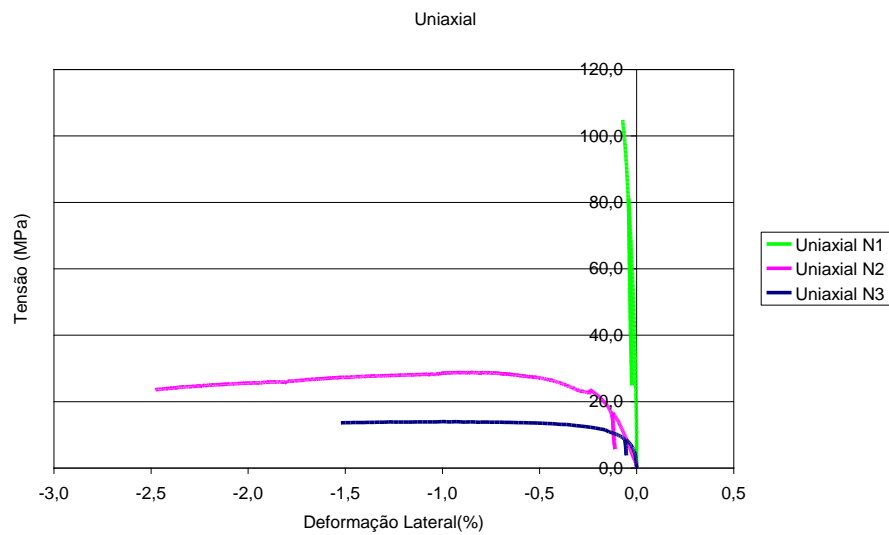


Gráfico 4.19 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3– Deformação Lateral x Tensão

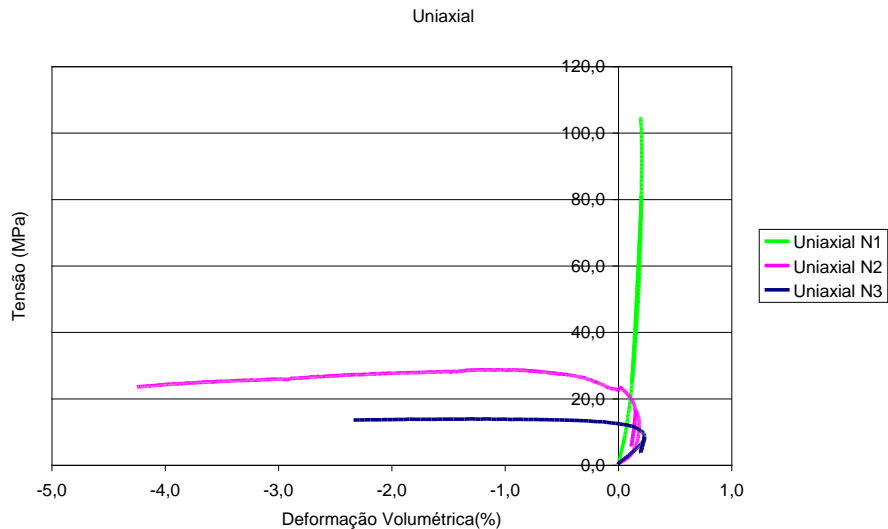


Gráfico 4.20 Ensaio Uniaxial N1, N2 e N3–Deformação Volumétrica x Tensão

- Não foi possível caracterizar o pós pico do nível 1, devido á ruptura da amostra. A diferença de resistência do nível 1 para o nível 2 é bastante acentuada para o ensaio uniaxial, que com a presença de tensão confinante, sendo as resistências de ruptura 104,7MPa, 28,2 MPa e 13,9MPa respectivamente para os níveis 1, 2 e 3.
- Observa-se que o trecho inicial das curvas dos níveis 2 e 3 praticamente coincidem indicando comportamentos semelhantes destes dois materiais para tensões abaixo de 10MPa. A partir daí o nível 2 suporta tensões ligeiramente maiores, enquanto o nível 3 apresenta grandes ganhos de deformação para ligeiros incrementos de tensão. Conclui-se portanto, que sem tensão confinante o nível 2 aproxima-se mais do nível 3 que do nível 1. O mesmo ocorre com as curvas volumétricas.

4.1.6 Envoltórias de Ruptura de Mohr Coulomb

O gráfico 4.21 mostra as envoltórias de resistência de Mohr Coulomb para os três níveis de alteração do Leptinito.

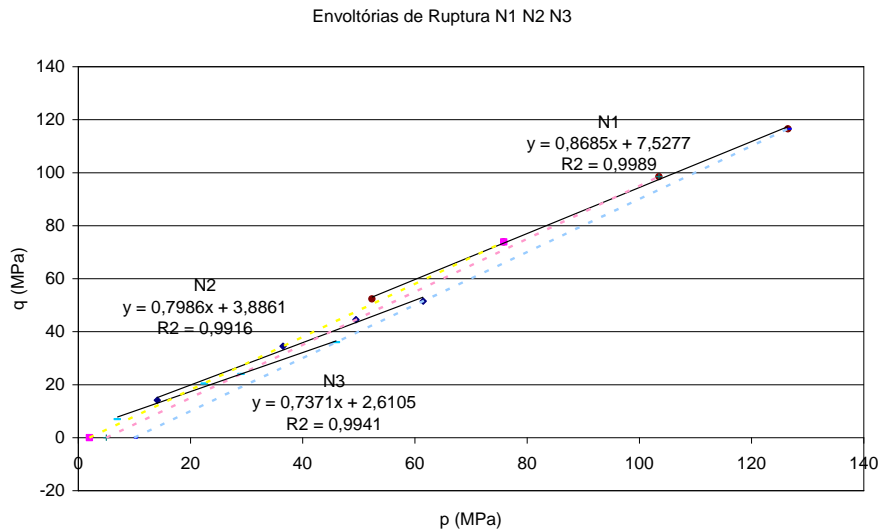


Gráfico 4.21 Envoltórias de Ruptura Níveis 1, 2 e 3

- As envoltórias de ruptura indicam bem a diferença de resistência entre os níveis e em especial o comportamento do nível 2, que se aproxima muito mais da resistência do nível 3 que do nível 1.
- Essa queda nos valores de resistência não aparece em mesma proporção para os valores de porosidades e nem na observação das amostras em escala macroscópica.
- Entretanto o alto grau de fraturamento dos minerais e sua alteração com o intemperismo podem explicar este comportamento do nível 2.
- Observa-se a grande queda de coesão do nível 1 para o nível 2, mais acentuada que do nível 2 para o nível 3. Com relação ao ângulo de atrito também não ocorre uma queda tão acentuada entre os níveis.

A tabela 4.1 mostra os parâmetros de resistência obtidos.

Sendo $\sin \Phi = \operatorname{tg} \alpha$, onde $\operatorname{tg} \alpha$ é o coeficiente angular das retas ajustadas.

E

$c = a / \cos \theta$, onde a é o coeficiente linear das retas ajustadas.

	Φ (°)	c (MPa)
N1	60,28	15,18
N2	52,99	6,45
N3	47,48	3,86

Tabela 4.1 Parâmetros de Resistência para os três níveis do Leptinito

O gráfico 4.22 mostra a relação da resistência á compressão simples com a porosidade para o Gnaiss Facoidal (Menezes Filho, 1993) e para o Leptinito.

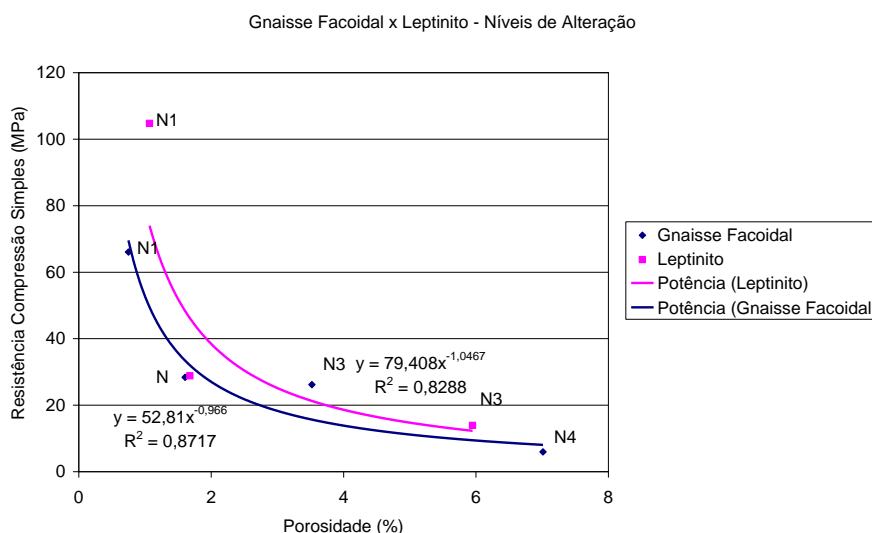


Gráfico 4.22 Comparativo dos níveis de alteração para o Leptinito e o Gnaiss Facoidal

4.2 Adequação do Modelo de Lade Kim aos Níveis de Intemperismo

Nesta sessão foram utilizados os parâmetros calibrados pelo método inverso. Os gráficos 4.23 a 4.28 mostram a comparação das curvas numéricas e experimentais para 2MPa, 5MPa e 10MPa de tensão confinante.

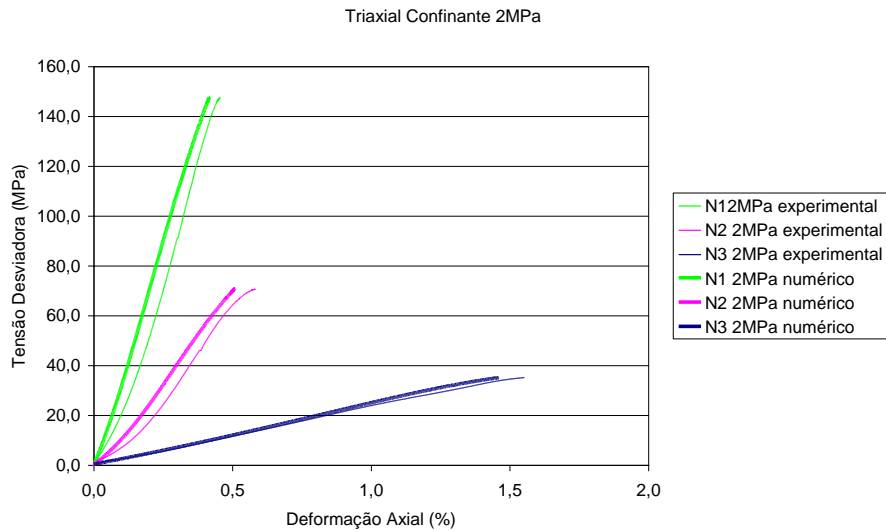


Gráfico 4.23 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x Tensão desviadora, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 2MPa

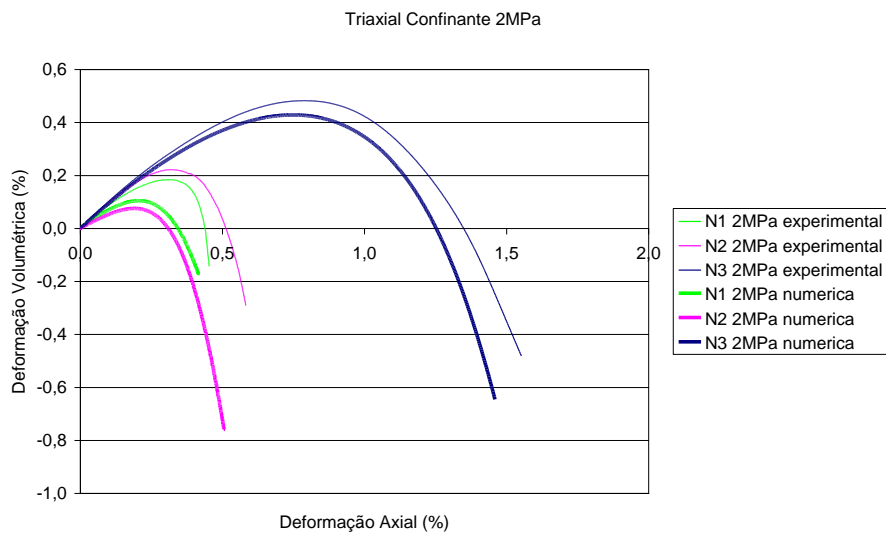


Gráfico 4.24 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x deformação volumétrica, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 2MPa

- Para 2 MPa de tensão confinante, em uma análise visual, o modelo ajustou melhor o nível 3 de intemperismo tanto para as curvas tensão x deformação, quanto para as curvas volumétricas, sendo os valores de deformações numéricas são ligeiramente menores que as experimentais para os níveis 1 e 2.

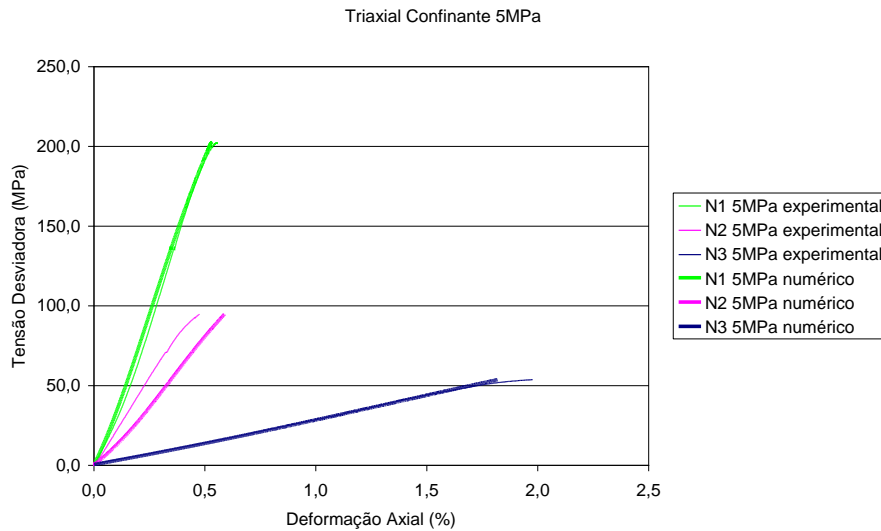


Gráfico 4.25 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x Tensão desviadora, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 5MPa

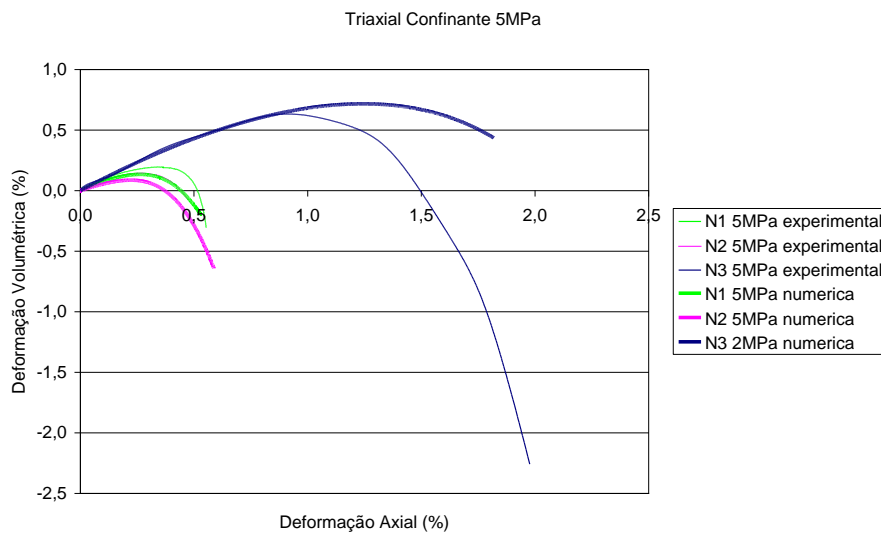


Gráfico 4.26 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x deformação volumétrica, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 5MPa

- Para 5 MPa de tensão confinante, em uma análise visual, o modelo ajustou bem os níveis 1 e 3 de intemperismo para as curvas tensão x deformação. O nível 2 teve um pior ajuste possivelmente devido ao ensaio que apresentou-se mais rígido que os outros do nível 2. Para as curvas volumétricas, o nível 1 foi o de pior ajuste.

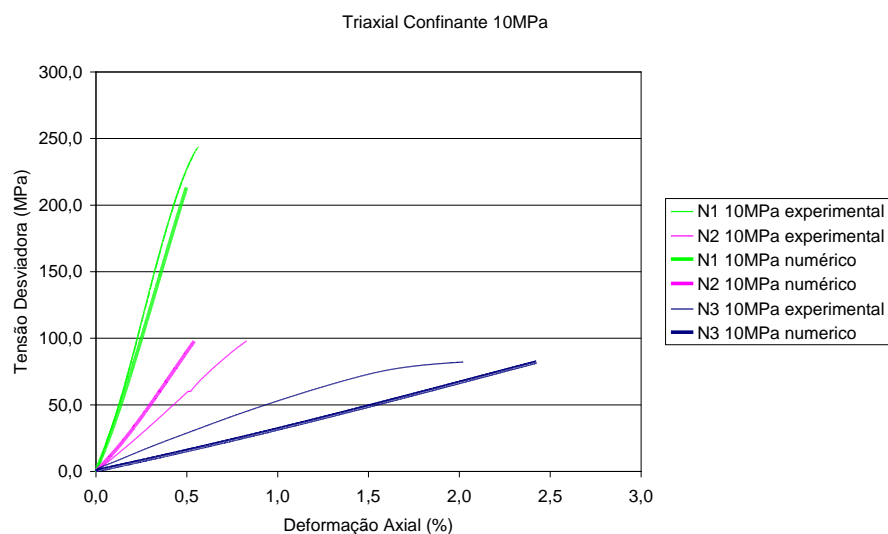


Gráfico 4.27 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x Tensão desviadora, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 10MPa

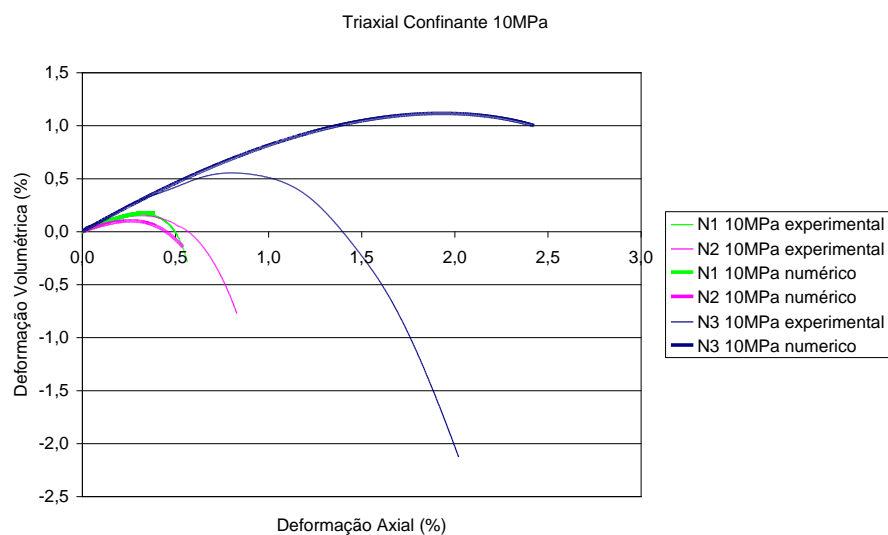


Gráfico 4.28 Curvas numéricas e experimentais, deformação axial x deformação volumétrica, Níveis 1, 2 e 3 Tensão confinante 10MPa

- Para 10 MPa de tensão confinante, em uma análise visual, o modelo ajustou melhor o nível 1 de intemperismo tanto para as curvas tensão x deformação, quanto para as curvas volumétricas, sendo os valores de deformações experimentais são ligeiramente menores que os numéricos.

- Modo geral o nível 1 foi o que melhor se ajustou ao modelo de Lade Kim, independente da tensão confinante, pois o nível 3 apresentou bons ajustes para baixas tensões confinantes, mas não tão bons para as mais altas.

4.3 Relação dos Parâmetros de Lade Kim com o Intemperismo

Um dos objetivos do trabalho é verificar se é possível identificar se há alguma relação entre os parâmetros e o nível de alteração da rocha, de modo a identificar se o modelo de Lade Kim atua como um modelo evolutivo. Para tanto avaliou-se a relação entre os parâmetros, a porosidade e o peso específico conforme gráficos a seguir.

Como foram feitos poucos ensaios de porosidade para o leptinito estudado, optou-se apresentar um desvio dos valores da porosidade para o nível 3 de 5% a 8%, estimado com base em dados da literatura para porosidades de gnaisses intemperizados.

Observa-se pelos gráficos 4.29 e 4.30 que as resistências de pico seguem leis de potência decrescentes com o aumento da porosidade, e decrescentes com o peso específico, considerando estas propriedades como representantes do intemperismo. As curvas apresentam formas semelhantes e certo paralelismo com relação à tensão confinante, obtendo ajustes maiores que 0,75 para a porosidade.

Modo geral, para as resistências, bem como para todos os parâmetros, a porosidade ajustou curvas melhores que o peso específico. Todos os parâmetros, exceto ψ_2 e C , apresentaram relações decrescentes com o intemperismo, ou seja, quanto mais intemperizada, menor o valor do parâmetro. Foi escolhido o ajuste, linear, lei de potência ou logarítmico, que fornecesse os melhores valores de correlação.

