

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUÍSA BRAZ DA SILVA RAMOS

**ESTUDO DO GANHO DE RESISTÊNCIA E DA ESTABILIZAÇÃO
QUÍMICA PELA ADIÇÃO DO COPRODUTO KR NO
MELHORAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS**

VITÓRIA

2018

LUÍSA BRAZ DA SILVA RAMOS

**ESTUDO DO GANHO DE RESISTÊNCIA E DA ESTABILIZAÇÃO
QUÍMICA PELA ADIÇÃO DO COPRODUTO KR NO
MELHORAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil da Universidade Federal do Espírito
Santo.

Orientador: D. Sc. Patrício José Moreira Pires

VITÓRIA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

R175e Ramos, Luísa Braz da Silva, 1991-
Estudo do ganho de resistência e da estabilização química
pela adição do coproduto KR no melhoramento de solos
argilosos / Luísa Braz da Silva Ramos. – 2018.
161p. : il.

Orientador: Patrício José Moreira Pires.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Solos argilosos. 2. Resistência não drenada. 3. Coproduto
de aciaria. 4. Solos moles. I. Pires, Patrício José Moreira.
II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico.
III. Título.

CDU: 624

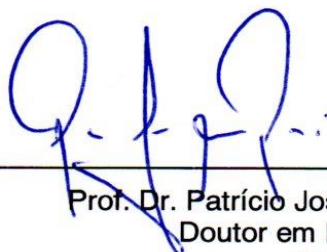
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

ESTUDO DO GANHO DE RESISTÊNCIA E DA ESTABILIZAÇÃO QUÍMICA PELA ADIÇÃO DO COPRODUTO KR NO MELHORAMENTO DE SOLOS ARGILOSOS

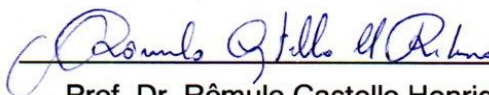
Luísa Braz da Silva Ramos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

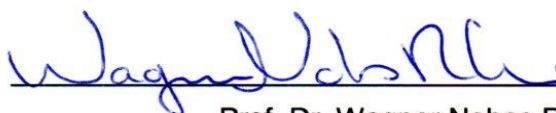
Aprovada no dia **16 de agosto de 2018** por:



Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Doutor em Engenharia Civil
Orientador - UFES



Prof. Dr. Rômulo Castello Henriques Ribeiro
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno - UFES



Prof. Dr. Wagner Nahas Ribeiro
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo - UFES

Vitória – ES, agosto de 2018

"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.

Arthur Schopenhauer

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus.

À minha família que sempre esteve presente em todos os momentos da minha vida. Sempre por perto para me apoiar e incentivar. Vocês são a minha base.

Ao meu marido Raffael, parceiro e companheiro desde o ensino médio. Sem seu apoio não seria possível chegar até aqui, sempre acreditou no meu potencial quando onde nem eu mesma poderia imaginar. Obrigada por tudo.

À todos os meus amigos de mestrado, mas em especial a Caroline, Rogério, Carlos Magno e Vinícius que me ajudaram, batalharam e me incentivaram desde o início quando ingressei na Universidade, onde tudo era novidade. Vocês são muito especiais.

Aos membros da banca examinadora por aceitarem o convite e por avaliarem com critério e dedicação este trabalho.

Aos técnicos do laboratório de solos, Sidineidy, Natália, Leonaldo e Deiverson. Obrigada por sempre estarem dispostos a me ajudar. Também aos monitores do laboratório que sempre me auxiliaram na execução dos ensaios.

Aos técnicos do laboratório de materiais de construção civil por terem auxiliado nos ensaios.

Ao professor orientador Patrício, por acreditar neste trabalho e em mim. Obrigada pela dedicação e pelo apoio em todos os momentos.

Ao Miguel por ele e seu laboratório estarem sempre disponíveis para execução dos ensaios.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Devido ao aumento da demanda da construção civil, cresce a necessidade de construir em regiões cujo solo não apresenta condições de resistência mínima adequadas a receber carregamentos. No sentido de tornar essas regiões úteis à construção civil de forma geral, é fundamental garantir o conhecimento das propriedades do solo e de técnicas capazes de melhorar seu desempenho geotécnico. A remoção de solos inadequados nem sempre é possível do ponto de vista técnico e econômico, seja pela dimensão da zona de ocorrência do material, ou pela espessura e profundidade da camada. Em muitos casos, técnicas de estabilização apresentam-se como solução mais eficiente e são, portanto, largamente empregadas no meio geotécnico. Por este motivo, esta pesquisa visa aprofundar o conhecimento das técnicas de estabilização de solos e avaliar o uso de um novo produto siderúrgico, o co-produto de dessulfuração KR (KambaraReactor) como estabilizante químico para solos de baixa consistência. O co-produto KR, resíduo gerado no processo de fabricação do aço, também vem sendo utilizado com sucesso em outras áreas da construção civil por promover melhoras nas características de solos e por ser abundante na região. No sentido de conhecer melhor o coproduto e avaliar seu potencial como estabilizante, realizou-se inicialmente ensaios de caracterização do coproduto e do solo. Nesta fase, foram feitos, para o coproduto, ensaios de análise granulométrica, massa específica, expansão PennsylvaniaTestingMethod (PTM), pozolanicidade, difração de raio-x e fluorescência de raio-x e, para um solo de alta plasticidade, realizou-se a caracterização geotécnica, difração e fluorescência raio-x. Em um segundo momento, a fim de avaliar a ação do coproduto, realizou-se ensaios de resistência não drenada, Vane Test, Cone Fall Test e de Adensamento unidimensional com o solo natural e para as misturas. Os resultados apontaram que o coproduto é capaz de promover aumento na resistência não drenada do solo, apresentando comportamento pozolânico e também é possível garantir que o ganho de resistência é função da umidade das amostras e da granulometria do co-produto empregado.

Palavras-chave: coproduto KR, argila de baixa consistência, resistência, estabilização de solos.

ABSTRACT

Due to the increase in the demand for construction, there is a growing need to build in regions where the soil does not present conditions of minimum resistance adequate to receive loads. In the sense of making these regions useful to civil construction in general. It is fundamental to guarantee the knowledge of soil properties and techniques capable of improving their geotechnical performance. The removal of inadequate soil is not always possible from a technical and economic point of view, either by the size of the area of occurrence of the material or by the thickness and depth of the layer. In many cases stabilization techniques present themselves as a more efficient solution and are therefore widely used in the geotechnical environment. For this reason, this research aims at deepening the knowledge of soil stabilization techniques and evaluating the use of a new steel product, the KR desulfurization co-product (KambaraReactor) as a chemical stabilizer for low consistency soils. The KR co-product, which has been reclaimed in the steelmaking process, has also been used successfully in other areas of civil construction for promoting improvements in soil characteristics and for being abundant in the region. In order to better know the co-product and to evaluate its potential as a stabilizer, characterization tests of the co-product and soil were carried out. In this phase, particle size analysis, specific gravity, Pennsylvania Testing Method (PTM) expansion, pozzolanicity, x-ray diffraction and x-ray fluorescence were performed for the co-product and for a high plasticity soil the geotechnical characterization, diffraction and fluorescence -x. In a second moment, in order to evaluate the action of the coproduct, tests of non-drained resistance, Vane Test, Cone Fall Test and of unidimensional density with the natural soil for the mixtures were reanalyzed. The results indicated that the co-product is capable of promoting increase in the soil's non-drained resistance, presenting pozzolanic behavior and that the resistance gain is due to the moisture of the samples and the fineness of the co-product used.

Key-words: KR co-product, clay of low consistency, resistance, soil stabilization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação da sensibilidade	11
Tabela 2: Componentes químicos do coproduto KR.....	30
Tabela 3: Programa Experimental	34
Tabela 4: Misturas realizadas e suas composições.....	42
Tabela 5: Resultado da classificação dos solos	46
Tabela 6: Análise quantitativa de óxidos presentes no coproduto KR.....	49
Tabela 7: Resultados de pH.....	52
Tabela 8: Resultados de resistência não drenada pelo ensaio de cone aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura.....	54
Tabela 9: Resultados de Cone Fall para misturas com um material.....	55
Tabela 10: Resultados de Cone Fall para misturas com dois materiais.....	56
Tabela 11: Resultados de resistência não drenada pelo ensaio de Vane aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura.....	58
Tabela 12: Resultados de Vane Test para misturas com um material	59
Tabela 13: Resultados de Vane Test para misturas com dois materiais.....	60
Tabela 14: Resultados dos ensaios de adensamento.....	63
Tabela 15: Resultados dos índices físicos das misturas que foram feitos os ensaios de Cone Fall.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Técnicas de melhoramento de solos moles usuais.....	12
Figura 2: Interferência do valor de pH com relação a resistência a compressão não confinada.....	14
Figura 3: Evolução da melhoria do solo com o passar do tempo de acordo com a resistência mecânica. A) Cal; B) Cimento	15
Figura 4: Resistência versus quantidade de ligante.....	17
Figura 5: Influência da adição de água no valor da resistência com o aumento do tempo de cura	18
Figura 6: Comportamento do solo tratado e natural.....	19
Figura 7: Exemplos de coluna de solo tratado.....	19
Figura 8: Metodologia de execução do DeepSoilMixing.....	21
Figura 9: Detalhe esquemático do equipamento e do processo Stabtec®.....	22
Figura 10: Metodologia de execução do CPR Grouting®	24
Figura 11: Metodologia de execução do JetGrouting®.....	25
Figura 12: Fluxo Simplificado da produção do aço	27
Figura 13: Produção da escória de dessulfuração KR	29
Figura 14: Localização do local de coleta	32
Figura 15: Aparelho do Cone Fall Test com as posições de penetração	37
Figura 16: Seção transversal mostrando as profundidades ensaiadas (medidas em centímetros).	38
Figura 17: Aparelho do Vane Test.	39
Figura 18: Aparelho do adensamento.....	40
Figura 19: Etapas da preparação e moldagem dos corpos de prova	43/44
Figura 20: Etapas da preparação e moldagem dos corpos de prova.....	45
Figura 21: Curva de compactação na energia modificada do coproduto KR.....	47
Figura 22: Expansão PTM durante 14 dias	47
Figura 23: Difratometria do solo.....	50
Figura 24: Difratograma do coproduto KR	51
Figura 25: Phmetro	52
Figura 26: Resistência obtida com o ensaio de Cone versus pH.....	53

Figura 27: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Cone Fall para as misturas com um material em todos os tempos de cura.....	55
Figura 28: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Cone Fall para as misturas com dois materiais para os tempos de 14 e 28 dias.....	56
Figura 29: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Vane Test para as misturas com um material em todos os tempos de cura.....	59
Figura 30: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Vane Test para as misturas com dois materiais para os tempos de 14 e 28 dias.....	60
Figura 31: Resultados das sensibilidades	62
Figura 32: Resultados de Cv para todas as misturas	64
Figura 33: Resultados de Cv para tensão de 10 KPa.....	64
Figura 34: Correlação entre o teor de saturação e o índice de vazios das misturas.....	65
Figura 35: Correlação entre a resistência não drenada pelo ensaio de Triaxial UU e o índice de vazios das misturas	66
Figura 36: Correlação entre o teor de umidade final e o índice de vazios	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características e técnicas de melhoramento de solos	13
Quadro 2: Avaliação do efeito de ligantes na estabilização de solos Nórdicos tendo por base resistência à compressão não confinada em 28 dias de cura.....	16/17
Quadro 3: Vantagens e desvantagens da aplicação da escória de aciaria	28
Quadro 4: Exigências para classificação de material pozolânico	35/36
Quadro 5: Resultados dos ensaios	48

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BOF – Basic OxygenFurnace

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CP III – Cimento Portland de alto forno

CPR - Consolidação Profunda Radial

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagens

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX – Difração Raio-x

DSM – DeepSoilMixing

ES – Espírito Santo

FCT - Cone Fall Test

FRX – FluorescênciaRaio-x

HRB - Highway Research Board

IBS – InstitutoBrasileiro de Siderurgia

ISO - International Organization for Standardization

IAB - Instituto Aço Brasil

KG - Quilograma

KR – KambaraReactor

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

MM - Milímetro

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PH - Potencial Hidrogeniônico

PTM – Pennsylvania Test Method

RS – Resistente a Sulfato

SU - Resistência não Drenada

SUCS - Sistema Unificado de Classificação de Solos

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 Objetivos.....	9
1.2 Organização do trabalho	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 Métodos de estabilização e características de solos argilosos	11
2.2 Estabilização de solos: técnicas de melhoramento de solos argilosos.....	18
2.2.1 Estabilização em massa	21
2.2.2 CPR Grouting	23
2.2.3 Jet Grouting	24
2.3 Resíduos	18
2.4 Co-produto de Dessulfuração KR.....	6
3 MATERIAIS E METODOLOGIA.....	32
3.1 Materiais	32
3.1.1 Solo.....	33
3.1.2 O Resíduo de Siderurgia.....	33
3.1.3 Cimento Portland.....	33
3.1.4 Areia Quartzosa	33
3.2 Metodologia dos ensaios	34
3.2.1 Etapa I: Caracterização dos materiais.....	34
3.2.1.1 Ensaios de Caracterização Física.....	35
3.2.1.2 Ensaios de Caracterização Química	35
3.2.2 Etapa II: Melhoramento do solo	37
3.2.2.1 Cone Fall Test.....	37
3.2.2.2 Vane Test.....	38
3.2.2.3 Adensamento	39

3.2.2.4 Misturas utilizadas.....	40
3.2.3Preparação dos corpos de prova para a realização dos ensaios de Cone Fall Test e Vane Test	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Etapa I: Caracterização.....	45
4.1.1 Caracterização Física.....	45
4.1.2 Caracterização Química.....	47
4.1.2.1 Fluorescência de raios-X	49
4.1.2.2 Difração raio-X.....	50
4.1.2.3 Determinação do pH.....	51
4.1.2.4 Correlação entre o valor de pH da mistura e o valor de resistência	53
4.2 Etapa II: Estabilização/melhoramento de solo	54
4.2.2 Cone Fall Test.....	54
4.2.2 Vane Test.....	58
4.2.3 Resultados dos valores de sensibilidade de todas as misturas realizadas.....	61
4.3 Adensamento	62
4.4 Correlação entre resistência não drenada e os índices físicos	65
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	32
5.1 Conclusão	32
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	32
6 REFERÊNCIAS	70
7 APÊNDICE	78

1 INTRODUÇÃO

O progressivo avanço da construção civil, devido ao crescimento urbano e pelo crescimento econômico, tem guiado ao aumento da ocupação em áreas com solos de baixa consistência e alta compressibilidade, comumente encontrados em regiões litorâneas.

Devido a necessidade de se utilizar solos de baixa consistência estudos são realizados, por meio de campanhas de investigação geotécnica, de diversos depósitos de solos moles distribuídos ao longo de toda a costa brasileira, sendo os mais estudados os da Baixada Fluminense, Baixada Santista e vários trechos de solo mole nas cidades de Recife, Porto Alegre e Florianópolis, a maior parte deles envolvendo grandes obras de infraestrutura (ALMEIDA e MARQUES, 2010). No Espírito Santo, destacam-se os estudos sobre solos sedimentares de origem marinha da região da Grande Vitória, realizados pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em que os resultados de ensaios de adensamento, realizados desde 1972, foram analisados na tentativa de estabelecer-se correlações e linhas de comportamento gerais (CASTELO e POLIDO, 1986, 1988).

Portanto, aparece a busca por novos materiais e novas técnicas de melhoramento de solo. A partir disso, surge o conceito da utilização de resíduos, devido ao potencial que podem ter em outras áreas, como na construção civil. Destaca-se o de maior geração no país, que é a escória proveniente da obtenção do aço, seja ela de alto-forno, ou de aciaria. O relatório de sustentabilidade apresentado pelo Centro de Coprodutos Aço Brasil mostra que em 2015 a geração de resíduos foi de 594 Kg por tonelada de aço produzida.

Para obras em solos de baixa consistência, vários parâmetros geotécnicos são analisados, como plasticidade, compressibilidade, entre outros. Dentre os parâmetros de solos de baixa consistência, a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) é o parâmetro de projeto mais importante para análises de estabilidade de curto prazo (SHOGAKI, 2006). Na determinação desses parâmetros, ensaios laboratoriais e de campo são importantes.

Lunne *et al.* (1997) afirmam não existir um único valor para S_u , *in situ*, dependendo este valor do modo de ruptura, da anisotropia do solo, da taxa de deformação e do histórico de tensões. Sendo o valor de S_u , dependente, dentre outros fatores, do tipo de ensaio, é importante para definição de resistência de projeto entender a relação entre as resistências determinadas por cada tipo de ensaio, como também é importante se estabelecer a confiabilidade destas determinações (WATABE *et* TSUCHIDA, 2001).

A partir do exposto, este projeto de pesquisa visa analisar a viabilidade técnica da utilização do coproduto KR na estabilização química de solos em camadas de solos moles argilosos. A presente pesquisa apresenta, primeiramente, uma revisão de literatura sobre os coprodutos siderúrgicos e sobre técnicas de estabilização química de solos. E traz como uma alternativa a incorporação de coproduto KR como estabilizante químico, no melhoramento de solos de baixa consistência, visando demonstrar a viabilidade técnica deste coproduto. Foram também descritos os procedimentos envolvidos na estabilização química de solos e suas técnicas e materiais usualmente utilizados e a maneira pela qual os coprodutos siderúrgicos podem ser incorporados às técnicas.

1.1 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é verificar, por meio de ensaios laboratoriais, o efeito da incorporação do coproduto KR em parâmetros físicos, químicos e mecânicos para sua utilização em técnicas de melhoramento de solo argiloso.

Os objetivos específicos são:

- Determinar experimentalmente a compressibilidade do solo e de suas misturas com coproduto KR por meio do ensaio de adensamento unidimensional.
- Verificar experimentalmente a influência que o coproduto KR causa nos valores de resistência não drenada do solo e de suas misturas com KR por meio de ensaios, Vane Test, Cone Fall Test.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em capítulos que abordam os seguintes tópicos:

- **Capítulo 1:** Introdução, objetivo e organização do trabalho – relatando a importância do estudo, seus objetivos e como será a estrutura da pesquisa.
- **Capítulo 2:** Revisão bibliográfica – para melhor entendimento sobre o assunto e como base para entendimento da pesquisa.
- **Capítulo 3:** Metodologia - materiais e misturas trabalhadas, os ensaios realizados e as normas vigentes e que foram utilizadas.

- **Capítulo 4:** Resultados e discussões – apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios e as discussões sobre eles, que conduzirão para a conclusão dos objetivos propostos.
- **Capítulo 5:** Conclusões e sugestões – apresentam-se as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Métodos de estabilização e características de solos argilosos

Um grande problema na engenharia geotécnica caracteriza-se em realizar melhorias físicas e químicas em solos moles argilosos, devido as suas características de elevada compressibilidade, baixa resistência e consistência. Quando se faz necessária a realização de obras sob esse tipo de solo sem que haja a sua substituição, precisam ser realizados estudos detalhados para se analisar qual alternativa deve ser adotada. Dentre diversas alternativas usuais, surgem técnicas de estabilização de solos argilosos por meio da adição de aglomerantes.

