

ELIANE DE PAULA CLEMENTE

COMPACTAÇÃO DO SOLO PROVOCADA POR RAÍZES DE EUCALIPTO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2001

ELIANE DE PAULA CLEMENTE

COMPACTAÇÃO DO SOLO PROVOCADA POR RAÍZES DE EUCALIPTO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de "*Magister Scientiae*".

APROVADA: 03 de dezembro de 2001

Prof. Carlos Ernesto G.R. Schaefer
(Conselheiro)

Prof. Nairam Félix de Barros
(Conselheiro)

Prof. Haroldo Nogueira de Paiva

Prof. João Luiz Lani

Prof. Roberto Ferreira de Novais
(Orientador)

A Deus sempre presente,
Aos meus pais João Dumont e Dalgiza,
Aos meus irmãos Alexandre, Alan e Alisson
A todos meus amigos
Com amor e gratidão.
Dedico

AGRADECIMENTO

A esta conceituada Instituição de Ensino - U.F.V. e aos professores, funcionários e colegas dos Departamentos de Engenharia Florestal e Solos, pela oportunidade de conviver e adquirir novos e valiosos conhecimentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo suporte financeiro.

Ao Professor Roberto Ferreira de Novais pela orientação, atenção e apoio dispensados durante toda a realização do trabalho, com minha sincera admiração.

Ao Professor Carlos Ernesto Schaefer pela valiosa contribuição, apoio e ensinamentos, tornando possível à concretização deste trabalho.

Ao Professor Nairam Félix de Barros pela colaboração durante todos os anos de curso e também pelos conhecimentos transmitidos.

Aos amigos Manoel Ricardo e João Hebert pela ajuda no experimento e companheirismo, sem vocês com certeza teria sérias dificuldades.

Às minhas amigas Samantha, Selma, Camila, Camilinha e ao amigo Bertola pelo convívio, pelo carinho, pela paciência, pelos conselhos e o mais importante, pela amizade, por ter sido minha segunda família eu agradeço de coração.

Ao José Márcio por ter aparecido na minha vida neste momento, tornando os meus dias mais alegres e mais felizes, pelo carinho, apoio e companheirismo.

A minha família: pais, irmãos, minha prima Andréa e a minha cunhada Ágata pela amizade e força nos momentos mais difíceis.

A todos os meus amigos, pelo companheirismo, incentivo e amizade que fizeram minha permanência aqui mais agradável e proveitosa.

Ao Beto, Sr.Cardoso, Geraldo, José Luiz, José Flávio e Frederico, funcionários do departamento de Solos que tanto me ajudaram, sempre dispostos a colaborar. A Ritinha e todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia Florestal, muito obrigada.

A Deus que me guiou durante toda minha vida e nos momentos mais difíceis esteve sempre comigo.

Enfim a todas as pessoas ora aqui não citadas, mas que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho, meus sinceros agradecimentos.

BIOGRAFIA

ELIANE DE PAULA CLEMENTE, filha de João Dumont Clemente e Dalgiza Nogueira Rios Clemente, nasceu em Belo Horizonte - MG, em 27 de Julho de 1974.

Ingressou na Universidade Federal Viçosa - MG em 1994, graduando-se Engenheira Florestal em agosto de 1999.

Em agosto de 1999, iniciou o curso de Pós-Graduação em Ciência Florestal na Universidade Federal de Viçosa - MG, concluindo-o em dezembro de 2001.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	05
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	09
3.1. Aspectos micromorfológicas.....	09
3.2. Efeito da compressão radicular na forma espacial dos poros.....	12
3.3. Teste de infiltração de água in situ.....	17
4. CONCLUSÕES.....	19
5. LITERATURA CITADA.....	20
APÊNDICE.....	24

RESUMO

CLEMENTE, ELIANE de PAULA, M.S., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2001. **Compactação do solo provocada por raízes de eucalipto.** Orientador: Roberto Ferreira de Novais. Conselheiros: Carlos Ernesto G.R. Schaefer e Nairam Félix de Barros.

Avaliou-se o efeito do crescimento da raiz de eucalipto sobre a compactação do solo em amostras indeformadas de solo que sofreram pressão de crescimento de raízes de diferentes diâmetros. O principal método de estudo foi a análise micromorfológica do contato solo-raiz, à partir de seções finas de solos que sofreram compactação por raízes de 0,3; 0,9; 1,3; 2,8; 3,5; 6,4; 8,0; 9,0 e 10,2 cm de diâmetro. As seções-finas foram analisadas na área de influência direta da raiz, até 1cm de distância da superfície de contato entre raiz-solo, comparando-se com a área de menor influência da raiz, a uma distância aproximada de 3,0 cm da superfície de contato. Como método complementar, realizou-se um teste de infiltração localizada, cronometrando o tempo necessário para que uma gota d'água infiltrasse na superfície de solo compactada pela raiz comparando-se a uma área que não sofreu compactação, como referência. A compactação aumentou nos diâmetros de raiz maiores que 3,5 cm, sendo

esse efeito acompanhado pela redução na infiltração de água na superfície de contato solo-raiz. A formação de fraturas de cisalhamento alinhadas, em ângulos de 45° em relação à superfície sugere um crescimento helicoidal da raiz de eucalipto, exercendo compressão do solo e mecanismos de tração tangenciais. A micromorfologia do contato solo-raiz mostrou feições de orientação de argila, microfraturas, cobertura superficial por hifas fúngicas e espelhamento; os valores baixos de infiltração verificados são associados a mecanismos físicos (compactação) e químicos (hidrofobicidade). A utilização de técnicas micromorfológicas e análise de imagens permitem observar e quantificar alguns efeitos da raiz de eucalipto na compactação e porosidade do solo na sua proximidade.

ABSTRACT

CLEMENTE, ELIANE de PAULA, M.S., Universidade Federal de Viçosa, December 2001. **Soil compaction provoked by eucalypt roots.** Adviser: Roberto Ferreira de Novais. Committee members: Carlos Ernesto G. R. Schaefer and Nairam Félix de Barros.

This work aimed to evaluate the effects of eucalyptus root's growth on soil compaction. Undeformed soil samples that suffered the pressure of the roots's growth were used. Two methods were utilized to study the phenomenon. Micromorphological analysis of thin sections of samples of soil compacted by roots of 0,3; 0,9; 1,3; 2,8; 3,5; 6,4; 8,0; 9,0 e 10,2 cm of diameter were carried out in the area under the direct influence of the root, up to 1 cm from the root-soil surface; compared with the area at a distance of 3,0 cm from the contact surface. In addition, a localized infiltration test was carried out, assessing the time needed to infiltrate one drop of water into the surface of root compacted soil, comparing with the time spent in a sample without root compaction, as reference. The compaction was greater in root diameters larger than 3,5 cm, and this effect was accompanied by reduced water infiltration in the soil surface at the contact. Presence of fractures with a 45° angles to the soil surface suggests the helicoidal growth of the eucalyptus root, exercising both soil compression and tangential thrust; the soil-root contact micromorphology showed clay-oriented features, microfractures, fungi cover and slickensides. The lower infiltration in compacted soil-root surface is

associated to both physical (compaction) and chemical (hydrophobicity) mechanisms. The use of micromorphological techniques and image analysis allowed the observation and quantification of soil porosity in its vicinity.

1 – INTRODUÇÃO

O crescimento e o desenvolvimento das plantas dependem de inúmeros fatores ambientais. Dentre esses, há a compactação do solo, intimamente relacionada com propriedades físicas, químicas e biológicas importantes às plantas.

O efeito prejudicial da compactação consiste em mudanças indesejáveis em importantes propriedades físicas do solo, relacionadas com o seu espaço poroso, estrutura, permeabilidade ao ar e à água, com conseqüente reflexo no crescimento do sistema radicular e produtividade da cultura.

Existem inúmeros trabalhos referentes ao efeito da compactação no crescimento de várias culturas. Para florestas plantadas, em geral, e Eucalyptus em particular, pouco se conhece dos efeitos da compactação do solo no entorno da raiz, seja provocada pelo seu próprio crescimento ou por condições naturais e sua influência nos mecanismos de absorção de água e nutrientes. Os poucos trabalhos referem-se à variabilidade dos solos no entorno das raízes (Brown, 1977; Ryan e McGarity, 1982).

À medida que a raiz se expande, exerce pressão contra o solo adjacente, acarretando diminuição da proporção de macro e microporos, aumentando a densidade do solo. A densidade do solo, que é influenciada pela textura e densidade de partículas, é um referencial muito utilizado para

caracterizar a compactação e, ou, o adensamento dos solos. Entretanto, segundo Gomes (1996), a densidade do solo não se mostra muito adequada nos estudos de adensamento e, ou, compactação. Relato semelhante foi feito por Fernandes (1996) que, avaliando a influência de características químicas, físicas e mineralógicas na compactação de três Latossolos, concluiu que a densidade do solo não refletiu a intensidade da condição de compactação observada no campo, embora tenha verificado seu aumento com o cultivo.

De acordo com Lopes (1989), os solos arenosos, apesar de apresentarem menor tendência à compactação que os argilosos, quando contém alta proporção de areia muito fina, são facilmente compactados. Por sua vez, os solos com alto teor de silte são, geralmente, os que apresentam pior estrutura. Contudo, Carvalho (1991) afirma que a presença de partículas grosseiras no solo promove a orientação de partículas de argila ao seu redor, dificultando o desenvolvimento de agregados compactos.

Em relação à matéria orgânica, Greacen & Sands (1980) afirmam que a suscetibilidade do solo para compactar-se depende fortemente da quantidade de matéria orgânica que possui. É quase consensual na literatura que a adição de matéria orgânica melhora a estrutura e reduz a compactação, solo ricos em matéria orgânica são mais difíceis de se compactar.

Tem sido observado ainda que a compactação do solo depende do tamanho, da forma e da quantidade de partículas agregadas presentes e que, de maneira geral, misturas de partículas de diferentes tamanhos conduzem a maiores compactações do que conjuntos de partículas de tamanho aproximadamente igual, uma vez que as partículas menores ocupam os vazios deixados pelas partículas maiores (Costa, 1985; Bennie & Burger, 1988).

Alvarenga et al. (1996) verificaram que, com o aumento da compactação do solo, houve decréscimos na porosidade total e na macroporosidade das amostras, sendo que, nessas condições, as raízes de leguminosas tiveram grande dificuldade em penetrar o solo.