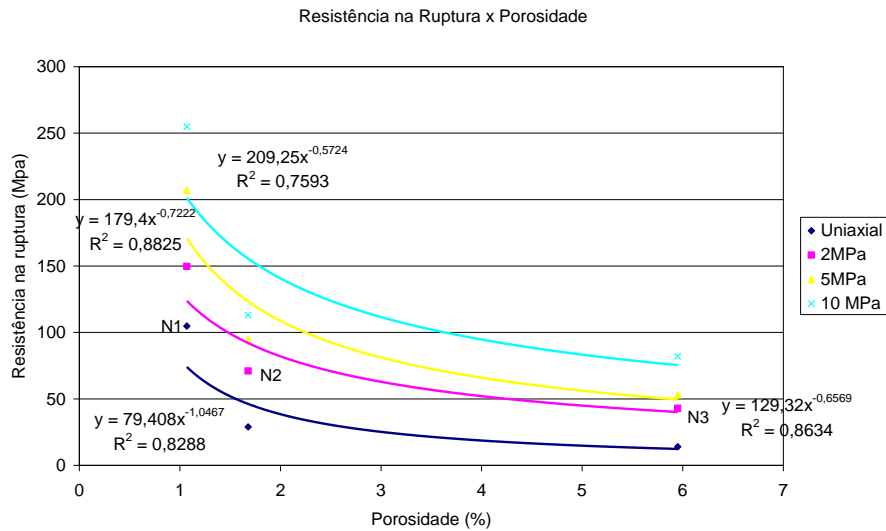


Gráfico 4.29 Resistência na Ruptura x Porosidade

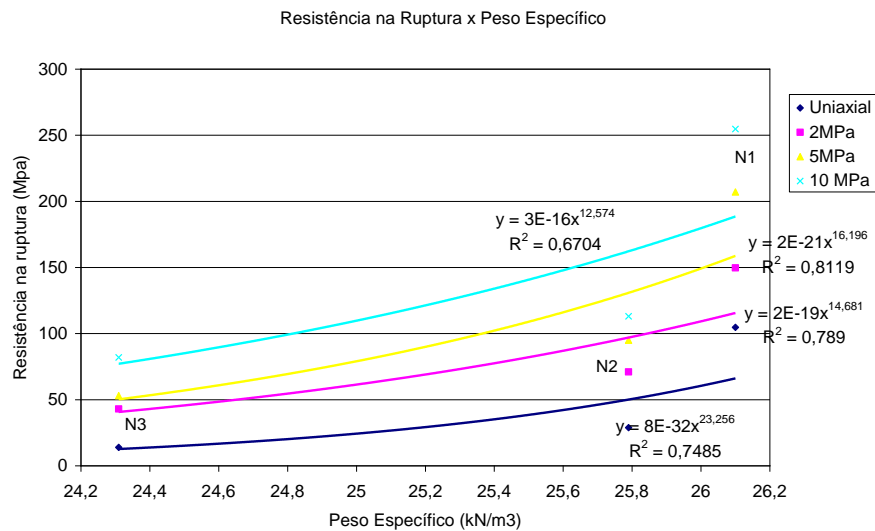


Gráfico 4.30 Resistência na Ruptura x Peso Específico

Os gráficos 4.31 a 4.54 mostram a variação dos parâmetros do modelo de Lade e Kim com a porosidade e o peso específico utilizados como parâmetros de intemperismo.