As vantagens da estabilização segundo EuroSoilStab (2002) são a elevação da capacidade de carga do solo, redução dos efeitos de recalques absolutos, funcionamento do solo estabilizado como uma plataforma para a construção, redução da variação de volume do solo devido a variação de temperatura ou umidade, aumento da durabilidade e diminuição da plasticidade do solo.

A estabilização de solos pode ser usada para tratar diversos tipos de solo. De acordo com a EuroSoilStab (2002), no entanto, as características do solo influenciam consideravelmente o resultado da estabilização e, por isso, é necessário que seja feito um estudo detalhado do solo que se pretende estabilizar. Ainda segundo a mesma, as principais propriedades dos solos que devem ser analisadas são os valores de resistência não drenada e da compressibilidade.

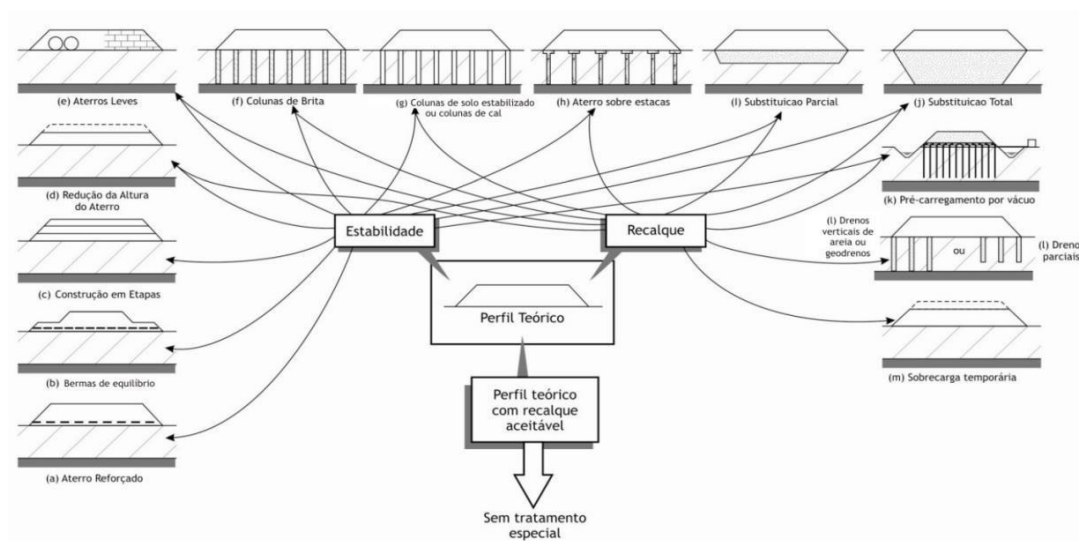
Segundo Pinto (2006), a resistência não drenada do solo pode ser obtida de três maneiras diferentes: (I) por meio de ensaios de laboratório; (II) por meio de ensaio de campo; e (III) por meio de correlações. Pinto (2006) ainda afirma que a resistência não drenada depende do índice de vazios do solo, e também da estrutura das argilas. A estrutura é ligada ao arranjo entre as partículas e as forças físico-químicas que as envolve. E essa estrutura que faz com que a argila remoldada apresente menor resistência quando comparada ao seu estado natural.

Já o estudo de compressibilidade dos solos é normalmente efetuado utilizando-se o oedômetro, que foi desenvolvido por Terzaghi para o estudo das características de compressibilidade e da taxa de compressão do solo com o tempo. Dentre os parâmetros de

compressibilidade que o engenheiro geotécnico necessita para a execução de projetos e o estudo do comportamento dos solos, destacam-se a pressão de pré-adensamento, o índice de compressão, C_c , e o coeficiente de adensamento, C_v .

Para Lopes (2011), os fatores principais são o custo, a finalidade da obra e as características dos materiais que compõem o solo. A substituição total ou parcial do solo é uma solução viável, entretanto acarreta altos custos e grande impacto ambiental. Dentre as técnicas de estabilização que são usualmente utilizadas, podem-se citar a utilização de sobrecarga, devido ao peso próprio do aterro que vai expulsar a fração de solo mole. Essa técnica é de difícil controle de qualidade, não garante uniformidade no terreno e o bota-fora gerado é elevado. E também a utilização de geodrenos, que elevam a condutividade hidráulica, reduzindo poropressões e acelerando os recalques. Cristelo (2001) confirma que para ele e alguns autores os métodos aplicados em processos de estabilização são a compactação, consolidação por sobrecargas, ou drenagem vertical, dentre outros que podem ser exemplificados e caracterizados na Figura 1 e no Quadro 1:

Figura 1: Técnicas de melhoramento de solos moles usuais



Fonte: Almeida (2018)

Quadro 1 - Características e técnicas de melhoramento de solos

CATEGORIA	TÉCNICAS	OBJETIVOS
Compactação	*Vibro compactação;	Aumentar a densidade, a capacidade de carga e a resistência ao atrito, aumentar a resistência à liquefação, reduzir a compressibilidade, aumentar a resistência de solos argilosos
	* Compactação dinâmica;	
	*Compactação com uso de explosivo;	
	* Compactação Grouting;	

	* Compactação de superfície (incluindo compactação de rápido impacto);	
Adensamento	* Pré carregamento sem drenos;	Acelerar o adensamento, reduzir os recalques, aumentar a resistência
	* Pré carregamento com drenos;	
	* Pré carregamento por vácuo;	
	* Eletrosmose;	
Redução de carregamento	* EPS	Reduzir o carregamento no solo de fundação, reduzir os recalques, aumentar a estabilidade do talude
	* Concreto aerado;	
	* Materiais leves para aterro (pneus picados, etc.);	
Reforço	* Micro estacas;	Inclusão de elementos de reforço no solo para melhorar as características de engenharia, promover estabilidade lateral
	* Solo grampeado/ancoragem;	
	* Colunas (colunas granulares, colunas granulares encamisadas, jetgrouting)	
	* Colunas com plataformas de transferência de cargas;	
	* Aterro reforçado com geossintético;	
Tratamento químico	* Deepmixing: via seca ou úmida;	Aumentar a densidade, aumentar a resistência, preencher os vazios, vedar infiltrações
	* Jet Grouting;	
	* Compactação Grouting;	
Estabilização térmica	* Congelamento do solo;	Aumentar a resistência ao cisalhamento, promover vedação
	* Aquecimento do solo e vitrificação;	
Estabilização biotécnica	* Uso de vegetação em taludes como reforço;	Aumentar resistência, reforçar
	* Métodos microbianos;	
Outros	* Métodos eletrocinéticos, químicos;	Remediar solos contaminados

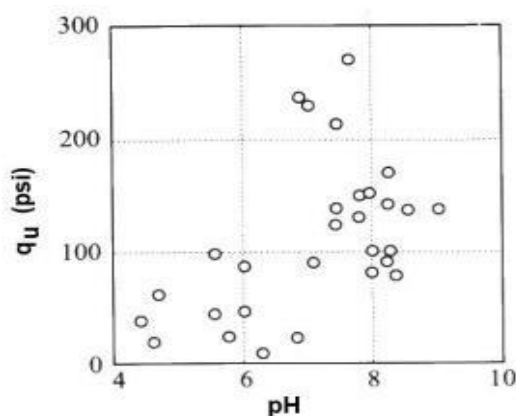
Fonte: Shaefer et al. (2012) adaptado

Quanto à estabilização por meio de adição de aglomerantes, também conhecida como estabilização química, esta depende das reações que acontecem no solo. Segundo Sandroni e Consoli (2010), a estabilização química consiste em melhorar, ou controlar a estabilização volumétrica, resistência mecânica e as propriedades tensão-deformação. Elas estão entre os principais objetivos da mistura de aditivos no solo. As reações mais comuns na estabilização são de troca catiônica com partículas de argilas, além das reações cimentícias e pozolânicas. Normalmente, os agentes químicos mais utilizados são o cimento Portland e a cal.

Sanches (2012) cita que as reações de hidratação ocorrem entre o ligante e a água existente no solo, essa reação é exotérmica, isto é, ocorre liberação de calor, o que facilita o início das reações pozolânicas. As reações pozolânicas, por sua vez, correspondem a reações iniciais com minerais pozolânicos, ou seja, a sílica e a alumina. Estes tipos de reações ocorrem quando o ligante é hidráulico, como o cimento. Quando os ligantes aumentam o valor do pH, propiciam as reações pozolânicas e em consequência direcionam o aumento da resistência do solo. Já a troca iônica, expressa uma pequena melhoria à resistência do solo tratado.

Com relação às alterações do pH da mistura, verifica-se que se os produtos da reação são expostos a um meio ácido, de um pH inferior a cinco, existe o risco de serem dissolvidos. Tal fato impediria que as reações de estabilização subsequentes ocorressem como é esperado (AHNBERG *et al.*, 1995). A situação pode condicionar a evolução esperada das reações químicas, o que, por outro lado, leva a uma necessidade superior de quantidade de ligante adicionado (FORTUNATO, 2012). A Figura 2 mostra a influência do pH em relação a resistência a compressão não confinada, comprovando que quanto mais ácido o meio, menor será a resistência a compressão não confinada.

Figura 2: Interferência do valor de pH com relação a resistência a compressão não confinada



Fonte: CDIT (2002)

Finalmente, salientam-se os ligantes comumente utilizados, cal e cimento Portland, uma vez que é um tópico que foi amplamente pesquisado e o número de publicações relacionadas com a estabilização são vastas. A estabilização do cimento aumenta a resistência à compressão, à tração e flexão, durabilidade e rigidez, propriedades do solo (AL-RAWAS *et al.*, 2005; BAHAR *et al.*, 2004; BROMS *et al.*, 1978; CROFT, 1967; KHAIR *et al.*,

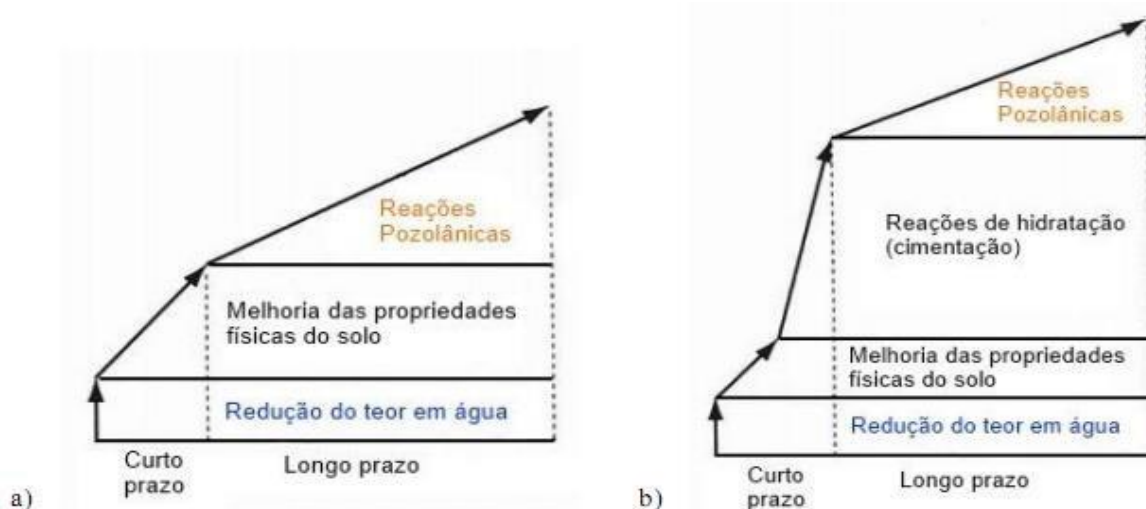
1991; MOLEIROE AZAD, 2000; MITCHELL, 1976; SEZER *et al.*, 2006; TANG *et al.*, 2007).

Para os ligantes tradicionais citados, as principais diferenças referem-se às reações químicas que ocorrem na evolução do ganho de resistência mecânica e na reação de hidratação, na mistura solo-cimento.

Comparativamente, os solos argilosos tratados com cal apresentam menor resistência, em relação aos tratados com cimento. Isto ocorre porque as reações químicas com a cal, intervenientes no processo de estabilização, correspondentes ao endurecimento do solo, são as reações pozolânicas que ocorrem de forma lenta e podem demorar anos.

No caso dos solos tratados com cimento, como o processo de hidratação (ligante sob a forma de pó), ou as reações de hidratação ocorrem rapidamente, em semanas, o aumento de resistência verifica-se de forma expressiva em curto prazo, conforme mostrado na Figura 3. Em seguida, ainda ocorrem às reações pozolânicas que conferem ao solo tratado uma resistência ainda superior (CDIT, 2002).

Figura 3: Evolução da melhoria do solo com o passar do tempo de acordo com a resistência mecânica. A) Cal; B) Cimento



Fonte: CDIT (2002)

Tanto o cimento Portland como a cal podem ser utilizados em diversas variedades de solo. Um fato importante sobre a mistura entre solo-cimento é que a quantidade de cimento necessário para estabilização aumenta à medida que o solo se torna mais fino. Croft (1968; *apud* Portelinha, 2008) esclarece que isto se deve ao fato de que os minerais argilosos do solo reagem com a cal formada no processo de hidratação do cimento e diminuem o pH da mistura afetando as reações de endurecimento.

Alguns pesquisadores, como Ajayi-Mejebi et al. (1991), Bolander (1999) e Tingle e Santoni (2003), sugerem a utilização de agentes não tradicionais como um método alternativo para a estabilização do solo. Neste contexto, aparecem os coprodutos como materiais alternativos, devido à facilidade de serem encontrados e a necessidade de serem descartados. Dentre os coprodutos disponíveis, destacam-se os coprodutos siderúrgicos por sua grande abundância na região.

Entretanto, o seu uso deve ser bem avaliado, principalmente devido à expansibilidade do material para obras de terraplenagem, o que é de suma importância a determinação dessa característica dos aglomerantes. Já para as técnicas de melhoramento de solos, a questão da expansão do coproduto não se aplica em sua execução, considerando que o solo ganhará resistência e irá se consolidar ocorrendo variação volumétrica independente da sua expansão. Conforme a *EuroSoilStab* (2001), para solos argilosos, com pouca matéria orgânica, todos os ligantes e suas combinações são satisfatórias (

Quadro 2).

Quadro 2- Avaliação do efeito de ligantes na estabilização de solos Nórdicos tendo por base resistência à compressão não confinada em 28 dias de cura

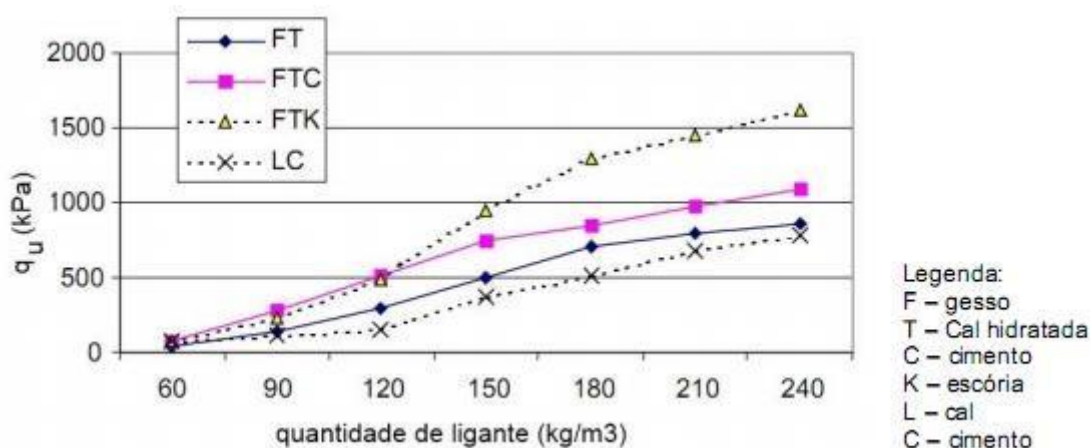
LIGANTE	SILTE (Quantidade M.O. - 0% a 2%)	ARGILA (Quantidade M.O. - 0% a 2%)	ARGILA (Quantidade M.O. - 2% a 30%)	TURFA (Quantidade M.O. - 50% a 100%)
Cimento	XX	X	X	XX
Cimento+Gesso	X	X	XX	XX
Cimento+Escória	XX	XX	XX	XXX
Cal+Cimento	XX	XX	X	-
Cal+Gesso	XX	XX	XX	-
Cal+Escória	X	X	X	-
Cal+Gesso+Escória	XX	XX	XX	-
Cal+Gesso+Cimento	XX	XX	XX	-
Cal	-	XX	-	-

Legenda
XXX- Aplicabilidade garantida
XX- Aplicável em muitos casos
X- Aplicável em alguns casos
- Não aplicável
M.O.- Matéria orgânica

Fonte: EuroSoilStab (2001)

De acordo com o Quadro 2, pode-se observar que em todos os solos, exceto o turfoso, a aplicação dos ligantes foi conveniente para o ganho de resistência. Porém, vale ressaltar, que para o solo turfoso, com a presença de 50 a 100% de matéria orgânica, o uso de cimento e de cimento com escória promoveu ganho de resistência. Estes resultados confirmam a viabilidade dos coprodutos siderúrgicos no lugar de um aglomerante habitualmente adotado.

Figura 4: Resistência versus quantidade de ligante

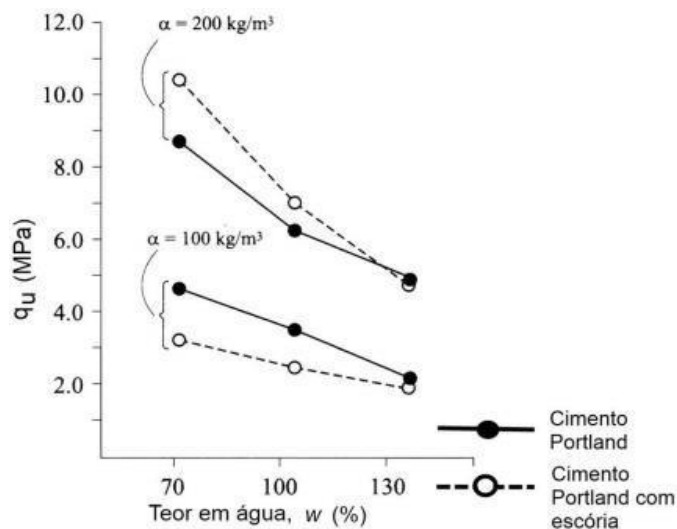


Fonte: EuroSoilStab (2001)

De acordo com a EuroSoilStab (2001), ensaios realizados em laboratórios com uma argila da Finlândia provaram que para várias combinações de ligantes, também com aditivos, quanto maior for a dosagem, maior será o valor de resistência não confinada (q_u) (Figura 4).

Tayro (2012; *apud* CDIT, 2002) apresenta na Figura 5 a influência da variação do teor de água na estabilização do porto de Yokohama com cimento Portland, com e sem escória. Percebe-se que o aumento da quantidade de água provoca redução da resistência à compressão não confinada, independente do tipo de ligante e da quantidade utilizada.

Figura 5: Influência da adição de água no valor da resistência com o aumento do tempo de cura



Fonte: CDIT (2002)

De acordo com Ahnberg (2006), as dosagens dos ligantes adicionados as argilas e a solos lamacentos são em torno de 4%/m³ e 8%/m³, respectivamente. Esses teores são efetivamente corretos se a mistura na hora da execução da técnica de melhoramento ocorrer devidamente. Além disso, é necessário efetuar um estudo sobre o solo que está sendo analisado e realizar vários testes com diferentes teores de ligante e de água, para detectar qual a dosagem ideal da mistura para estabilização. Adicionalmente fatores ambientais e financeiros envolvidos na aplicação de cada técnica.