Para Brown et al. (1992), a redução da porosidade provocada pela compactação, pode limitar ou impedir o desenvolvimento vegetal pela falta de água ou oxigênio no ambiente radicular. Com a diminuição do diâmetro e continuidade dos poros, diminui a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água no perfil, condicionando menor fluxo para as raízes. Outro efeito que conduz à redução do sistema radicular é o acúmulo de CO₂ e baixa difusão de oxigênio (Nadian et al., 1996; Borges et al., 1997) pela compactação.

A estrutura do solo submetido à compactação, quando analisada em escala de maior detalhe, revela redução em tamanho e número de macroporos, bem como mudanças na forma e continuidade dos poros. Em escala de menor detalhe, observam-se alterações no tipo de empacotamento dos agregados ou partículas, o que afeta, por sua vez, características como: índice de vazios, porosidade total e densidade do solo. A alteração destas características pode determinar mudanças na condutividade interna, na permeabilidade e na difusão de água e ar através do sistema poroso (Young, 1998).

O balanço de forças externas e internas é responsável pelo crescimento radicular e a raiz pode exercer pressões de 9 a 13 MPa contra as paredes dos poros do solo (Carson, 1974). O que interessa, entretanto, não é a pressão máxima que a raiz pode exercer e sim a pressão mínima que o meio impõe e que reduzirá consideravelmente a elongação radicular (Camargo, 1983).

A expansão radial e axial das raízes provoca compactação do solo (White, 1975), podendo gerar fraturas no solo, de modo a evitar o excessivo gasto energético na elongação radicular (Young, 1998).

Para comprovar o efeito compactante das raízes, Dexter (1987) criou um modelo simplificado, baseado na teoria da expansão de corpos cilíndricos em meios friccionais plásticos, com o objetivo de medir a compressão do solo no entorno das raízes. Obteve-se um modelo exponencial que mostra que, com o aumento do volume de raízes, há perda do espaço poroso do solo ao entorno das mesmas; existe uma

porosidade mínima do solo, a qual não se admite maior compressão, sendo que, a densidade decresce exponencialmente com a distância da superfície radicular, com um expoente que é um múltiplo constante do diâmetro da raiz.

Carson (1974), estudando a influência da compactação no desenvolvimento radicular, verificou que a raiz necessita forçar sua passagem através do espaço poroso, exercendo pressão sobre o poro, de tal forma que, se a pressão que a raiz pode exercer para aumentar a dimensão ou criar novos poros é menor que a força que o solo exerce sobre ela, então haverá uma diminuição do sistema radicular e, conseqüentemente, o crescimento e desenvolvimento da planta ficarão prejudicados. Segundo esse autor, a pressão de crescimento radicular (PCR) é definida conforme a equação:

$$PCR = (\sum Ft - \sum FPc) / A \qquad \text{Equação 1}$$

em que $\sum Ft$ = somatório das forças longitudinais da raiz resultante da pressão de turgor celular (dynes);

$\sum FPc$ = somatório das forças originárias da resistência das paredes celulares à elongação (dynes);

A = área da raiz no plano que a força é determinada (cm²).

A pressão de turgor não é o principal determinante da elongação radicular; entretanto, é verdade que a raiz apenas penetrará um meio sólido quando Ft exceder FPc.

Apesar de algumas raízes poderem crescer em solos compactados, a maioria o faz pelos planos de fratura. Uma raiz grande que cresce entre planos de fratura, comprime o solo ao seu redor de tal maneira que as ramificações não conseguem penetrá-lo, ficando no canal radicular (Camargo, 1983).

O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos do crescimento da raiz de eucalipto na compactação do solo adjacente, por meio de técnicas micromorfológicas, complementadas por testes de infiltração em torrões indeformados

2- MATERIAL E MÉTODOS

Amostras indeformadas de solo ao longo das raízes foram coletadas em um povoamento de eucalipto localizado na região de Viçosa, Minas Gerais, a 20^o45' latitude sul, 42^o52' longitude oeste e altitude média de 650m. O clima é do tipo Cwa (Köppen), com temperatura média anual de 19,5 a 21,8^oC e precipitação média anual de 1100 a 1400mm.

O povoamento de eucalipto utilizado para a coleta das amostras tem 27 anos de idade e está situado sobre solo de textura argilosa, (23% de areia grossa, 12% de areia fina, 7% de silte e 58% de argila). De acordo com observações de campo, o solo representa uma fase de transição entre o Latossolo Vermelho Amarelo de encosta e o Argissolo Vermelho Amarelo de terraço, com estrutura em blocos sub-angulares que se desfaz em pequena granular. A mineralogia é caulinítica, com presença de goethita como principal óxido de ferro.

Para a coleta de amostras indeformadas ao longo da raiz, foram feitas trincheiras ao redor de duas árvores de eucalipto, separadas dois metros de distância uma da outra (Figura 1).

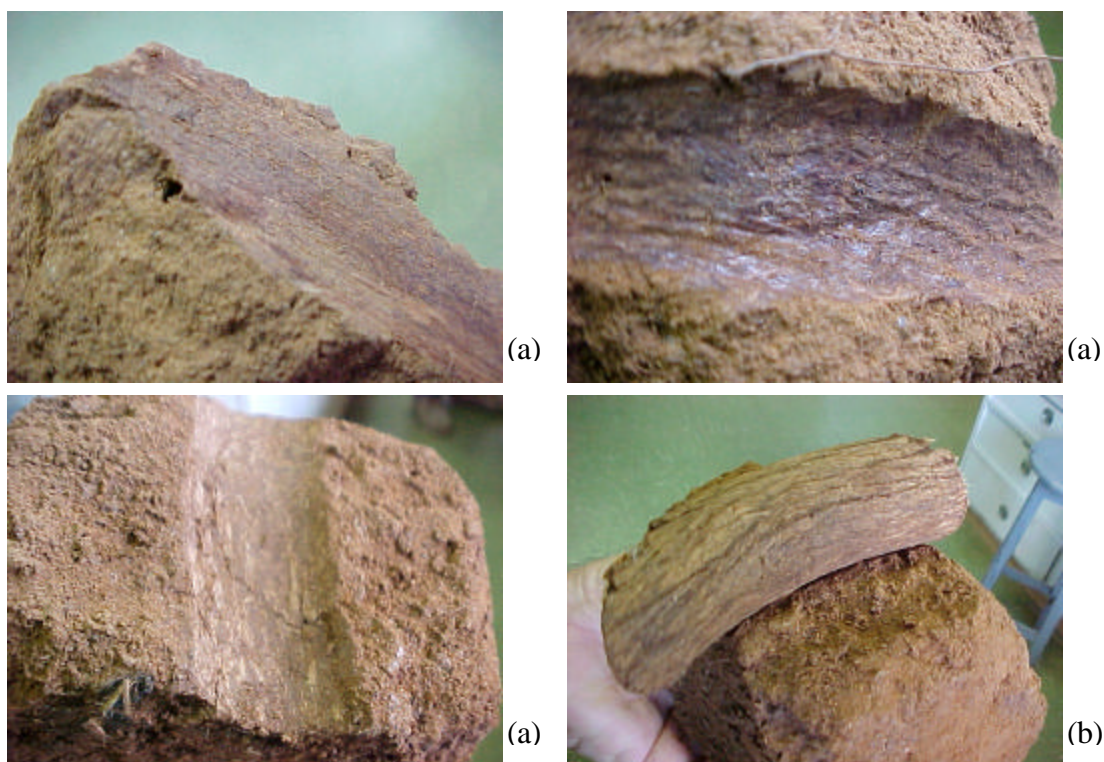


Figura 1 - Blocos compactados por raízes de diferentes diâmetros evidenciando o espelhamento causado pela compressão das mesmas (a) e pedaço de uma raiz sobre um bloco de solo (b).

Para a quantificação do grau de compactação provocada pelas raízes foram utilizados dois métodos. O primeiro método foi o micromorfológico, aplicado a amostras indeformadas obtidas até 6 cm de distância do contato solo-raiz. O segundo método foi o teste de infiltração localizado, em que se utilizaram blocos indeformados, que sofreram compactação por raízes de diferentes diâmetros.

Na análise micromorfológica, avaliou-se a porosidade do solo na vizinhança da raiz. Para isso, as amostras foram impregnadas com a resina de poliéster (POLYLITE T-208), com uso de acelerador, diluído em monômero de estireno e adição de pigmento UV fluorescente (UVITEX OAB, Ciba-Geigy). Para a impregnação dos blocos foram utilizadas 60% de resina, 40% de estireno, 18 gotas de catalisador e 50 gotas de pigmento,

por litro de mistura. A polimerização foi feita em ambiente ventilado, por 30 dias, repondo-se a resina à medida que os blocos de solo absorviam a mistura, até que as amostras estivessem inteiramente saturadas. Após a polimerização, efetuou-se o corte de uma fatia delgada do contato solo-raiz, entre 0,5 a 1,0 cm de espessura, em sentido transversal à superfície de contato raiz-solo, utilizando-se uma serra diamantada. As amostras foram montadas sobre lâminas de vidro com dimensões de 2X6 cm, por meio de araldite e desbastadas até atingir 30 micrômetros de espessura. Todas as lâminas foram preparadas no mesmo sentido dos cortes, até à distância de 4 cm da raiz.

Foram preparadas lâminas de amostras coletadas junto às raízes de diâmetros 0,3; 0,9; 1,3; 2,8; 3,5; 6,4; 8,0; 9,0 e 10,2 cm. As lâminas foram analisadas em duas áreas distintas: a de influência direta da raiz, até 1cm de distância da superfície de contato entre raiz-solo, e a de menor influência da raiz, a uma distância aproximada de 3,0 cm da superfície de contato.

As lâminas foram observadas em microscópio petrográfico e lupa binocular. Em lupa, as fotomicrografias foram obtidas em magnificação de 10 vezes, com seis fotografias de cada lâmina. Em microscópio petrográfico, as fotomicrografias foram tiradas com aumentos de 40 e 100 vezes e visaram observar a microestrutura da zona de influência direta da raiz, em comparação à da zona de menor influência. As fotomicrografias foram digitalizadas em scanner HP Scanjet 4C, com resolução de 200 dpi. As imagens foram manipuladas por meio dos programas ADOBE-PHOTOSHOP 5.5, VISUAL STITCHER, montado-se mosaicos com seqüência de fotos de cada lâmina, e pelo programa QUANTIPORO (Viana & Fernandes Filho, 2001) onde foi possível observar a distribuição espacial do espaço poroso e calcular a porosidade da área de influência direta da raiz e da área de referência com menor influência, avaliando-se em cada lâmina o efeito da raiz sobre a estrutura do solo. Segundo Richner et al.