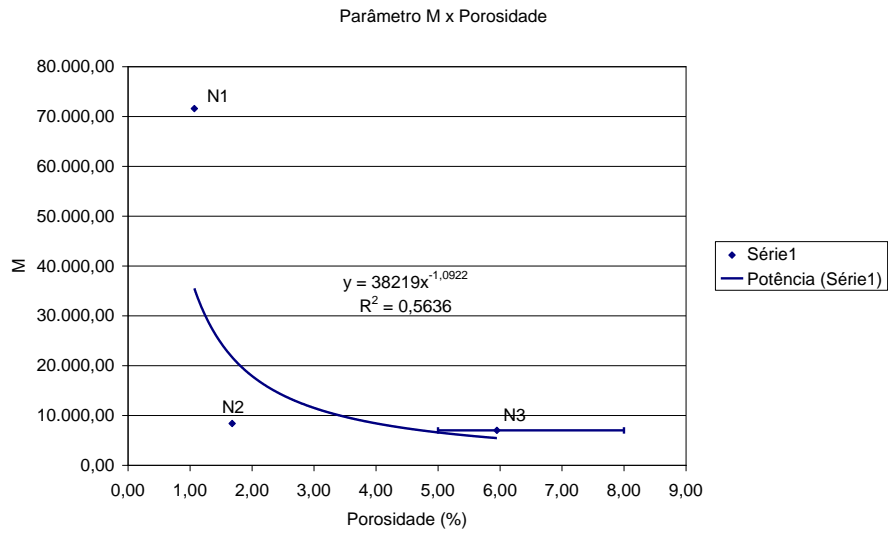


Gráfico 4.31 Parâmetro M x Porosidade

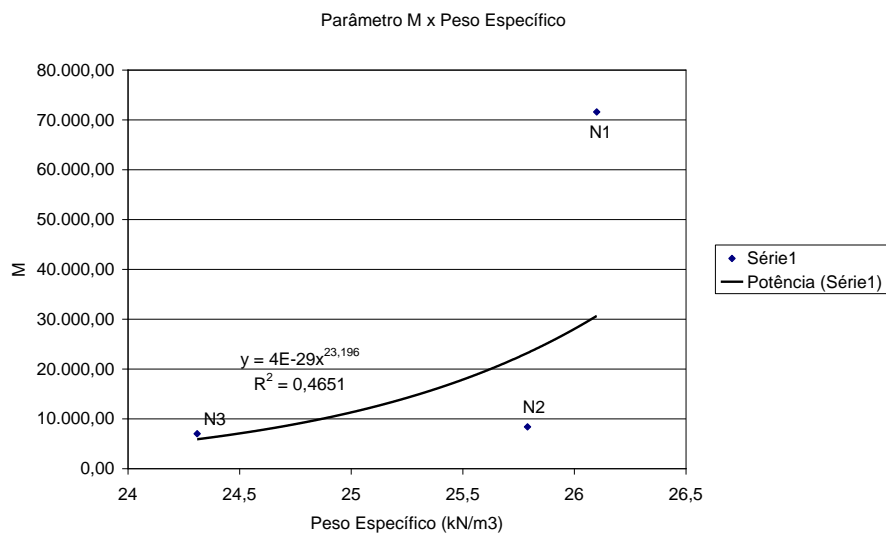


Gráfico 4.32 Parâmetro M x Peso Específico

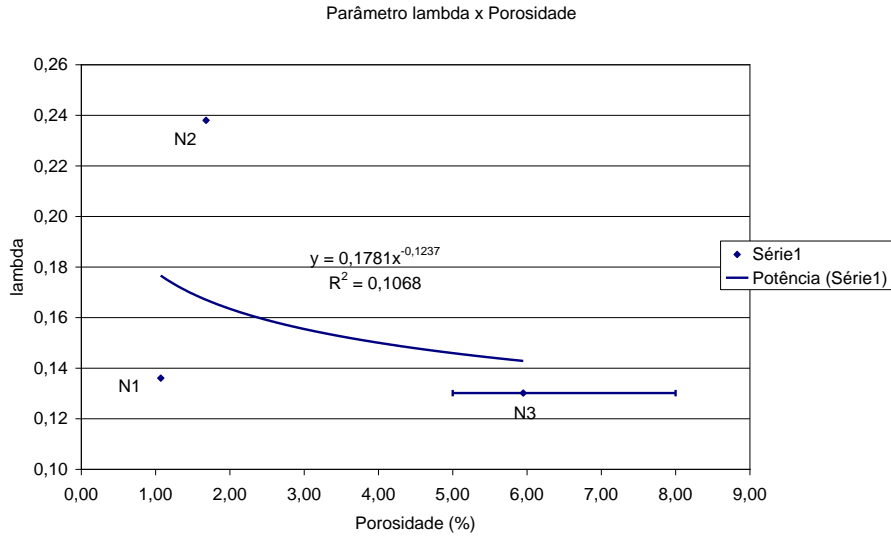


Gráfico 4.33 Parâmetro λ x Porosidade

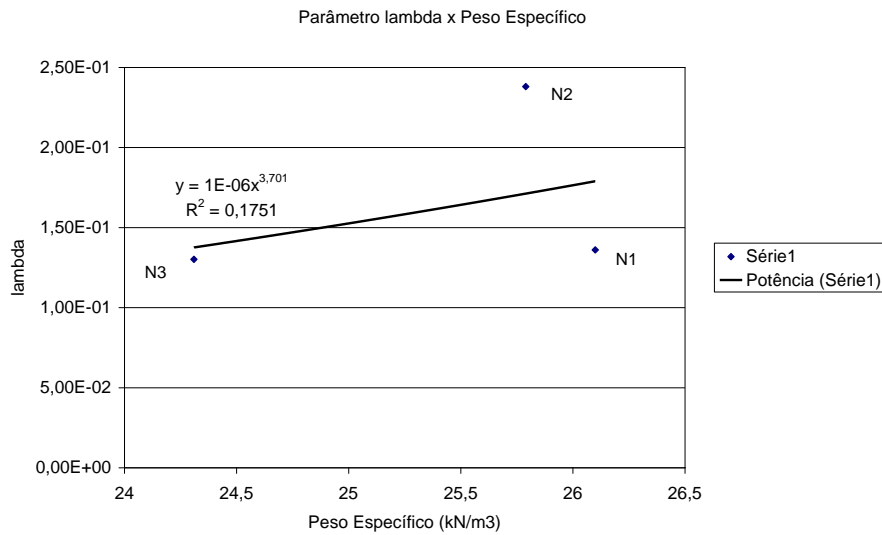


Gráfico 4.34 Parâmetro λ x Peso Específico

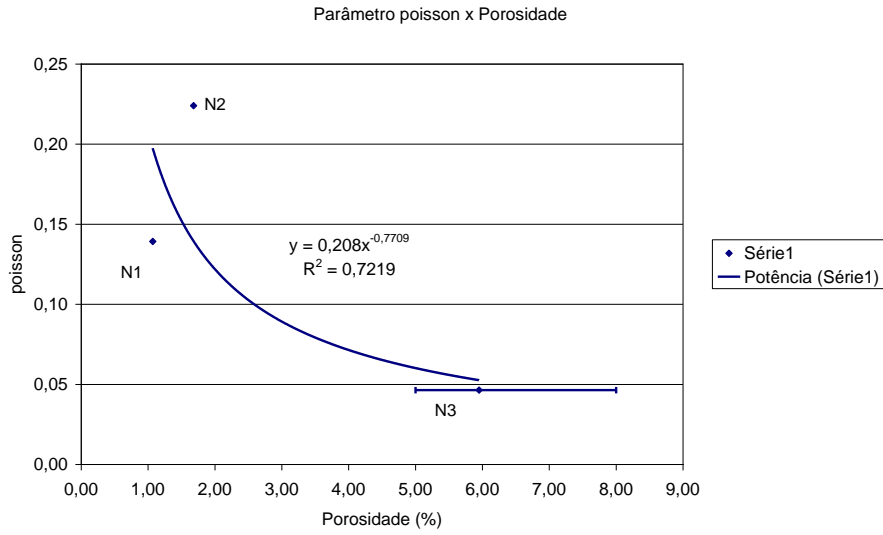


Gráfico 4.35 Parâmetro ν x Porosidade

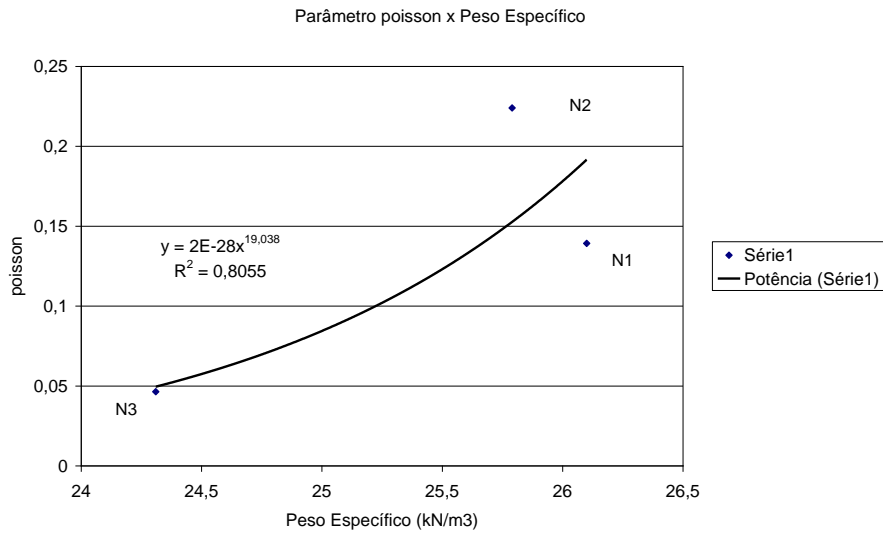


Gráfico 4.36 Parâmetro ν x Peso Específico

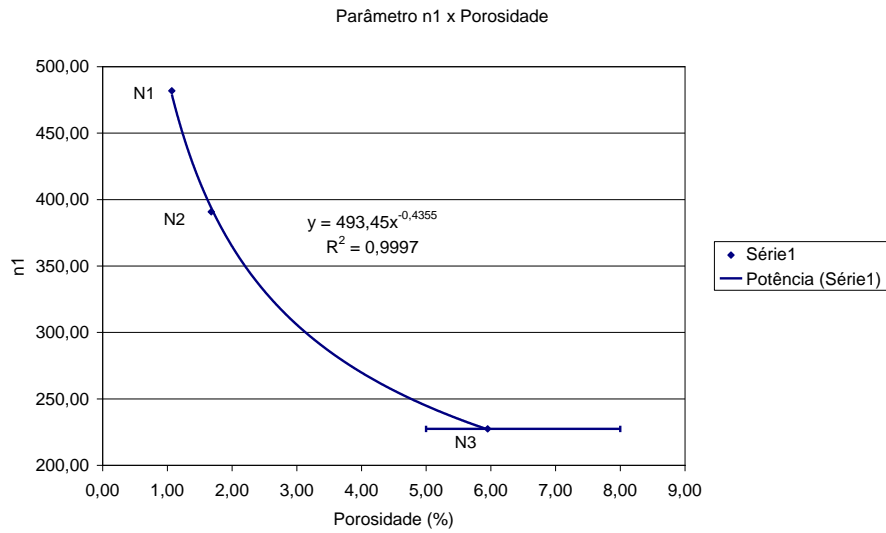


Gráfico 4.37 Parâmetro η_1 x Porosidade

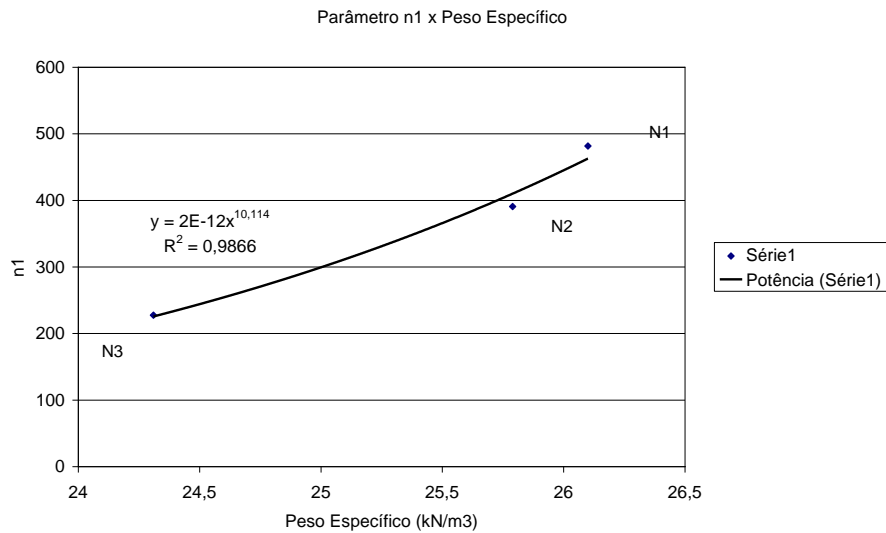


Gráfico 4.38 Parâmetro η_1 x Peso Específico

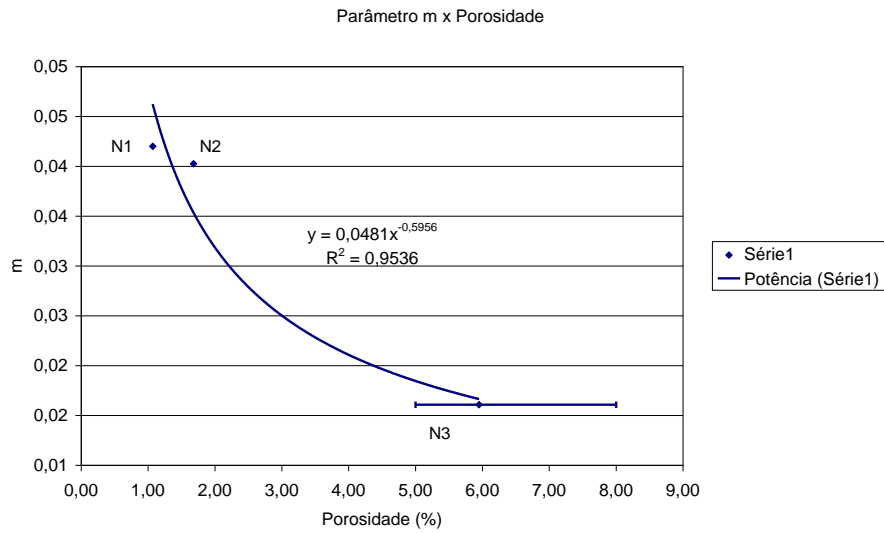


Gráfico 4.39 Parâmetro m x Porosidade

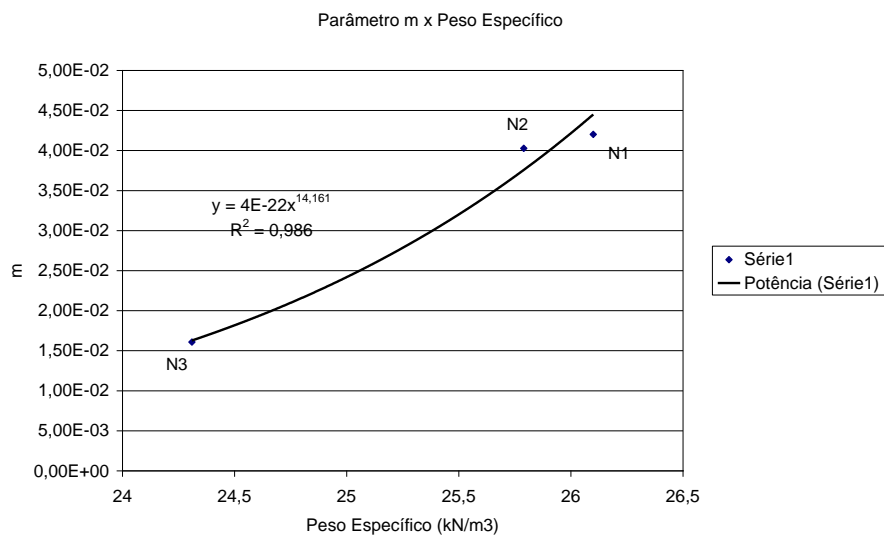


Gráfico 4.40 Parâmetro m x Peso Específico

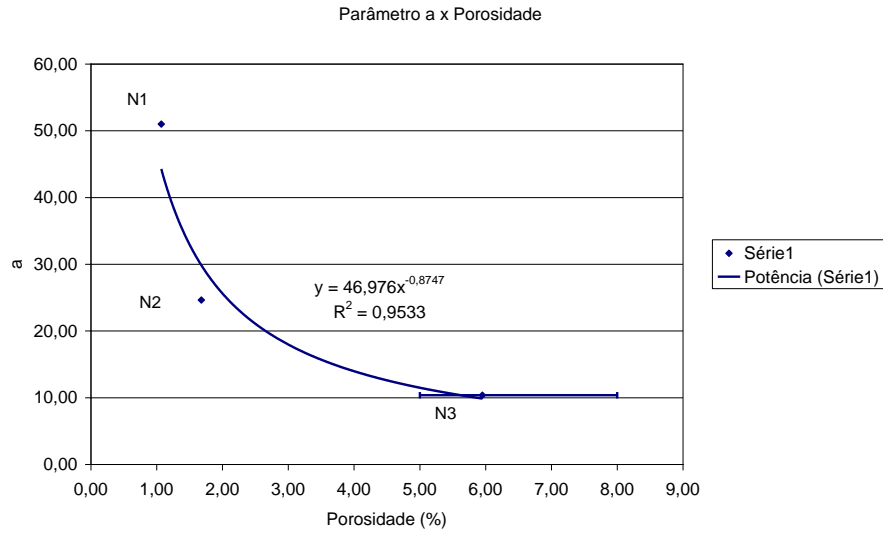


Gráfico 4.41 Parâmetro a x Porosidade

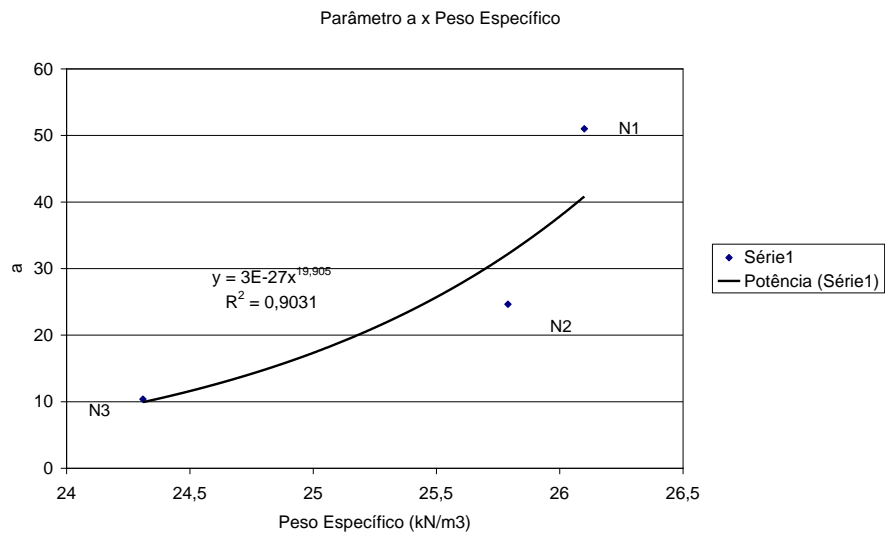


Gráfico 4.42 Parâmetro a x Peso Específico

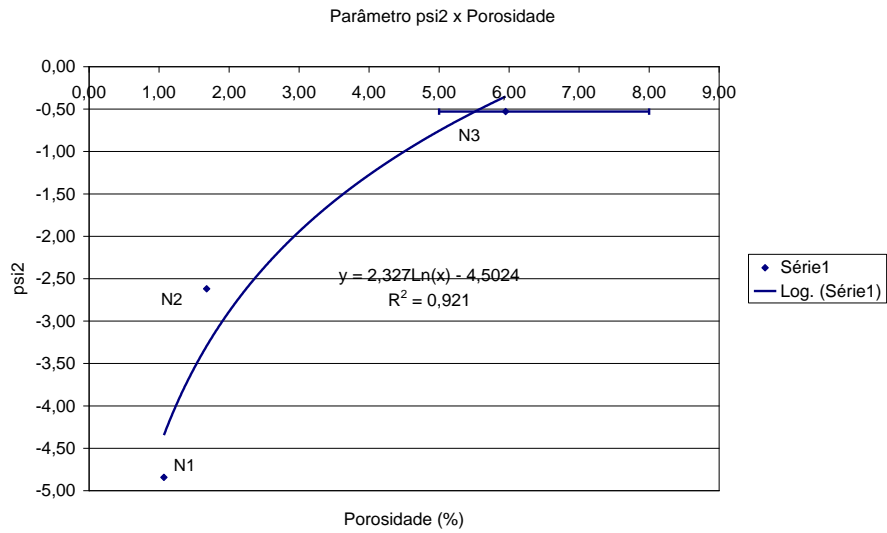


Gráfico 4.43 Parâmetro ψ_2 x Porosidade

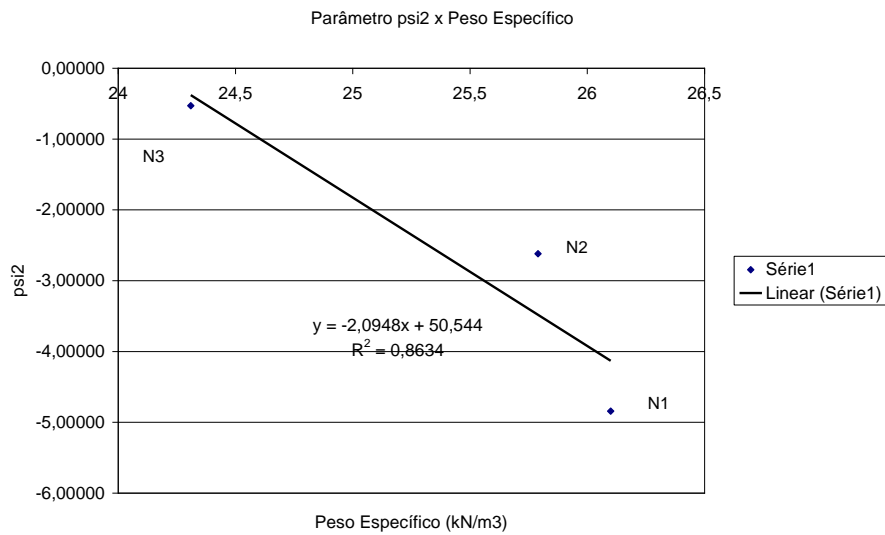


Gráfico 4.44 Parâmetro ψ_2 x Peso Específico

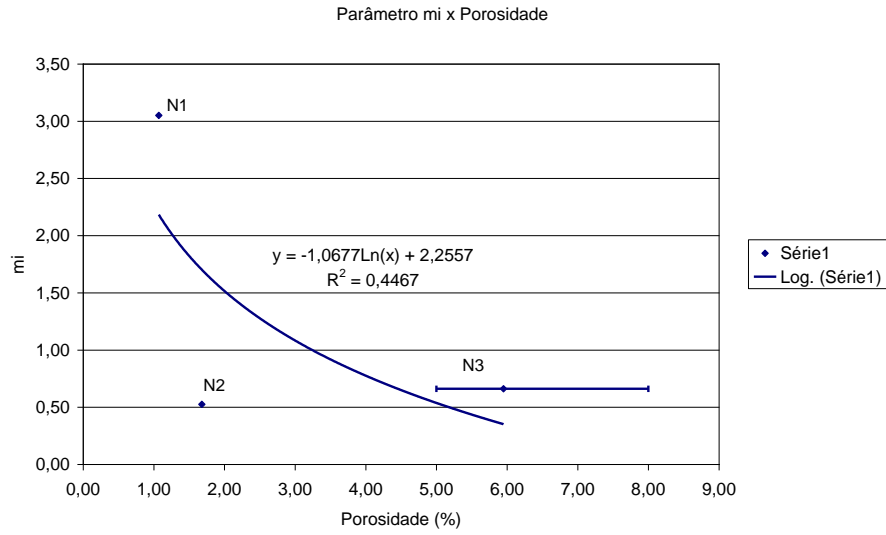


Gráfico 4.45 Parâmetro μ x Porosidade

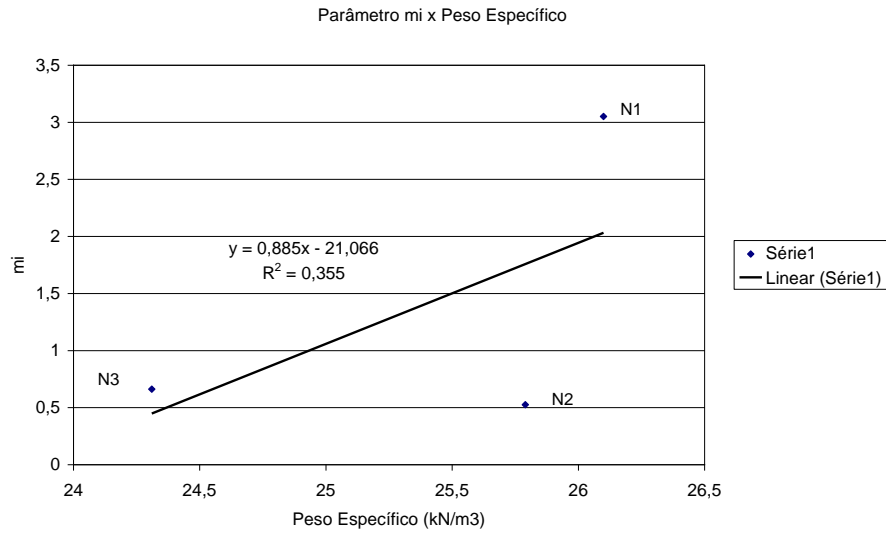


Gráfico 4.46 Parâmetro μ x Peso Específico

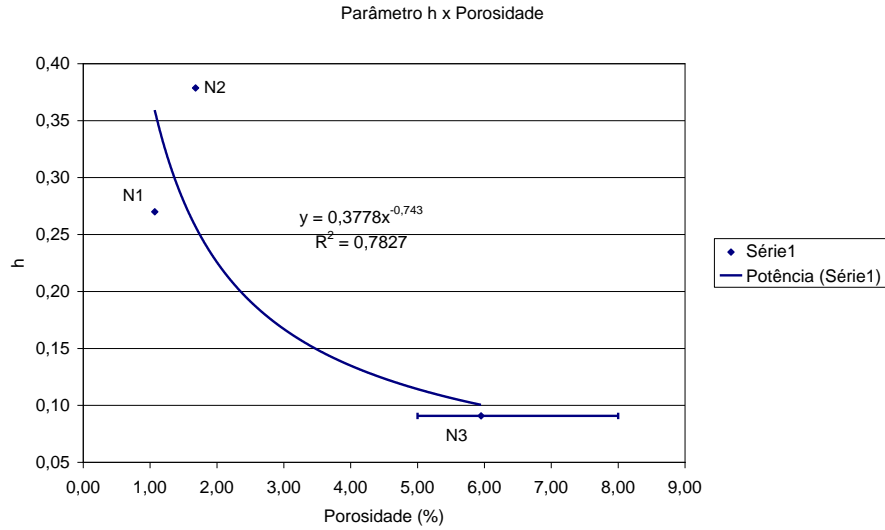


Gráfico 4.47 Parâmetro h x Porosidade

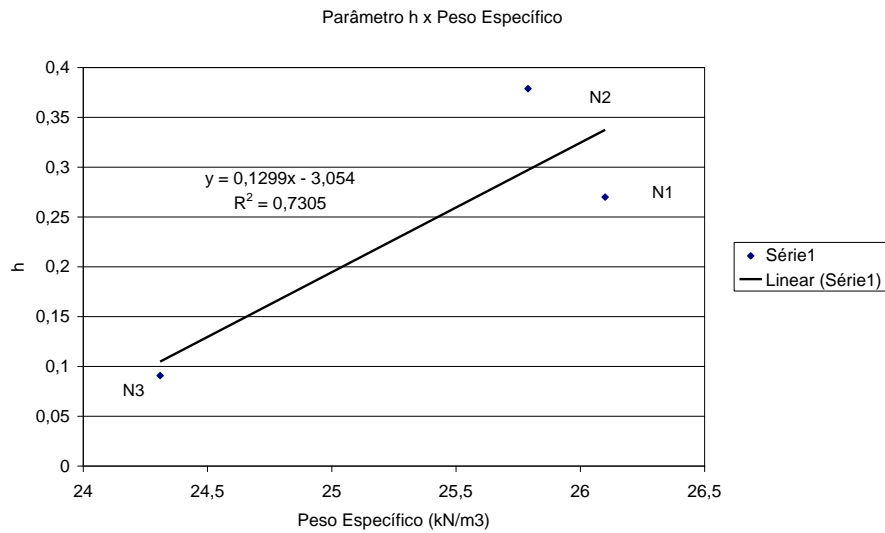


Gráfico 4.48 Parâmetro h x Peso Específico

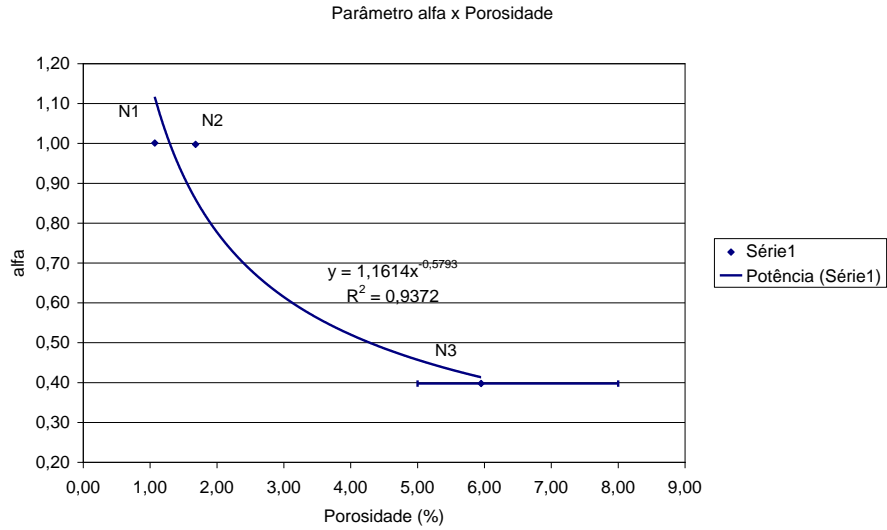


Gráfico 4.49 Parâmetro α x Porosidade

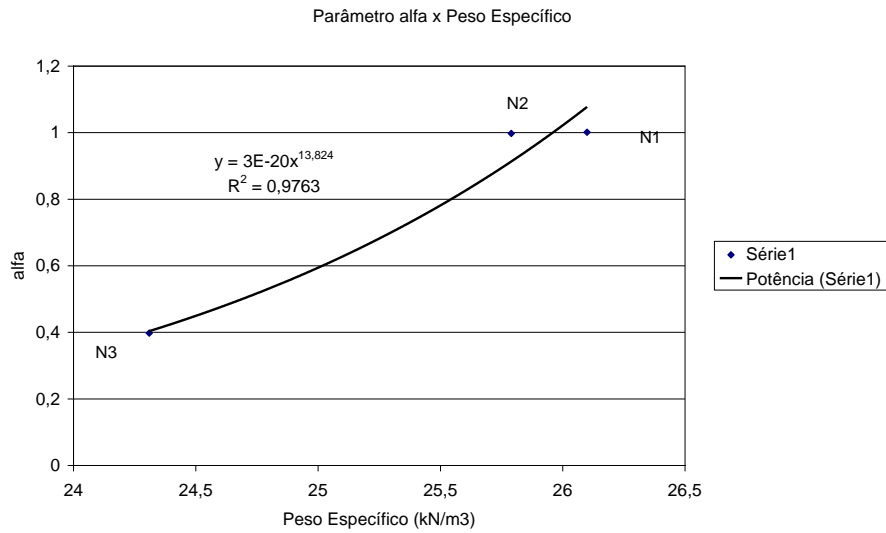


Gráfico 4.50 Parâmetro α x Peso Específico

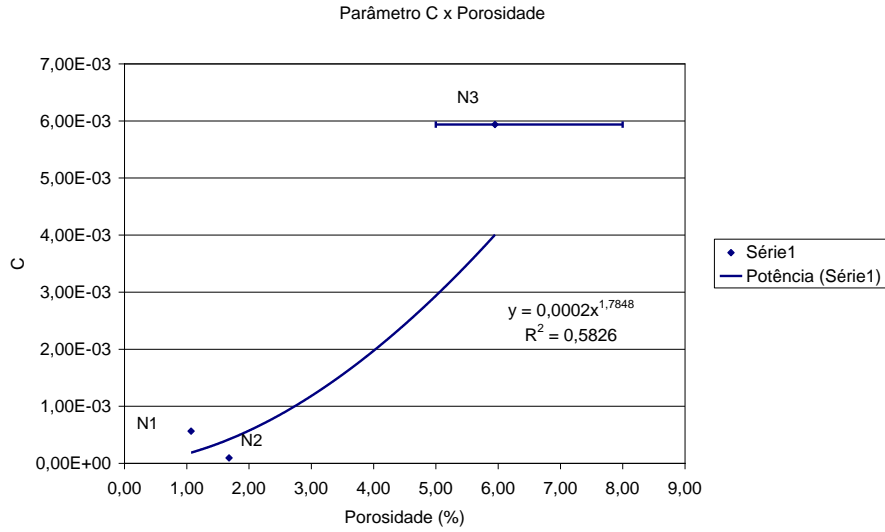


Gráfico 4.51 Parâmetro C x Porosidade

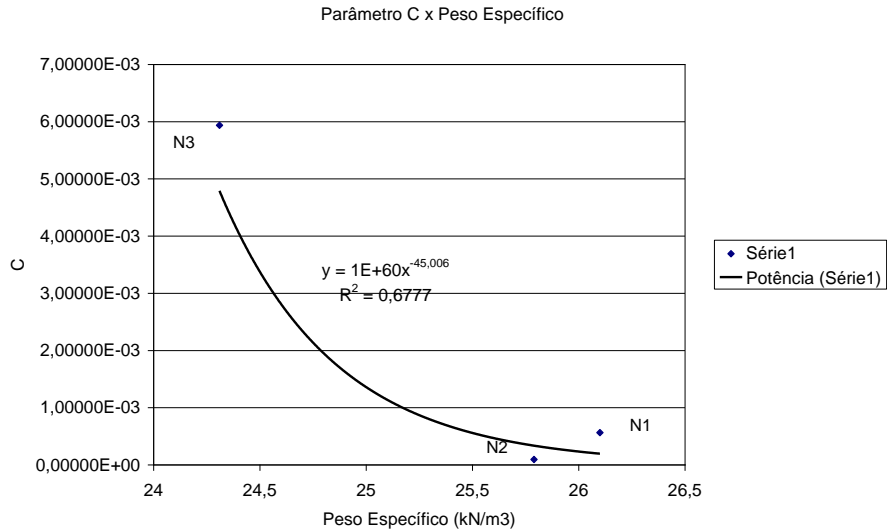


Gráfico 4.52 Parâmetro C x Peso Específico

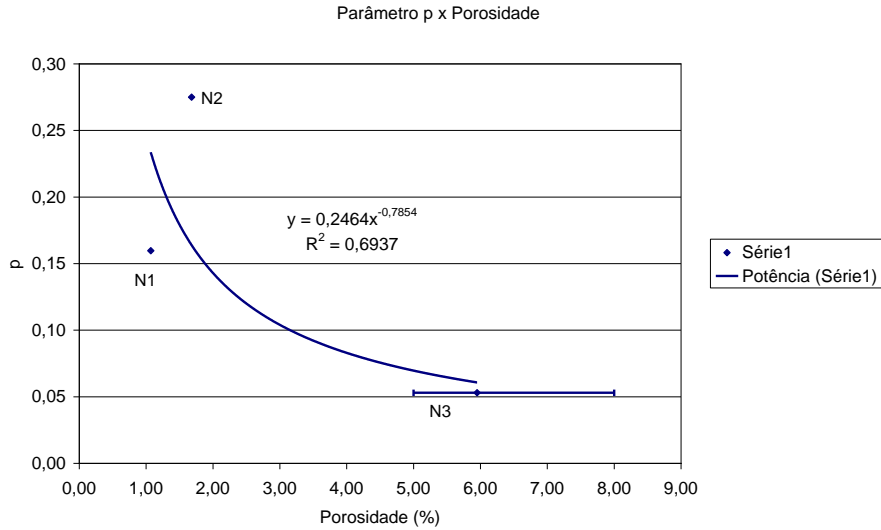


Gráfico 4.53 Parâmetro p x Porosidade

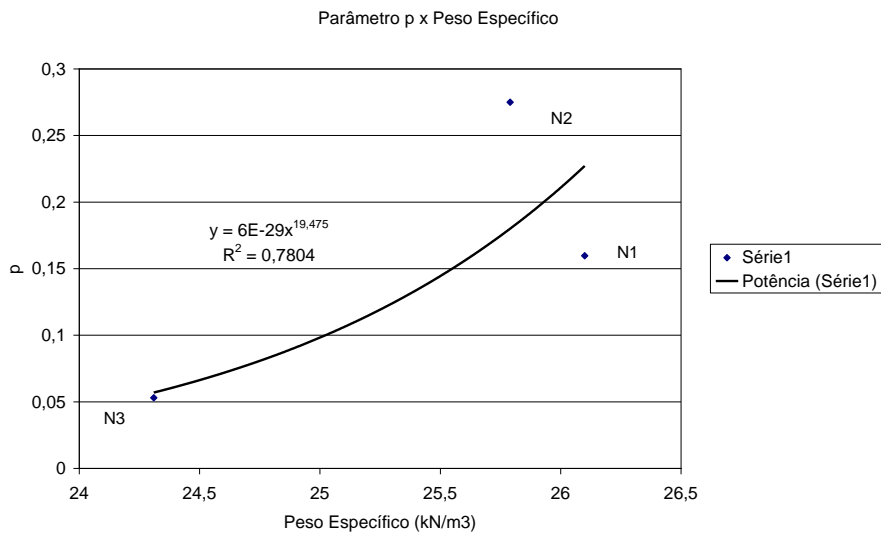


Gráfico 4.54 Parâmetro p x Peso Específico

Os parâmetros com as piores correlações, abaixo de 0,5, tanto para a porosidade quanto para o peso específico foram M , λ e μ , sendo que λ foi o que obteve a pior correlação de todos os parâmetros.

Os parâmetros ν , ψ_2 , h , C e p , forneceram valores de correlação entre 0,5 e 0,9 para a porosidade, apresentando bons ajustes.

Os parâmetros η_1 , m , a e α apresentaram excelentes correlações, acima de 0,9 com a porosidade, sendo que o parâmetro η_1 foi o que melhor se ajustou.

Observa-se portanto que os parâmetros com sentido físico, como o parâmetro a , ligado diretamente à resistência à tração, obviamente reduzido com o aumento do intemperismo, assim como os parâmetros do critério de ruptura, menos ligados aos cálculos dos demais parâmetros, foram os que melhor se ajustaram. O mesmo deveria acontecer com os parâmetros elásticos, que não ajustaram bem, possivelmente pela diferença entre delimitar deformações puramente elásticas, especialmente para o nível 3 de intemperismo, ou pela utilização do ensaio mais rígido do nível 2 na calibração.