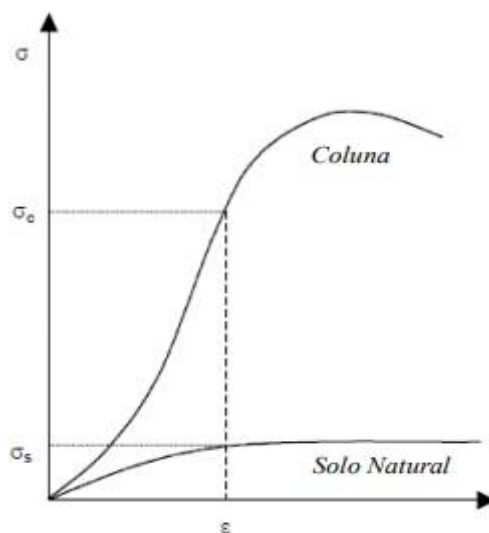
2.2 Estabilização de solos: técnicas de melhoramento de solos argilosos

Dentre os métodos de estabilização existentes, destaca-se como o mais difundido o Método de Estabilização Profunda. Trata-se da execução de colunas de solo tratado com aglomerantes secos ou em forma líquida conhecida como *DeepSoilMixing* (DSM), sendo mundialmente a mais utilizada. O seu desenvolvimento foi iniciado no Japão e Estado Unidos da América (BRUCE, 2000), sendo estes os principais responsáveis pela existência de estudos e ensaios realizados desta área.

O objetivo do processo da estabilização em colunas é a de produzir um solo tratado que interaja com solo não estabilizado. A carga aplicada será absorvida em parte pelas colunas de solo tratado e parte pelo solo não estabilizado, para que a inserção das colunas tenha interação com o solo natural do local e para que elas não trabalhem de maneira

independente. A Figura 6 mostra um exemplo do comportamento de tensão-deformação do solo natural e tratado pela estabilização profunda.

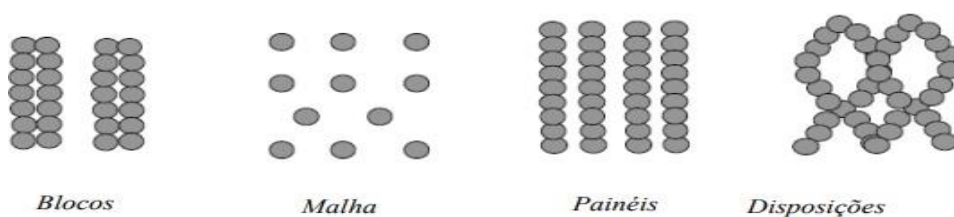
Figura 6: Comportamento do solo tratado e natural



Fonte: EuroSoilStab (2002)

Dependendo dos requisitos do projeto e da função que o solo estará sujeito após o melhoramento, as colunas podem ser feitas em diferentes geometrias, sendo em formatos de malhas, blocos, painéis, grades, entre outros, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7: Exemplos de coluna de solo tratado



Fonte: EuroSoilStab (2002)

As técnicas de mistura com o solo ocorrem com maior garantia em laboratório do que em campo, devido às amostras serem de tamanhos minorados, mas também, por ser possível observar as mudanças à medida que vai sendo homogeneizado, ocorrendo um maior controle no processo. Esta técnica possui elevada eficácia e pode ser aplicada a uma grande

variedade de solos, como os que possuem elevada quantidade de matéria orgânica, saturados ou moles.

Os objetivos principais desta técnica são o melhoramento das características do solo, como a permeabilidade, resistência mecânica e a deformabilidade (LARSSON, 2005), com a finalidade de se permitir obras, onde antes não eram permitidas. Essa técnica recorre às misturas com um ou mais ligantes no solo, tais como o cimento Portland e a cal viva, aplicados isoladamente ou misturados com outros ligantes, como a escória granulada de alto forno, a cinza volante, ou a sílica de fumo. Estes últimos foram desenvolvidos para fins específicos, como acelerar o desenvolvimento da resistência mecânica, melhorar os resultados de estabilização de solos orgânicos e/ou com elevado teor em água, onde os tradicionais ligantes não são muito eficientes (CORREIA, 2011).

Devido aos múltiplos desenvolvimentos ocorridos nos últimos 40 anos, a técnica de DSM pode ser aplicada em uma vasta gama de solos, desde solos moles até rochas brandas. Sendo utilizada no controle de construção de aterros sobre solos moles, em estruturas de suporte de escavações, no controle da percolação, como barreira impermeável, no auxílio de escavações de túneis, no controle de deformações por corte, na mitigação da propagação de vibrações, entre outras (CORREIA, 2011).

Basicamente existem dois métodos diferentes de misturar o solo e o ligante. O solo que precisa ser melhorado pode ser misturado mecanicamente à calda de ligante (DSM úmido) ou misturado ao ligante a granel (DSM seco).

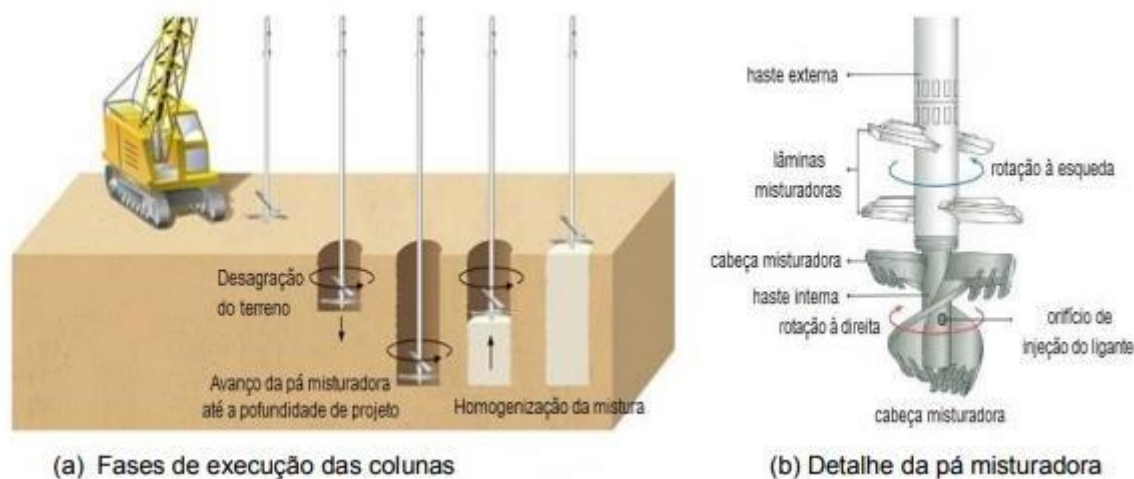
O DSM seco, segundo Correia *et al.*, (2012), geralmente é aplicado em solos com elevado teor de água e em solos moles homogêneos. Importante ressaltar que o ligante é aplicado em forma de grãos ou em pó e que é importante um local para seu armazenamento. A quantidade de material varia de acordo com o local e a função que o solo irá exercer. Segundo a norma EN 14679 (2015), os países nórdicos e o Japão utilizam a quantidade variando de 100kg/m³ a 250kg/m³.

O DSM úmido é aplicado pela ponta do equipamento ou de vários eixos que produzem colunas individuais. No Japão, essa técnica é mais utilizada em obras marítimas. Segundo a norma EN 14679 (2015), os países nórdicos utilizam a quantidade variando de 80Kg/m³ a 450Kg/m³ e o Japão adota valores entre 70Kg/m³ a 300Kg/m³.

Segundo Pinto (2016), o método úmido da DSM é mais indicado para solos argilosos moles, solos arenosos de grãos finos com pouca umidade ou solos estratificados com camadas

moles e rígidas intercaladas e geralmente emprega calda de cimento. A Figura 8 demonstra parte do procedimento da técnica descrita.

Figura 8: Metodologia de execução do DeepSoilMixing



Fonte: Keller Group(2017)

A máquina de perfuração usada para introdução da haste no solo pode ser equipada com uma ou mais hastes (cada haste executa uma coluna). Em ambos os métodos, úmido e seco, é empregado o mesmo tipo de equipamento, diferenciando o tipo de haste e os estabilizantes injetados. O aglutinante é transportado para o equipamento com mangueiras de conexão usando ar comprimido, e atravessa o interior da haste para ser lançado ao solo por meio dos bocais.

As colunas executadas nesse método têm, normalmente, 60 cm a 80 cm de diâmetro. A haste penetra no solo, revolvendo-o. Após atingir a profundidade determinada, ela é recolhida e o estabilizante começa a ser lançado, ao mesmo tempo em que a lâmina de mistura continua a girar.

2.2.1 Estabilização em massa

Lahtinen *et* Niutanen (2008) afirmam que o processo de estabilização de massa foi executado pela primeira vez em 1993, em um aterro experimental, em Veittostensuo, na Finlândia, para estabilizar uma camada superficial de turfa. Com o sucesso do projeto, a

tecnologia de estabilização de massa se espalhou rapidamente, especialmente nos países nórdicos, como Finlândia e Suécia.

Esse sistema consiste na mistura mecânica e monitorada de aglomerantes em pó com solos moles, do tipo argilas orgânicas, turfas, solos dragados, solos moles contaminados, etc. Estes solos deverão estar sempre na condição saturada, submersos no lençol freático, condição importante para auxiliar na reação dos materiais (solo e água) com o cimento, gerando a estabilização da massa e capacitando o terreno para absorção de tensões, devido a carregamentos, condição inadmissível no caso do terreno natural (EuroSoilStab, 2002).

Os tipos de aglomerantes poderão variar segundo seus princípios e características, podendo ser à base de cimento (com ou sem pozolana), cal, escória de alto forno, fibras vegetais e mistas. Após a definição do aglomerante, serão estabelecidos os parâmetros da mistura, como o consumo de material, pressão e vazão do ar comprimido como veículo de transporte do aglomerante (CARUSO, 2009).

EuroSoilStab (2002) e Allu (2007) alegam que é possível a combinação dos métodos de estabilização profunda e em massa no caso de existir camada superficial de solo mole posicionada sobre camada de argila profunda.

A Figura 9 apresenta a tecnologia de estabilização em massa de solos moles, indicando os principais equipamentos necessários para que se realize o tratamento, bem como a possibilidade de se tratar novas faixas de solo diariamente.

Figura 9: Detalhe esquemático do equipamento e do processo Stabtec®



Fonte: Geosonda (2016)

O aglomerante em pó é armazenado em tanques pressurizados, sobre esteiras hidráulicas, denominados de alimentadores de aglomerantes, e é bombeado até o multimisturador em dosagens previamente estabelecidas na fase de elaboração do projeto. Os serviços de estabilização de solos moles são executados por áreas de aproximadamente 4,0 m x 4,0 m, com sua respectiva profundidade, que pode ser no máximo de 6 m, ajustados no sistema de aquisição de dados, que estabelece os procedimentos de controle dos serviços.

2.2.2 CPR Grouting

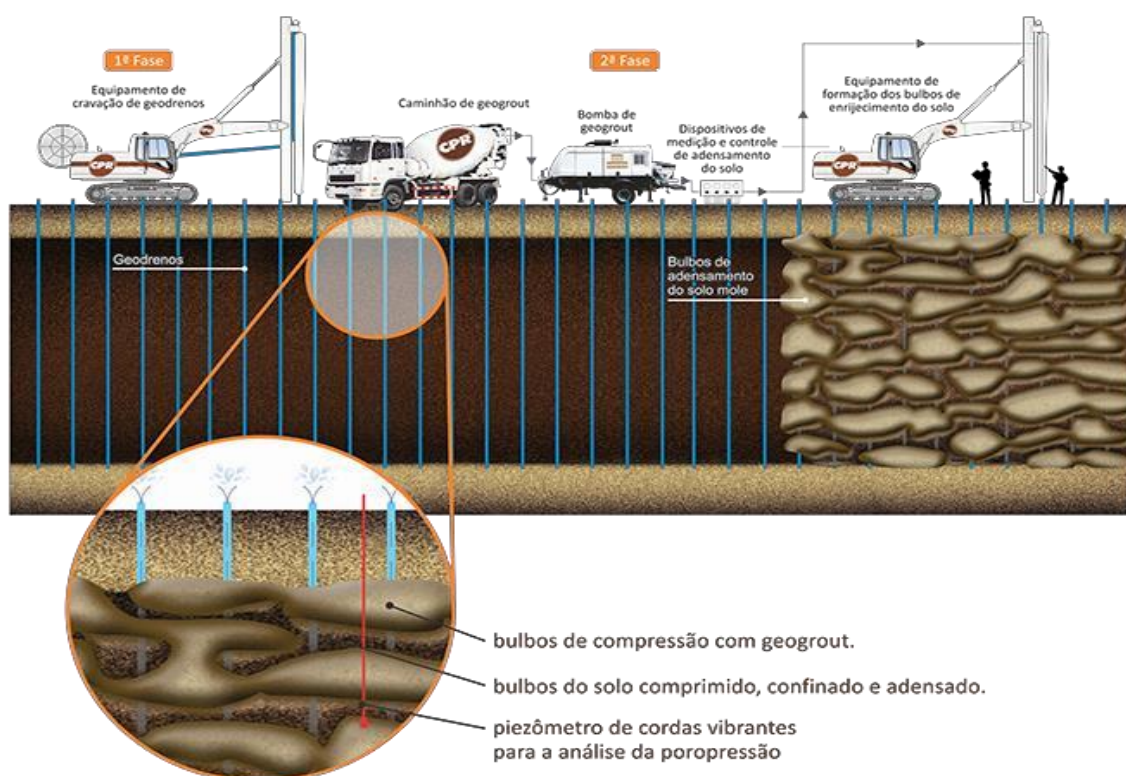
Outra técnica é denominada de Consolidação Profundo Radial® ou CPR Grouting®, uma tecnologia patenteada para tratamento de solos argilosos moles (estabilização de recalques, estabilização de fundações, aterros) exclusivamente desenvolvida pela empresa brasileira ENGEGRAUT Geotécnica e Engenharia Ltda.

Para Nogueira (2010), o método promove o aumento da resistência e estabilidade de um solo mole através do bombeamento de grout no solo sob alta pressão, causando a redução ou eliminação de possíveis recalques. O bombeamento do grout gera bulbos ao longo das camadas de solo mole os quais geram compressão lateral no solo e, conseqüentemente, aumento da poropressão. O grout utilizado é, normalmente, composto pela mistura de areia, cimento, silte e aditivos. Deve-se estar atento às características dessa mistura para que o seu caminho percorrido durante o bombeamento não sofra interferência.

A técnica consiste basicamente em três etapas: dimensionamento, cravação de geodrenos e formação de bulbos de compressão, com controle das tensões e deformações. Todo o processo é aliado à modelagem numérica avançada e a um rigoroso monitoramento geotécnico de campo, com piezômetros e pressiômetros (ENGEGRAUT, 2015). Durante a formação dos bulbos, há um controle do bombeamento através de curvas de pressão de bombeamento por volume de argamassa bombeada. Um dos critérios de paralisação consiste na obtenção do volume máximo da argamassa bombeada ou no alcance da máxima pressão de injeção. Outro fator de parada do bombeamento é o levantamento superficial do terreno no entorno do ponto de injeção, devido à ocorrência de um plano de ruptura acima do bulbo. No processo de execução, inicialmente há um aumento da poropressão e a partir do processo de adensamento do solo pela injeção de argamassa do CPR 52 Grouting, ocorre a percolação da água em direção aos drenos anteriormente instalados. À medida que a água sai pelos drenos,

há um processo gradual de transferência de carga ao arcabouço sólido, aumentando assim a tensão efetiva do solo. A metodologia de execução do CPRGrouting® é exibida na Figura 10.

Figura 10: Metodologia de execução do CPR Grouting®



Fonte: Engegraut (2015)

Após o tratamento, o solo reforçado passa a trabalhar imediatamente como solo compósito rígido. Todas as cargas de projeto, a serem impostas, serão distribuídas sobre a camada de aterro de maneira uniforme, sem os inconvenientes provocados por transferências de carga e efeitos de arqueamento (ENGEGRAUT, 2015).

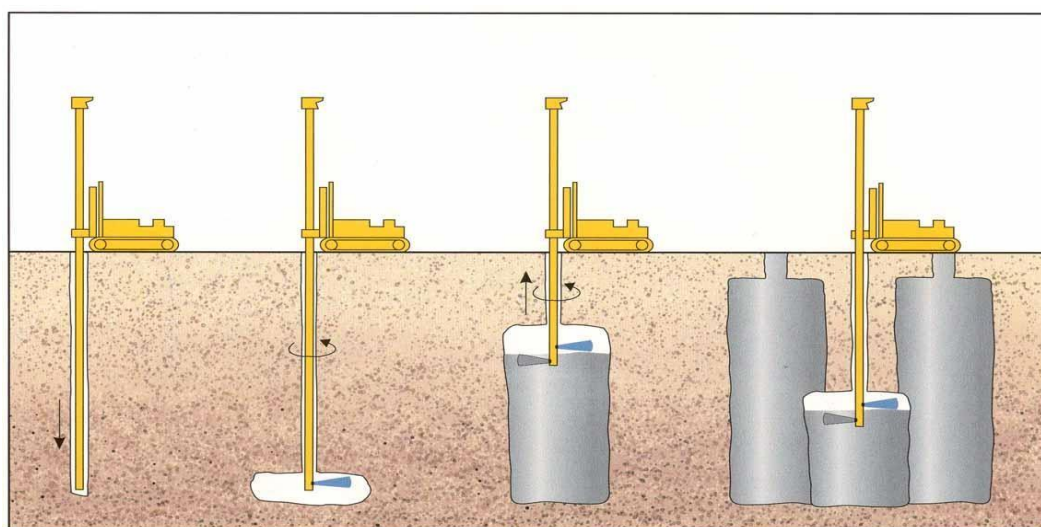
2.2.3 Jet Grouting

A técnica do *Jet Grouting* é muito parecida com a DSM. Ela permite melhorar a capacidade de solo podendo ser aplicada em diferentes tipos de solos. A principal diferença entre o *Jet Grouting* e o DSM é a forma como o ligante é adicionado e misturado ao solo. No

que diz respeito a aplicações da técnica, destacam-se a utilização de *Jet Grouting* enquanto reforço de fundações, em cortinas de impermeabilização, na estabilização de taludes e em túneis.

Este método tem como princípio básico a separação das duas ações, tanto de erosão (resultante do jato de água e ar comprimido) quanto de preenchimento (ou mistura) da calda de cimento com o solo desagregado. Cada jato apresenta uma função distinta neste sistema: Jato de água – utilizado para erodir o solo; Jato de ar - injetado através do mesmo bico de injeção de água para aumentar o seu efeito de erosão; Jato de cimento - injetado através de um segundo bico, posicionado abaixo do bico de água e ar comprimido, misturando a calda de cimento com o solo que permanece na cavidade após a passagem do jato de água e ar comprimido, dando origem a um material solidificado. Em geral, o sistema triplo é utilizado em reforço de fundações e em escavações, para a diminuição da permeabilidade e na estabilização de maciços de solo. Pelo elevado custo da bomba, não é muito empregada no Brasil (TECNOGEO). Dentre as fases dessa técnica, existe a fase de corte, mistura e cimentação. (Figura 11).