(2000), o contínuo desenvolvimento de recursos de computadores pode possibilitar amplas explorações do potencial de técnicas de análise de imagens na descrição morfológica de amostras de raízes.

A orientação dos poros (vazios) foi determinada pelo programa QUANTIPORO, sendo excluídos todos os poros com arredondamento superior a 0,6 (o arredondamento fornecerá o resultado entre 0 e 1 e, quanto maior o valor, maior o grau de arredondamento). Quanto mais próximo o valor à 1 mais o objeto se aproxima a circunferência perfeita; portanto, para valores menores que 0,6 o objeto apresenta formas variadas desde ovais a planares. O valor do arredondamento foi calculado a partir da fórmula: $(4 \times p \times \text{área}) / \text{perímetro}^2$ (Olszewski, 2000).

Amostras indeformadas da superfície do contato raiz-solo foram também cuidadosamente selecionadas e montadas em discos de alumínio para observação em microscopia eletrônica de varredura. Após as montagens, estas amostras foram recobertas com ouro e levados para observação no microscópio eletrônico de varredura, sendo fotografadas em magnificações variadas sempre maior que 150 vezes. Observaram-se aspectos da superfície compactada pela raiz, como orientação de partículas na superfície, fraturas causadas pela pressão de crescimento da raiz, o estado de agregação das partículas no interior do torrão, e diferentes fases de decomposição do material orgânico deixado pela raiz.

Mediu-se também a velocidade de infiltração de água *in situ*, em que o tempo de infiltração foi cronometrado para avaliar a que velocidade uma gota de água, dispensada por meio de uma bureta, infiltra na superfície compactada de um torrão, comprimido por raízes de diferentes diâmetros, em relação à medida na parte não compactada do mesmo torrão, como referência.

Para efeito de comparação, a velocidade de infiltração foi determinada utilizando-se etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) e acetonitrila (CH_3CN), solventes menos polares que a água.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1- Aspectos micromorfológicos

De modo geral, a porosidade na zona de influência direta da raiz (até 1cm de distância da superfície de contato entre raiz-solo) mostrou-se sempre menor que a porosidade na zona de menor influência (a uma distância aproximada de 3,0 cm da superfície de contato) nos diâmetros de 0,3 até 3,5 cm (Quadro 1).

Quadro 1 - Porosidade do solo influenciada pelo diâmetro de raízes de eucalipto, quantificada por fotografias sob lupa binocular.

Diâmetro de raiz (cm)	Zona de influência direta da raiz*	Zona de menor influência da raiz**
	%	
0,3	15,89	23,30
0,9	17,87	26,21
1,3	16,01	25,62
2,8	12,42	18,15
3,5	9,33	8,56
6,4	4,81	4,88
8,0	2,39	6,03
9,0	3,21	4,41
10,2	0,65	1,74

* Até 1 cm de distância do contato solo-raiz

** Após os 3 cm de distância do contato solo-raiz

Nos diâmetros de 3,5 a 6,4 cm houve pouca diferença na porosidade entre as duas áreas. A área de influência direta da raiz mostrou sempre menor porosidade, em todos os casos estudados. Em diâmetros de raiz superiores a 6,4 cm, toda a área de estudo, até a distância de 4,0 cm ao longo do eixo vertical da superfície de contato solo-raiz, mostrou acentuada compactação e perda de porosidade, evidenciando que estes diâmetros provocam uma compactação a maiores distâncias.

Deve-se ressaltar que os valores de porosidade medidos tanto na zona de influência direta, quanto na de menor influência, na escala do microscópio petrográfico ou lupa binocular, referem-se, aproximadamente, à macroporosidade do solo, não incluindo portanto, valores relativos de microporosidade, como observados em trabalhos de Faria et al. (1998) e Schaefer et al. (2001). Com essa ressalva, pela análise no programa QUANTIPORO, também foi possível quantificar o número de poros nas duas regiões estudadas em todas as lâminas, agrupando-os em três classes de tamanho: poros com área menor que $0,01 \text{ cm}^2$, área entre $0,01$ e $0,05 \text{ cm}^2$ e área maior que $0,05 \text{ cm}^2$. O número de poros seguiu a mesma tendência da porosidade total e à medida que aumentou o diâmetro da raiz diminuiu o número de poros (Figura 2). Até o diâmetro de 2,8 cm, há grande número de poros tanto na área de influência direta da raiz como na de menor influência, onde se encontra um maior número de poros na classe de maior tamanho. A partir do diâmetro de raiz de 3,5 cm, observou-se diminuição do número de poros, sendo que há maior equilíbrio entre as classes de tamanho dos poros.

Nas amostras de raízes de menores diâmetros, ocorre maior número de poros na classe com área maior que $0,05 \text{ cm}^2$, devido à grande presença de poros longos e finos, em sentido vertical à superfície de contato raiz-solo. Estes poros característicos foram observados em todas as lâminas, exceto na lâmina de amostra de raiz de menor diâmetro e foram agrupados na classe de maior

tamanho. Na lâmina com a amostra de raiz de menor diâmetro (0,3 cm) estes poros não foram observados, atribuindo-se isto ao fato que raízes nesta classe de diâmetro ainda não exercem pressão suficiente para deformação dos poros no solo. O tipo de poro da zona de influência direta é semelhante aos da zona de menor influência. Em amostras de raízes acima de 6,4 cm de diâmetro, estes poros não se sobressaíram em relação aos demais.

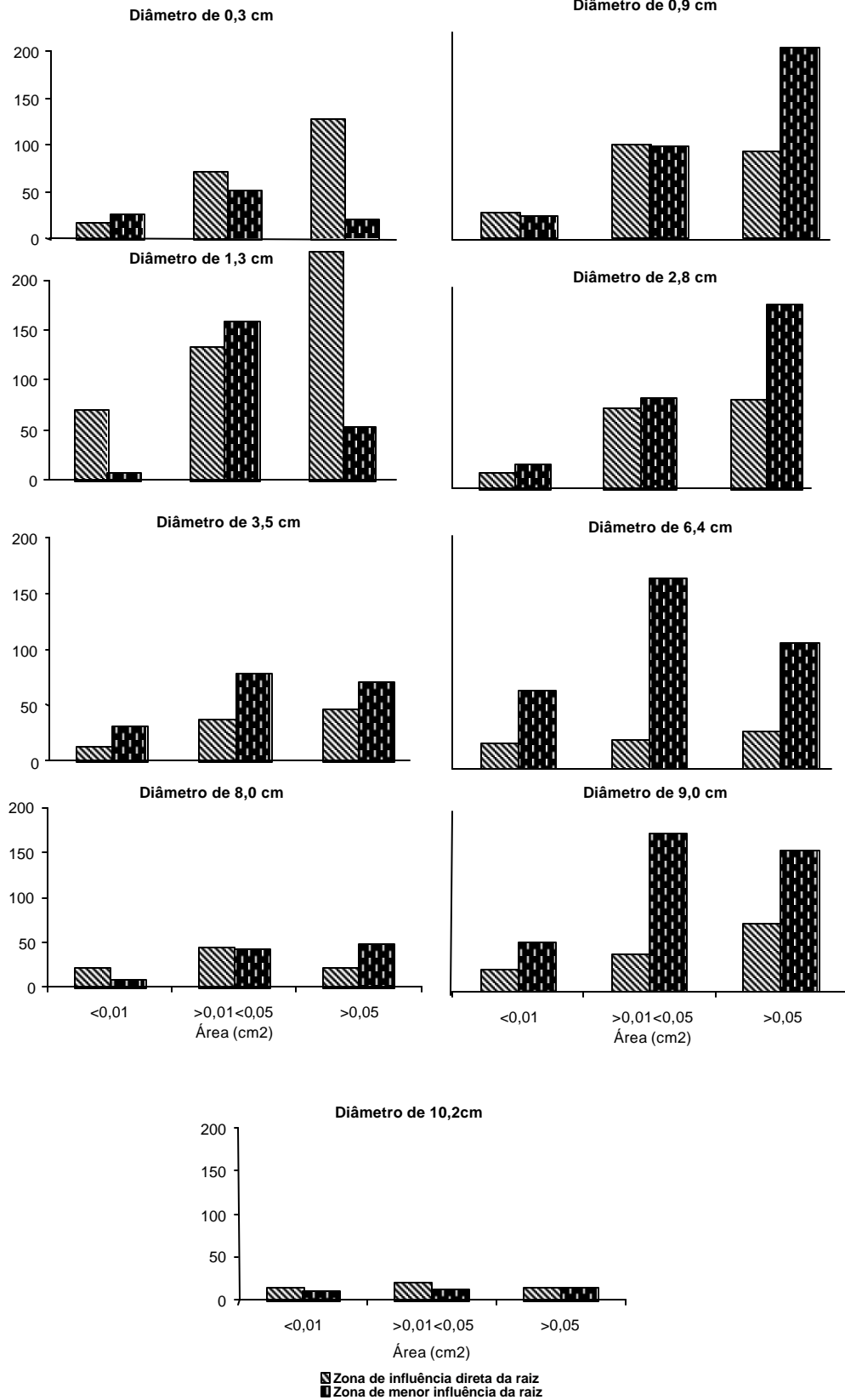


Figura 2 – Número de poros em três classes de tamanho, na área de influência direta da raiz e na área de menor influência, para diferentes diâmetros de raiz.