Com o objetivo de avaliar a evolução dos parâmetros com o intemperismo, plotou-se em conjunto com os dados do leptinito, os parâmetros para solo residual de gnaiss da tabela 4.2, e porosidade de 47% para o solo, conforme gráficos 4.55 a 4.66

Parâmetros	Solo residual de Gnaiss
M	140,197
λ	0,248
ν	0,192
η_1	32,287
m	0,302
a	0
Ψ_2	-2,90
μ	1,735
h	0,754
α	0,2047
C	0,617e-03
p	1,745

Tabela 4.2 Parâmetros de Lade Kim para solo residual de gnaiss (Laquini et al, 2007).

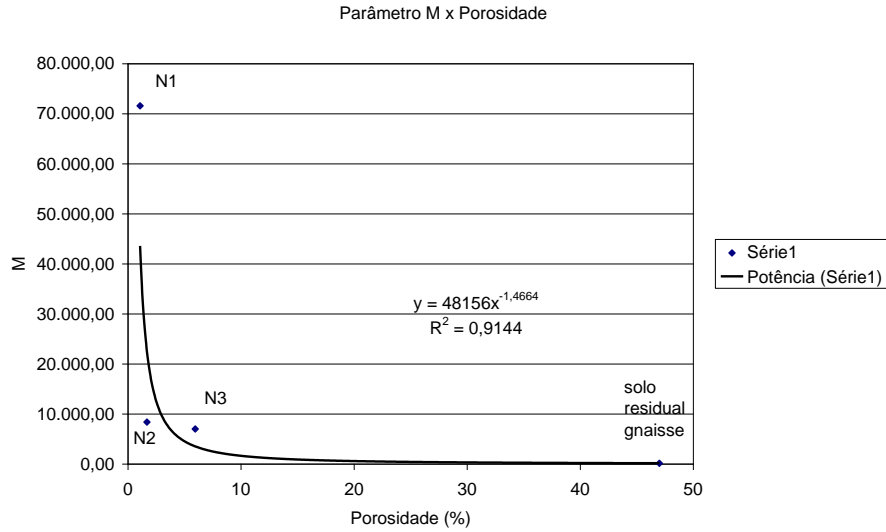


Gráfico 4.55 Parâmetro M x Porosidade com solo residual de gnaïsse

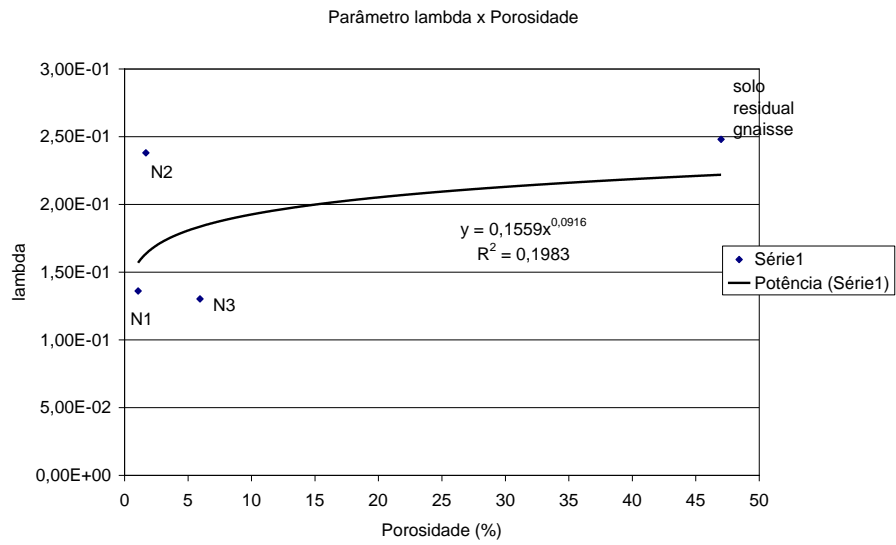


Gráfico 4.56 Parâmetro λ x Porosidade com solo residual de gnaïsse

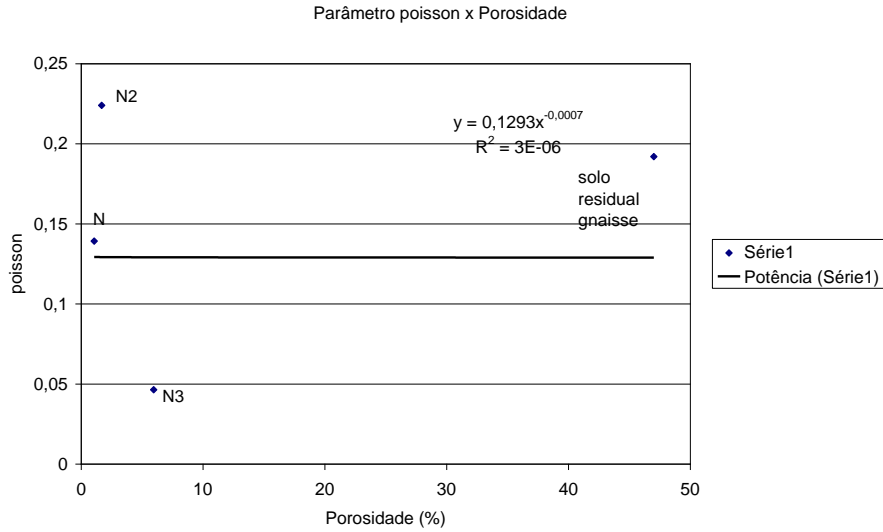


Gráfico 4.57 Parâmetro ν x Porosidade com solo residual de gnaisse

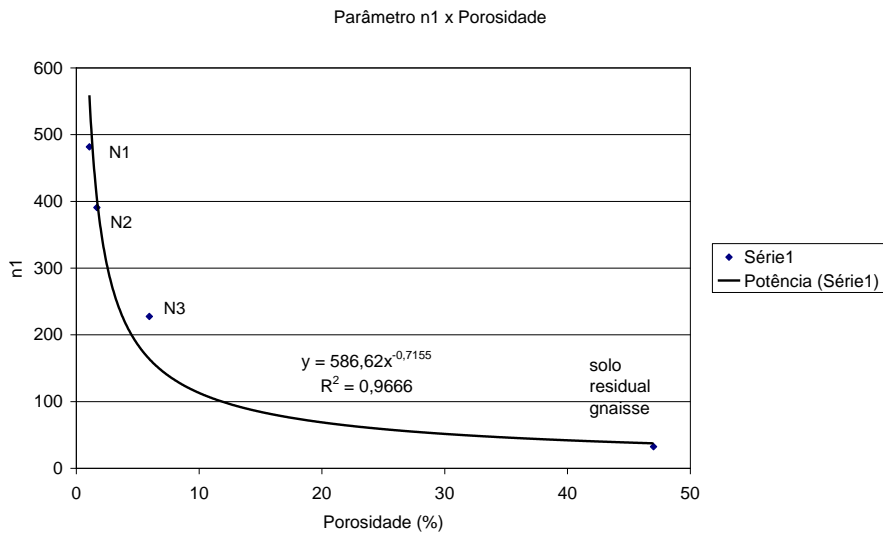


Gráfico 4.58 Parâmetro η_1 x Porosidade com solo residual de gnaisse

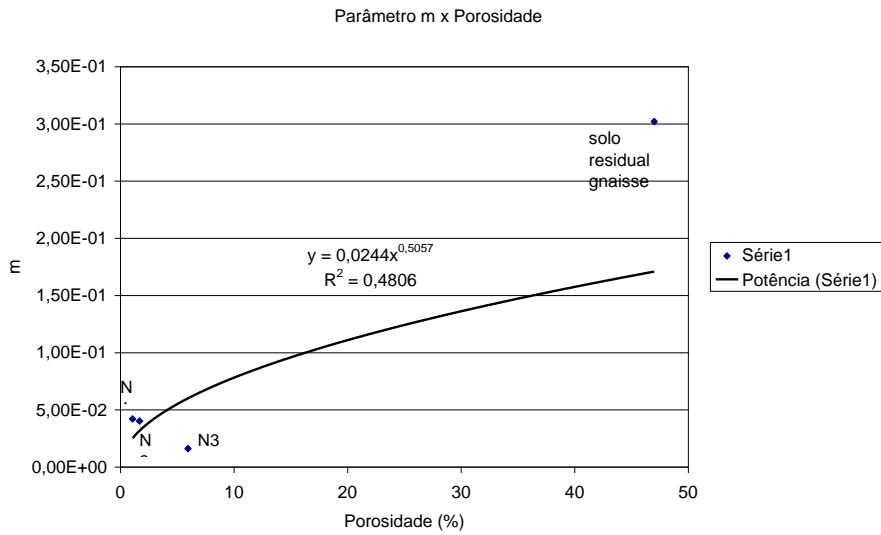


Gráfico 4.59 Parâmetro m x Porosidade com solo residual de gnaisse

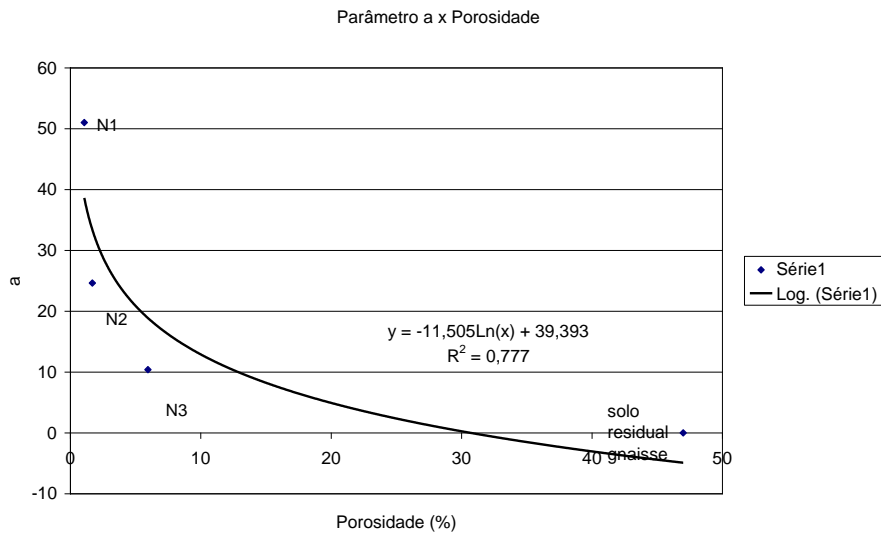


Gráfico 4.60 Parâmetro a x Porosidade com solo residual de gnaisse

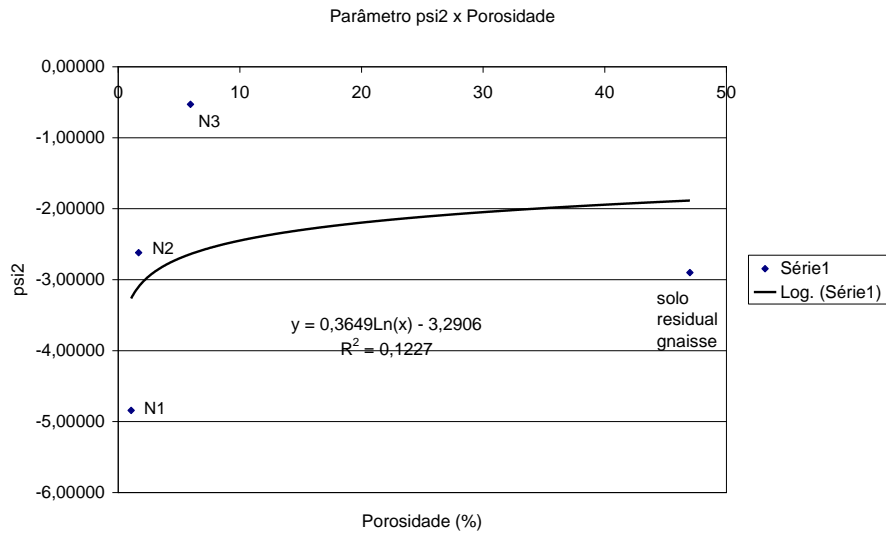


Gráfico 4.61 Parâmetro ψ_2 x Porosidade com solo residual de gnaisse

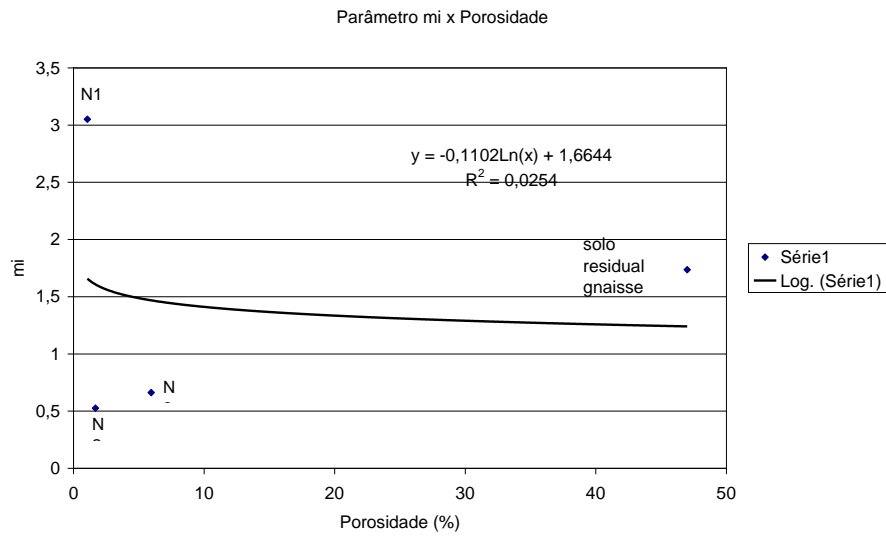


Gráfico 4.62 Parâmetro μ x Porosidade com solo residual de gnaisse

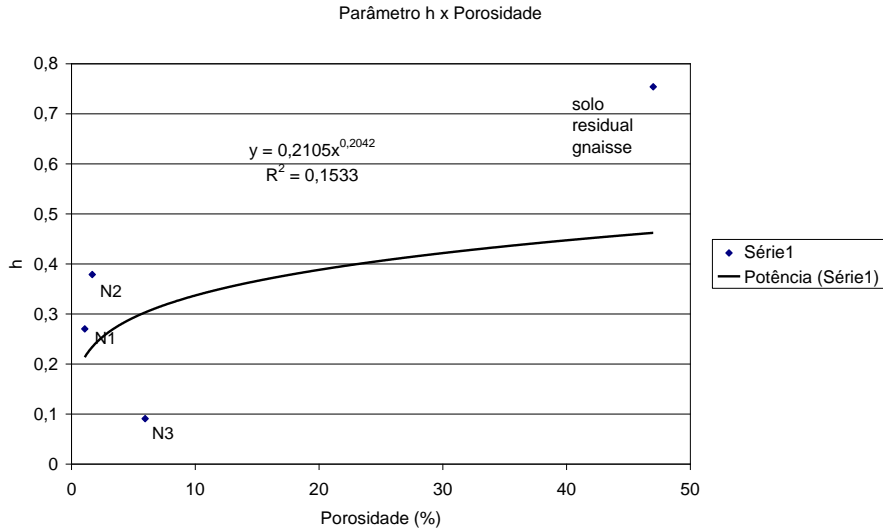


Gráfico 4.63 Parâmetro h x Porosidade com solo residual de gnaisse

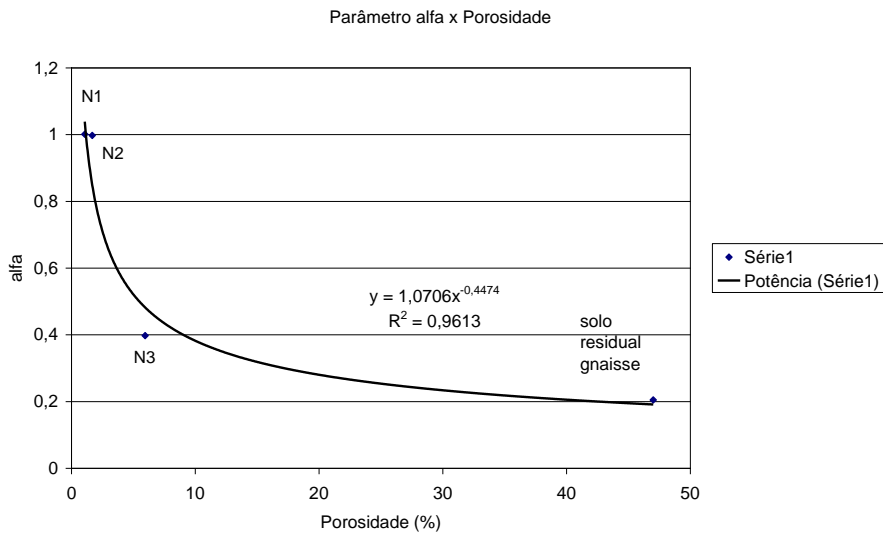


Gráfico 4.64 Parâmetro α x Porosidade com solo residual de gnaisse

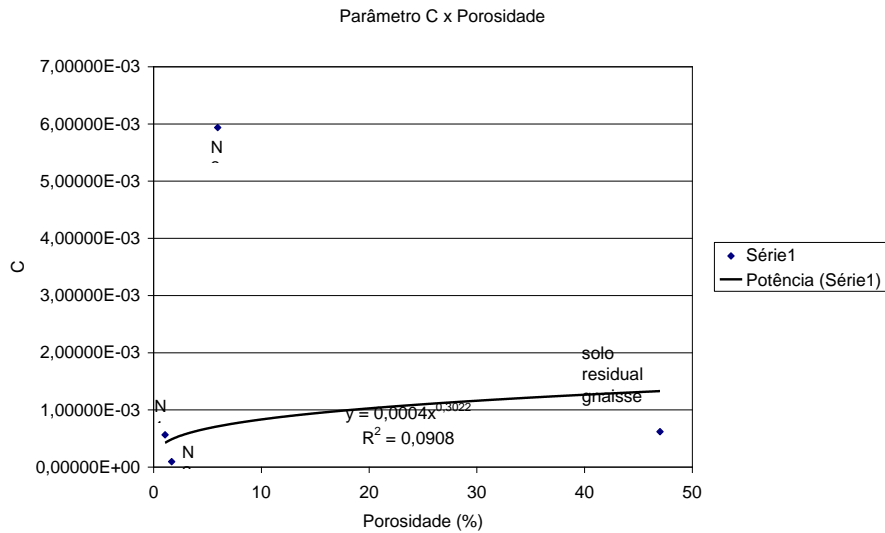


Gráfico 4.65 Parâmetro C x Porosidade com solo residual de gnaiss

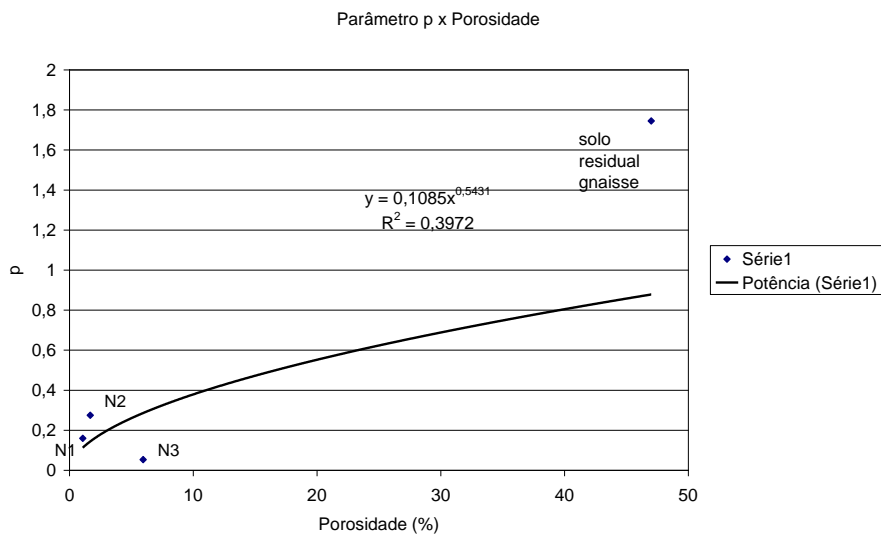


Gráfico 4.66 Parâmetro p x Porosidade com solo residual de gnaiss

Nos gráficos 4.67 a 4.78 foi utilizada como índice para o grau de intemperismo a relação entre a porosidade da rocha sã e da rocha alterada.