Figura 11: Metodologia de execução do JetGrouting®



Fonte: Hayward Baker (2003)

2.3 Resíduos

Resíduos sólidos são materiais resultantes da atividade da indústria que apresenta estado físico sólido, semi-sólido ou pastoso (NASCIMENTO, 2003). O reaproveitamento de

resíduos pode ser feito segundo três enfoques: a recuperação (extração e remoção de algumas substâncias presentes nos resíduos), reutilização (reaplicação de um resíduo, sem que passe por processos de transformação) e reciclagem (reaproveitamento de um resíduo, após este ter sido submetido a algum tipo transformação) (CONAMA, 2002).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classifica os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública. Segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004), os resíduos são divididos em duas classes, Resíduos Classe 1: Perigosos - são aqueles que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade, podendo provocar risco à saúde pública; Resíduos Classe 2 - Não Perigosos, que estão subdivididos a seguir: Classe 2A: Não inertes: são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe 1. Estes resíduos podem possuir propriedades tais como combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água. Classe 2B: Inertes: são os resíduos sólidos ou mistura de resíduos sólidos que, submetidos ao teste de solubilização, conforme a norma (NBR 10.006:2004), não tem nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões definidos na listagem nº 8 (padrões para o teste de solubilização).

Segundo GUMIERI (2002), após estudos realizados pelo Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), foi constatado que as escórias brasileiras de aciaria BOF (*BlastOxygenFurnace*) enquadram-se na Classe 2B (resíduos inertes e não perigosos). Porém, nos ensaios realizados por Gonçalves (2016) de lixiviação, solubilização, o coproduto KR apresentou índices de fenóis maiores que os permitidos pela norma, concluindo - se tratar de um resíduo Classe 2A – Resíduo não inerte. Porém, pelos métodos de produção do coproduto KR, esses fenóis encontrados não deveriam aparecer nos resultados dos ensaios, portanto isso deve ser decorrente de alguma contaminação externa, na preparação da amostra ou em seu transporte. Considerando o apresentado, pode-se caracterizar o coproduto KR como um Resíduo não-perigoso inerte (Classe 2-B).

É importante frisar que os limites do Anexo G da norma ABNT NBR 10004 são baseados em padrões de potabilidade, conforme indicado no item 4.2.2.2 da norma, e não tem a intenção de avaliar risco ao meio ambiente na utilização de resíduos sólidos. Outro ponto a ser observado é que agregados naturais utilizados comumente em obras civis não são sujeitos a análises segundo a norma ABNT NBR 10004 pelo fato de não se tratarem de resíduos.

A fim de mostrar a incoerência que representaria adotar a classificação NBR 10004 (2004) como limitante ao uso de um resíduo, Diniz *et al.* (2017) expuseram misturas de solo-

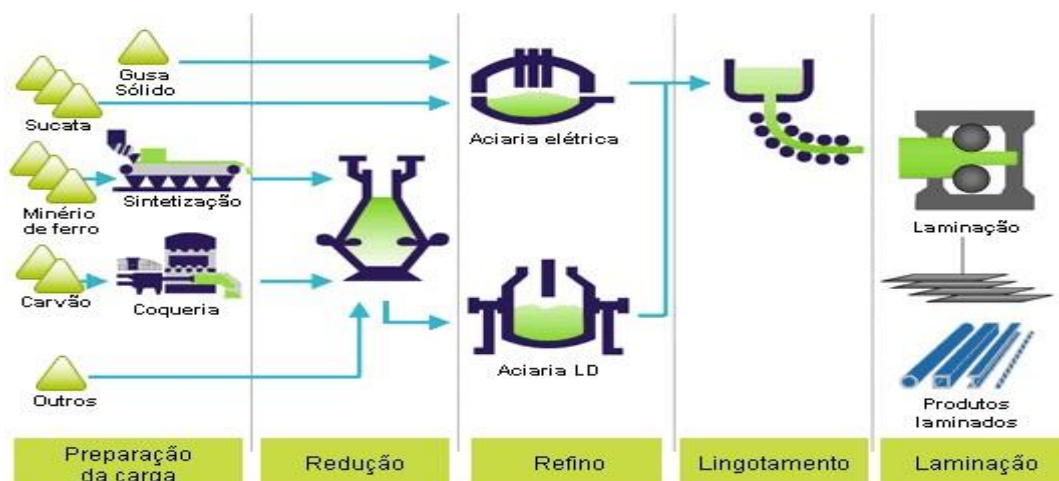
cimento, solo-cal e solo-escória aos ensaios de lixiviação concluindo que todas as misturas são classificadas com não inertes. Portanto, caso esse fosse critério suficiente para limitar o uso de um material, solo-cimento e solo-cal deveriam igualmente ser considerados impróprios. Comparando o teor de fenóis obtido por Gonçalves (2016) (0,02 mg/L) com outros valores de referência na legislação como a Resolução CONAMA nº 430, que dispõe sobre padrões de lançamento de efluentes e impõe o limite de 0,5 mg/L; e a Resolução CONAMA nº 420, que apresenta valores orientadores para solo e águas subterrâneas e limita o valor a 0,14 mg/L, o coproduto KR atende satisfatoriamente aos limites.

Logo, a classificação de um resíduo sólido, por si só, não impede o estudo de alternativas para a sua utilização. No entanto, é essa classificação que orienta os cuidados especiais no gerenciamento do resíduo sólido, os quais podem inviabilizar sua utilização quando não se puder garantir segurança ao trabalhador, ao consumidor final ou ao meio ambiente. Para a utilização de um resíduo sólido ou de misturas de resíduos sólidos na fabricação de um novo produto ou para outras finalidades, este último deve estar em conformidade com os requisitos estabelecidos pelos órgãos responsáveis pela liberação do produto (ABNT, 2017).

2. 4 Coproduto de Dessulfuração KR

Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (2016), o aço é produzido basicamente a partir de minério de ferro, carvão e cal. A fabricação do aço pode ser dividida em quatro etapas: preparação da carga, redução, refino e laminação, conforme Figura 12.

Figura 12: Fluxo Simplificado da produção do aço



Fonte: IBS (2016)

A produção do aço tem por consequência a geração de resíduos decorrentes do seu processo produtivo. Nos últimos anos, para cada tonelada de aço produzida, cerca de 600kg de resíduos foram gerados (CNI, 2012), porém grande parte desses resíduos são aproveitados. Dentre esses resíduos são gerados diversos tipos de escórias. Estes subprodutos podem ser de alto-forno, proveniente da produção do ferro-gusa ou de aciaria, gerados na produção do aço a partir do ferro gusa (PRADO *et al.*, 2001).

Diversas pesquisas têm obtido êxito em mostrar o potencial do uso desse material para pavimentação, seja como agregado (TARAZONA, 2016; SOUZA, 2007; AUTELITANO e GIULIANI, 2016; ROHDE, 2002) ou estabilizante químico (DINIZ *et al.*, 2017; ORTEGA-LÓPEZ *et al.*, 2004). Silva *et al.* (2002) relatam o aproveitamento de escórias de aciaria em geral por vários países (Inglaterra, Alemanha, Polônia, França, Japão) desde o início do século XX para diversas finalidades. Na Alemanha, por exemplo, 93% da escória de aciaria são utilizadas em diversas áreas e, portanto, apenas 7% da geração são encaminhadas a depósitos (PENA, 2004). No Brasil, têm-se dados da utilização desse material em pavimentação, desde a década de 70 (IPR, 1988). Segundo a IAB (2014), 85% das empresas associadas ao Instituto Aço Brasil dispunham de sistemas de gestão ambiental certificados pela ISO 14001, uma normativa utilizada para controle de impacto ambiental e aumento na reutilização de resíduos gerados nos processos fabris. Rodrigues (2007) resume as principais vantagens e desvantagens da aplicação da escória de aciaria, como mostrado no Quadro 3.

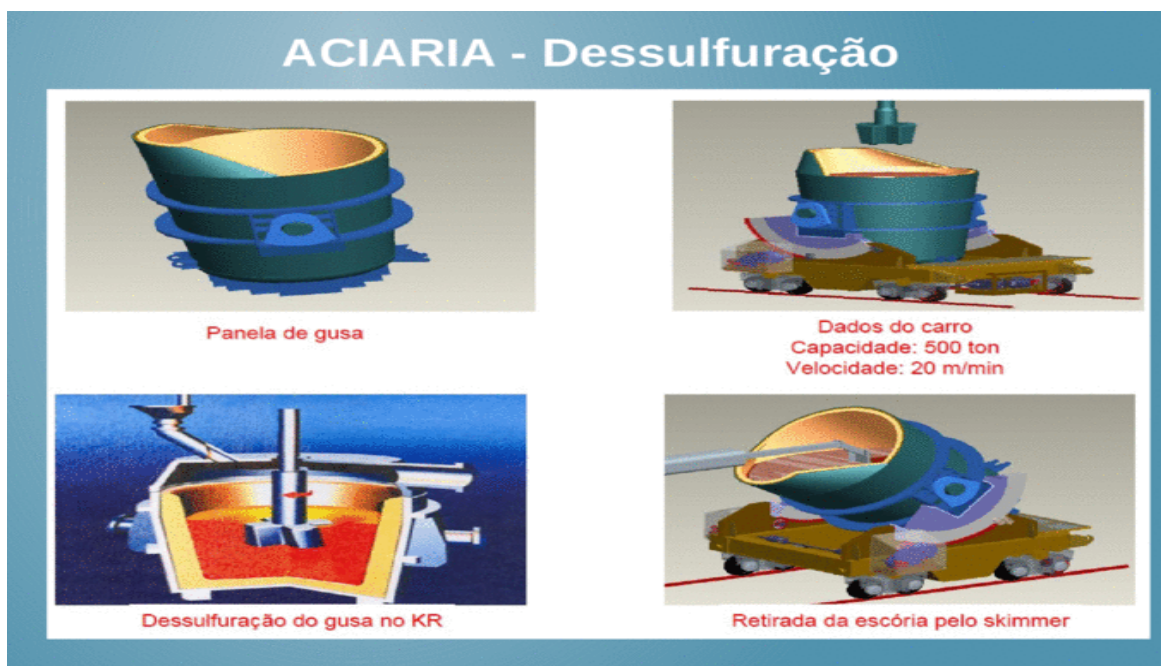
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da aplicação da escória de aciaria

APLICAÇÃO	VANTAGENS	DESVANTAGENS
Agregado de pavimentação	Maior massa unitária	Potencial de expansão; Elevada fissuração e lixiviação;
	Possibilidade de execução de camadas mais finas	
	Maior resistência ao desgaste	
	Maior capacidade de suporte de cargas	
Lastro de Ferrovia	Melhor comportamento do lastro	Liberação de finos que colmata o lastro;
	Melhor ajustamento dos dormentes	
	Melhor intertravamento	
Contenção e estabilização de encostas	Massa específica alta	Não divulgado
	Melhor drenagem	
	Cimentação natural	
Corretivo de solos	Alto teor de calcário	Presença de chumbo; Maior custo de moagem;
	Liberação de CaO	

Fonte: Alexandre et al, Oseki, Alexandre e Raguin (1984) apud Rodrigues (2007, adaptado)

No processo de produção do coproduto de dessulfuração KR apresentado na Figura 11, o ferro gusa então sofre uma injeção de oxigênio para remover o enxofre, num processo de dessulfuração. O processo onde ocorre a conversão é denominado *KambaraReactor*(KR). Após intensa agitação, os elementos se separaram, e por diferença de densidade, se acumulam na superfície, a escória então é removida por um separador escória-metal (ARCELORMITTAL, 2016), sendo denominada escória KR.

Figura 13: Produção da escória de dessulfuração KR



Fonte: Kirmse (2006)

A dessulfuração do gusa líquido pode ser realizada, após sua saída dos altos-fornos, no próprio vasilhame de transporte (carro-torpedo) ou em panela de transferência, antes do carregamento nos convertedores. Durante o processo, se utilizam agentes dessulfurantes de baixo custo, inclusive com reaproveitamento de materiais da usina. Silva (2012) explica que as condições de agitação são excelentes, porém a perda de temperatura é alta e o tempo de tratamento também (se comparados com injeção em panela).

Segundo Mansur (2010), a etapa de dessulfuração, processo desenvolvido na segunda metade dos anos 60, persistiu até o final dos anos 70 quando deixou de ser competitivo, devido principalmente às limitações de refratários para o rotor (*impeller*). No final dos anos 90, com o desenvolvimento dos inversores de velocidade e de novos tipos de refratários, o processo voltou a ser atrativo em relação aos demais sistemas de dessulfuração do gusa, em função do baixo custo operacional, reduzido tempo de tratamento e boa eficiência.

Silva *et al.* (2006) também afirmam que a viabilidade em aplicações a altas temperaturas se deve ao fato do prolongamento da vida útil dos refratários e revestimentos do impulsor. Isso é muito importante para garantir a economia do processo.

Entretanto, de acordo com Tessari e Cobe (2015), os coprodutos de aciaria apresentam reações expansivas devido a certos compostos presentes no material. Dentre os compostos volumetricamente instáveis, destacam-se o CaO e o MgO que são indesejáveis numa estrutura de pavimentação por proporcionar o aparecimento de trincas e fissuras nas camadas de rolamento, podendo comprometer a estrutura de um modo geral. Portanto, a expansibilidade deve ser avaliada antes do seu uso em camadas de pavimentação.

Gonçalves (2016) e Mendonça *et al.* (2013) realizaram o ensaio de caracterização química do material (Tabela 2) com objetivo de analisar os componentes químicos para fins de aplicação em camadas de pavimentação.

Tabela 1 - Componentes químicos do coproduto KR

ELEMENTO QUÍMICO	TEOR (%) (Mendonça <i>et al.</i> , 2013)	TEOR (%) (Gonçalves,2016)
Al ₂ O ₃	3,15	5,19
C	-	2,42
CaO	39,04	54,6
FeM	-	5,25
FeO	-	10,5
FeT	30,01	15,5
MgO	3,14	3,2
MnO	-	0,77
S	1,28	1,41
SiO ₂	10,38	9,92
ZnO	0,004	0,0001
Mn	1,7	-
P	0,284	-

Fonte: Acervo pessoal

É possível verificar que de uma siderúrgica para outra a porcentagem de alguns compostos e alguns componentes variam, mas o CaO e MgO ainda estão presentes em grande quantidade nas duas caracterizações químicas. Eles são os maiores responsáveis pela desintegração e enfraquecimento por diferença de volume molar nas suas reações. Outro elemento que também contribui para expansão da escória é o ferro metálico (UFES, 2016; IBS, 2006).

Machado (2000), *apud* Rohde (2002) confirmam que estes compostos estão presentes na escória por diversos motivos. O óxido de cálcio livre (CaO) vem do excesso utilizado no processo de refino do gusa e junto com o periclásio (MgO), resultado do uso da cal dolomítica e do desgaste do refratário do forno. Cruz *et al.* (2000; *apud* Rodrigues, 2007) diz que o ferro metálico (Fe⁰) é incorporado no sopro do oxigênio ou durante o vazamento no pote de escória. Este ferro sofre oxidação ou corrosão formando compostos químicos que aumentam o volume gerando o processo expansivo.

3.1.2 O Resíduo de Siderurgia

O resíduo de siderurgia utilizado nesta pesquisa é um coproduto derivado da escória de aciaria. A escória é um subproduto obtido no processo de produção do aço, durante o processo de dessulfuração do ferro gusa no *KambaraReactor*, a esse resíduo, dá-se o nome de Escória KR.

Este material foi cedido pela empresa ArcelorMittal Tubarão e está de acordo com a NBR 10007 (ABNT, 2004). A granulometria do material cedido foi inferior a 9mm.

3.1.3 Cimento Portland

O cimento utilizado nesse estudo foi do tipo CP III 40 RS, cimento composto com escória de alto forno resistente a sulfatos. Este material foi cedido pelo Laboratório de Ensaios em Materiais de Construção (LEMAC) da UFES.

O cimento é composto principalmente de clínquer (calcário, argila e componentes químicos) e seus tipos diferenciam-se de acordo com as adições que lhe são feitas no processo de moagem. As características e propriedades dos produtos finais obtidos da mistura do cimento com outros materiais dependem da qualidade e das proporções de cada material adicionado (HOLCIM, 2015).

3.1.4 Areia Quartzosa

A areia utilizada nesse trabalho foi cedida pela UFES. Este material foi escolhido para fazer parte das misturas, para poder ser feita a comparação com relação a sua granulometria.

3.2 Metodologia dos ensaios

Os ensaios que serão realizados podem ser divididos em duas etapas: a etapa de caracterização dos materiais isoladamente e a etapa de melhoramento do solo descrito na Tabela 3. A etapa I tem como objetivo conhecer as propriedades de cada material de forma

isolada e a etapa II visa mostrar o potencial estabilizante do coproduto por meio de ensaios de resistência e de adensamento.

Tabela2: Programa Experimental

ETAPA	ENSAIO	NORMA
I	Análise Granulométrica	NBR 7181 (1984)
	Limites de Atterberg	NBR 7180 e 6459 (1984)
	Massa Específica Real dos Grãos	NBR 6508 (1984)
	Teor de Matéria Orgânica	NBR 13600 (1996)
	Fluorescência Raio-X	
	Difração Raio-X	
	Determinação do Valor de pH	NBR 9251 (1986)
	Expansão PTM	DER-MG RT - 01.70 (2009)
	Pozolanicidade	NBR 12653 (2015)
II	Cone Fall Test	ISSO/TS 17892-6 (2004)
	Vane Test	D4648
	Adensamento	MB 3336 (1990)

Fonte: Acervo Pessoal

3.2.1 Etapa I: Caracterização dos materiais

Esta fase é composta pela caracterização física, química e mineralógica do solo, coproduto KR, areia e cimento Portland. Adicionalmente, realizou-se a avaliação da expansibilidade do solo.

A partir disso, foi possível prever, em certo grau, seus comportamentos e indicar para quais materiais devem ser empregados e quando devem ser evitados. Essa etapa se refere aos ensaios de análise granulométrica, limites de Atterberg, massa específica real dos grãos, teor de matéria orgânica, análise química, mineralógica, pH e expansibilidade.

3.2.1.1 Ensaios de Caracterização Física

Os ensaios de caracterização física seguiram os ensaios de análise granulométrica dos materiais, que têm como objetivo conhecer as proporções e variações dos tamanhos dos diâmetros dos grãos de determinado material e de acordo as curvas pode-se classificá-las segundo os sistemas HRB (*HighwayResearchBoard*) e SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), utilizando também os dados de limites de consistência do solo;

Determinação do teor de matéria orgânica, normatizado pela NBR 13600, através da queima do solo, determina a quantidade de matéria orgânica presente naquele solo; Massa específica real dos grãos, normatizado pela NBR 6508, traz os procedimentos e cálculos que devem ser seguidos para se obter o peso específico real de determinado solo e a determinação dos limites de Atterberg, que tem como objetivo determinar o limite de liquidez e o índice de plasticidade do solo, características necessárias para conhecimento das propriedades de solos argilosos.