3.2- Efeitos da compressão radicular na forma espacial dos poros

O impacto físico do crescimento radicular no solo adjacente é evidenciado pela presença de fraturas paralelas entre si, formando ângulos de 45° , aproximadamente, em relação à superfície de contato solo-raiz (Figura 3). Essas fraturas indicam esforço de cisalhamento. O esforço de cisalhamento ocorre não apenas por compressão, mas também por esforços tangenciais de tração. Fraturas de cisalhamento foram observadas a partir do diâmetro de raiz de 1,3 cm, indicando que à medida que ocorrem o alongamento e a expansão das raízes, há divisão de células no córtex; a parte interna da célula apresenta um crescimento centrípeto e a externa um crescimento centrífugo ou irregular, assim uma série de células é dirigida para a periferia da raiz (Raven et al., 1978). Ao mesmo tempo muitos dos elementos traqueais primeiramente formados do protoxilema têm suas paredes secundárias depositadas na forma de anéis ou hélices. Estes espessamentos, que podem ser anelados ou espiralados permitem que os elementos traqueais sejam distendidos ou estendidos durante o processo de alongamento do órgão (Fahn, 1995), podendo assim explicar o desenvolvimento da raiz de forma helicoidal. Esse crescimento helicoidal, combinado ao aumento do diâmetro de raiz, é capaz de exercer compressão, que reduz o espaço poroso, e tração, dando origem às fraturas de cisalhamento. É possível supor que a presença dessas fraturas seja um mecanismo importante para aumentar a difusão de água e oxigênio de regiões distantes da raiz para o ambiente da rizosfera. O cisalhamento representaria, portanto, um efeito compensador da perda de porosidade pela expansão e compressão da raiz no solo. A quantificação dessas fraturas pelo programa QUANTIPORO mostra que a maior parte da porosidade no solo em contato com a raiz corresponde às fraturas de cisalhamento. **As** fraturas de cisalhamento se encontram em maior proporção nos primeiros milímetros do contato solo-raiz. À medida que se afasta da superfície de contato, ocorre diminuição dessas fraturas e aumento de poros normais. A área que apresenta o cisalhamento depende do diâmetro da raiz que comprimiu o solo, sendo que nos

maiores diâmetros a área de cisalhamento é maior, não se restringindo apenas aos poucos milímetros mencionados (Figura 4).

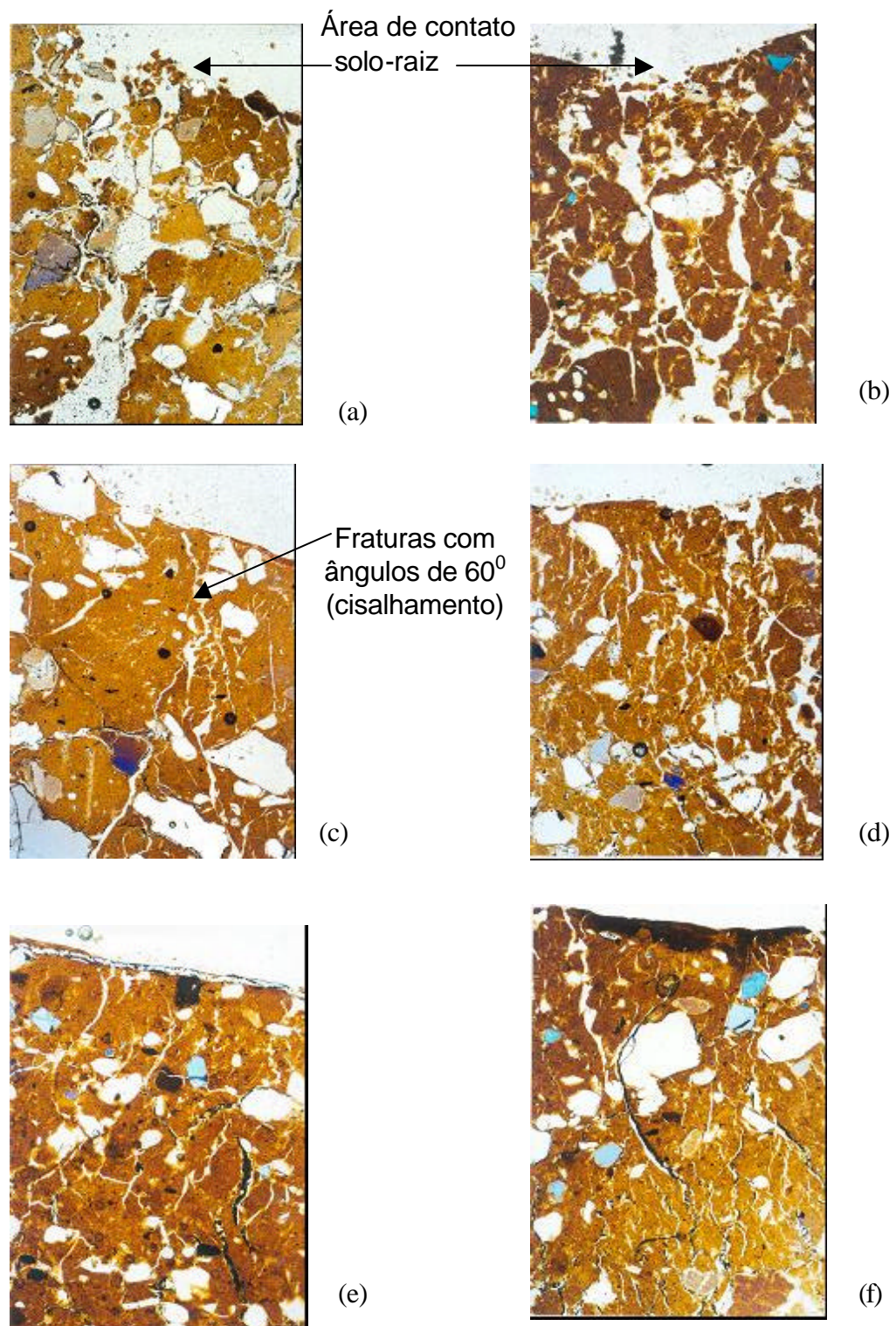


Figura 3 – Fraturas de cisalhamento da superfície a 2 mm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes de diâmetros: (a) 0,9; (b) 1,3; (c) 2,8; (d) 3,5; (e) 8,0; (f) 9,0 cm, sob microscópio petrográfico

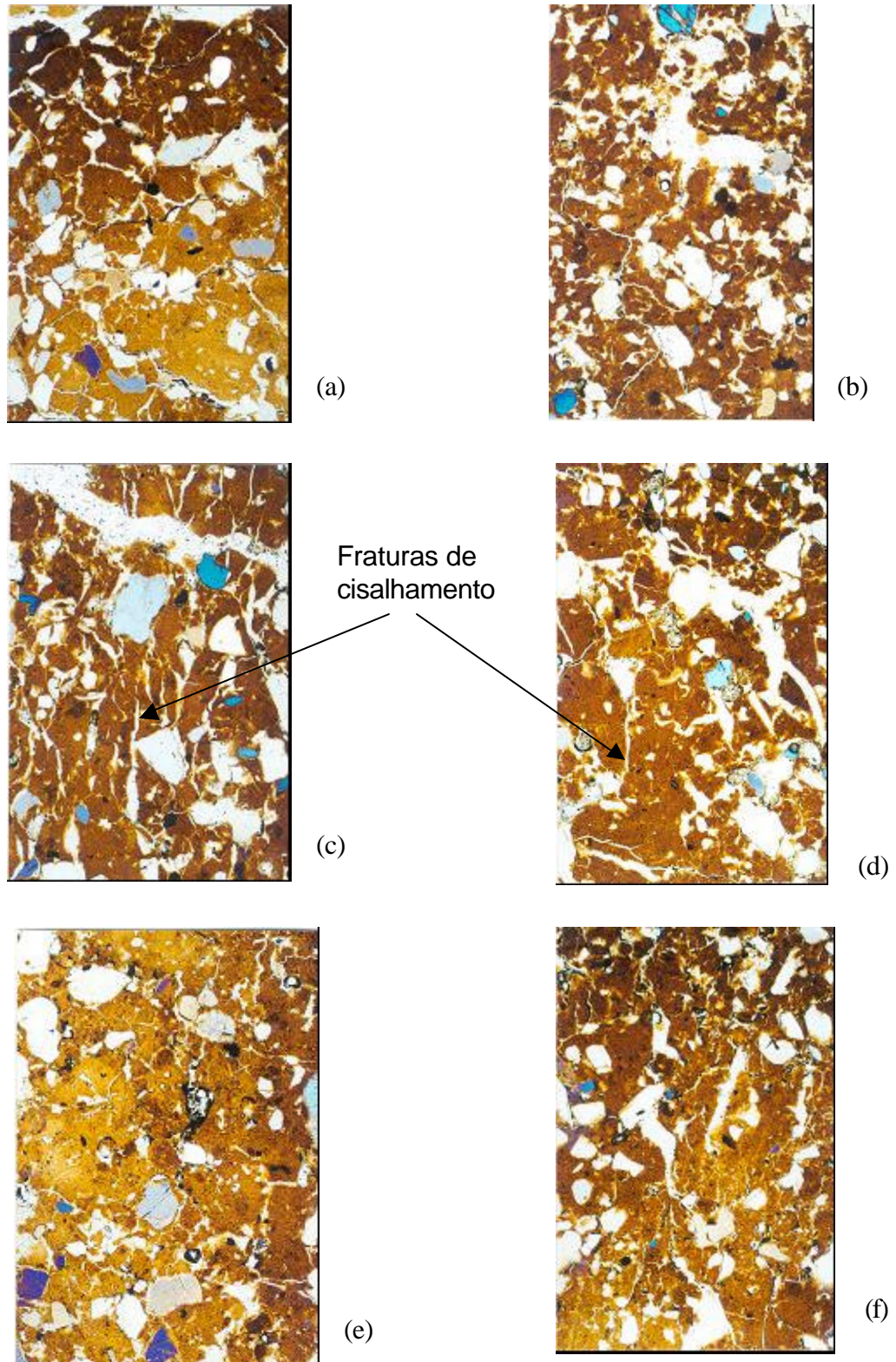


Figura 4 – Fraturas de cisalhamento da superfície a 3 cm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes de diâmetros: (a) 0,9;

(b) 1,3; (c) 2,8; (d) 3,5; (e) 8,0; (f) 9,0 cm, sob microscópio petrográfico.

Nas duas áreas de influência das raízes, os poros, incluindo as fraturas de cisalhamento, apresentaram orientação semelhante (Figura 5), mas houve diferença no número de poros, quanto maior o número de retas nos gráficos, maior o número de poros. Nas lâminas de amostra de raiz até 1,3 cm de diâmetro, a zona de menor influência possui menor quantidade destes poros do que na zona de influência direta da raiz. A partir do diâmetro de 2,8 cm ocorre inversão, com maior número de poros longe da circunferência perfeita na zona de menor influência da raiz. Isso é devido à zona de menor influência da raiz ser menos compactada que a zona de influência direta da raiz, portanto possui maior número de poros em relação ao número de fraturas de cisalhamento. Ao contrário do que se observa quando os diâmetros das raízes são inferiores a 1,3 cm, apesar de sofrerem certa compactação, o contato com as raízes criam poros longos e largos, denominados fendas.