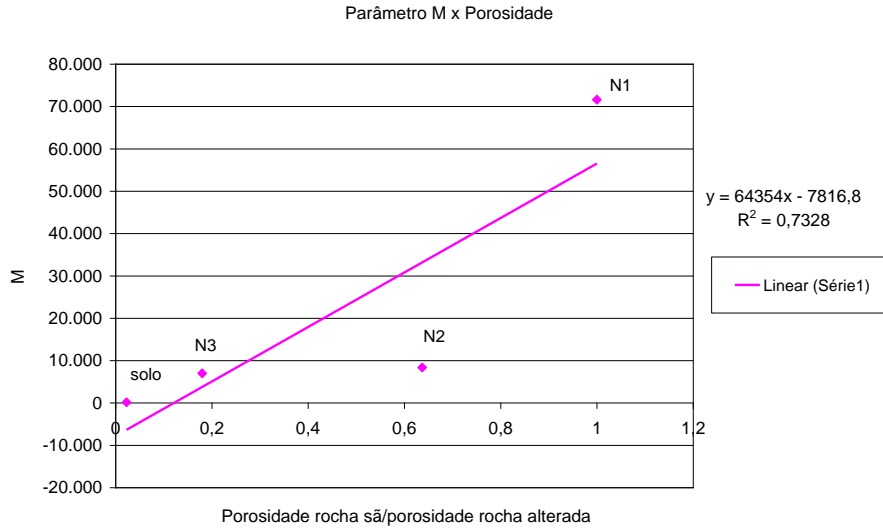


Gráfico 4.67 Parâmetro M x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

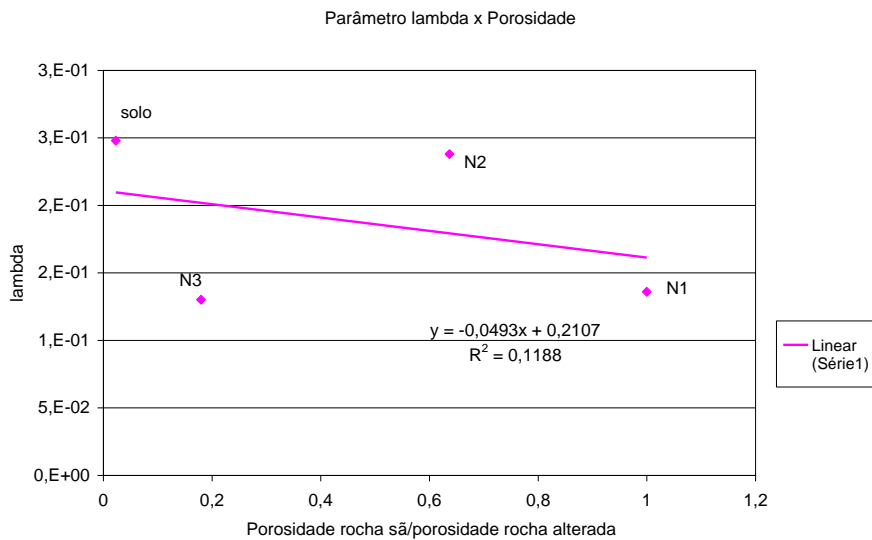


Gráfico 4.68 Parâmetro λ x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

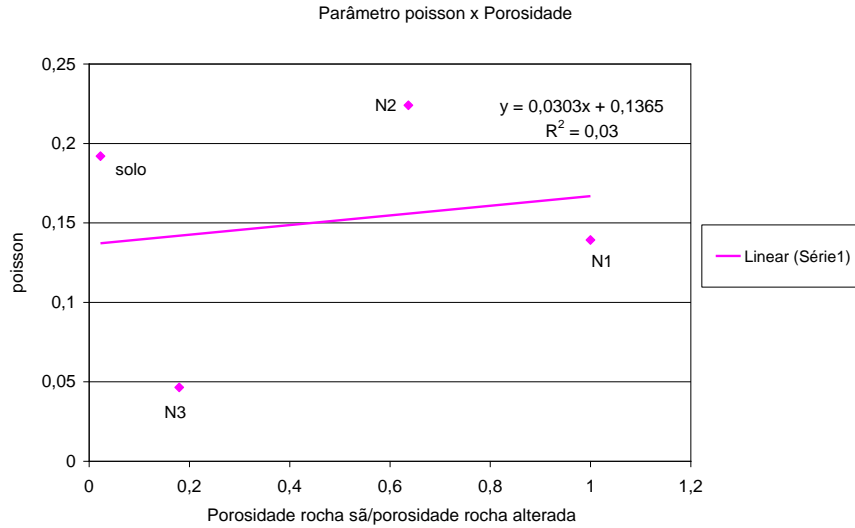


Gráfico 4.69 Parâmetro ν x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

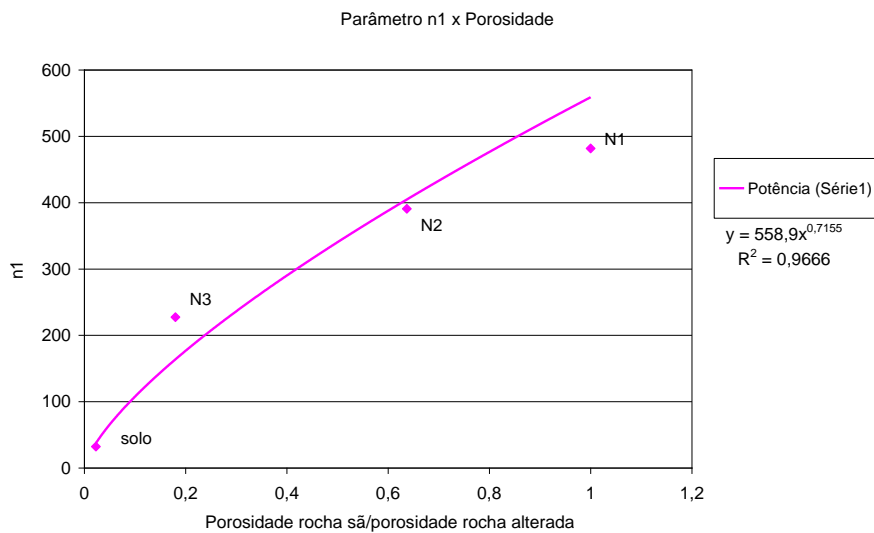


Gráfico 4.70 Parâmetro η_1 x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

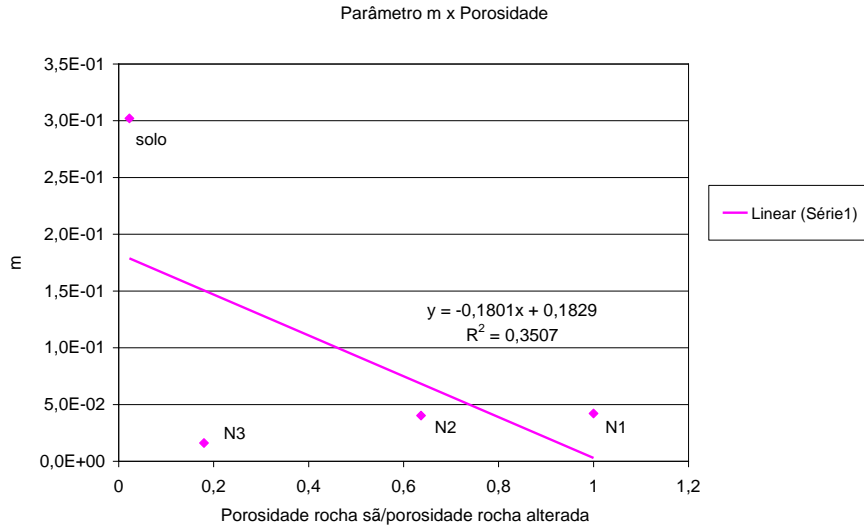


Gráfico 4.71 Parâmetro m x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

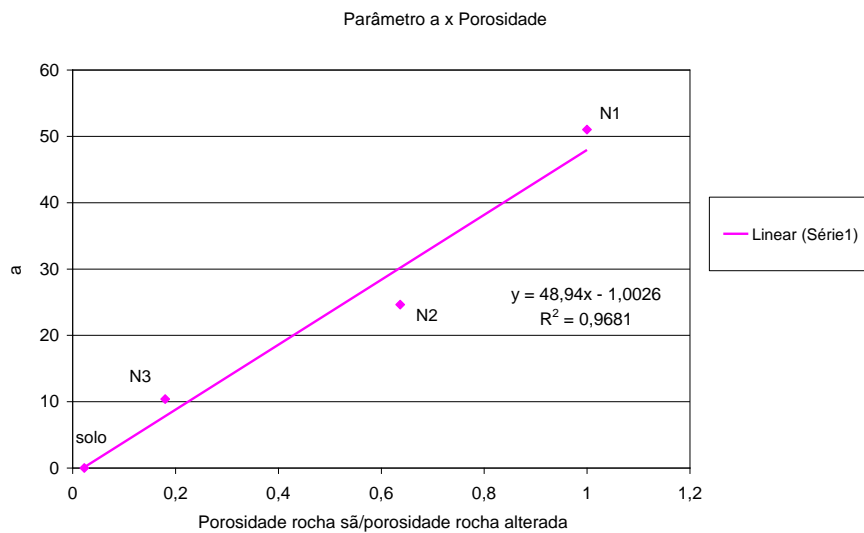


Gráfico 4.72 Parâmetro a x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

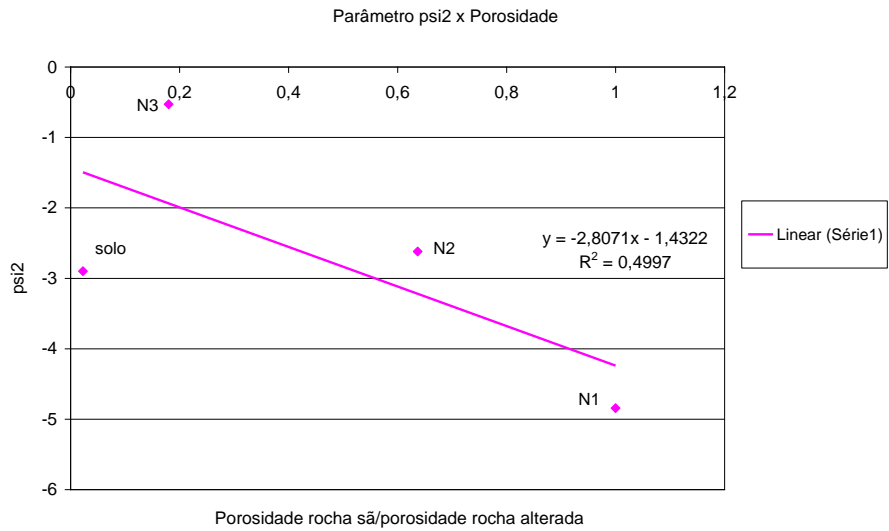


Gráfico 4.73 Parâmetro Ψ_2 x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

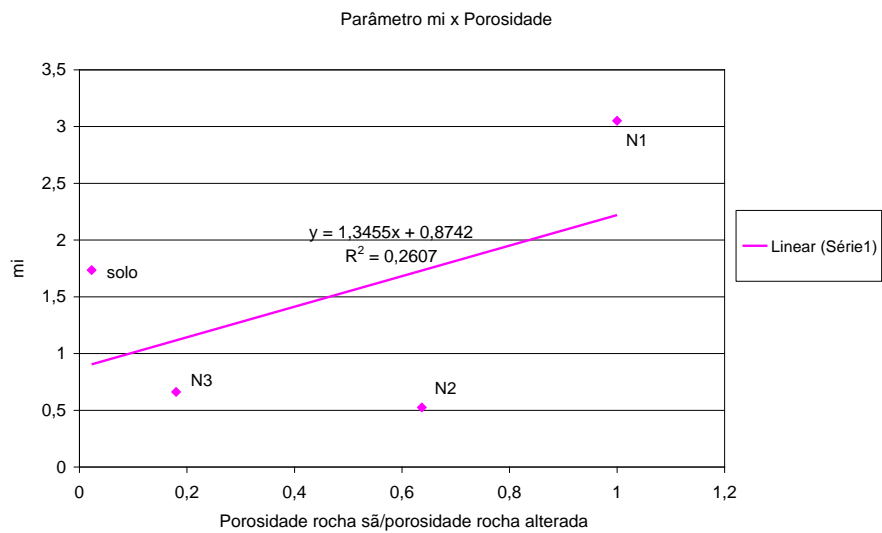


Gráfico 4.74 Parâmetro μ x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

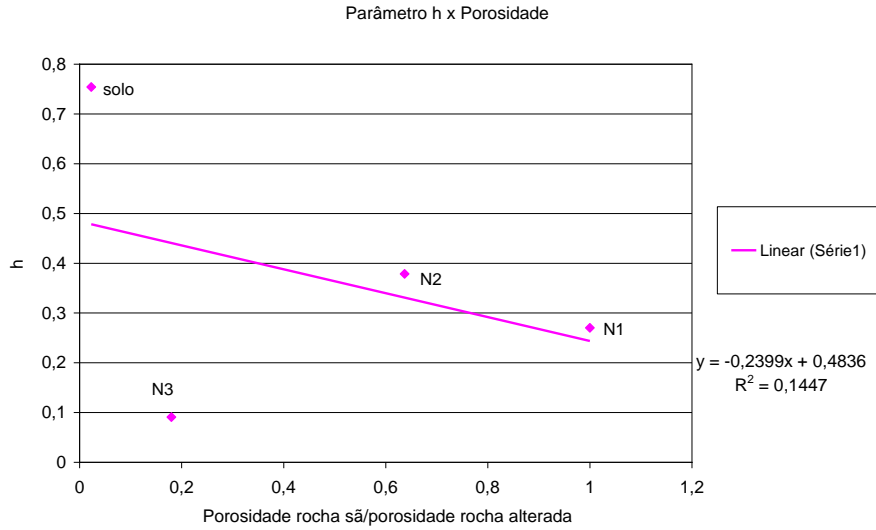


Gráfico 4.75 Parâmetro h x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

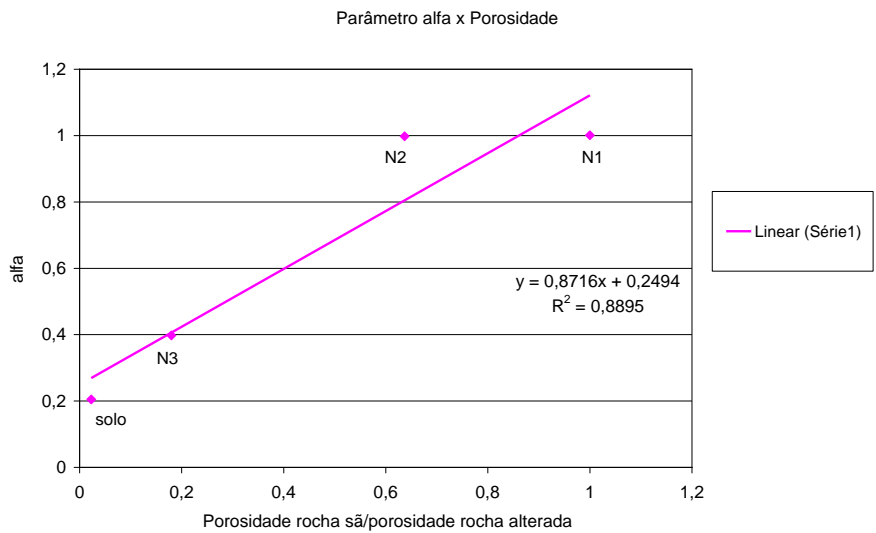


Gráfico 4.76 Parâmetro α x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

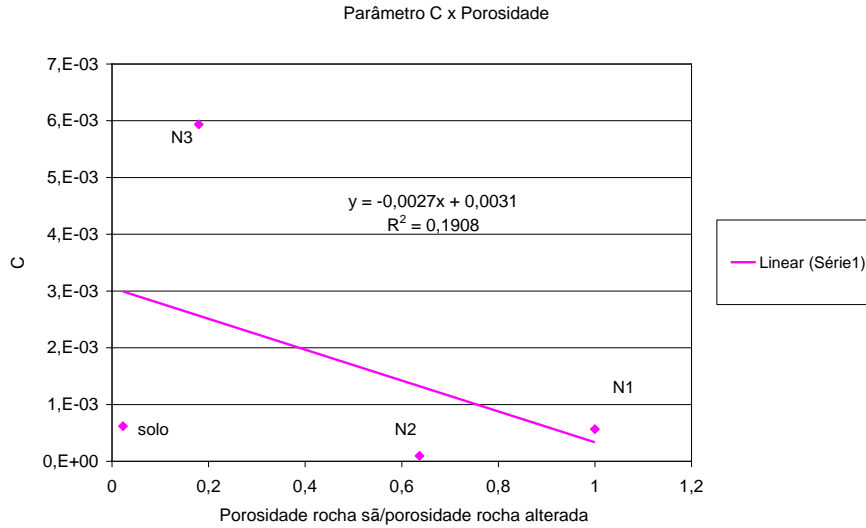


Gráfico 4.77 Parâmetro C x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

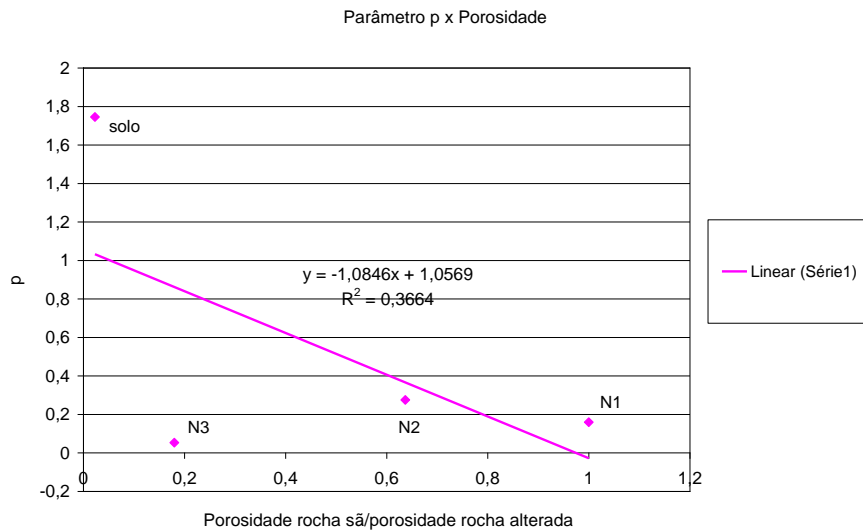


Gráfico 4.78 Parâmetro p x índice de intemperismo (porosidade rocha sã / porosidade rocha alterada).

Observa-se que alguns parâmetros com sentido físico como M, η_1 e a apresentam boas correlações com a inserção dos dados do solo residual de gnaiss, sugerindo uma evolução dos parâmetros.

Entretanto, o mesmo não ocorre para o parâmetro m, que controla a curvatura da superfície de ruptura, que tinha apresentado bom ajuste para os três níveis de alteração do

leptinito, mas que não segue a tendência para o solo residual. Os demais parâmetros também não apresentam bom ajuste, exceto pelo parâmetro α .

Os parâmetros de endurecimento C e p já não apresentavam boa correlação para o perfil, o que se repete com os dados de solo, o que pode ser explicado pela diferença de dos materiais em si, como coesão, contato entre grãos, etc.

A melhor explicação é que a calibração do modelo de Lade Kim leva a uma variabilidade considerável no conjunto de parâmetros possíveis com a inserção de ensaios, sendo necessários um maior número de ensaios para confirmar as conclusões. Ou seja, conjuntos diferentes de parâmetros são capazes de criar curvas numéricas adequadas e próximas das experimentais.

Por fim foram arbitrados valores de porosidades de 1,35%, 3,1%, 4,6% e 8% e obtidos os parâmetros de Lade e Kim calculados através das curvas obtidas nos ajustes dos gráficos 4.31, 4.33, 4.35, 4.37, 4.39, 4.41, 4.43, 4.45, 4.47, 4.49, 4.51, 4.53. Os valores calculados encontram-se na tabela 4.3. Em seguida foram calibradas curvas numéricas tensão deformação com estes conjuntos de parâmetros para as diferentes porosidades.

Parâmetros	Porosidade	Porosidade	Porosidade	Porosidade
	1,35%	3,1%	4,6%	8%
M	27.538	11.107	7.218	3.944
λ	0,17	0,15	0,15	0,14
v	0,17	0,09	0,06	0,04
η_1	433,0	301,5	253,9	199,5
m	0,040	0,025	0,019	0,014
a	36,1	17,5	12,4	7,6
Ψ_2	-3,80	-1,87	-0,95	0,34
μ	1,94	1,05	0,63	0,04
h	0,30	0,16	0,12	0,08
α	0,98	0,60	0,48	0,35
C	0,0003	0,0015	0,0030	0,0082
p	0,19	0,10	0,07	0,05

Tabela 4.3 Parâmetros de Lade Kim para porosidades arbitradas.

Os gráficos 4.79 e 4.80 mostram as curvas numéricas tensão x deformação e deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas, plotadas conjuntamente com as curvas experimentais para o leptinito. As porosidades foram arbitradas de modo a ter um valor de porosidade no intervalo entre os níveis 1 e 2 do leptinito, 2 valores entre os níveis 2 e 3, e 1 valor acima do nível 3. Os gráficos 4.82 a 4.88 mostram as curvas para porosidades de 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%, enquanto os gráficos 4.89 a 4.96 mostram as curvas para 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

Observa-se que:

- Para todas as tensões confinantes, nos gráficos tensão desviadora x deformação axial a curva de porosidade de 1,35% não interpola com as curvas de 1,07% e 1,68%.
- As curvas de 3,1% e 4,6% de porosidade interpolam bem com as curvas de 1,68% e 5,95% sugerindo que é possível prever o comportamento tensão x deformação de um gnaisse para porosidades neste intervalo, exceto para o caso uniaxial.
- As curvas de 5,95% e 8% de porosidade aproximam-se bastante para casos uniaxiais, 2MPa e 5MPa de tensão confinante.
- As curvas volumétricas não apresentaram boa interpolação para nenhum nível de tensão.
- Para a porosidade de 4,6%, a curva tensão x deformação mostra um comportamento intermediário entre os níveis 2 e 3 de alteração do leptinito, entretanto as curvas volumétricas sugerem uma aproximação maior com o nível 2.