3.2.1.2 Ensaios de Caracterização Química

Os ensaios de caracterização química seguiram os ensaios de pozolanicidade, que foi realizado de acordo com o preconizado pela norma ABNT NBR – Materiais pozolânicos - Requisitos (2015). Essa norma estabelece os requisitos para materiais pozolânicos destinados ao uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Determina as condições exigíveis para materiais pozolânicos no uso como adição.

O coproduto KR será enquadrado na “Classe E” especificado pela norma, pois não se trata de uma pozolana natural ou artificial (Classe N), nem uma cinza volante (Classe C). As exigências físicas e químicas para que um material seja pozolânico para a Classe E estão dispostas no Quadro 4.

Quadro 4 - Exigências para classificação de material pozolânico

REQUISITOS QUÍMICOS		REQUISITOS FÍSICOS	
Propriedades	Material Pozolânico (Classe E)	Propriedades	Material Pozolânico (Classe E)
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +FeO ₃ (%)	>= 50	Material retido na peneira 45 µm (%)	<20
SO ₃ (%)	<= 5,0	Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (%)	>=90
Teor de umidade (%)	<= 3,0	Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)	>=6
Perda ao fogo (%)	<= 6,0		
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	<=1,5		

Fonte: Adaptado da NBR 12653 (ABNT, 2014)

O ensaio mineralógico de difração de raio-X das amostras de agregado siderúrgico, solo, cimento e areia foram realizados segundo as normas da ABNT, para identificar os minerais predominantes nos materiais analisados. A técnica feita foi a de difração raios-X, que tem por finalidade a identificação da composição cristalina de um determinado material. Os picos que aparecem no difratograma são as distâncias interplanares característica dos minerais presentes. A análise dos resultados compara os picos obtidos no ensaio, com as informações já existentes em um banco de dados pré determinado. O solo utilizado, o coproduto KR, a areia e o cimento foram submetidos à determinação qualitativa para caracterização estrutural de substâncias cristalinas por difração de raios-X, realizado em laboratório particular. O coproduto e o solo foram submetidos ao método de pó, isto é, ele foi analisado na forma de um pó muito fino ($d < 0,075\text{mm}$). Neste método, cada partícula é um pequeno cristal, orientado aleatoriamente em relação ao feixe incidente.

A análise por espectroscopia de fluorescência de raio-X (FRX) é um método quantitativo baseado na medida das intensidades (número de raios-X detectados por unidade de tempo) dos raios-X emitidos por amostras analisadas. De forma resumida, o FRX é composto por três fases: excitação dos elementos da amostra, dispersão e posterior detecção dos raios-X. O FRX vem sendo amplamente utilizado por não promover a destruição da amostra, exigir uma pequena quantidade de material e não exigir pré-tratamento químico (NASCIMENTO, 1999).

E o ensaio de determinação do pH, onde a sigla pH significa potencial (ou potência) hidrogeniônico e indica o teor de íons hidrônio ($\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}$) livres por unidade de volume da solução. Quanto mais hidrônios houver no meio, mais ácida será a solução. Dessa forma, podemos dizer que quanto mais íons $\text{OH}^-_{(\text{aq})}$ houver no meio, mais básica ou alcalina será a solução.

3.2.2 Etapa II: Melhoramento do solo

A etapa em que os ensaios de resistências foram realizados – ensaio de Cone Fall Test, Vane Test e Adensamento Unidimensional – principais deste projeto. Os ensaios foram realizados com o solo puro e com todas as 14 misturas.

3.2.2.1 Cone Fall Test

O dispositivo do ensaio de Cone Fall Test (FCT) foi desenvolvido entre 1914 e 1922, pela Comissão Geotécnica de Ferrovias da Suécia, e comparado com outros métodos de ensaio é considerado um método muito simples, o que levou a sua ampla utilização na Escandinávia (HANSBO, 1957). O ensaio consiste na queda de um cone metálico padronizado no solo, o cone é colocado verticalmente sobre a superfície da amostra contatando-a ligeiramente e cai livremente pelo seu peso próprio após ser liberado. Por meio da profundidade de penetração do cone no solo pode-se calcular a resistência ao cisalhamento não drenada (S_u). Devido ao procedimento desse ensaio o valor de S_u encontrado normalmente será superior ao seu valor real por ser executado na superfície do corpo de prova, onde acontece a maior perda de umidade da mistura.

De acordo com a norma o cálculo de S_u é dado pela seguinte equação:

$$S_u = c * g * \frac{m}{i^2}$$

Onde:

c - é uma constante empírica que depende do ângulo e da rugosidade do cone;

g - é a aceleração do cone em queda em m/s^2 ;

m - é a massa do cone em gramas;

i - a profundidade de penetração do cone no solo em milímetros.

A profundidade de penetração do cone (i) na amostra é calculada pela diferença entre as leituras L_1 e L_2 . A norma europeia CEN ISO/TS 17892-6 indica valores de c de 0,80 a 1,0 para cone de 30° e 0,27 para cone de 60° , para uma rugosidade média do cone inferior a $0,8 \mu m$.

Para cada tempo de cura (7,14, 28, 56 dias), foram moldados e ensaiados dois corpos de prova com oitos pontos de penetrações em cada corpo de prova, conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Aparelho do Cone Fall Test com as posições de penetração



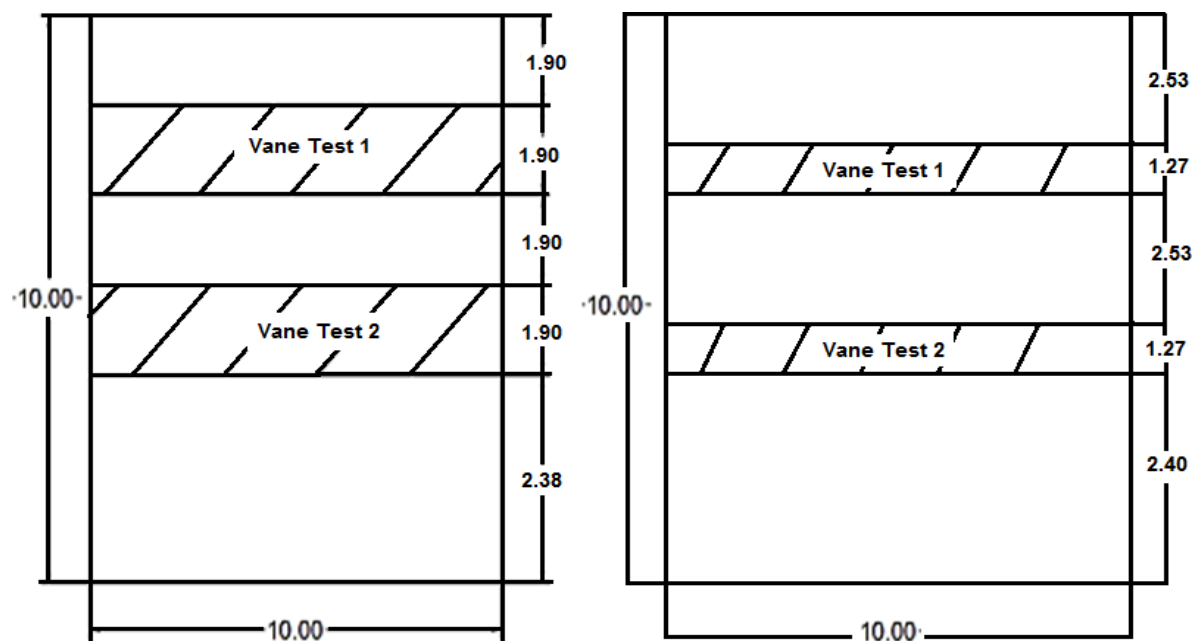
Fonte: Acervo pessoal

3.2.2.2 Vane Test

O ensaio é padronizado pela norma americana ASTM D4648 que recomenda sua utilização em solos de granulação fina, predominantemente argilosos e com resistência não drenada inferior a 100 kPa.

Neste trabalho, os corpos de prova foram ensaiados em dois exemplares com dois furos e duas alturas para cada tempo de cura, na condição amolgada e não amolgada. Com o ganho de dias de cura (07, 14, 28, 56 dias), os ensaios passaram a ter um maior tempo de execução indicando o ganho de resistência das amostras, tornando-se necessário a substituição da mola e palheta para outras mais adequadas ao aumento de resistência, conforme o esquema da Figura 16.

Figura 16 -Seção transversal mostrando as profundidades ensaiadas (medidas em centímetros)



(a) Palheta menor

(b) Palheta maior

Fonte: Acervo pessoal

Figura 17 – Aparelho do Vane Test



Fonte: Acervo pessoal

A norma europeia, EM 1997-2, recomenda que os resultados de S_u , obtidos pelo ensaio de cone, válido também para o ensaio de Vane test de laboratório, sejam utilizados da seguinte forma: a) como um valor que representa a resistência do solo na condição de laboratório e não necessariamente de campo; b) dependendo das características do solo, os resultados podem ser apenas uma estimativa aproximada de S_u ; c) se algumas condições e métodos da norma europeia, EM 1997-1 – Eurocode7 – *Geotechnical design – Part1: General rules*, forem utilizados, o valor de S_u obtido pelo FCT pode ser utilizado como sendo representativo da resistência do solo, e d) os resultados obtidos podem ser usados para checar a variabilidade da resistência de uma camada.

Conforme Polido (2014) o ensaio de vane test de laboratório consiste em inserir verticalmente na amostra de solo uma palheta de seção cruciforme com quatro pás radialmente opostas, de diâmetro D e altura H , e em seguida aplicar uma rotação a velocidade constante e padronizada (6° a $12^\circ/\text{minuto}$), medindo-se o torque necessário para causar o cisalhamento da superfície cilíndrica do solo, em condições não drenadas. O torque da palheta é mensurado por meio de uma mola calibrada que é ligada diretamente a ela.

Definidas as dimensões da palheta (D e H) e o torque ao qual ela foi submetida, pode-se determinar a resistência ao cisalhamento não drenada do solo (kPa) a partir das equações:

$$S_u = T * K * 10^{-4}$$

$$K = \frac{\pi * D^2}{10^9} * \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right)$$

Onde:

T - é o torque máximo medido em kgf.cm;

D - é o diâmetro da palheta em mm;

H - é a altura da palheta em mm;

K - é a constante da palheta.

3.2.2.3 Adensamento Unidimensional

O processo de adensamento foi largamente estudado a fim de se obter respostas quanto ao comportamento de solos saturados submetidos a carregamentos. A Teoria de Adensamento, desenvolvida por Terzaghi (1943), é considerada a grande referência para análises de problemas que envolvem recalques por adensamento.

O ensaio de laboratório é unidimensional, ou seja, um anel de metal confina a amostra e isto garante que não haverá movimento lateral do solo e todo fluxo de água ocorre na direção vertical (hipóteses da teoria de Terzaghi). De maneira resumida e na maioria das situações é válida a aplicação dos parâmetros unidimensionais para a previsão dos recalques, principalmente quando se tem grandes áreas carregadas.

O ensaio de adensamento convencional, estabelecido em norma, é feito através da aplicação de incrementos de carga de duração de 24 horas cada, onde as deformações são monitoradas de forma contínua, neste trabalho as amostras eram deformadas e foram saturadas inicialmente. Este processo está diretamente relacionado à capacidade de drenagem da água através dos vazios e compressibilidade do solo.

Figura 18 – Aparelho do adensamento



Fonte: Acervo pessoal

3.2.3 Misturas Utilizadas

Foram ensaiadas 14 misturas diferentes e o solo puro. A seguir, serão detalhados os procedimentos (misturas, técnicas e condições) dos ensaios de laboratório desta pesquisa. Todas as misturas “analisadas” são apresentadas na Tabela 4.

Inicialmente, na fase I da realização dos ensaios de resistência, foram definidas a preparação de 5 misturas diferentes. A mistura I refere-se ao solo puro, sem adições, e serve como parâmetro comparativo para analisar o ganho de resistência. As misturas II e III são amostras de solo com adição de teores de coproduto *in natura* e moída no moinho de argolas (utilizada na mesma granulometria do cimento), a mistura IV refere-se ao solo-cimento (10% de cimento) que serve como base para a verificação da eficiência do coproduto quando comparado a um estabilizante tradicional, neste caso, o cimento Portland III 40 RS, pois apresenta maior durabilidade que os outros tipos de cimento devido à maior resistência ao ataque de sulfatos (RS), baixo nível de permeabilidade e baixo calor de hidratação, que elimina possibilidades de fissuras e rachaduras. E por fim, a mistura V é uma amostra de solo com adição de areia quartzosa, para avaliar a influência em relação à granulometria, da escória e da areia.

Após a finalização da fase inicial de misturas, foi proposta a fase II com a combinação de solo com a mesma porcentagem de cimento já adotado para o coproduto KR, no valor de 30% para comparação em relação a quantidade de aglomerante utilizado, na criação da mistura VI.

Ao perceber que o valor de resistência obteve maior acréscimo quando utilizado o coproduto com menor dimensão de partículas, foi proposto, na realização da fase III com as misturas VII e VIII, que são a combinação de solo com KR passante nas peneiras 4,8 e 2,0 mm, e também foi feita a mistura IX de KR moída com diferente teor de adição da mistura III, para ser empregada na comparação com o solo-cimento.

Devido aos resultados satisfatórios obtidos das misturas anteriores, foi proposta a fase IV, onde foi realizada a mescla de aglomerante convencional e coproduto KR com o solo em questão, a fim de avaliar a ação conjunta dos aditivos ao solo no ganho de resistência. Em vista disso, realizaram-se as misturas X, XI, XII, XIII, XIV, XV.

Os moldes de cada mistura foram provados em diferentes tempos de cura, com 7, 14, 28 e 56 dias após a moldagem. Os teores dos materiais adotados em cada mistura estão indicados na Tabela 4, os valores são relativos a percentagem em massa seca de solo e adições.

Tabela 4– Misturas realizadas e suas composições

AMOSTRAS	SOLO (%)	ESCÓRIA KR (%)	COPRODUTO KR MOÍDA SIMILAR AO CIMENTO (%)	COPRODUTO KR #4,8mm (%)	COPRODUTO KR #2,00mm (%)	CIMENTO PORTLAND (%)	AREIA (%)	SÍMBOLOGIA
I	100	-	-	-	-		-	Sp
II	70	30	-	-	-		-	SKR(30)
III	70	-	30	-	-		-	SKRm(30)
IV	90	-	-	-	-	10	-	SC(10)
V	70	-	-	-	-		30	AS(30)
VI	70	-	-	-	-	30	-	SC(30)
VII	70	-	-	30	-	-	-	SKR(30)#4,8
VIII	70	-	-	-	30	-	-	SKR(30)#2,0
IX	90	-	10	-	-	-	-	SKRm(10)
X	70	-	-	-	25	5	-	SC(5)KR(25)#2,0
XI	70	-	-	-	27,5	2,5	-	SC(2,5)KR(27,5)#2,0
XII	70	-	-	-	28,5	1,5	-	SC(1,5)KR(28,5)#2,0
XIII	90	-	-	-	5	5	-	SC(5)KR(5)#2,0
XIV	90	-	-	-	7,5	2,5	-	SC(2,5)KR(7,5)#2,0
XV	90	-	-	-	8,5	1,5	-	SC(1,5)KR(8,5)#2,0

Fonte: Acervo pessoal

3.2.4 Preparação dos corpos de prova para a realização dos ensaios de Cone Fall Test e Vane Test

Foi necessária a utilização de técnicas que antecederam a preparação das amostras. Nas quais, o solo foi seco em estufa à temperatura de 60°C para que não houvesse queima da matéria orgânica existente. Logo após foi armazenado até seu resfriamento, para que então fosse destorroado no moinho de bolas.

O coproduto KR foi totalmente seco em estufa. Ele foi empregado na condição *in natura*, moído em moinho de argolas e peneirado. No seu estado natural, o diâmetro utilizado foi inferior a 9mm, o coproduto moído ficou com a granulometria “similar” próxima a do cimento Portland e o peneirado utilizado passou nas peneiras 4,8mm e 2,0mm. Já a areia foi seca em estufa e retirada sujeiras ali presentes e por fim, o cimento Portland que não precisou de nenhum preparo prévio.

Os moldes dos corpos de prova eram de PVC e para serem utilizados precisaram ser cortados e retificados com altura e diâmetro de 10 cm. A capacidade de cada corpo de prova é de 1 kg de mistura de material seco.

Para a futura moldagem, todos os materiais foram separados e armazenados previamente em sacos plásticos em suas devidas porcentagens e quantidades já especificadas na Tabela 4.

As quantidades de cimento, coproduto KR e areias utilizadas foram baseadas em valores próximos ao de solo-cimento (10%) e de outros trabalhos realizados pela UFES por Gonçalves (2016), Moratti e Scotá (2016) e Tessari e Cobe (2015) com o coproduto KR.

Nesse mesmo momento também foram retirados os valores das suas umidades naturais antes do fechamento dos sacos, para que no momento da moldagem, a quantidade de água a ser acrescentada ficasse de acordo como já determinado, definido em 76%, um valor 10% inferior ao limite de liquidez do solo. Essa umidade foi definida de acordo com resultados de outros trabalhos já realizados pelo laboratório de Geotecnia da UFES.

Na moldagem dos corpos de prova, os materiais foram misturados à seco e a quantidade de água foi corrigida de acordo com o valor da umidade pré-estabelecida de 76%.

A água foi adicionada aos poucos na mistura. Inicialmente a massa foi misturada com auxílio de uma espátula e posteriormente de forma manual até que a água fosse adicionada em sua totalidade e houvesse homogeneização completa da mistura. Foram retiradas três amostras de solo para determinação da umidade da mistura, conforme recomendação da norma ABNT NBR 6457:1986.

De acordo com o que está descrito na *EuroSoilStab* (2002), a moldagem da amostra no molde foi realizada em finas camadas pressionadas com auxílio de uma espátula, as camadas foram iniciadas nas paredes do molde e em formato cônico. O tubo foi preenchido até o centro e do meio até as extremidades. A superfície da amostra foi nivelada na borda do tubo com auxílio de uma espátula. No final, as amostras foram fechadas dentro de sacolas plásticas para evitar a perda de umidade, conforme é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Etapas da preparação e moldagem dos corpos de prova



(a) Corte do tubo de PVC



(b) Adição de água de homogeneização



(c) Solo seco e Moldagem



(d) Cápsulas para determinação da umidade



(e) Corpos de prova acondicionados em sacos hermeticamente fechados

Fonte: Acervo pessoal

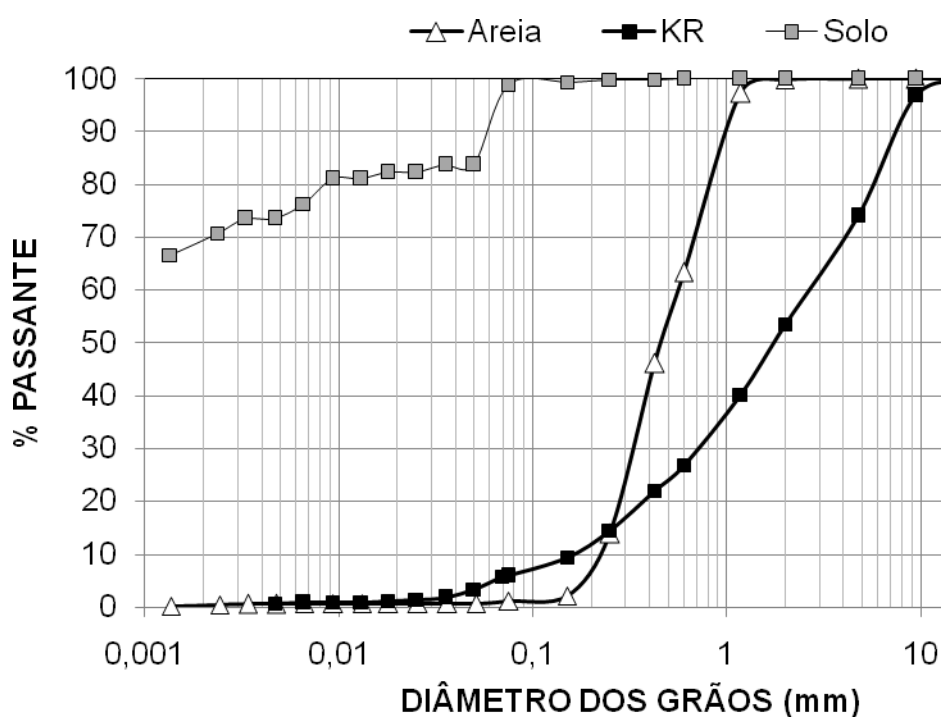
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Etapa I: Caracterização

4.1.1 Caracterização Física

Apesar da caracterização geotécnica ser designada a solos, no sentido de comparação, o coproduto KR foi da mesma forma classificado. A partir das curvas apresentadas na Figura 20, é possível confirmar que o solo usado possui alto teor de finos, com cerca de 80% das partículas passantes na peneira 200 (0,075mm) e o coproduto apresenta uma curva mais bem distribuída como já esperado.