Nas amostras compactadas por raízes de 0,9 e 1,3 cm de diâmetro, há um maior número de poros, e a orientação destes se encontra na faixa de 0 a 120⁰, em relação ao plano horizontal do maior eixo do objeto. As amostras compactadas por raízes superiores a 1,3 cm possuem menor número de poros e maior número de fraturas de cisalhamento, e se orientam na faixa de 0 a 60⁰, com a maioria na faixa de 0 a 45⁰. Apesar da amostra compactada por raiz de 0,3 cm diâmetro não possuir este cisalhamento, os poros com a mesma orientação dessas fraturas são decorrentes da existência de muitas fendas no contato solo-raiz.

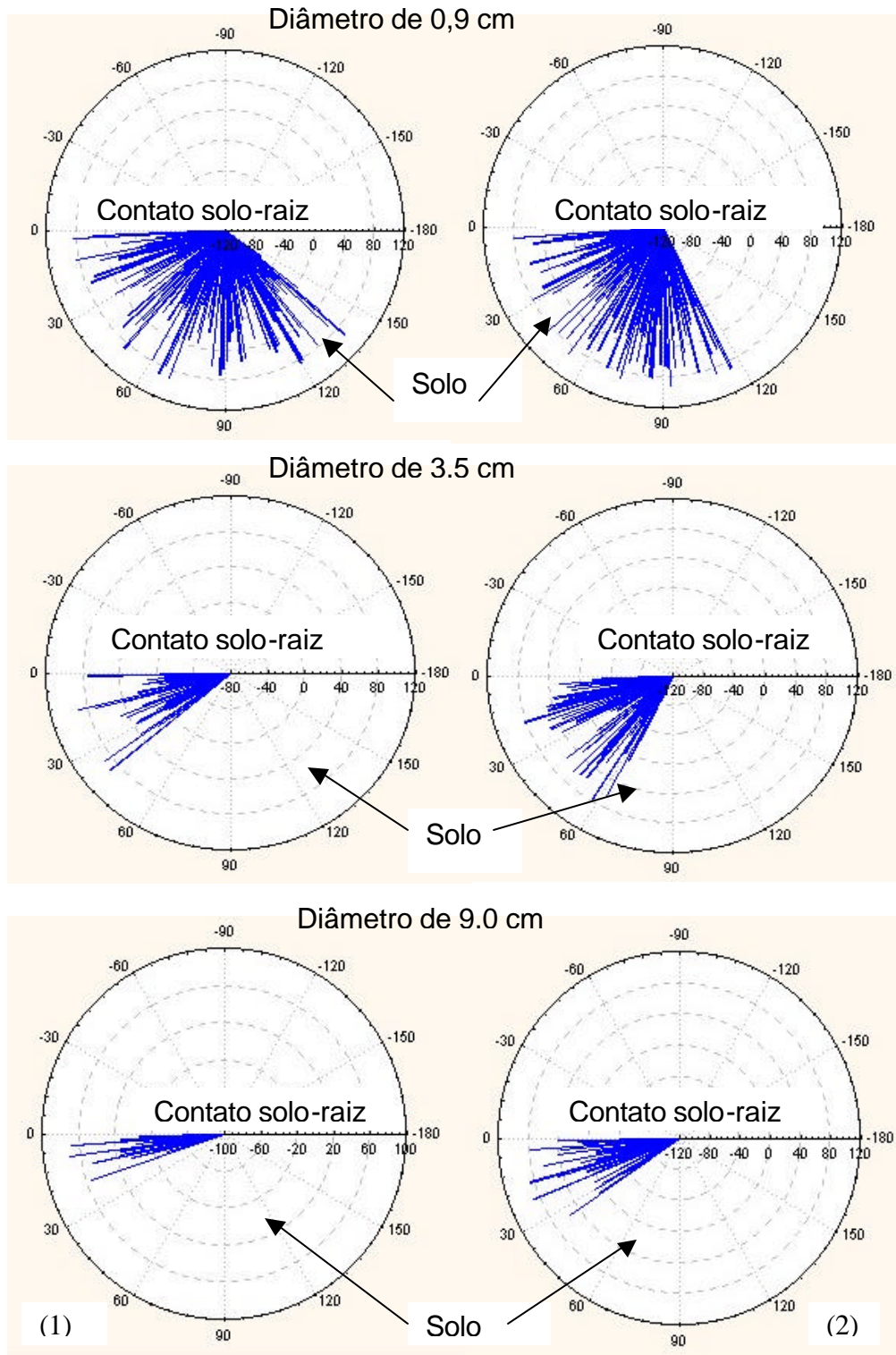


Figura 5 – Orientação dos poros, incluindo fraturas de cisalhamento e fendas, nas amostras compactadas por raízes com diferentes diâmetros, em graus, em relação à superfície de contato na zona de influência direta da raiz (1) e na zona de menor influência da raiz (2).

3.3- Teste de Infiltração de água *in situ*

O tempo necessário para infiltração de água na superfície compactada por raízes aumentou com o diâmetro da raiz (Quadro 2). Na superfície não compactada (sem a presença de raízes), não foi possível medir-se o tempo, pois quando se adicionou a gota, esta imediatamente foi absorvida. O mesmo teste foi conduzido com etanol e acetonitrila, solventes com menor polaridade que a água, tanto na superfície compactada como na não compactada, não se obtendo diferenças entre as superfícies testadas (infiltração imediata).

Observou-se que até o diâmetro de raiz de 3,5 cm, houve pouca diferença do tempo de infiltração da gota de água, enquanto acima deste diâmetro de raiz, há um aumento gradual do tempo de infiltração.

A superfície compactada pela raiz mostrou características hidrofóbicas, que podem ser originadas de exsudatos radiculares, ou pelas abundantes hifas fúngicas como observado em microscopia eletrônica de varredura (Figura 6).

Quadro 2 - Tempo de infiltração de uma gota d'água na superfície do contato solo-raiz como variável do diâmetro da raiz.

Diâmetro de raiz (cm)	Tempo de infiltração (seg)
1,6	11
1,9	24
2,2	107
2,8	97
3,2	48
3,5	61
3,8	217
4,2	410
4,8	1288
5,0	1599
6,6	1720
7,3	2030
9,0	2866
9,6	2715

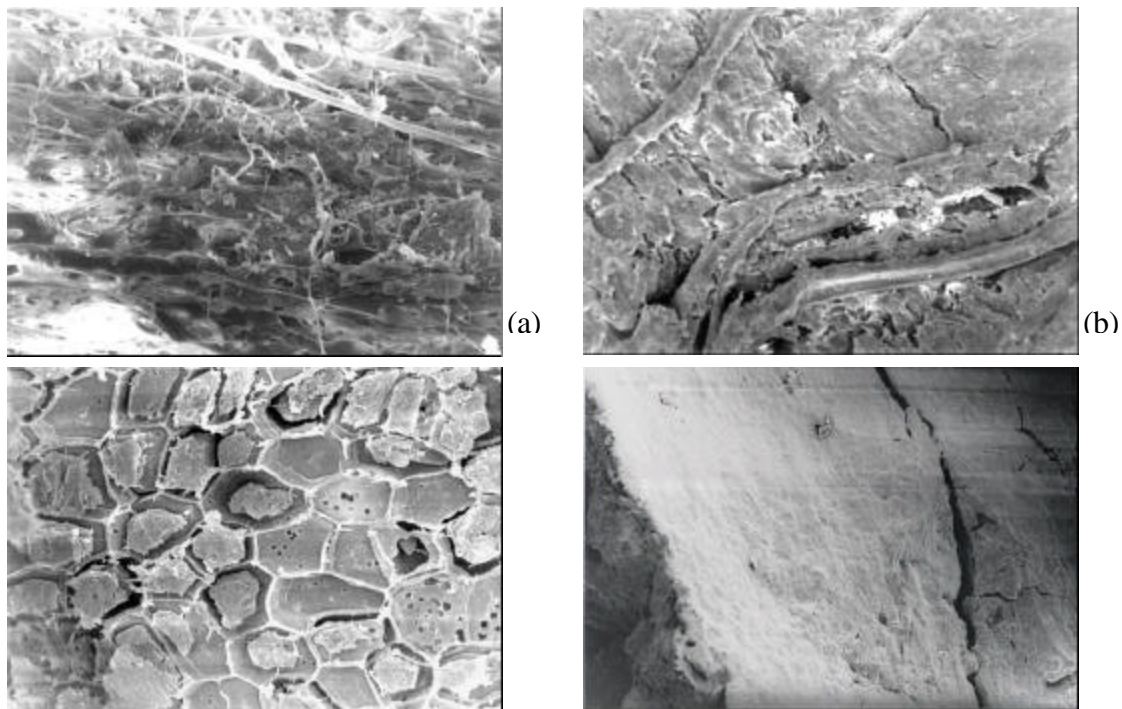


Figura 6 – Abundante trama de hifas na superfície do solo, com aumento de 750 vezes (a). Raiz e espelhamento com cristais de caulinita hexagonais e hifas fúngicas, com aumento de 150 vezes (b). Superfície hexagonal, perfeita, sob raiz, com aumento de 200 vezes (c). Superfície lustrosa da área da raiz, sem raízes, com adensamento e presença de trincas (fraturas), com aumento de 200 vezes (d). (Fotografias em microscópio eletrônico de varredura com 78 Pixel/cm)

O solo perto da superfície das raízes pode ser modificado em vários modos pela atividade da própria raiz ou por microrganismos presentes na rizosfera. O número de microrganismos aumenta enormemente próximo à superfície de raízes, sendo isto relacionado com a exsudação de substratos orgânicos (Foster, 1981), concorrendo também para a hidrofobicidade observada (Wallis & Horne, 1992).

4- CONCLUSÕES

1 - A compactação e perda da porosidade estende-se a maiores distâncias que a maior estudada (4cm do contato solo-raiz) para diâmetros de raiz superiores a 3,5 cm, sendo esse efeito acompanhado de redução na infiltração de água na superfície de contato solo/raiz.

2 - O crescimento da raiz determina a formação de fraturas de cisalhamento alinhadas, em ângulos inferiores a 90° de modo geral, em relação à superfície de contato, em que mostra ser um efeito compensador da perda de porosidade para a percolação de água.

3 - A redução da velocidade de infiltração de água *in situ* parece mais relacionado a de mecanismos químicos (hidrofobicidade) que físicos (compactação).

4 - Técnicas micromorfológicas e análises de imagens mostram-se eficazes no estudo da compactação causada por raízes de eucalipto.

5 - A morfologia microscópica do contato solo-raiz mostra feições de orientação de argila, microfaturas, cobertura superficial por hifas fúngicas e efeitos de espelhamento.