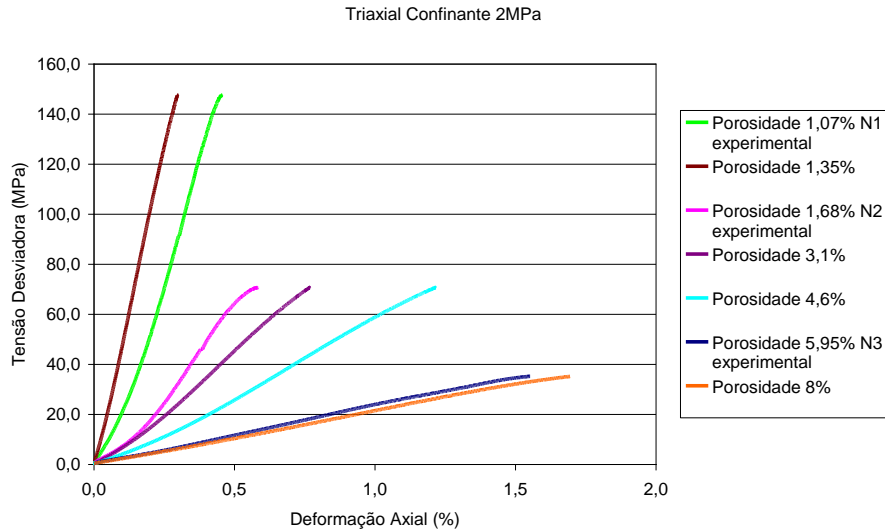


Gráfico 4.79 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa.

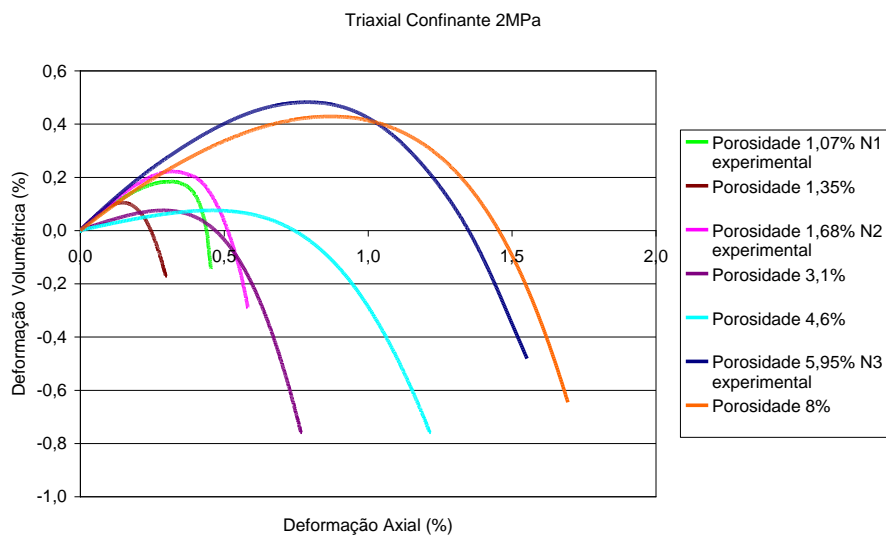


Gráfico 4.80 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa.

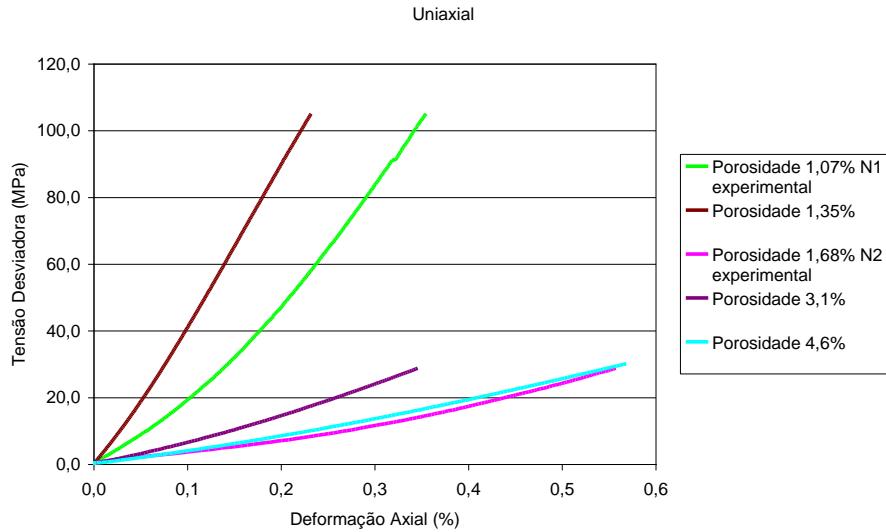


Gráfico 4.81 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito - uniaxial. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

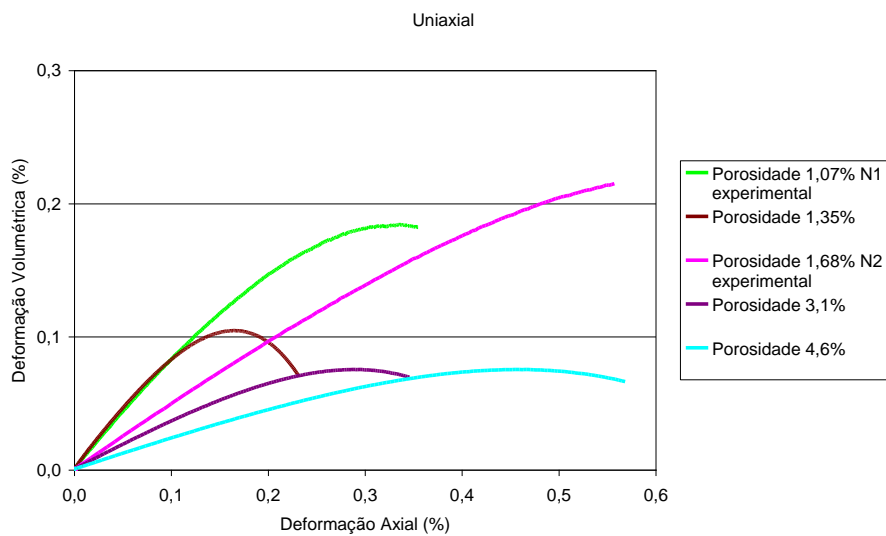


Gráfico 4.82 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito - uniaxial. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

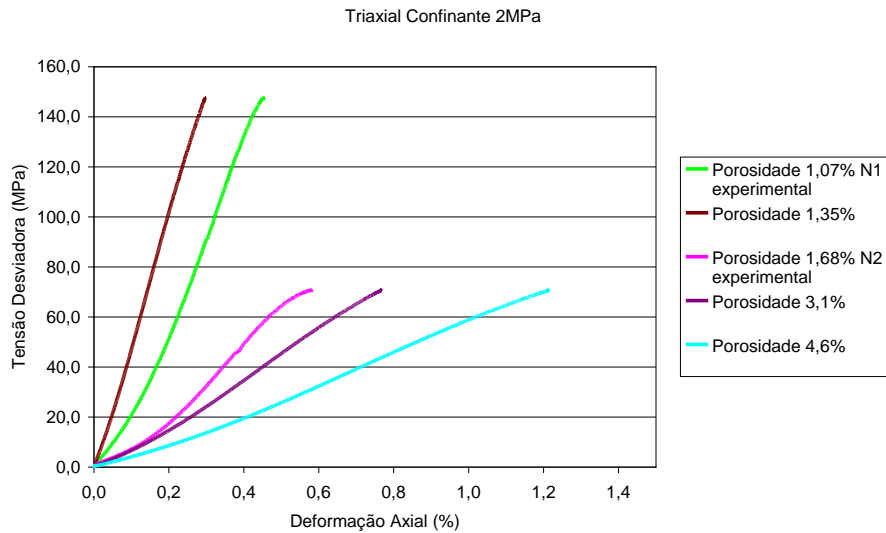


Gráfico 4.83 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

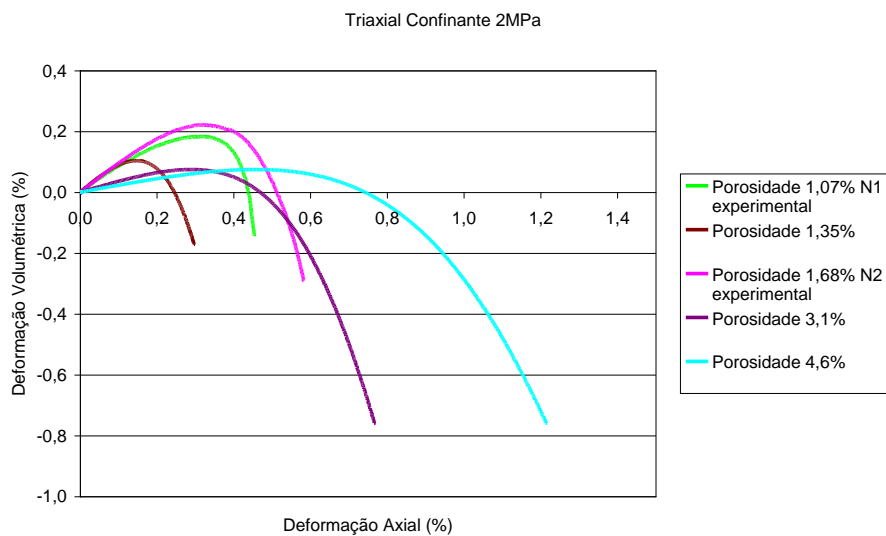


Gráfico 4.84 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

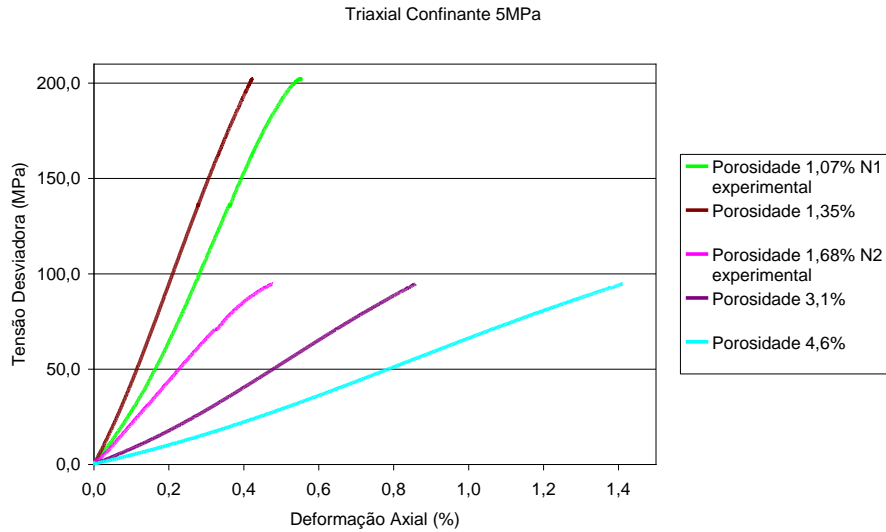


Gráfico 4.85 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

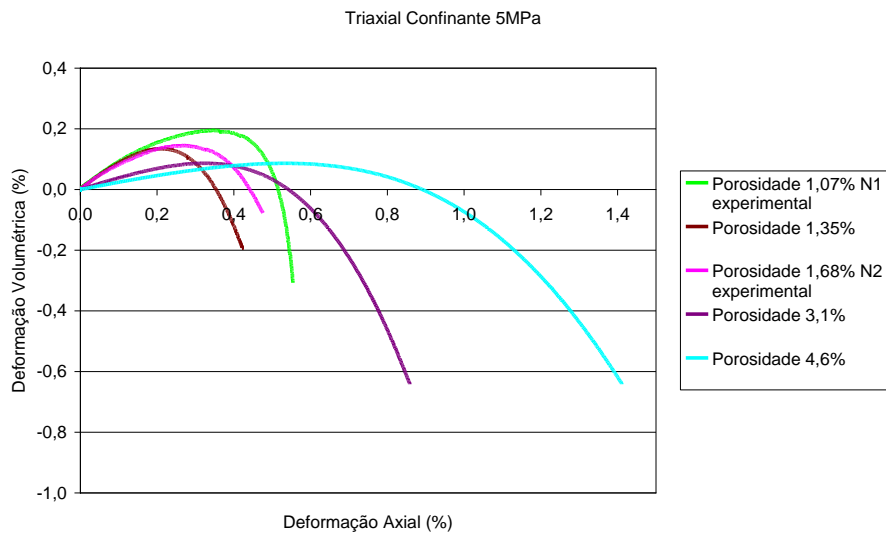


Gráfico 4.86 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

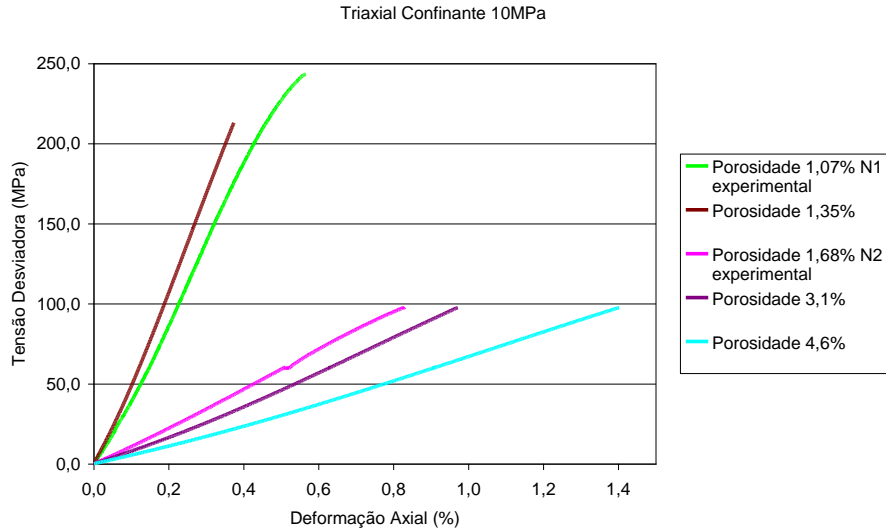


Gráfico 4.87 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

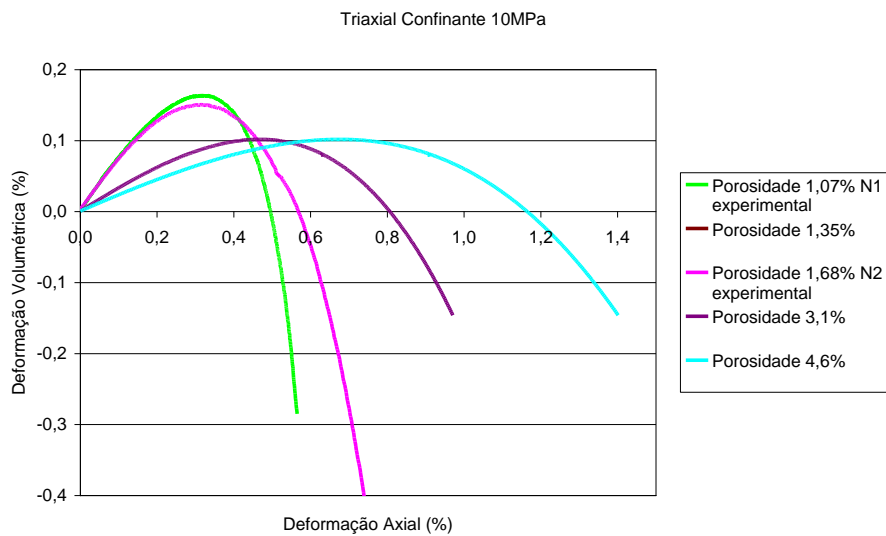


Gráfico 4.88 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,07%, 1,35%, 1,68%, 3,1% e 4,6%.

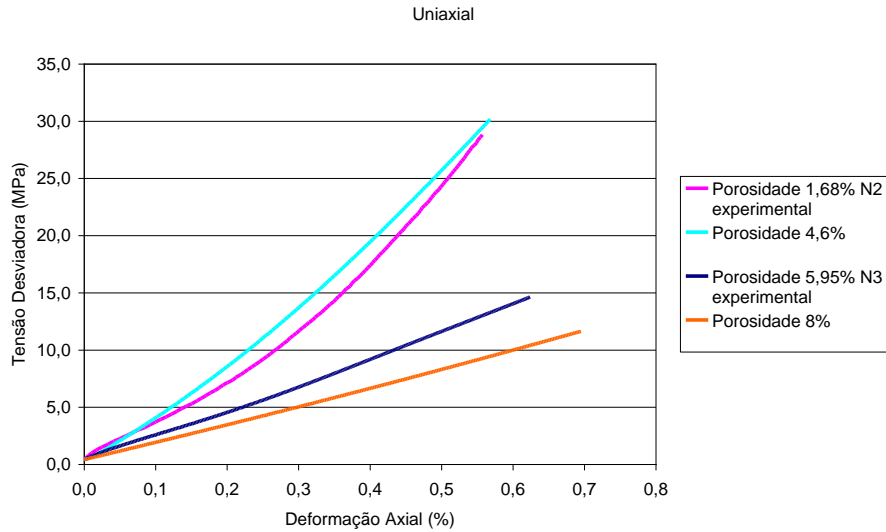


Gráfico 4.89 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito - uniaxial. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

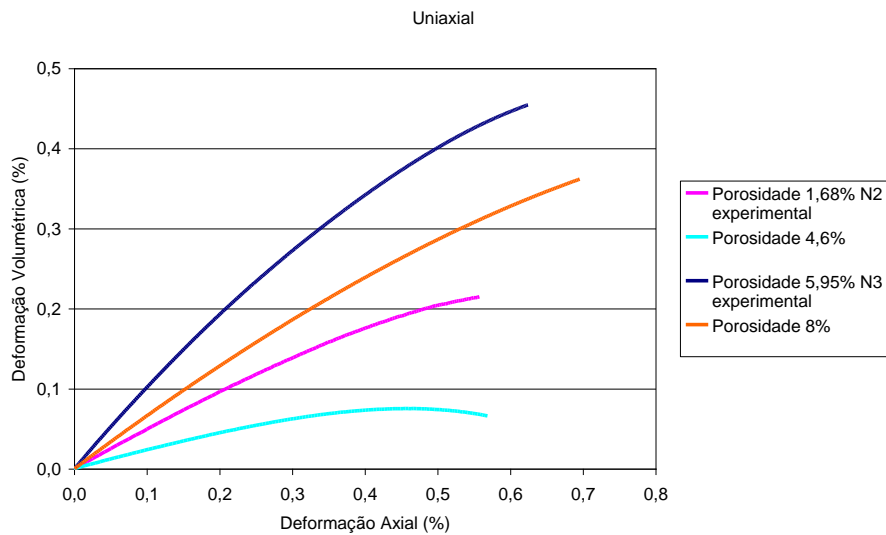


Gráfico 4.90 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito - uniaxial. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

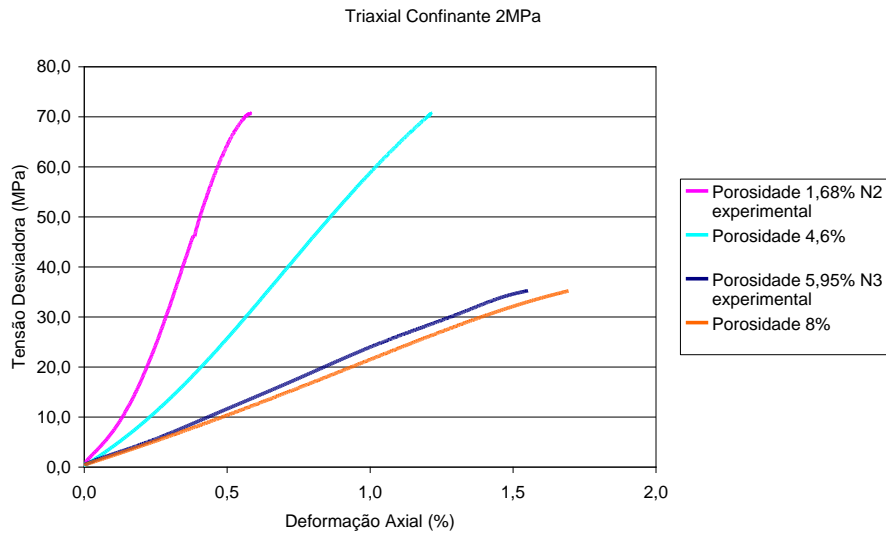


Gráfico 4.91 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

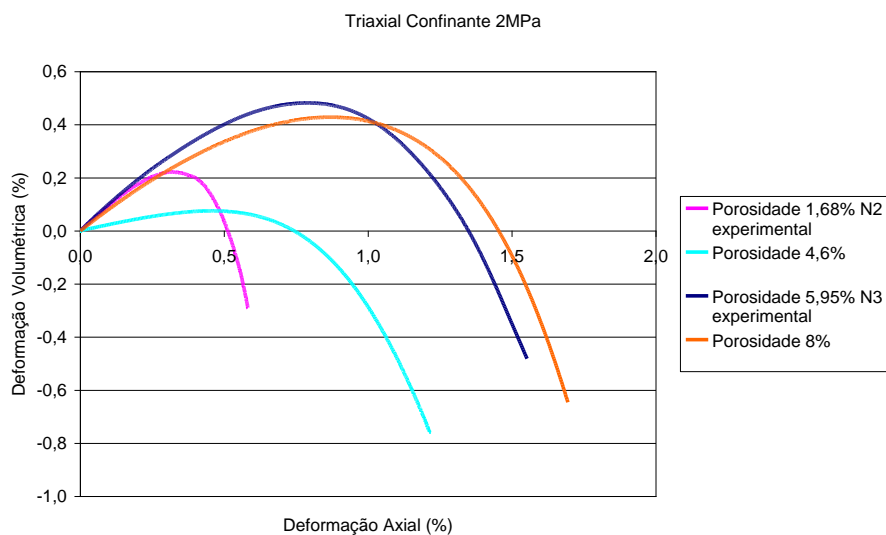


Gráfico 4.92 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 2MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