Figura 20 –Granulometria dos materiais isolados



Fonte: Acervo pessoal

A partir da análise granulométrica dos materiais e dos limites de Atterberg realizado com o solo previamente seco e moído no moinho de bolas, segue a classificação segundo o sistema SUCS (Tabela 5).

Tabela 5 – Resultado da classificação dos solos

MATERI AL	MASSA ESPECÍFI CA REAL DOS GRÃOS	LIMITE DE LIQUID EZ	ÍNDICE DE PLASTICID ADE	% PASSAN TE NA PENEIR A 200	% PASSAN TE NA PENEIR A 4	CLASSIFICA ÇÃO
SOLO	2,61	86	38	80	100	OH (Argila orgânica)
AREIA	2,61	-	-	1,15	100	SW (Areia bem graduada)
KR	3,31	-	NP	5,9	74,1	SM

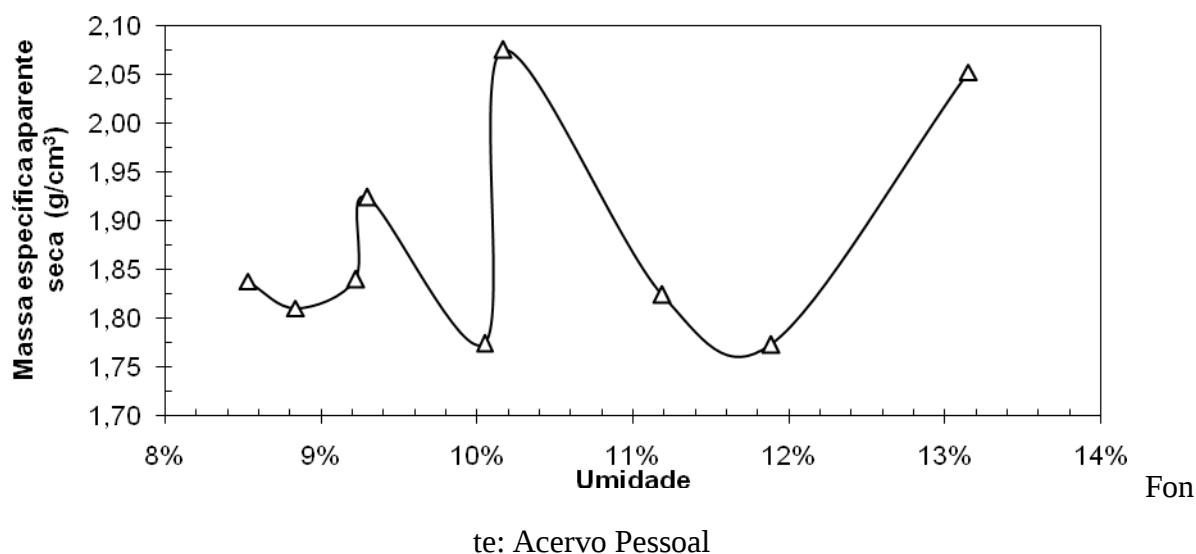
Fonte: Acervo pessoal

No ensaio de determinação de matéria orgânica, o solo apresentou um teor de 51,57% de matéria orgânica, caracterizando-o como um solo argiloso turfoso.

Os ensaios de expansão não são necessários na prática da estabilização de solos, porém, por se tratar de um tipo de escória, esses ensaios foram realizados no Laboratório de Geotécnica da UFES. Os procedimentos para determinação da expansão seguiu as recomendações normativas da Norma ME 113 (DNIT, 2009). E valores determinados para o coproduto, conforme a norma 262 (DNER, 1992) de 3% de expansão acumulada.

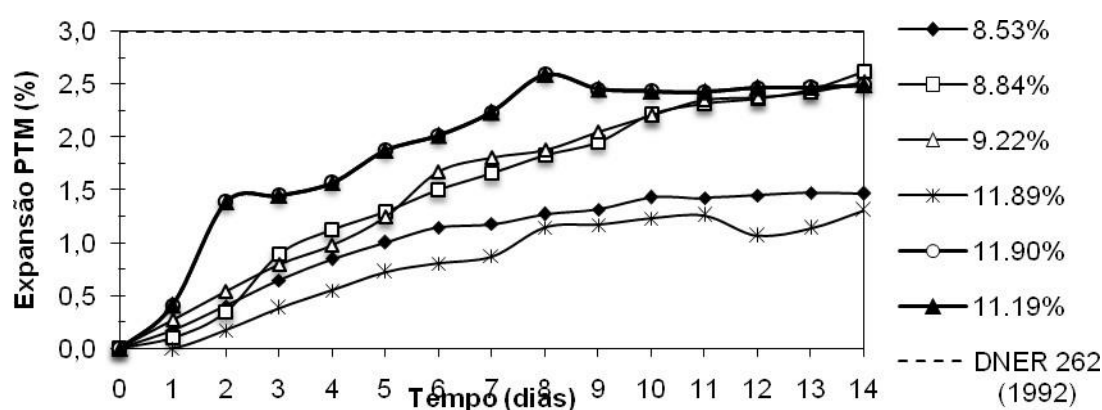
Realizou-se o ensaio de compactação do material na energia modificada, uma vez que a expansão PTM corresponde ao valor da expansão na umidade ótima. Entretanto, como observa-se na Figura 19 o comportamento do material apresenta uma curva de compactação com múltiplos picos. Além disso, Raposo (2005) observa que, ao contrário do que indica a Norma ME 113 (DNIT, 2009), a expansão PTM não é função da umidade de moldagem dos corpos-de-prova.

Figura 21: Curva de compactação na energia modificada do coproduto KR



A Figura 22 apresenta a expansão dos corpos-de-prova ao longo do ensaio e as respectivas umidades de moldagem. Os resultados obtidos estão de acordo com a Norma EM 262 (DNER, 1994).

Figura 22 – Expansão PTM durante 14 dias



Fonte: Acervo pessoal

4.1.2 Caracterização Química

No Quadro 5, estão os resultados dos ensaios em comparação com as exigências da NBR 12653 (ABNT, 2015) do ensaio de pozolanicidade realizado.

Quadro5 – Resultados dos ensaios

REQUISITOS QUÍMICOS			REQUISITOS FÍSICOS		
Propriedades	Material Pozolânico (Classe E)	Resultado do Ensaio	Propriedades	Material Pozolânico (Classe E)	Resultado do Ensaio
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +FeO ₃ (%)	>= 50	45,7	Material retido na peneira 45 µm (%)	<20	22,3
SO ₃ (%)	<= 5,0	3,8	Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (%)	>=90	79
Teor de umidade (%)	<= 3,0	2,3	Atividade pozolânica com a cal aos 7 dias (MPa)	>=6	0,5
Perda ao fogo (%)	<= 6,0	<0,1			
Álcalis disponíveis em Na ₂ O (%)	<=1,5	<0,19			

Fonte: Adaptado de NBR 12653 (ABNT, 2014)

De acordo com os resultados obtidos, não foi possível classificar o coproduto KR como um material pozolânico para ser usado como adição para cimento Portland, argamassa ou pasta, de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014). Pois a partir dos limites estabelecidos pela norma, somente quatro dos requisitos químicos atenderam à norma. Vale enfatizar o resultado da atividade pozolana com a cal, onde o valor encontrado teve um valor muito abaixo do exigido.

Além disso, é importante notar que a NBR 12653 (ABNT, 2015) trata especificamente da avaliação da materiais para uso como aditivo em cimento, não sendo, portanto, determinante da presença ou não de reações pozolânicas de forma geral. Então seriam necessários outros meios de avaliação para que atividade pozolânica do material fosse completamente descartada.

Portanto, mesmo o resultado não sendo satisfatório, é possível que o coproduto KR apresente algumas reações pozolânicas, devido a capacidade de ganho de resistência ao longo do tempo em outros ensaios aqui apresentados, principalmente quando o material utilizado foi somente os finos do coproduto KR.

4.1.2.1. Fluorescência de raios-X

O ensaio de Fluorescência de raios-x foi realizado pela empresa *Nanobusiness*, segundo as normas da ABNT. As amostras foram preparadas pela prensa automática Vaneox (molde de 20mm, P=20 t e t=30s), utilizando como aglomerante ácido bórico (H_3BO_3), na proporção de 1:0,3 - 0,6 g do ácido e 2,0 g da amostra seca a $100^{\circ}C$. Os resultados estão apresentados em forma de porcentagem, calculados como óxidos.

Tabela 6: Análise quantitativa de óxidos presentes no coproduto KR

Óxidos	Quantidade (%)
Na ₂ O	0,12
MgO	2,7
Al ₂ O ₃	5,1
SiO ₂	14,6
P ₂ O ₅	0,51
SO ₃	3,8
K ₂ O	<0,1
CaO	44,8
TiO ₂	0,33
MnO	1,7
Fe ₂ O ₃	26
SrO	0,11
PPC*	<0,1

Fonte: Acervo Pessoal

*PPC: Perda por calcinação

Pode-se perceber que houve uma alta porcentagem de óxido de cálcio (CaO), óxido de ferro (Fe₂O₃), periclásio (MgO), hematita (Fe₂O₃). Já os outros elementos presentes na KR não apresentam uma quantidade significativa. A presença de cal e de componentes com ferro é característico ao processo, pois esses são ingredientes adicionados ao longo da produção do aço.

Os componentes presentes em maiores quantidades, estão também presentes no cimento Portland. O óxido de ferro sofre oxidação ou corrosão formando compostos químicos, como a hematita, que no cimento Portland, está presente em menores proporções,

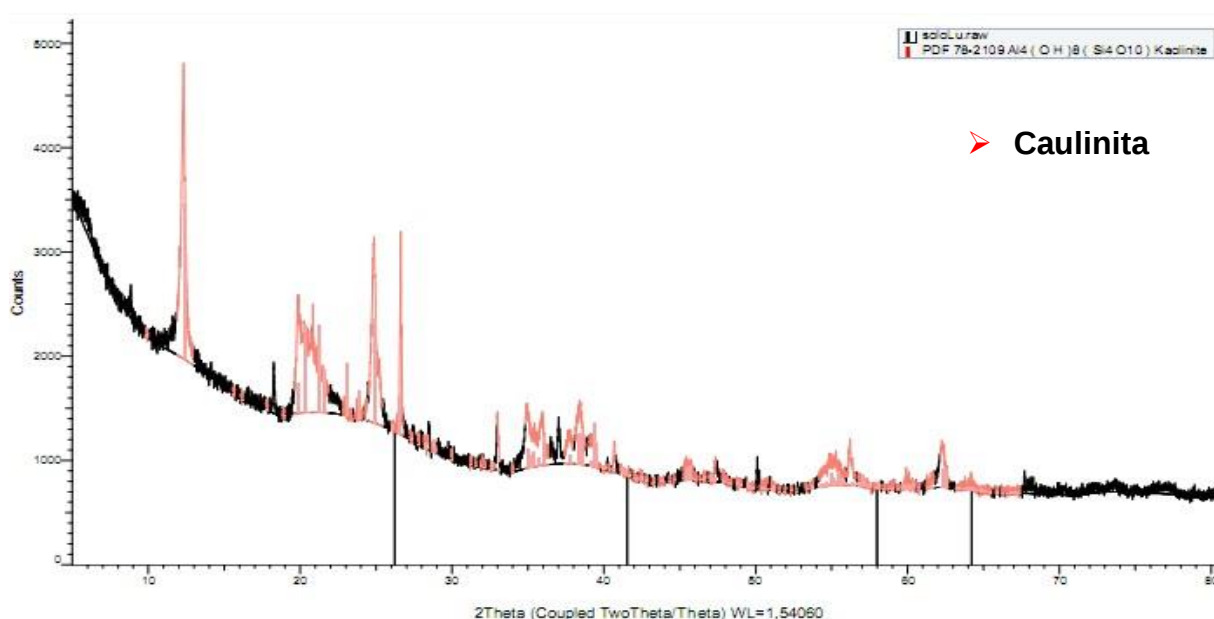
da ordem de 3%. (TAYLOR,1992) e age com um retardador de pega. Em maiores proporções, como é o caso do produto KR, a hematita pode ser indesejável.

Maas (1984, *apud* Rodrigues, 2007) diz que os óxidos de cálcio são os maiores responsáveis pelo processo expansivo da escória de aciaria, principalmente nas primeiras idades. Segundo ela, esta alta concentração é devido aos óxidos de cálcio gerados no final do processo pela precipitação dos fundentes que ultrapassaram os limites de solubilidade da escória fundida.

4.1.2.2 Difração raio-X

A preparação das amostras para a realização da análise por difração de raio-x seguiu os procedimentos de preparação da solução, descrito na ABNT NBR 7181. As condições experimentais foram feitas na faixa de varredura 2θ de 5,0 a 90,0, tamanho e tempo do passo de 0,026 e 150 segundos, fendas DS igual 1, máscara de 10mm e fenda AS de 10,4mm. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Metodologia para Análises de Petróleo da UFES e pelo laboratório particular *Nanobusiness*.

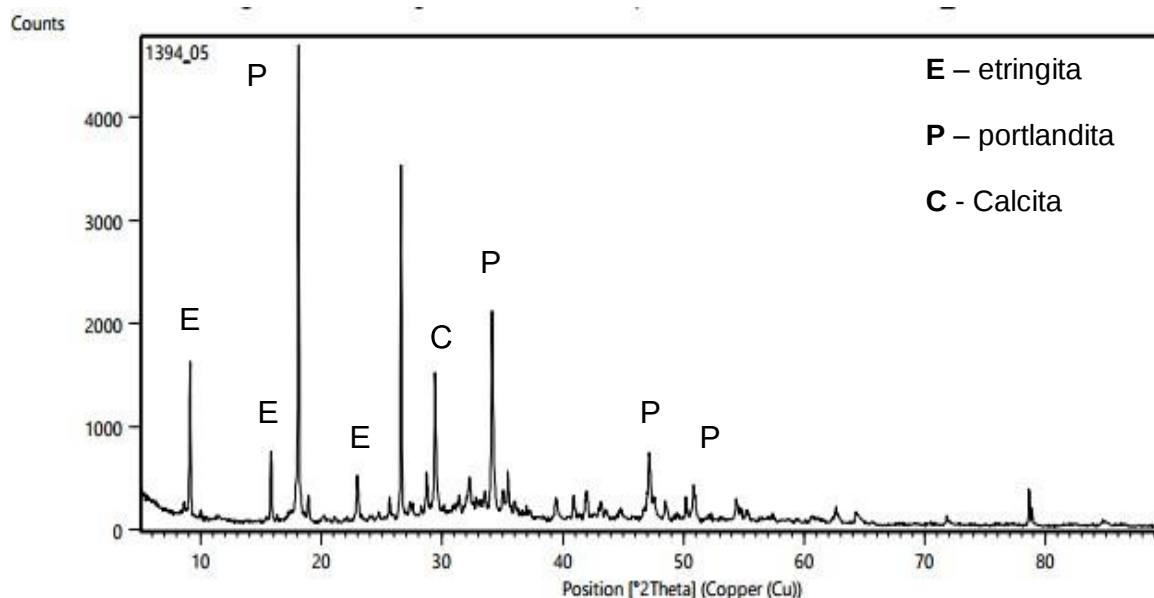
Figura 23 – Difratometria do solo



Fonte: Acervo pessoal

Pode-se observar que na amostra de solo, a maior parte dos picos apresenta uma espécie de argilomineral caulinita, os outros compostos são irrelevantes, devido a sua quantidade irrisória.

Figura 24 – Difratoograma do co-produto KR



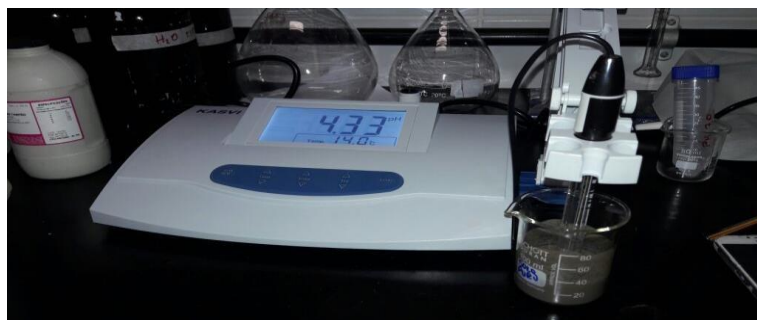
Fonte: Acervo pessoal

Pode-se observar que na amostra de coproduto KR, a maior parte dos picos (material cristalino) apresentam os minerais etringita ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \times 26\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3) e magnesioferrita (MgFe_2O_4), e esses compostos confirmam a presença dos minerais descritos pela fluorescência de raios-X e que são responsáveis pela expansão do coproduto KR. A grande incidência de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) no difratograma aponta que o material tem capacidade pozolânica, mas para que isso ocorra os minerais devem estar na forma amorfa, o que também pode explicar o ganho de resistência das misturas com o coproduto.

4.1.2.3 Determinação do pH

O ensaio de determinação do pH de todas as misturas seguiu a norma ABNT NBR 9251:1986, através da leitura de um phmetro (Figura 25) e seus resultados estão dispostos na Tabela 7.