5- LITERATURA CITADA

- ALVARENGA, R.C; COSTA, L.M. MOURA FILHO, W. & REGAZZI, A.J. Crescimento de raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. R. Bras. Ci. Solo, 20:319-326, 1996.
- BENNIE, A.T.P., & BURGER R.du.T. Penetration resistance of fine sandy soils as affected by relative bulk density, water content and texture. S. Afri. J. Plant Soil, 5:5-10, 1988.
- BROWN, H.J., CRUSE, R.M. & ERBACH, D.C. Tractive device effects on soil physical properties. Soil Till. Res., 22-1:41-53, 1992.
- BROWN, J.L. Etude de la perturbation des horizons du sol par un arbre qui se renverse et de son impact sur la pédogénese. Can J. Soil Sci. 57: 173-186, 1977.
- BORGES, E.N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G.F. & COSTA, L.M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. R. Bras. Ci. Solo, 21:125-130, 1997.

- CAMARGO, O.A. Compactação do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas, Fundação Cargill, 1983. 44p.
- CARSON, E.W. Root behavior as affected by soil structure and strength. In: The plant root and its environment. 694p. p.271-291. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974.
- CARVALHO, A.F. Emprego da agitação horizontal na avaliação da estabilidade de agregados de cinco solos da Região Sudeste. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, 1991. 73p. (Tese de mestrado).
- COSTA, J.B. Caracterização e constituição do solo. Lisboa: Calouste Gulbenkian. 3 ed., 1985. 527p.
- DEXTER, A. R. Compression of soil around roots. *Plant Soil*, 97:401-406, 1987.
- FAHN, A. *Plant Anatomy*. Oxford : Butterworth-Heinemann. 4^a Ed. 1995, 588p.
- FARIA, J.C. ; SCHAEFER, C.E.G.R. ; RUIZ, H.A. & COSTA, L.M. Effects of weed control on physical and micropedological properties of a Brazilian Ultisol. *Rev. Bras. Ci. Solo*, 22 :731-741, 1998.
- FERNANDES, R.B.A. Influência das características químicas, físicas e mineralógicas na compactação de três latossolos. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 117p. (Tese de mestrado).
- FOSTER, R.C. Ultrastructure and histochemistry of the rhizosphere. *New Phytol*, 89:263-273, 1981.
- GOMES, T.C.A. Análise de trilha no estudo de fatores físicos e químicos relacionados ao adensamento e,ou, à compactação em dois solos do norte de

Minas Gerais. Viçosa-MG Universidade Federal de Viçosa, 1996. 105p. (Tese de mestrado)

GREACEN, E. L; SANDS, R. Compaction of forest soils – A review. Aust. J. Soil Res., 18-2:163-189, 1980.

LOPES, A.S. Manual de fertilidade do solo. São Paulo: ANDA/POTAFOS, 1989. 155p.

NADIAN, H.; SMITH, S.E.; ALSTON, A.M. & MURRAY, R.S. The effect of soil compaction on growth and P uptake by *Trifolium subterraneum*: interactions with mycorrhizal colonization. Plant Soil, 182:39-49, 1996.

OLSZEWSKI, N. Morfologia de agregados de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo por meio da análise de imagens. Viçosa-MG, Universidade Federal de Viçosa, 2000, 53p. (Tese de mestrado).

RAVEN, P.H.; EVERT, R.F & CURTIS, H. Biologia Vegetal. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois S.A., 1978. 724p.

RICHNER, W., LIEDGENS, M., BÜRGI, H., SOLDATI, A. & STAMP, P. Root image analysis and interpretation. In: SMIT, A.L., BENGOUGH, A.G., ENGELS, C., VAN NOORDWIJK, M., PELLERIN, S. & VAN DE GEIJN, S.C(eds) . Root methods: A Handbook. Berlin: Editora Springer-Verlag, 2000. pp 305-342. .

RYAN, P.J. & MCGARITY, J.W. 1983. The nature and spatial variability of soil properties adjacent to large forest Eucalyptus. Soil Sci. Soc. Am. J. 47:286-293.

SCHAEFER, C.E.G.R.; SOUZA, C.M.; VALLEJOS M., F.J.; VIANA, J.H.M.; GALVÃO, J.C.C. & RIBEIRO, L.M. Características da porosidade de um

Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. R. Bras. Ci. Solo, 25:775-779, 2001.

VIANA, J.H. & FERNANDES FILHO, E.I. Quantiporo: um novo programa para tratamento e quantificação de imagens digitais para aplicação em ciência do solo. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Londrina-PR, 367p. programa e resumos. 2001. p.224.

WALLIS, M.G. & HORNE, D.J. Soil water repellency. Advances in Soil Science, 20:98-146, 1992.

WHITE, E.M. Soil compactation and contraction around plant root. Soil. Sci. 119:461-465, 1975.

YOUNG, I.M. Biophysical interactions at the root-soil interface: A review. J. Agric. Sci., 130:1-7, 1998.

APÊNDICE



Figura 1A – Fotografias sob câmera digital de blocos compactados na interface solo-raiz.

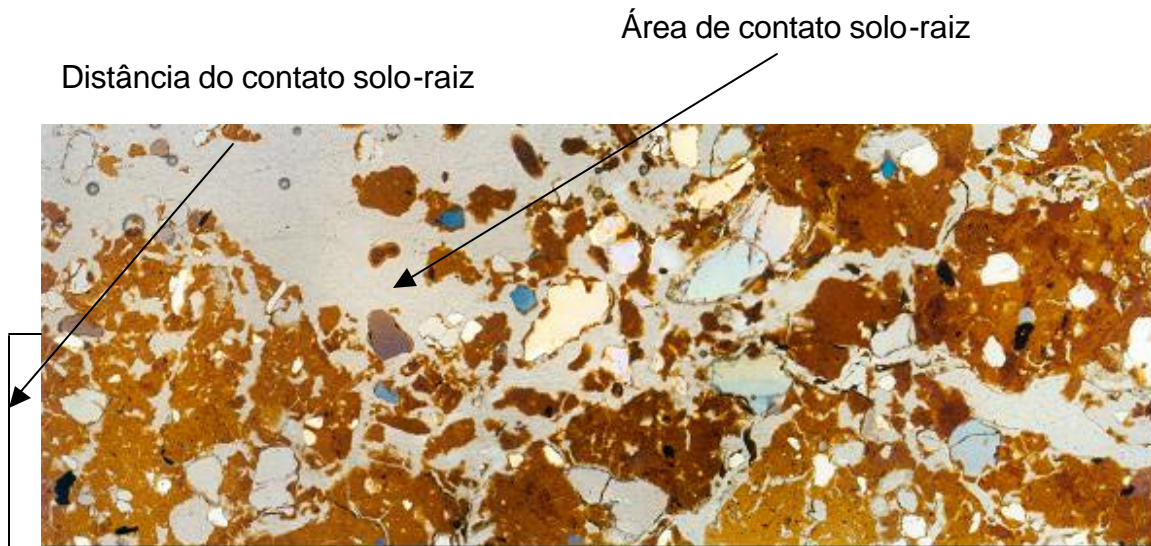


Figura 2A – Mosaico de fotomicrografias sob microscópio petrográfico, com aumento de 40 vezes, a 2 mm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes de 0,3 cm de diâmetro.
Dimensão: 37,72 x 14,10 cm
59 Pixel/cm

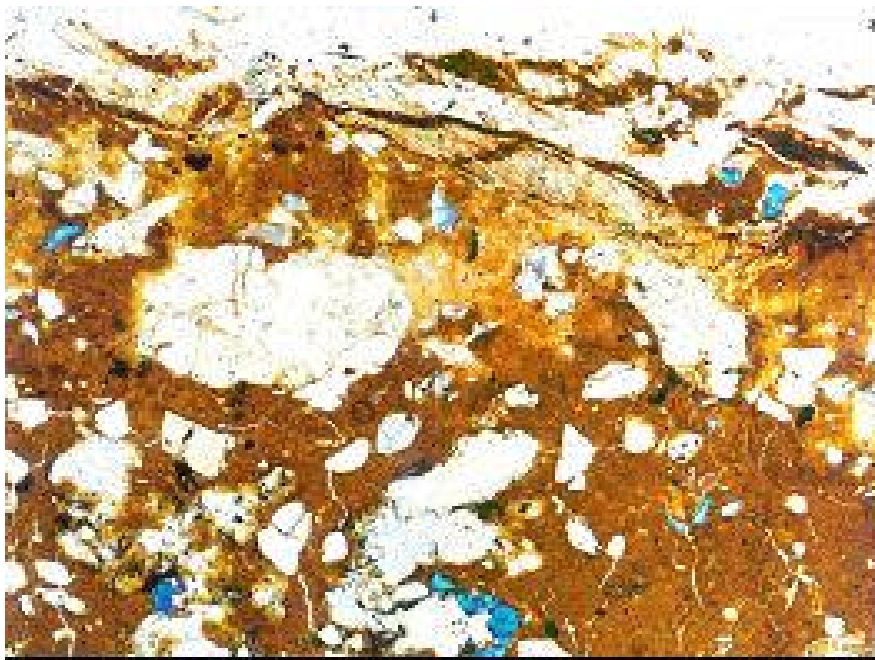


Figura 3A – Mini-mosaico de fotomicrografias sob microscópio petrográfico, com aumento de 40 vezes, a 2 mm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes de 6,4 cm de diâmetro.
Dimensão: 127,98 x 96,19cm
12 Pixel/cm