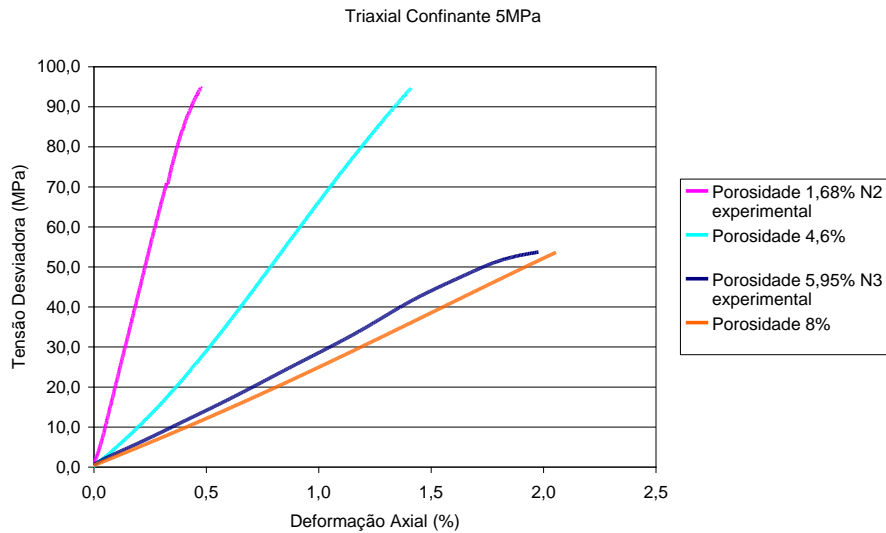


Gráfico 4.93 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

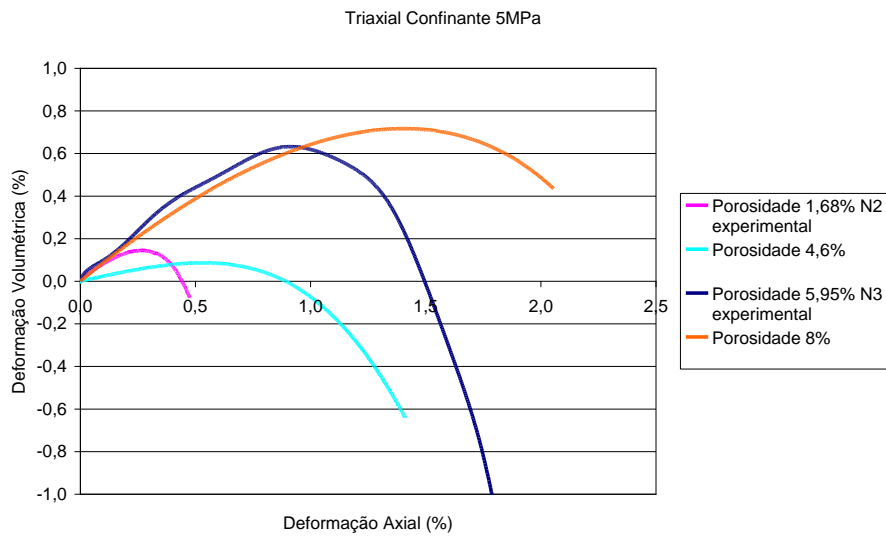


Gráfico 4.94 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 5MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

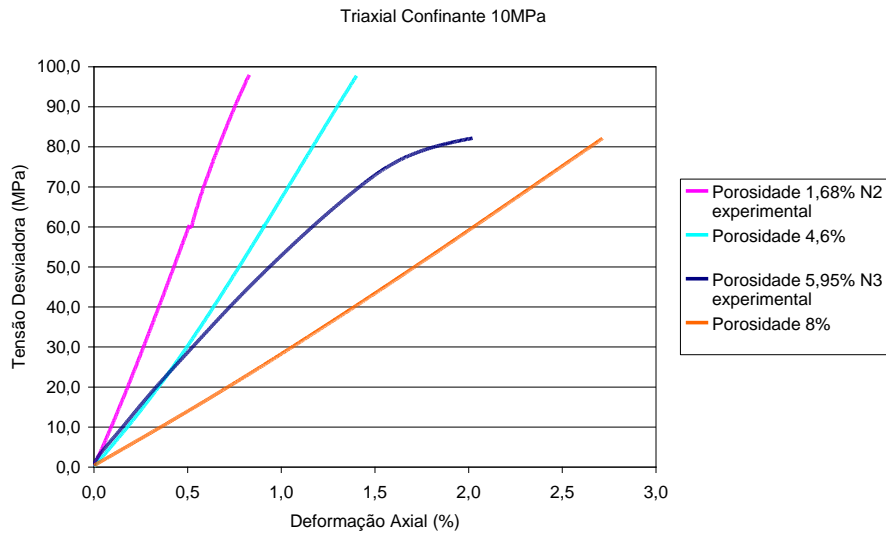


Gráfico 4.95 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

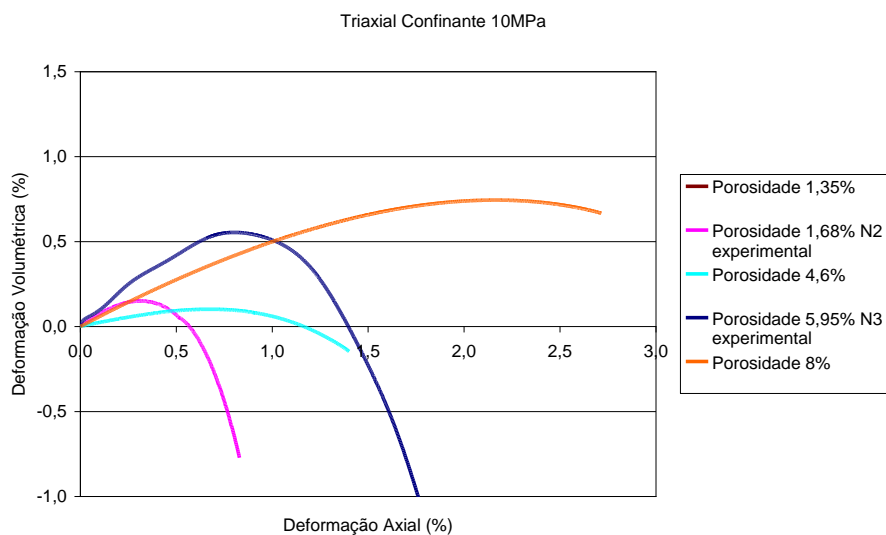


Gráfico 4.96 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidades arbitradas e curvas experimentais para o leptinito – tensão confinante 10MPa. Porosidades 1,68%, 4,6%, 5,95% e 8%.

Os gráficos 4.97 a 4.104 mostram as curvas numéricas tensão x deformação e volumétricas para cada porosidade arbitrada, plotadas conjuntamente com as curvas experimentais para o leptinito. As curvas experimentais são aquelas relativas ao nível de alteração cujo comportamento é o mais aproximado da porosidade arbitrada em questão.

Observa-se que:

- As curvas tensão x deformação para a porosidade de 1,35% para todos os níveis de tensão confinante apresentam deformações menores que as curvas experimentais para a porosidade de 1,07%, o que não é o comportamento esperado. Esta diferença diminui com o aumento da tensão confinante. O mesmo ocorre com as curvas volumétricas.
- Exceto para as curvas numéricas uniaxiais (que coincidem com as curvas de 2MPa de tensão confinante), as deformações obtidas para a porosidade de 3,1% são maiores que as deformações experimentais para o nível 2 (porosidade 1,68%), conforme esperado, entretanto o mesmo não ocorre para as curvas volumétricas.
- Para a porosidade de 4,6%, as deformações calculadas são maiores que para o nível 2, conforme esperado, sendo a maior diferença para 5MPa de tensão confinante. As curvas volumétricas apresentam comportamento bastante distinto para as porosidades em todos os níveis de tensão.
- As deformações calculadas para a porosidade de 8% são pouco maiores que as experimentais para o nível 3, sendo a maior diferença para a tensão confinante de 10MPa. O mesmo ocorre para as curvas volumétricas, exceto para 2MPa de tensão confinante.

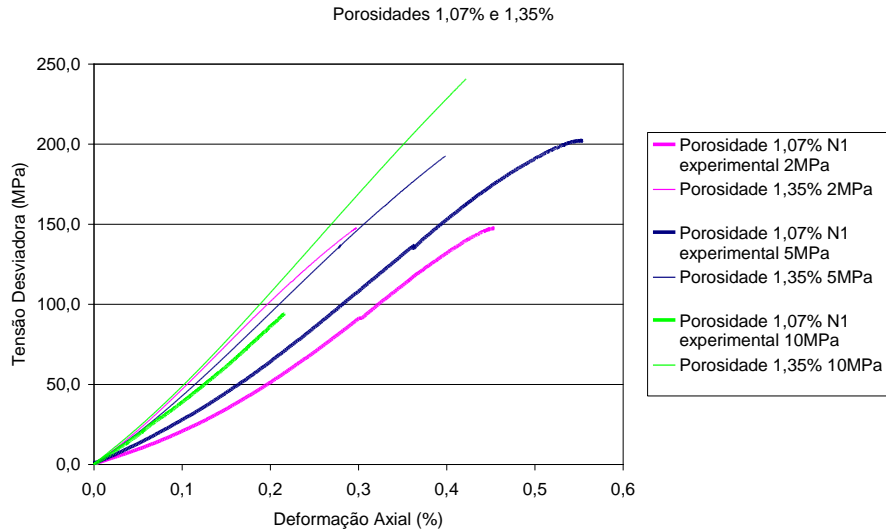


Gráfico 4.97 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 1,35% e curvas experimentais do nível 1, porosidade 1,07%.

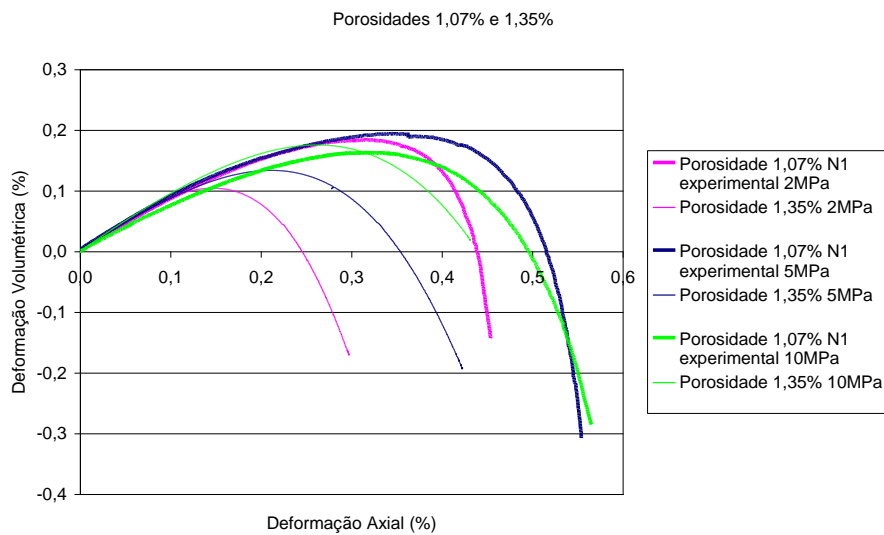


Gráfico 4.98 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 1,35% e curvas experimentais do nível 1, porosidade 1,07%.

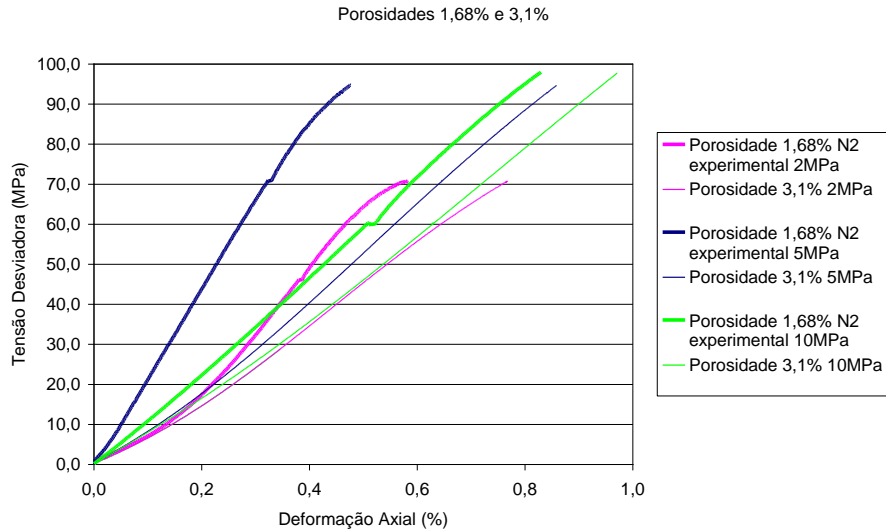


Gráfico 4.99 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 3,1% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.

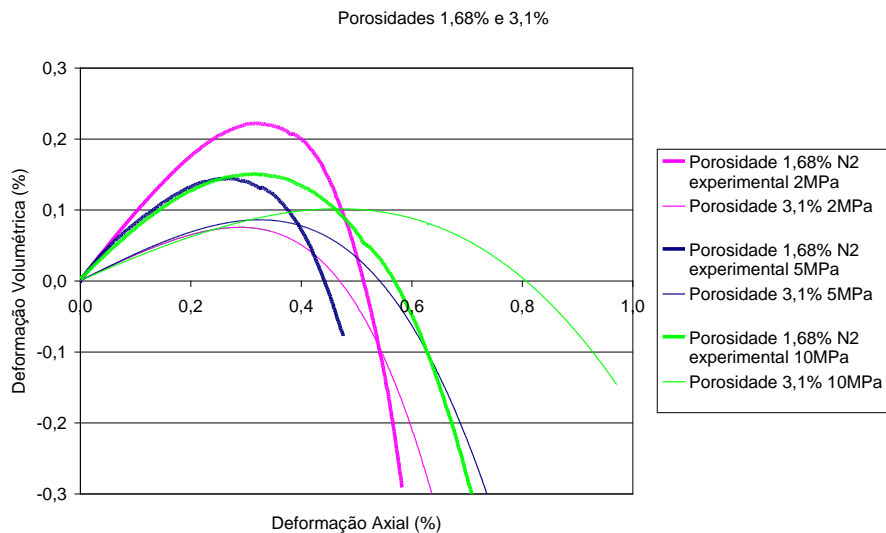


Gráfico 4.100 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 3,1% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.

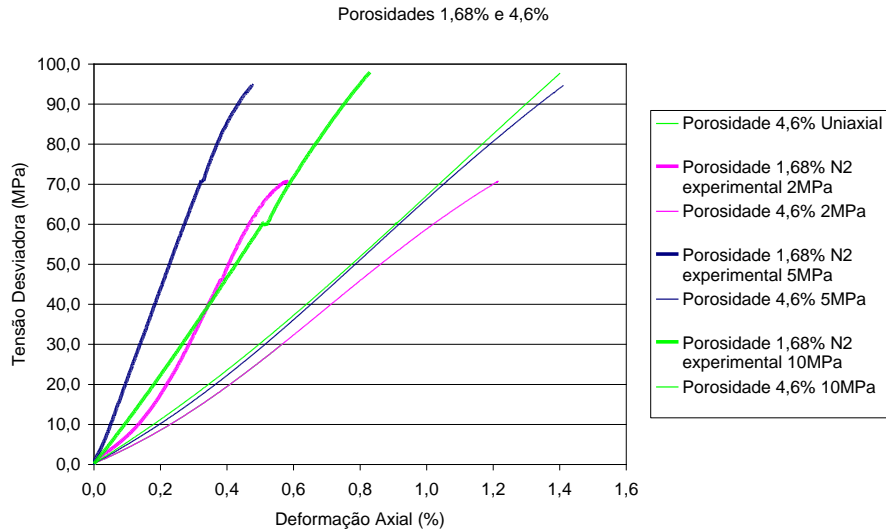


Gráfico 4.101 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 4,6% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.

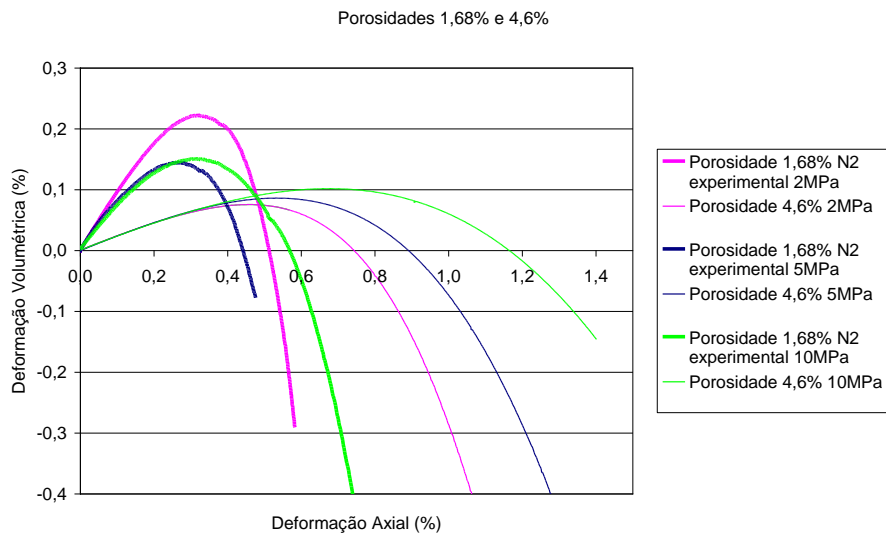


Gráfico 4.102 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 4,6% e curvas experimentais do nível 2, porosidade 1,68%.

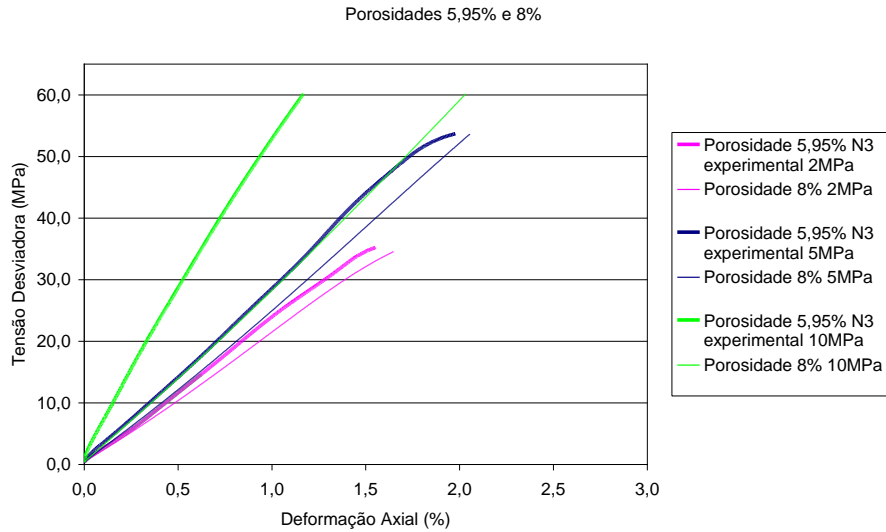


Gráfico 4.103 Curvas numéricas tensão x deformação axial para porosidade de 8% e curvas experimentais do nível 3, porosidade 5,95%.

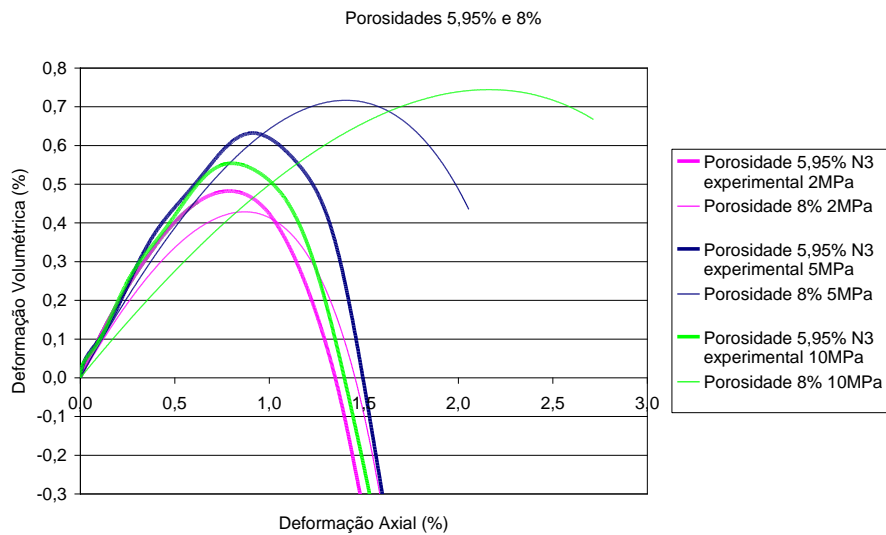


Gráfico 4.104 Curvas numéricas deformação axial x deformação volumétrica para porosidade de 8% e curvas experimentais do nível 3, porosidade 5,95%.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Em relação á comparação entre propriedades de resistência e deformabilidade entre níveis de intemperismo observou-se que:

- Para todos os ensaios realizados há uma queda maior de resistência do nível 1 para o nível 2 que do nível 3 para o nível 3, apesar do nível 2 macroscopicamente não apresentar-se tão intemperizado. Ou seja, o material intemperizado nível 2 apresenta comportamento de resistência e deformabilidade maio mais parecido com o nível muito mais degradado que com o nível são. Uma explicação seria o microfraturamento mineral e a perda de contato entre os grãos.

A calibração do modelo de Lade Kim indica que:

- Comparações visuais entre dados medidos e calculados indicam que o Modelo de Lade Kim ajusta bem o Leptinito do D. Marta em seus três níveis de alteração.