Figura 25 - Phmetro



Fonte: Acervo pessoal

Tabela 7- Resultados de pH

AMOSTRA	pH
Sp	5,33
SKR(30)	10,40
SKRm(30)	11,71
SC(10)	11,06
SA(30)	5,48
SC(30)	11,60
SKR(30)#2,0	12,64
SKRm(10)	8,40
SKR(30)#4,8	8,19
SC(5)KR(25)#2,0	14,00
SC(2,5)KR(7,5)#2,0	13,46
SC(1,5)KR(8,5)#2,0	13,14
SC(5)KR(5)#2,0	9,58
SC(2,5)KR(27,5)#2,0	9,76
SC(1,5)KR(28,5)#2,0	8,44

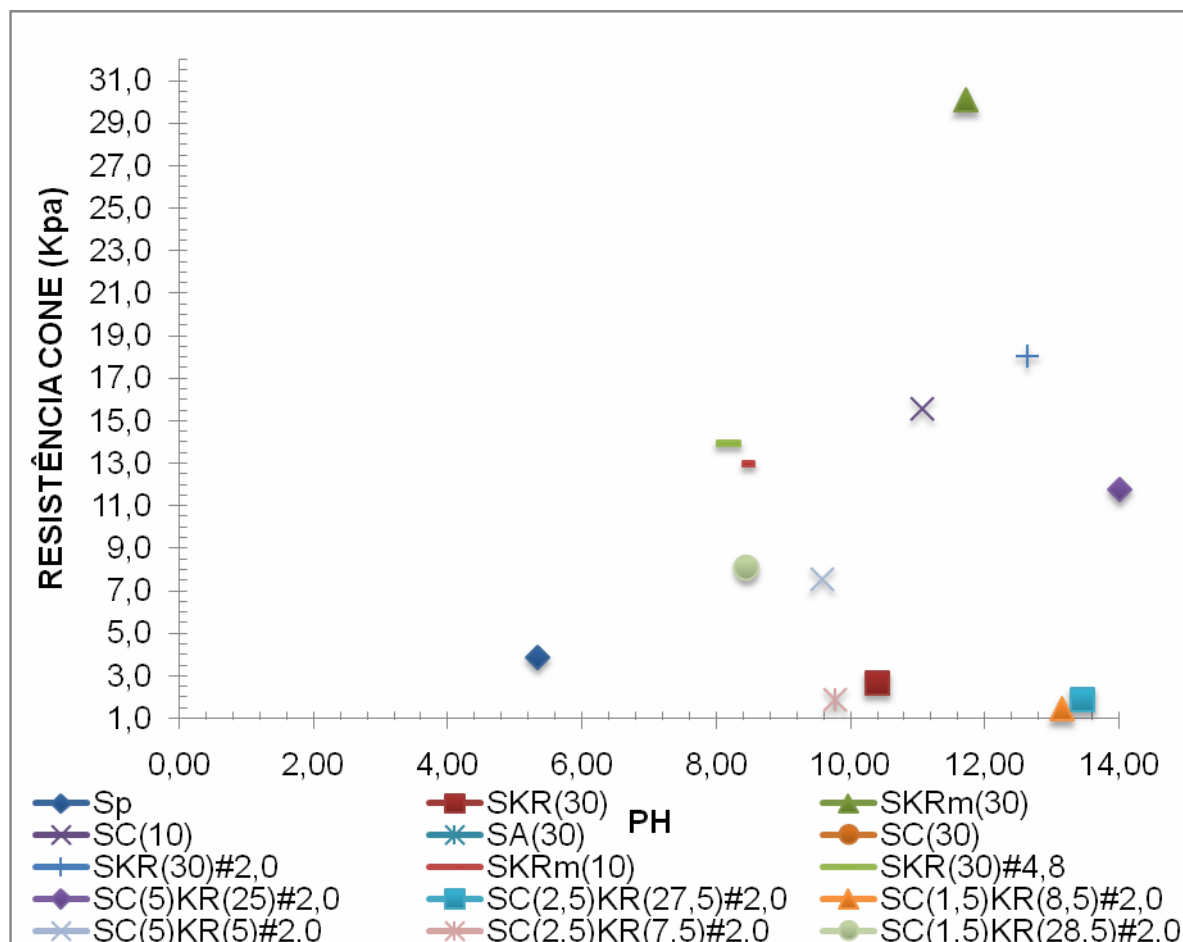
Fonte: Acervo pessoal

Segundo Ahnberget al. (1995), no que diz respeito às alterações do pH da mistura, verifica-se que se os produtos da reação são expostos a um meio ácido, correspondente a um pH inferior a 5, existe o risco de serem dissolvidos, situação que leva a que as reações subsequentes não progridam como esperado, no sentido de estabilização do solo.

Essa situação pode condicionar a evolução não esperada das reações químicas, o que, por outro lado, leva a uma necessidade superior da quantidade de ligante adicionado (FORTUNATO,2012). A priori, os ligantes começam a aumentar o pH, situação favorável ao desenvolvimento de reações pozolânicas, que por sua vez condicionam com o passar do tempo o ganho de resistência.

4.1.2.4 Correlação entre o valor de pH da mistura e o valor de resistência

Figura 26: Resistência obtida com o ensaio de Cone versus pH



Fonte: Acervo Pessoal

Percebe-se então que na nuvem formada por altos valores de pH, quanto maior a quantidade de ligante na mistura e quanto menor a granulometria dele, maior será o valor do pH (menos ácido) e, por conseguinte, segundo CDIT (2002) ocorre um aumento das reações pozolânicas da mistura, aumentando o valor de resistência.

4.2 Etapa II: Estabilização/Melhoramento de solo

4.2.1 Cone Fall Test

A Tabela 8 apresenta todos os resultados dos ensaios de Cone Fall Test realizados e seus teores de umidade de acordo com cada fase (I, II, III e IV) de moldagem para os tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

Tabela 8 - Resultados de resistência não drenada pelo ensaio de cone aos 7, 14, 28 e 56 dias de cura

FASE	MISTURA	DIAS 7 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 14 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 28 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 56 Su (Kpa)	UMIDADE (%)
I	Sp	2,8	71,80	3,9	72,00	4,7	70,30	9,7	68,80
	SKR(30)	2,7	73,00	2,7	70,80	1,9	72,50	4,9	63,50
	SKRm(30)	18	71,00	30,1	70,50	39,8	72,00	61,3	70,00
	SC(10)	11,3	71,75	15,6	70,25	27,3	69,00	42,4	71,25
	SA(30)	0	70,50	0	71,00	0	69,00	0	70,50
II	SC(30)	0	*	0	*	0	*	-	*
III	SKR(30)#4,8	11,2	70,50	13,98	69,50	-	-	-	-
	SKR(30)#2,0	11,6	69,30	18,04	69,30	-	-	-	-
	SKRm(10)	10,8	71,50	12,96	69,25	-	-	-	-
IV	SC(5)KR(25)#2,0	-	-	11,78	67,80	18,04	59,30	-	-
	SC(2,5)KR(27,5)#2,0	-	-	10,87	67,80	18,04	59,30	-	-
	SC(1,5)KR(28,5)#2,0	-	-	8,11	67,80	15,33	59,30	-	-
	SC(5)KR(5)#2,0	-	-	7,58	67,50	20,02	62,00	-	-
	SC(2,5)KR(7,5)#2,0	-	-	1,92	67,50	2,79	62,0	-	-
	SC(1,5)KR(8,5)#2,0	-	-	1,48	67,50	2,79	62,0	-	-

* Umidade não retirada, devida a alta resistência

- Ensaio não realizado

Fonte: Acervo pessoal

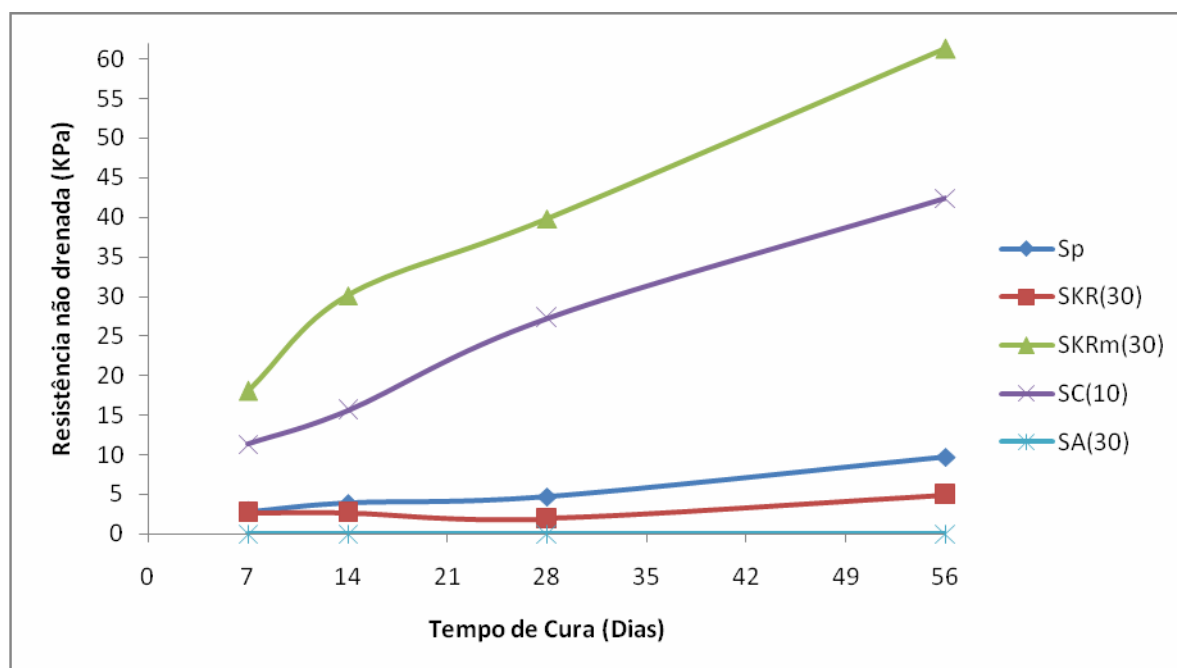
As Tabelas 9 e 10 foram separadas de acordo com as misturas realizadas para melhor visualização. A primeira contém somente misturas de solo com um tipo de material e a outra, com as misturas compostas com aglomerante tradicional e o coproduto KR para avaliação da ação dos dois juntos no solo puro.

Tabela 9: Resultados de Cone Fall para misturas com um material

MISTURA	DIAS 7 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 14 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 28 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 56 Su (Kpa)	UMIDADE (%)
Sp	2,8	71,80	3,9	72,00	4,7	70,30	9,7	68,80
SKR(30)	2,7	73,00	2,7	70,80	1,9	72,50	4,9	63,50
SKRm(30)	18	71,00	30,1	70,50	39,8	72,00	61,3	70,00
SC(10)	11,3	71,75	15,6	70,25	27,3	69,00	42,4	71,25
SA(30)	0	70,50	0	71,00	0	69,00	0	70,50
SKR(30)#4,8	11,2	70,5	13,98	69,50	-	-	-	-
SKR(30)#2,0	11,6	69,30	18,04	69,30	-	-	-	-
SKRm(10)	10,8	71,5	12,96	69,25	-	-	-	-

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 27: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Cone Fall para as misturas com um material em todos os tempos de cura



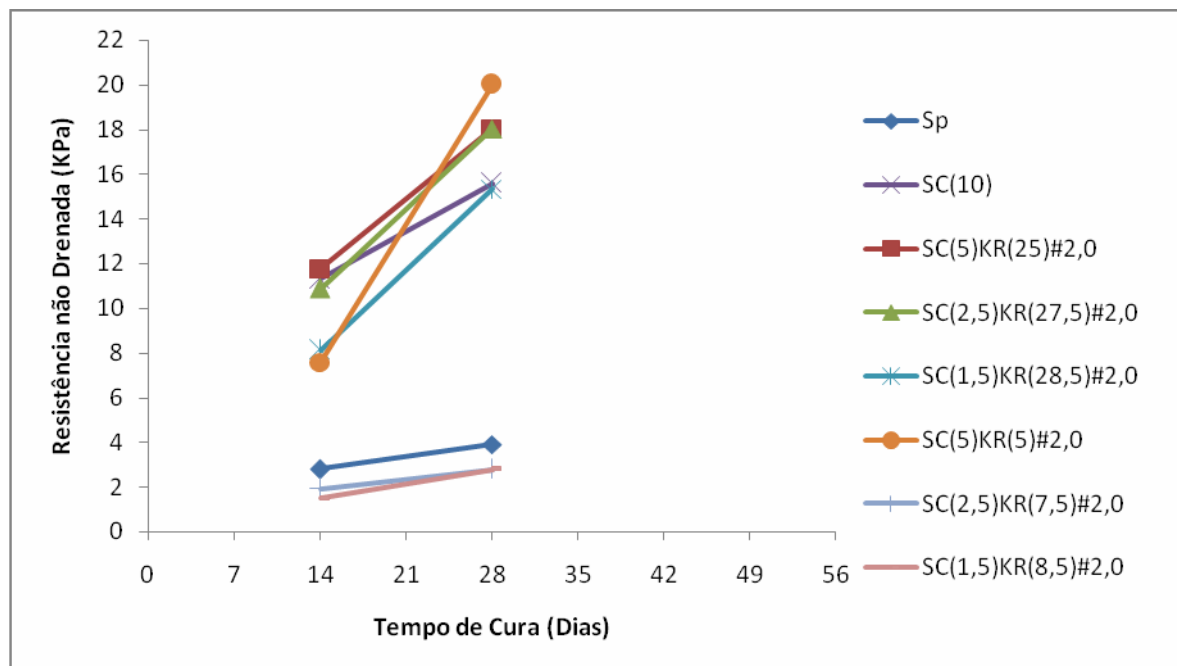
Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 10: Resultados de Cone Fall para misturas com dois materiais

MISTURA	DIAS 7 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 14 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 28 Su (Kpa)	UMIDADE (%)	DIAS 56 Su (Kpa)	UMIDADE (%)
Sp	2,8	71,8	3,9	72,00	4,7	70,30	9,7	68,80
SC(10)	11,3	71,75	15,6	70,25	27,3	69,00	42,4	71,25
SC(5)KR(25)#2,0	-	-	11,78	67,80	18,04	59,30	-	-
SC(2,5)KR(27,5)#2,0	-	-	10,87	67,80	18,04	59,30	-	-
SC(1,5)KR(28,5)#2,0	-	-	8,11	67,8	15,33	59,3	-	-
SC(5)KR(5)#2,0	-	-	7,58	67,5	20,02	62	-	-
SC(2,5)KR(7,5)#2,0	-	-	1,92	67,5	2,79	62	-	-
SC(1,5)KR(8,5)#2,0	-	-	1,48	67,5	2,79	62	-	-

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 28: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Cone Fall para as misturas com dois materiais para os tempos de 14 e 28 dias



Fonte: Acervo Pessoal

Afirmando o proposto por Sandroni e Consoli (2010), em que a estabilização química consiste em melhorar, ou controlar a estabilização dos solos as misturas apresentaram ganho de resistência com a adição de coproduto KR e Cimento Portland.

Houve aumento da resistência para o Sp com a idade. O aumento gradual e natural da resistência pode ser atribuído à perda de umidade das amostras com o tempo o que pode não ter ocorrido em todos os corpos de prova. Visto que, para todas as misturas, foram moldados dois corpos de prova ensaiados em cada tempo de cura, portanto alguns valores de Su podem não ter aumentado proporcionalmente com o passar do tempo, devido aos diferentes dias de moldagem.

As próximas análises foram feitas em diferentes misturas de solo com adição de cimento Portland. O solo-cimento, que possui 10% do aglomerante (SC(10)), obteve um valor de Su quatro vezes maior em relação ao solo puro e, com relação as outras misturas, o valor de resistência continuou maior, porém com valores mais próximos. Nas próximas misturas ensaiadas, apesar de adicionarmos um valor de porcentagem de coproduto KR e aglomerante inferior ao proposto por Ahnberg (2006), houve ganho de resistência. No entanto, nas misturas solo-cimento-KR compostos por menores teores de cimento, o ganho de resistência não foi satisfatório, mesmo com o valor de umidade alcançado sendo muito abaixo do proposto de 76%, o que levaria a um ganho de resistência maior.

Com base no que foi descrito no parágrafo anterior, pode-se perceber que a KR moída aumentou significativamente o valor de Su, porém sua preparação por meio de moagem para aplicação do coproduto não seria viável para implantação na estabilização química de solos. É importante destacar que a mistura com 30% de KR moída apresentou valores de resistência maior que a mistura mais adotada hoje que é a de 10% de cimento Portland.

Para a mistura composta de solo com adição de 30% de KR *in natura* (SKR(30)), observa-se que não houve um ganho de resistência quando comparado com o solo sem adição de aglomerante. Visto que foi utilizada a KR sem nenhuma modificação de suas propriedades físicas, com diâmetros inferiores a 9mm, onde na mistura com o solo deixou vazios e fez com que essa ficasse heterogênea, prejudicando a realização dos ensaios e também o ganho de resistência da amostra. Em alguns corpos de prova, houve um pequeno aumento de Su, provavelmente devido à perda de umidade.

Para as amostras de solo com adição de areia (SA(30)), os resultados não apresentaram ganho de resistência. Em razão pela qual ela seja um material inerte, o que não influencia nos valores de Su alcançados. Para comparar com as misturas de 30% de coproduto, foram moldados corpos de prova com adição de 30% de cimento Portland

(SC(30)). O valor de Su foi extremamente elevado devido ao alto teor de cimento, algo incomum a ser adotado na prática, portanto foi descartado nas análises.

Nas análises das amostras de SKR(30)#4,8, o ganho de resistência resultante foi em torno de três vezes maior em relação ao solo puro. Nas amostras de SKR(30)#2,0, o ganho de resistência resultante aos quatorze dias de idade foi um pouco maior que a mistura com a granulometria um pouco maior, já que ela também alcançou um valor de Su muito próximo ao solo-cimento, acreditando no potencial do uso do coproduto nas misturas para melhoramento de solos. Vale ressaltar que os valores de Su alcançados também estão relacionados com a perda de umidade na execução dos ensaios. Comprovando o que CDIT (2002) aponta que quanto maior a quantidade de água adicionada a mistura, menor o ganho de resistência.

4.2.2 Vane Test

A Tabela 11 apresenta todos os resultados dos pontos superiores dos corpos de prova não amolgados e amolgados dos ensaios de Vane Test, realizados e seus teores de umidade de acordo com cada fase (I, II, III e IV) de moldagem para os tempos de cura de 7, 14, 28 e 56 dias.