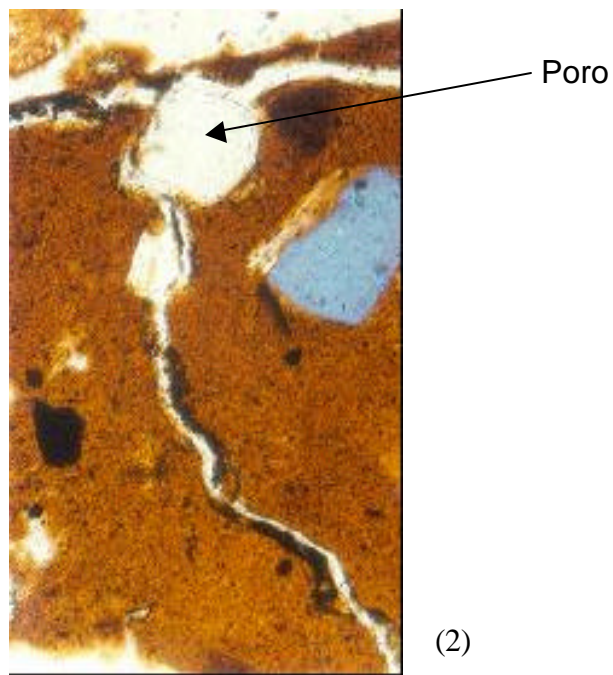
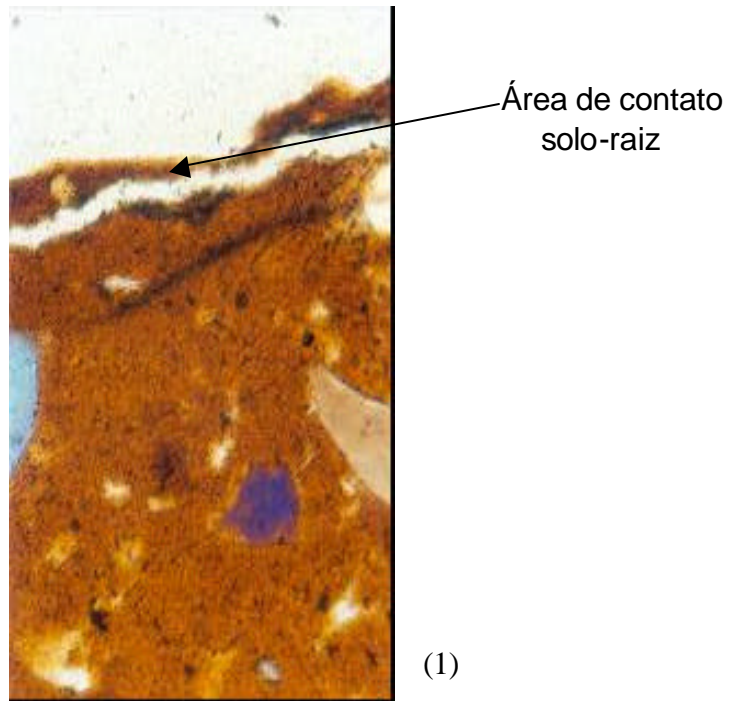


Figura 4A – Fotomicrografias sob microscópio petrográfico, com aumento de 100 vezes, a 2 mm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes 10,2 cm de diâmetro.

Dimensão: 9,94 x 14,17 cm (1)
9,73 x 14,52 cm (2)
78 Pixel/cm

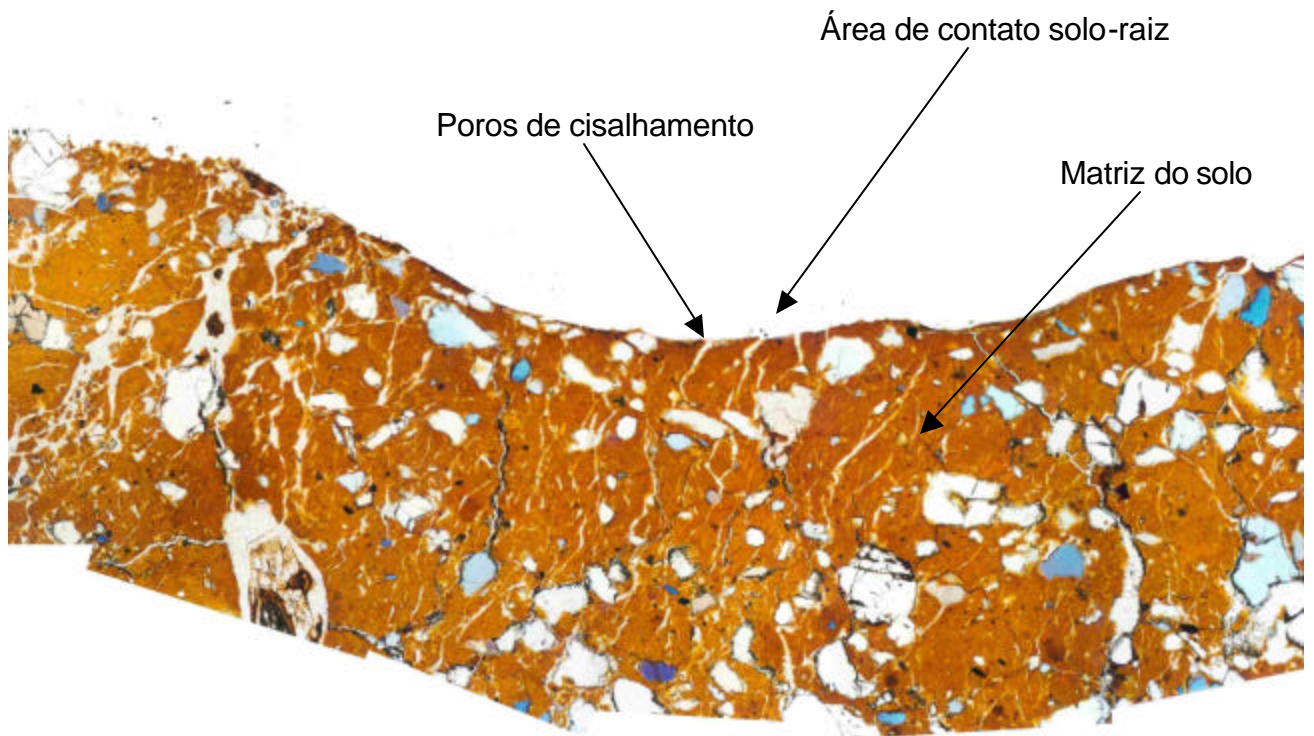


Figura 5A – Mosaico de fotomicrografias sob microscópio petrográfico, com aumento de 40 vezes a 2 mm de distância do contato solo-raiz.
Dimensão: 21,87 x 57,47cm
78 Pixel/cm

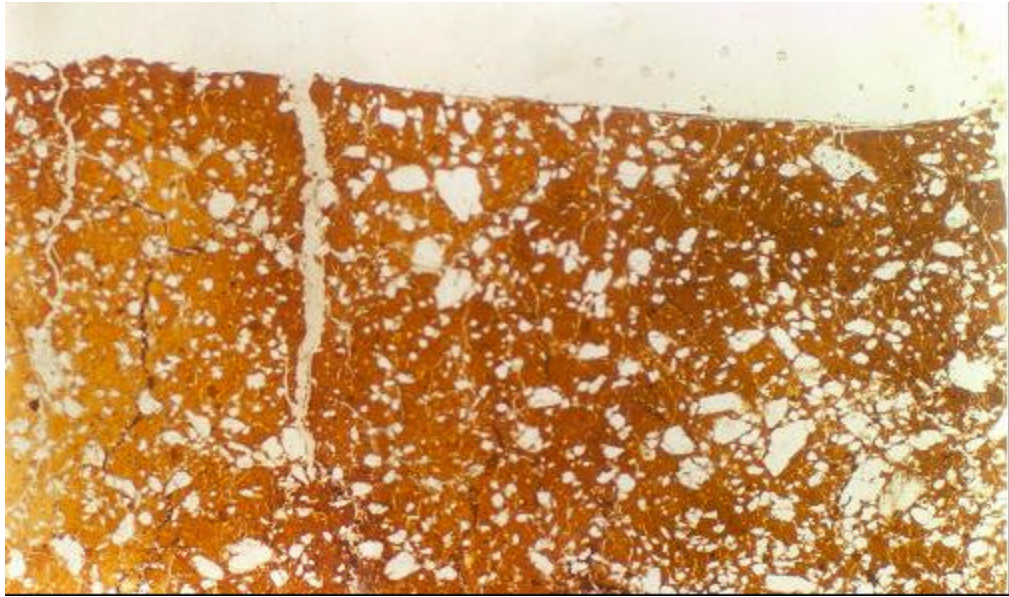


Figura 6A – Mosaico de fotomicrografias sob lupa binocular, com aumento de 10 vezes, a 1cm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes 8,0 cm de diâmetro.
Dimensão: 23,09 x 13,53 cm
78 Pixel/cm

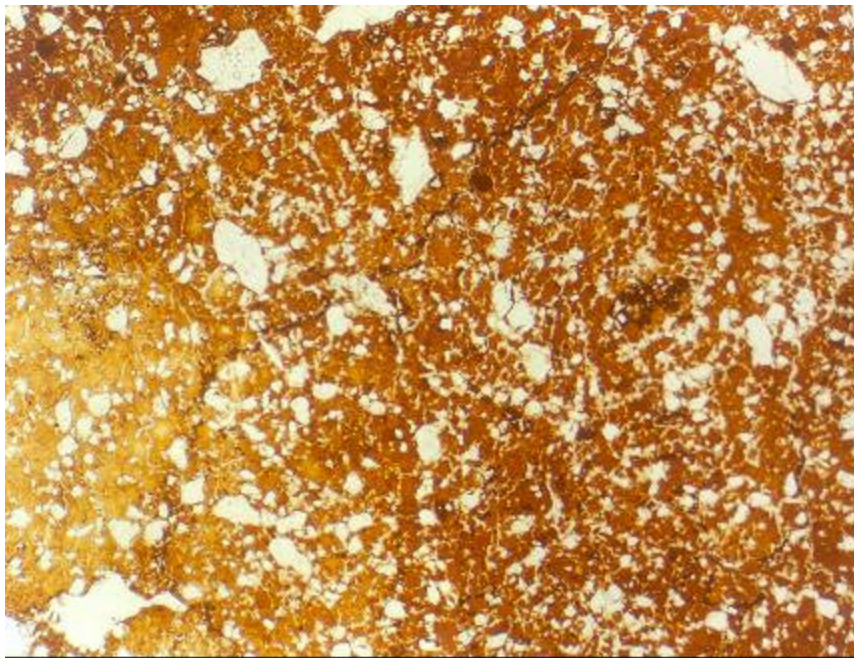


Figura 7A – Mosaico de fotomicrografias sob lupa binocular, com aumento de 10 vezes, a 3 cm de distância do contato solo-raiz, em amostras compactadas por raízes 8,0 cm de diâmetro.
Dimensão: 17,87 x 13,72 cm
78 Pixel/cm