Quanto ao modelo de Lade Kim atuar como um modelo evolutivo, ou seja, que seus parâmetros relacionem-se com o nível de intemperismo observou-se que:

- Alguns dos parâmetros do modelo de Lade Kim, especialmente alguns com sentido físico, como M , η_1 e a apresentam uma relação evolutiva razoável, entre o perfil de intemperismo de Leptinito e o solo residual de gnaise, sugerindo que o modelo de Lade Kim possa representar a variação dos materiais com o intemperismo, muito embora o ajuste da maior parte dos parâmetros não forneça esta indicação. Deste modo são necessários ensaios adicionais para confirmar esta conclusão.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar mais ensaios para o perfil de intemperismo de Leptinito e para solo residual de gnaiss para confirmar as conclusões, que podem estar afetadas pela pouca densidade de pontos.
- Caso o modelo de Lade e Kim apresente-se de fato como um modelo evolutivo, sugere-se inserir a porosidade como mais um parâmetro do modelo, de modo a considerar o intemperismo.
- Verificar se perfis de intemperismo de diferentes tipos de rochas apresentam o mesmo comportamento.
- Realizar ensaios em outras trajetórias de tensões, por exemplo, trajetórias de descarregamento.
- Realizar ensaios de permeabilidade para verificar outras variações de propriedades e características entre os níveis de alteração.
- Identificar se outros modelos numéricos (por exemplo os apresentados por Nova, 2003 e Gutierrez, 2010) são melhores para representar o comportamento das rochas em diferentes níveis de alteração.

ANEXO

Códigos Mat Lab para cálculo dos parâmetros de Lade e Kim e para a obtenção das curvas numéricas no método direto.

Programa Mat Lab – Critério de Ruptura – N1, N2 e N3

N1	N2	N3
<pre> pa=0.1; a=58.10 sd=[104.7 150 202 242]; s2=[0 2 5 10]; s3=[0 2 5 10]; for i=1:4 s1(i)=sd(i)+s3(i); s1a(i)=s1(i)+pa*a; s2a(i)=s2(i)+pa*a; s3a(i)=s3(i)+pa*a; I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i); I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i); x(i)=pa/I1(i); y(i)=((I1(i))^3/I3(i))-27; xl(i)=log10(x(i)); yl(i)=log10(y(i)); end </pre>	<pre> pa=0.1; a=22.0 sd=[28.2 73 95 123]; s2=[0 2 5 10]; s3=[0 2 5 10]; for i=1:4 s1(i)=sd(i)+s3(i); s1a(i)=s1(i)+pa*a; s2a(i)=s2(i)+pa*a; s3a(i)=s3(i)+pa*a; I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i); I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i); x(i)=pa/I1(i); y(i)=((I1(i))^3/I3(i))-27; xl(i)=log10(x(i)); yl(i)=log10(y(i)); end </pre>	<pre> pa=0.1; a=10.7 sd=[13.9 42.9 53 82]; s2=[0 2 5 10]; s3=[0 2 5 10]; for i=1:4 s1(i)=sd(i)+s3(i); s1a(i)=s1(i)+pa*a; s2a(i)=s2(i)+pa*a; s3a(i)=s3(i)+pa*a; I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i); I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i); x(i)=pa/I1(i); y(i)=((I1(i))^3/I3(i))-27; xl(i)=log10(x(i)); yl(i)=log10(y(i)); end </pre>

Programa Mat Lab – Deformações Elásticas – N1, 2MPa

Para os ensaios uniaxiais 5 e 10MPa foi utilizado o mesmo programa, alterando-se apenas os valores das variáveis s2 e s3 para 0, 5 e 10 e os arquivos .txt de leitura de dados. Para os demais níveis foi utilizado o mesmo programa fazendo-se as devidas alterações de parâmetros.

```

pa=0.1;
a=58.1;
v=0.14;
R= 6*(1+v)/(1-2*v);
file = 'N1 2MPa Parelast.txt'
base = load(file);
eax=base(:,1)
sd=base(:,2)
s2=2;
s3=2;
for i=1:52

```

```

s1(i)=sd(i)+s3;
s1a(i)=s1(i)+pa*a;
s2a(i)=s2+pa*a;
s3a(i)=s3+pa*a;
I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i);
I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i);
J2(i)=(1/6*((s1a(i)-s2a(i))^2)+((s2a(i)-s3a(i))^2)+((s3a(i)-s1a(i))^2));
E(i)=(s1a(i)-s1a(i-1))/(eax(i)-eax(i-1)/100);
x(i)=((I1(i)/pa)^2)+R*(J2(i)/pa^2);
y(i)= E(i)/pa;
xl(i)=log10(x(i));
yl(i)=log10(y(i));
end

```

Programa Mat Lab – Potencial Plástico – N1, 2MPa

```

pa=0.1;
a=58.1;
v=0.14;
m=0.16;
psi1=0.00155*m^(-1.27);
M=72443;
lambda=0.136;
R=9.5;
file = 'N1 2MPa PotPlast.txt';
base = load(file);
eax=base(:,1);
elat=base(:,2);
evol=base(:,3);
sd=base(:,4);
s2=2;
s3=2;
for i=2:67
s1(i)=sd(i)+s3;
s1a(i)=s1(i)+pa*a;
s2a(i)=s2+pa*a;
s3a(i)=s3+pa*a;
I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i);
I2(i)=-1*(s1a(i)*s2a(i)+s2a(i)*s3a(i)+s3a(i)*s1a(i));
I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i);
J2(i)=(1/6*((s1a(i)-s2a(i))^2)+((s2a(i)-s3a(i))^2)+((s3a(i)-s1a(i))^2));
E(i)=M*pa*((I1(i)/pa)^2)+(R*J2(i)/pa^2)^lambda;
de1e(i)=(s1a(i)-s1a(i-1))/E(i);
de3e(i)=-v*de1e(i);
de1p(i)=(eax(i)-eax(i-1))/100-de1e(i);
de3p(i)=(elat(i)-elat(i-1))/100-de3e(i);
vp(i)=-1*(de3p(i)/de1p(i));
epsx(i)=(1/1+vp(i))*((I1(i)^3/I2(i)^2)*(s1(i)+s3(i)+2*vp(i)*s3(i))+psi1*(I1(i)^4/I3(i)^2)*(s1(i)*s3(i)+vp(i)*s3(i)^2))-
3*psi1*(I1(i)^3/I3(i))+2*(I1(i)^2/I2(i));
epsy(i)=psi1*(I1(i)^3/I3(i))-(I1(i)^2/I2(i));
end;

```

Programa Mat Lab – Lei de Endurecimento – N1

```
pa=0.1;
a=58.1;
v=0.14;
R=9.5;
M=72443;
lambda=0.136;
file = 'N1Hidro.txt'
base = load(file);
evol=base(:,1)
s=base(:,2)
for i=2:43
sa(i)=s+a*pa;
I1(i)=3*sa(i);
E(i)=M*pa*((I1(i)/pa)^2)^lambda;
eve(i)=(eve(i-1)+(sa(i)-sa(i-1)))/(E(i)/3*(1-2*v))
evp(i)=(evol/100)-eve(i);
Wp(i)=((s1(i-1)+s1(i))/2)*evp(i);
x(i)=I1(i)/pa;
y(i)=Wp(i)/pa;
end
```

Programa Mat Lab – Função de Plastificação – Cálculo do trabalho plástico – N1

2MPa.

```
pa=0.1;
a=58.1;
v=0.14;
R=9.5;
M=72443;
C=0.038
p=0.416
lambda=0.136;
file = 'N12MPa.txt'
base = load(file);
eax=base(:,1)
elat=base(:,2)
evol=base(:,3)
sd=base(:,4)
s2=2;
s3=2;
for i=2:43
s1(i)=sd(i)+s3;
s1a(i)=s1(i)+pa*a;
s2a(i)=s2+pa*a;
s3a(i)=s3+pa*a;
I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i);
I2(i)=-1*(s1a(i)*s2a(i)+s2a(i)*s3a(i)+s3a(i)*s1a(i));
```



```

I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i);
J2(i)=(1/6*((s1a(i)-s2a(i))^2)+((s2a(i)-s3a(i))^2)+((s3a(i)-s1a(i))^2));
E(i)=M*pa*((I1(i)/pa)^2)+(R*J2(i)/pa^2)^lambda;
de1e(i)=(s1a(i)-s1a(i-1))/E(i);
de3e(i)=-v*de1e(i);
de1p(i)=(eax(i)-eax(i-1))/100-de1e(i);
de3p(i)=(elat(i)-elat(i-1))/100-de3e(i);
Wp(1)=C*pa*(I1(1)/pa)^p;
Wp(i)=Wp(i-1)+(((s1a(i-1)+s1a(i))/2)*de1p(i)+2*s3a(i)*de3p(i));
end

```

Programa Mat Lab – Função de Plastificação – Cálculo de h – N1

Para os demais níveis (N2 e N3) foi utilizado o mesmo programa fazendo-se as devidas alterações de parâmetros.

```

pa=0.1;
a=58.1;
C=0.0038;
p=0.416;
m=0.16;
psi1=0.00155*m^(-1.27);
sd=[104.7 149.7 202.1 244.7];
s2=[0 2 5 10];
s3=[0 2 5 10];
Wp=[0.457 0.94 0.166 0.225];
e=2.718;
for i=1:4
s1(i)=sd(i)+s3;
s1a(i)=s1(i)+pa*a;
s2a(i)=s2+pa*a;
s3a(i)=s3+pa*a;
I1(i)=s1a(i)+s2a(i)+s3a(i);
I2(i)=-1*(s1a(i)*s2a(i)+s2a(i)*s3a(i)+s3a(i)*s1a(i));
I3(i)=s1a(i)*s2a(i)*s3a(i);
I1a(i)=pa*(Wp(i)/C*pa)^(1/p);
H(i)=log10(((psi1*(I1(i)^3/I3(i))-(I1(i)^2/I2(i))*e)/(27*psi1+3))/log10(I1a(i)/I1(i)));
end
h=mean(H);
end

```

Programa Mat Lab – Função de Plastificação – Cálculo de S e q – N1 2MPa

```

pa=0.1;
a=58.1;
m=0.16
C=0.038
p=0.416

```

```

psi1=0.00155.m^(-1.27);
h=1.919;
ro=p/h;
D=C/(27*psi1+3)^ro;
alfa=1;
file = 'WplastN12MPa.txt'
base = load(file);
Wp=base(:,1)
I1=base(:,2)
I2=base(:,3)
I3=base(:,4)
for i=2:43
q1(i)=log((Wp(i)/(D*pa))^1/ro)/(psi1*(I1(i)^3/I3(i))-I1(i)^2/I2(i))*(I1(i)/pa)^h);
S1(i)=(1/n1)*((I1(i)^3/I3(i))-27)*(I1(i)/pa)^m;
q2(i)=alfa*S1(i)/(1-(1-alfa)*S1(i));
Wp2(i)=C*pa*(((psi1*I1(i)^3/I3(i))-I1(i)^2/I2(i))*((I1(i)/pa)^h)*EXP(q2(i)))/(27*psi1+3)^ro
End

```

Programa Mat Lab – Curvas Numéricas – N1 ($\sigma_3 = 2\text{MPa}$)

Para os ensaios uniaxiais, 5 e 10MPa foi utilizado o mesmo programa, alterando-se apenas os valores da variável sc e o máximo de tensão atingida, para alcançar a amplitude de tensões necessárias em cada nível de tensão confinante e cada nível de alteração . Para os demais níveis (N2 e N3) foi utilizado o mesmo programa fazendo-se as devidas alterações de parâmetros.

```

clear all;
clc;
type = 0;
sc = 2; % MPa
ds1 = 0.1;
ds3 = 0.1;
ds2 = 0.1;
npmax = 3000;
pa = 0.1; % MPa
% ruptura
a = 58.1;
m = 0.16;
n1 = 1585;
% elasticos
poiss = 0.14;
M = 72443;
lbd = 0.136;
% potencial plastico
mu = 5.59;
psi2 = -4.57;
% funcao de escoamento

```

```

C = 0.038;
p = 0.416;
h = 1.919;
alpha = 1.0;
psi1 = 0.00155*m^(-1.27);
rho = p/h;
D = C/((27*psi1 + 3)^rho);
s1b = sc + a*pa;
s3b = sc + a*pa;
s2b = s3b;
I1 = s1b + s2b + s3b;
I2 = -(s1b*s2b + s2b*s3b + s3b*s1b);
I3 = s1b*s2b*s3b;
S = ((I1^3/I3 - 27)*(I1/pa)^m)/n1;
q = (alpha*S)/(1 - (1 - alpha)*S);
Wp = C*pa*(I1/pa)^p; % hidrostático
fsig = (psi1*I1^3/I3 - I1^2/I2)*(I1/pa)^h*exp(q);
fWp = (1/D)^(1/rho)*(Wp/pa)^(1/rho);
np = 1;
e1(np) = 0;
e3(np) = 0;
e2(np) = 0;
s1(np) = s1b - a*pa;
s3(np) = s3b - a*pa;
s2(np) = s3(np);
ft(np) = fsig - fWp;
while ( S < 1.0 && s1(np) < 150.0 )
    np = np + 1;
    s1b = s1b + ds1;
    s2b = s2b + ds2;
    s3b = s3b + ds3;
    I1 = s1b + s2b + s3b;
    I2 = -(s1b*s2b + s2b*s3b + s3b*s1b);
    I3 = s1b*s2b*s3b;
    %deformacoes elasticas
    J2 = 1/6*((s1b-s2b)^2+(s2b-s3b)^2+(s3b-s1b)^2);
    R = 6*(1 + poiss)/(1 - 2*poiss);
    E = M*pa*((I1/pa)^2 + R*J2/(pa^2))^lbd;
    de_e1 = (ds1 - poiss*(ds2 + ds3))/E;
    de_e2 = (ds2 - poiss*(ds3 + ds1))/E;
    de_e3 = (ds3 - poiss*(ds1 + ds2))/E;
    %deformacoes plasticas
    S = ((I1^3/I3 - 27)*(I1/pa)^m)/n1;
    q = (alpha*S)/(1 - (1 - alpha)*S);
    fsig = (psi1*I1^3/I3 - I1^2/I2)*(I1/pa)^h*exp(q);
    fWp = (1/D)^(1/rho)*(Wp/pa)^(1/rho);
    ft(np) = fsig - fWp;
    if ( ft(np) >= 0.0 )
        fator = (I1/pa)^mu;
        G = psi1*(mu + 3)*I1^2/I3 - (mu + 2)*I1/I2 + psi2*mu/I1;
        dgds1 = fator*(G - I1^2/I2^2*(s2b + s3b) - psi1*I1^3/I3^2*s2b*s3b);

```

```

dgs2 = fator*(G - I1^2/I2^2*(s3b + s1b) - psi1*I1^3/I3^2*s3b*s1b);
dgs3 = fator*(G - I1^2/I2^2*(s1b + s2b) - psi1*I1^3/I3^2*s1b*s2b);
gp = (psi1*I1^3/I3 - I1^2/I2 + psi2)*(I1/pa)^mu;
Wp_ = (fsig^rho)*D*pa;
dWp = Wp_ - Wp;
Wp = Wp_;
dlambda = dWp/(mu*gp);
de_p1 = dlambda*dgs1;
de_p2 = dlambda*dgs2;
de_p3 = dlambda*dgs3;
else
de_p1 = 0;
de_p2 = 0;
de_p3 = 0;
end
e1(np) = e1(np - 1) + de_e1 + de_p1;
e2(np) = e2(np - 1) + de_e2 + de_p2;
e3(np) = e3(np - 1) + de_e3 + de_p3;
s1(np) = s1b - a*pa;
s2(np) = s2b - a*pa;
s3(np) = s3b - a*pa;
end
s1 = s1.';
s2 = s2.';
s3 = s3.';
e1 = e1.' * 100;
e2 = e2.' * 100;
e3 = e3.' * 100;
sd = s1 - s3;
ev=e1+e2+e3;

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M.R.S. (1987) Propriedades Mecânicas de Rochas Associadas ao Grau de Intemperismo. 213p. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

AZAMBUJA, M. A. E. (1970) Solos: Intemperismo, Origem e Formação dos Solos. Editora CEUE.

BARROSO, E.V. (1993) Estudo das Características Geológicas e do Comportamento Geotécnico de um Perfil de Intemperismo em Leptinito. 251p. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BARROSO, E.V. (2002) Avaliação de um Modelo Elastoplástico Para Estudos De Processos de Produção de Areia em Rochas Produtoras de Petróleo. 188p. Tese de Doutorado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

BATHE, K. J. (1982) – Finite element procedures in engineering analysis. Prentice Hall.

BAYNES, F.J., DEARMAN, W. R. (1978), The relationship between the microfabric and the engineering properties of weathered granite, Bulletin of the International Association of Eng. Geol., 18, 191-197.

BURNIER, A.A.L., (2006). Análises numéricas de provas de carga em sapatas utilizando o método dos elementos finitos Dissertação (Mestrado em geotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

DESAI, C. S. (1979) – Elementary Finite Element Method, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.

DESAI, C. S. e SIRIWARDANE, H. J., (1984) – Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials. Prentice- Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

DUNCAN, M.J. e CHANG, C.Y. (1970) – Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division - ASCE*, SM5, p 1629 - 1653.

FRANÇA, P.T. (2006) – Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos Elasto plásticos – Dissertação de Mestrado. 185p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

GOODMAN, R. E. (1989) – *Introduction to Rock Mechanics*, 576 p. Wiley.

GUIMARÃES, A. G., (2008) – Análise inversa para determinação de parâmetros de deformabilidade de solos. 195p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.

GUTIERREZ, M., HICKMAN, M. (2010) – Chemo-Plasticity Modeling of Pore Fluid Induced Degradation of Soft Rock. 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th U.S. Canada Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, UT June 27–30, 2010.

KIRKPATRICK, S., GELATT, C.D., VECCHI, M.P. (1983) – Optimization by Simulated Annealing: *Science*, v. 220, N.4598, p. 671 - 680.

KIRKPATRICK, S. (1984) – Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies. *Journal of Statistical Physics*, v. 34, N.5/6, p. 975 - 986.

LADE, P. V. (1977) – Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *International Journal of Solids and Structure*, v. 13, N.GM8, p. 1019 - 1035.

LADE, P.V. e KIM, M.K. (1988a) – Single hardening constitutive model for frictional materials – I. Plastic potential function – *Computers and Geomechanics*, 5, pp 307 324.

LADE, P.V. e KIM, M.K. (1988b) – Single hardening constitutive model for frictional materials – II. Yield criterion and plastic work contours – Computers and Geomechanics, 6, pp 13-29.

LADE, P.V. e KIM, M.K. (1988c) – Single hardening constitutive model for frictional materials – III. Comparisons with experimental data – Computers and Geomechanics, 6, pp 31-47.

LADE, P.V. e KIM, M.K. (1995) – Single Hardening Constitutive Model for Soil, Rock and Concrete – International Journal Solids and Structures, 32(14), pp 1963-1978.

LADE, P.V., NELSON, R.B. (1987) – Incrementalization procedure for elasto plastic constitutive model with multiple simultaneous yield surface. Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8, pp. 311-323.

LAQUINI, J.P., AZEVEDO, R.F., REIS, R.M. (2007) – Elasto-Plastic Modeling of Saturated and Non-Saturated Residual Soil with Parameters Optimization. Eletronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 12 C.

MARQUES, E.A.G, (1998) - Caracterização Geomecânica de um Perfil de Intemperismo em Kinzigito 289p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

MELO, L.T.B. (1995) - Utilização de um modelo elasto-plástico para análise de deformações em solos. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

MENEZES FILHO, A. P., (1993) – Aspectos Geológicos – Geotécnicos de um perfil de alteração de Gnaisse Facoidal. 229p. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro.

NAYLOR, D.J.; PANDE, G.N.; SIMPSON, B.; TABB, R (1981).- Finite Elements in Geotechnical Engineering. Pineridge Press, Swansea. U.K., 245p.

NOVA, R., CASTELLANZA, R. (2001), - Modelling weathering effects on the mechanical on the mechanical behaviour of soft rocks, Int. Conf. on Civil Engineering, Bangalore, India, Interline Publishing, 157-167.

OGATA, K. - Solução de Problemas de Engenharia de Controle com MATLAB, ED. PHB.

PANITZ, J. S. P, (2007), - Desenvolvimento e Implementação de Metodologias para a Determinação da Deformabilidade e Tensões em Maciços Gnáissicos. 201p. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

POTTS, D. M.; ZDRAVKOVIC, L. (1999). - Finite element analysis in geotechnical engineering theory. Imperial College of Science, Technology and Medicine, Thomas Telford, Pub., 439p.

REIS, R.M (2004) – Comportamento tensão-deformação de dois horizontes de um solo residual de gnaise, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

REYES, S. F.; DEERE, D. U. (1966). - Elastic-plastic analysis of underground openings by the finite element method. Proc. Ist. Symp. ISRM., pp 477-483.

ROCHA, M., Mecânica das Rochas, LNEC – Lisboa, 1981, pp.149-161

SUGIMOTO, M.; SRAMOON, A; ASCE, M. (2002) - Theoretical model of shield behavior during excavation. I: theory. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering. Vol. 52, pp 243-257.

VERMEER, P.A.; BRINKGREVE, R.B.J. (1998). - Finite element code for soil and rock. Balkema.

WHEELER, S. J.; KARUBE, D. (1995) - Constitutive modeling, Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, p. 1323-1356.

YANG, Z.; ELGAMAL, A. (2003) - Application of unconstrained optimization and sensitivity analysis to calibration of a soil constitutive model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 27, p. 1277-1297.