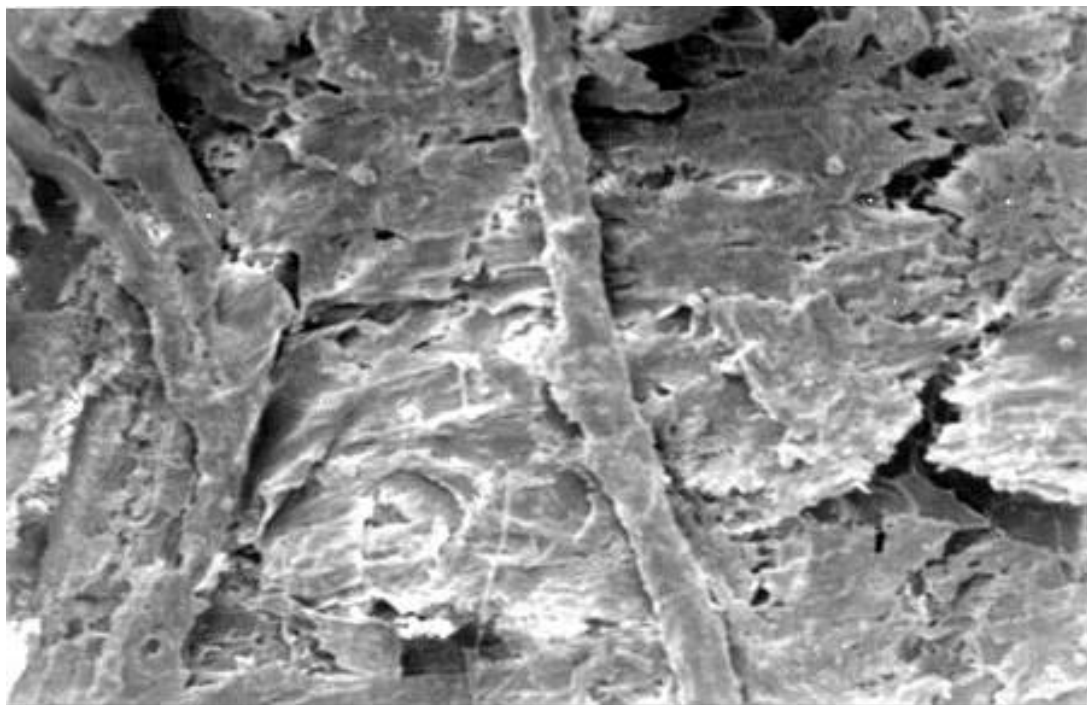


Figura 8A - Fotografia em microscópio eletrônico de varredura com aumento de 200 vezes, superfície de descolamento com hifas fúngicas.
Dimensão: 15,17 x 9,76
78 Pixel/cm

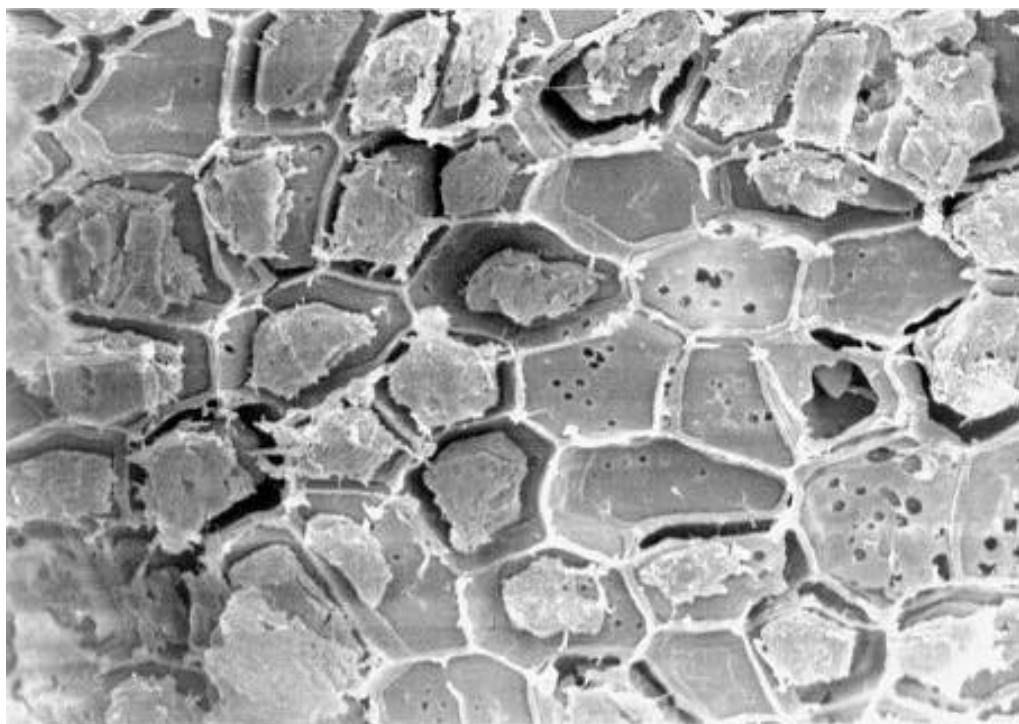


Figura 9A - Fotografia em microscópio eletrônico de varredura com aumento de 500 vezes, superfície hexagonal, perfeita, sob raiz.
Dimensão: 14,02 x 9,83cm
78 Pixel/cm

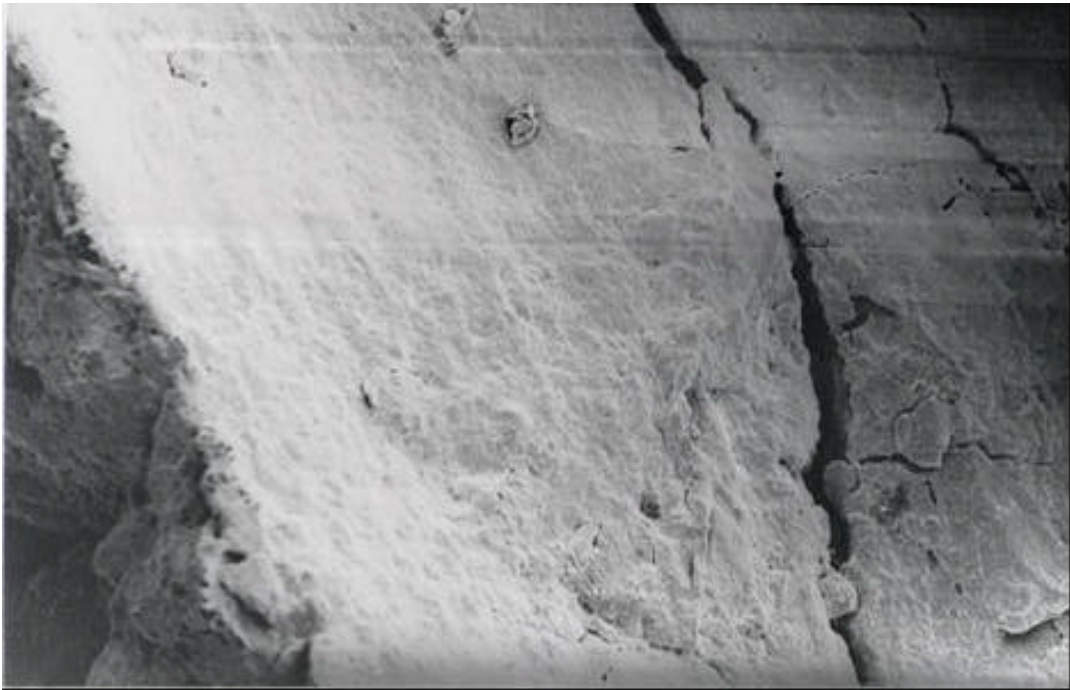


Figura 10A - Fotografia em microscópio eletrônico de varredura com aumento de 200 vezes, superfície lustrosa da área da raiz, sem raízes, com adensamento e presença de trincas (fraturas).
Dimensão: 11,59 x 7,42cm
59 Pixel/cm

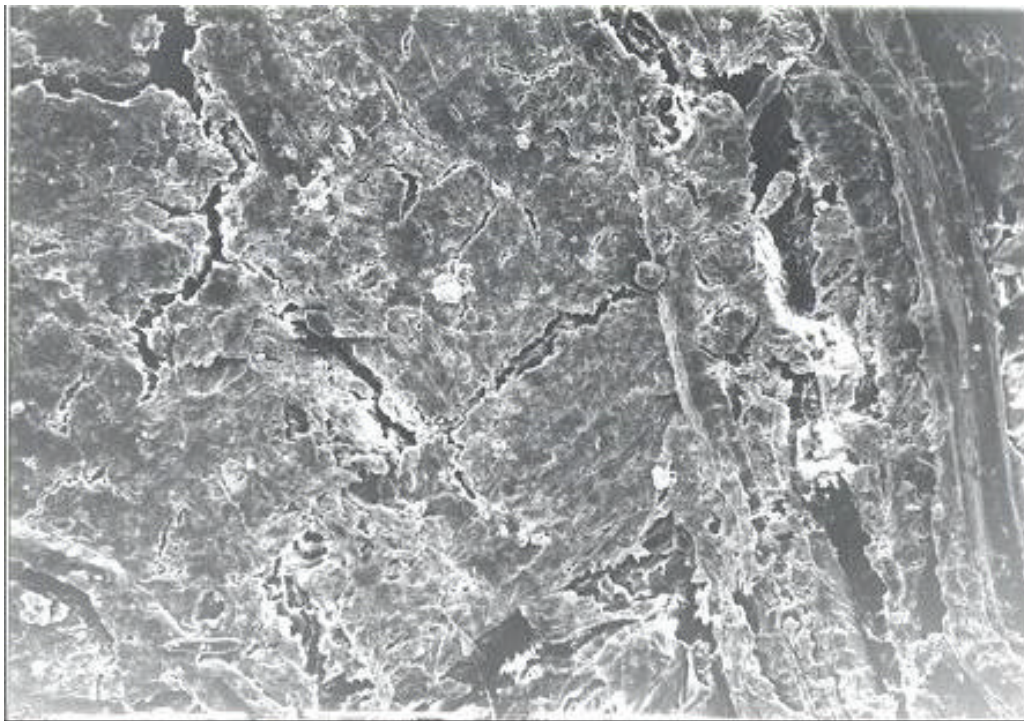


Figura 11A - Fotografia em microscópio eletrônico de varredura com aumento de 750 vezes, superfície lustrosa, sem raízes e fraturas.

Dimensão: 14,24 x 9,98cm
59 Pixel/cm



Figura 12A - Fotografia em microscópio eletrônico de varredura com aumento de 3500 vezes, ultradetalhe da orientação das partículas de argila sob raiz.

Dimensão: 13,62 x 9,01cm
59 Pixel/cm