Tabela 11: Resultados de resistência não drenada pelo ensaio de Vane

FASE	MISTURA	DIAS 7			DIAS 14			DIAS 28			DIAS 56		
		Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	UMIDADE (%)	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	UMIDADE (%)	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	UMIDADE (%)	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	UMIDADE (%)
I	Sp	2,75	1,13	71,80	3,07	1,46	72,00	3,23	1,46	70,30	6,47	2,43	68,80
	SKR(30)	2,42	0,49	73,00	2,91	0,49	70,80	2,91	0,39	72,50	6,63	0,81	63,50
	SKRm(30)	3,21	1,84	71,00	9,19	1,85	70,50	16,17	1,87	72,00	18,03	3,73	70,00
	SC(10)	5,01	1,78	71,75	9,22	1,94	70,25	21,14	4,98	69,00	31,72	7,46	71,25
	SA(30)	0,48	0,49	70,50	0,65	0,49	71,00	0,65	0,65	69,00	0,65	0,81	70,50
II	SC(30)	-	-	*	-	-	*	-	-	*	-	-	*
III	SKR(30)#4,8	4,04	1,94	70,50	11,81	2,19	69,50	-	-	-	-	-	-
	SKR(30)#2,0	3,28	1,09	69,30	17,41	2,49	69,30	-	-	-	-	-	-
	SKRm(10)	3,5	2,19	71,50	10,57	8,32	69,25	-	-	-	-	-	-
IV	SC(5)KR(25)#2,0	-	-	-	4,35	1,87	67,80	14,92	4,98	59,30	-	-	-
	SC(2,5)KR(27,5)#2,0	-	-	-	11,82	1,87	67,80	16,17	3,73	59,30	-	-	-
	SC(1,5)KR(28,5)#2,0	-	-	-	5,59	3,11	67,80	9,95	3,73	59,30	-	-	-
	SC(5)KR(5)#2,0	-	-	-	9,41	1,78	67,50	14,92	5,69	62,00	-	-	-
	SC(2,5)KR(7,5)#2,0	-	-	-	2,1	1,29	67,50	3,73	1,75	62,0	-	-	-
	SC(1,5)KR(8,5)#2,0	-	-	-	1,77	0,97	67,50	2,34	1,53	62,0	-	-	-

* Umidade não retirada, devida a alta resistência
 - Ensaio não realizado

Fonte: Acervo Pessoal

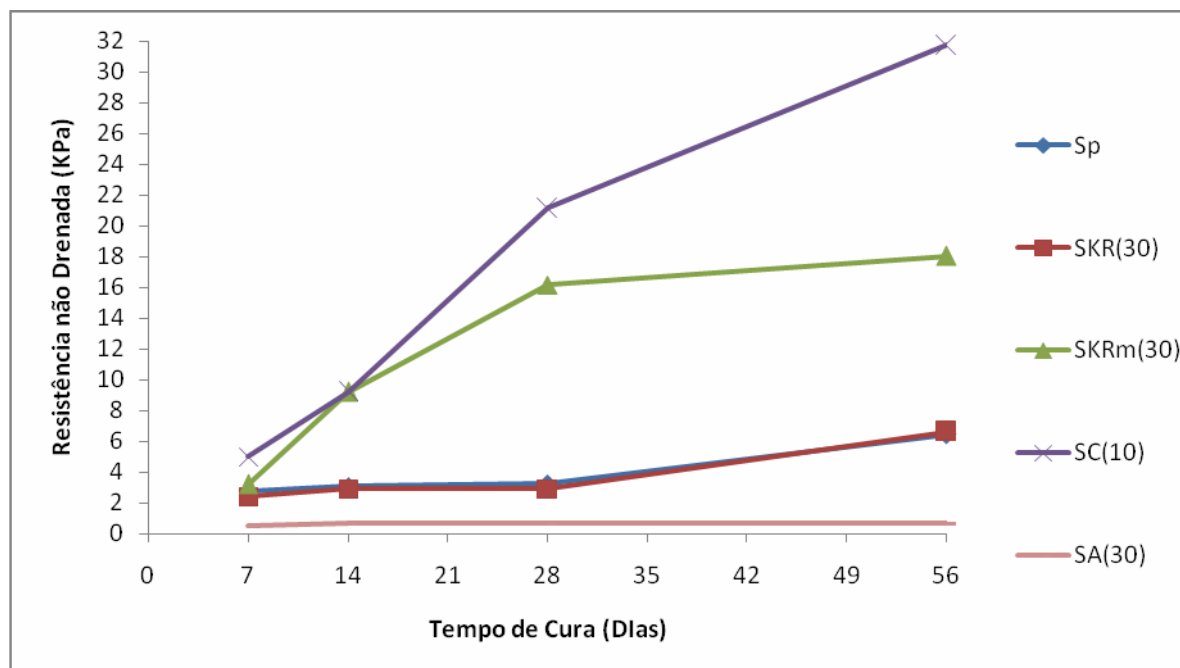
Nas tabelas 12 e 13 separam-se de acordo com as misturas realizadas para melhor visualização, igualmente feito nos resultados de Cone Fall.

Tabela 12: Resultados de Vane Test para misturas com um material

MISTURA	DIAS 7 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)	DIAS 14 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)	DIAS 28 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)	DIAS 56 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)
Sp	2,75	71,80	3,07	72,00	3,23	70,30	6,47	68,80
SKR(30)	2,42	73,00	2,91	70,80	2,91	72,50	6,63	63,50
SKRm(30)	3,21	71,00	9,19	70,50	16,17	72,00	18,03	70,00
SC(10)	5,01	71,75	9,22	70,25	21,14	69,00	31,72	71,25
SA(30)	0,48	70,50	0,65	71,00	0,65	69,00	0,65	70,50
SKR(30)#4,8	4,04	70,5	11,81	69,5	-	-	-	-
SKR(30)#2,0	3,28	69,3	17,41	69,3	-	-	-	-
SKRm(10)	3,5	71,5	10,57	69,25	-	-	-	-

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 29: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Vane Test para as misturas com um material em todos os tempos de cura



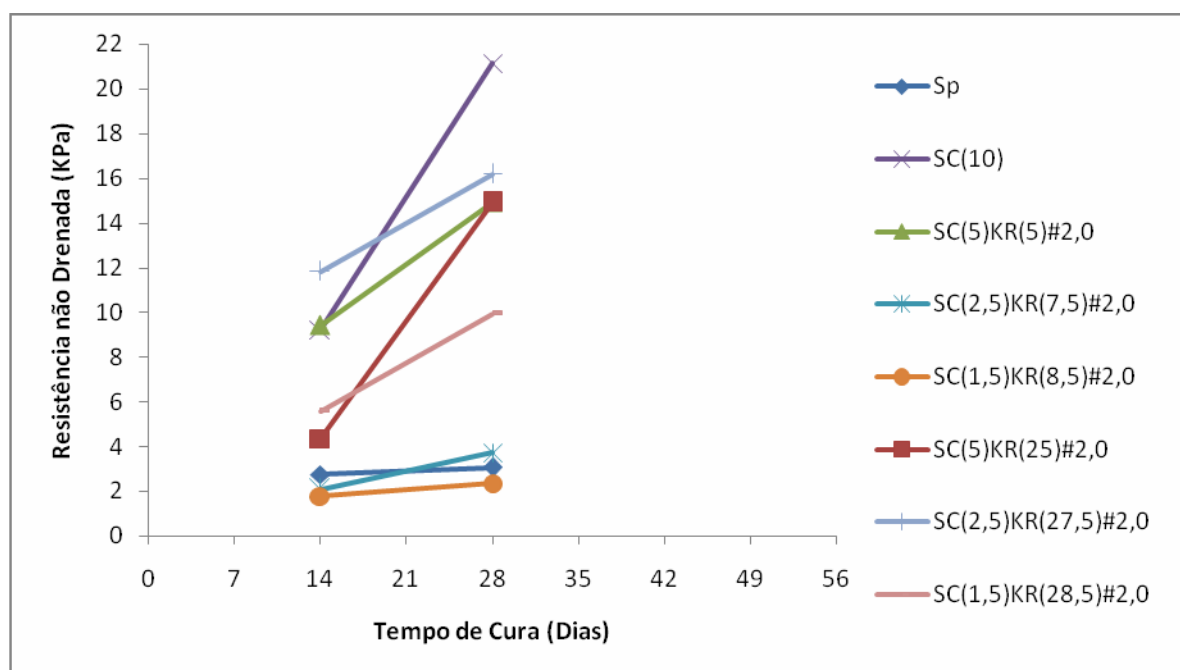
Fonte: Acervo Pessoal

Tabela 13: Resultados de Vane Test para misturas com dois materiais

MISTURA	DIAS 7 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)	DIAS 14 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)	DIAS 28 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)	DIAS 56 Su (KPa) Superior	UMIDADE (%)
Sp	2,75	71,8	3,07	72	3,23	70,3	6,47	68,8
SC(10)	5,01	71,75	9,22	70,25	21,14	69	31,72	71,25
SC(5)KR(25)#2,0	-	-	4,35	67,80	14,92	59,30	-	-
SC(2,5)KR(27,5)#2,0	-	-	11,82	67,80	16,17	59,30	-	-
SC(1,5)KR(28,5)#2,0	-	-	5,59	67,80	9,95	59,30	-	-
SC(5)KR(5)#2,0	-	-	9,41	67,50	14,92	62,00	-	-
SC(2,5)KR(7,5)#2,0	-	-	2,1	67,50	3,73	62,0	-	-
SC(1,5)KR(8,5)#2,0	-	-	1,77	67,50	2,34	62,0	-	-

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 30: Resultados em forma de gráfico do ensaio de Vane Test para as misturas com dois materiais para os tempos de 14 e 28 dias



Fonte: Acervo Pessoal

De acordo com CDIT (2002) nos solos tratados com cimento, as reações de hidratação (ligante sob a forma de pó), ocorrem em curto prazo, em semanas, o aumento de resistência verifica-se rapidamente, e em seguida, ainda ocorrem às reações pozolânicas oferecendo uma resistência superior e isso se confirma nas misturas com cimento e também com o KR de granulometria próxima a do cimento que em curto prazo, em que foram realizados os ensaios, apresentaram valores de resistência não drenada maiores que as iniciais.

Observa-se que houve aumento da resistência para o Sp com a idade. O aumento gradual e natural da resistência pode ser atribuído à perda de umidade das amostras com o tempo o que pode não ter ocorrido em todos os corpos de prova. Visto que, para todas as misturas, foram moldados dois corpos de prova ensaiados em cada tempo de cura.

A mistura SC(5)KR(5)#2,0, no tempo de cura de 14 dias, obteve valores de resistência igualmente a mistura solo-cimento, porém, aos 28 dias, o valor de resistência do solo-cimento superou a mistura KR-Cimento-Solo.

Já para as misturas com 30% de adição de coproduto, nos tempos de 14 e 28 dias, as composições de KR peneirada e moída alcançaram resultados muito satisfatórios em relação ao solo cimento. Obteve resultado igual ou superior ao solo cimento na mesma idade. Vale destacar que a mistura SKR(30) obteve resultado muito próximo ao Sp, isso pode ser explicado devido o corpo de prova conter a granulometria muito variável, tornando difícil a sua homogeneização.

4.2.3 Resultados dos valores de sensibilidade de todas as misturas realizadas

A sensibilidade foi utilizada para enfatizar a diferença entre resistências ao cisalhamento não drenadas das argilas, nas condições remoldadas e amolgadas. No entanto, o sentido da sensibilidade é determinar a redução da resistência ao cisalhamento não drenada pela desestruturação.

Figura 31: Resultados das sensibilidades

MISTURA	DIAS 7	Su		(St)	DIAS 14	Su		(St)	DIAS 28	Su		(St)	DIAS 56	Su		(St)
	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	SENSIBILIDADE	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	SENSIBILIDADE	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	SENSIBILIDADE	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	SENSIBILIDADE	Su (Mpa) Superior	AMOLGADA	SENSIBILIDADE	Su (Mpa) Superior
Sp	2,75	1,13	2,43	3,07	1,46	2,10	3,23	1,46	2,21	6,47	2,43	2,66				
SKR(30)	2,42	0,49	4,94	2,91	0,49	5,94	2,91	0,39	7,46	6,63	0,81	8,19				
SKRm(30)	3,21	1,84	1,74	9,19	1,85	4,97	16,17	1,87	8,65	18,03	3,73	4,83				
SC(10)	5,01	1,78	2,81	9,22	1,94	4,75	21,14	4,98	4,24	31,72	7,46	4,25				
SA(30)	0,48	0,49	1,0	0,65	0,49	1,33	0,65	0,65	1,00	0,65	0,81	1				
SC(30)	-	-	*	-	-	*	-	-	*	-	-	*				
SKR(30)#4,8	4,04	1,94	2,08	11,81	2,19	5,39	-	-	-	-	-	-				
SKR(30)#2,0	3,28	1,09	3,01	17,41	2,49	6,99	-	-	-	-	-	-				
SKRm(10)	3,5	2,19	1,60	10,57	8,32	1,27	-	-	-	-	-	-				
SC(5)KR(25)#2,0	-	-	-	4,35	1,87	2,33	14,92	4,98	3,00	-	-	-				
SC(2,5)KR(27,5)#2,0	-	-	-	11,82	1,87	6,32	16,17	3,73	4,34	-	-	-				
SC(1,5)KR(28,5)#2,0	-	-	-	5,59	3,11	1,80	9,95	3,73	2,67	-	-	-				
SC(5)KR(5)#2,0	-	-	-	9,41	1,78	5,29	14,92	5,69	2,62	-	-	-				
SC(2,5)KR(7,5)#2,0	-	-	-	2,1	1,29	1,63	3,73	1,75	2,1	-	-	-				
SC(1,5)KR(8,5)#2,0	-	-	-	1,77	0,97	1,82	2,34	1,53	1,53	-	-	-				

Umidade não retirada, devida a alta resistência
Ensaio não realizado

Fonte: Acervo Pessoal

Se excluirmos da análise final os três valores acima de 8, portanto os mais elevados, possivelmente devido a interferências de granulometria não uniforme e pela dificuldade de homogeneização e moldagem dos corpos de prova, a sensibilidade ficará entre 1 e 7,46. De acordo com SKEMPTON e NORTHEY (1952) as amostras ficaram na classificação entre argilas de média sensibilidade a sensíveis.

Os valores mais baixos podem ser explicados pela baixa qualidade da amostra, devido ao amolgamento, aproximando os valores de Su na condição indeformada e amolgada.

4.3 Adensamento Unidimensional

Pelas orientações descritas na norma MB-3336/NBR 12007 – Solo – Ensaio de adensamento unidimensional, realizou-se o ensaio em quinze amostras e dessa forma foi possível a determinação do índice de compressão e coeficiente de adensamento para cada

amostra pelo método de Taylor, vale ressaltar que não houve tensão de pré adensamento. Conforme é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultados dos ensaios de adensamento

Mistura	Cc
Sp	0,4190
SKR(30)	0,1841
SKRm(30)	0,2072
SC(10)	0,1445
AS(30)	0,0518
SC(30)	0,0065
SKR(30)#4,8	0,0552
SKR(30)#2,0	0,0518
SKRm(10)	0,0816
SC(5)KR(25)#2,0	0,1068
SC(2,5)KR(27,5)#2,0	0,1842
SC(1,5)KR(28,5)#2,0	*
SC(5)KR(5)#2,0	0,0970
SC(2,5)KR(7,5)#2,0	0,1063
SC(1,5)KR(8,5)#2,0	0,1156

* Erro na execução do ensaio

OBS: Não houve pressão de pré-adensamento

Fonte: Acervo pessoal

Percebe-se que quanto menor a granulometria do material adotado na mistura com solo puro, sendo o cimento Portland, o coproduto KR ou a mistura dos dois, o coeficiente de compressibilidade diminui. Esse resultado torna-se favorável na estabilização em obras no geral.

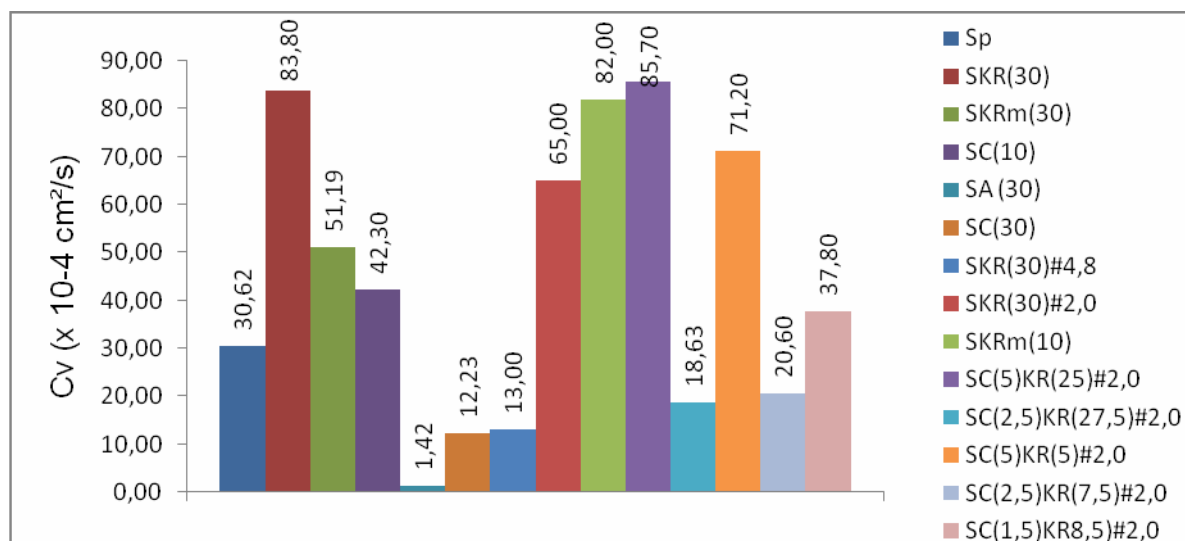
Na Figura 32, os coeficientes de adensamento calculados são apresentados. É importante ressaltar que não foi possível a determinação de todos os coeficientes de todas as tensões aplicadas durante o ensaio.

Figura 32: Resultados de $C_v(\text{cm}^2/\text{s})$ para todas as misturas

σ	Sp	SKR(30)	SKRm(30)	SC(10)	SA (30)	SC(30)	SKR(30)#4,8	SKR(30)#2,0	SKRm(10)	SC(5)KR(25)#2,0	SC(2,5)KR(27,5)#2,0	SC(5)KR(5)#2,0	SC(2,5)KR(7,5)#2,0	SC(1,5)KR(8,5)#2,0
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	14,36	0,00	0,00	10,43	19,20	0,00	0,00	0,00	15,20	21,80	62,60	64,30	0,00	50,80
0,50	37,77	14,77	0,00	0,00	24,00	27,20	0,00	0,00	20,60	0,00	50,90	0,00	11,50	0,00
0,75	12,43	54,92	57,04	14,07	31,30	0,00	30,00	0,00	0,00	0,00	21,90	0,00	15,50	35,80
1,00	0,00	50,18	0,00	51,84	20,80	51,70	59,70	56,00	26,00	65,70	39,90	0,00	0,00	0,00
2,50	0,00	48,50	0,00	94,90	0,00	0,00	89,80	98,90	47,30	143,80	0,00	156,70	62,90	58,00
5,00	0,00	0,00	102,58	66,70	0,00	38,00	61,20	69,10	41,80	65,40	0,00	68,80	55,90	48,50
10,00	30,62	83,80	51,19	42,30	1,42	12,23	13,00	65,00	82,00	85,70	18,63	71,20	20,60	37,80
20,00	25,73	36,37	46,93	12,70	0,00	0,00	0,00	37,70	35,50	11,10	0,00	51,60	14,60	29,00
10,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37	0,00
5,00	13,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,16	0,37	0,00	0,87	1,75
2,50	9,70	14,21	0,00	5,24	0,00	0,00	0,57	0,00	0,52	0,76	0,00	0,90	0,43	0,96
5,00	53,26	0,00	4,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10,00	35,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,88	0,00	0,00	0,00	0,00
20,00	41,55	5,54	5,28	0,00	4,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,39	0,00	0,00	0,00
40,00	30,25	9,94	6,72	0,00	2,75	34,05	0,50	0,00	4,92	1,49	0,00	0,00	0,00	0,00

Fonte: Acervo Pessoal

Percebe-se que as misturas com dois diferentes materiais apresentam taxas de recalques mais elevadas do que as outras misturas dessa pesquisa. Principalmente no início do carregamento.

Figura 33: Resultados de C_v para tensão de 10 KPa

Fonte: Acervo Pessoal

4.4 Correlação entre resistência não drenada e os índices físicos

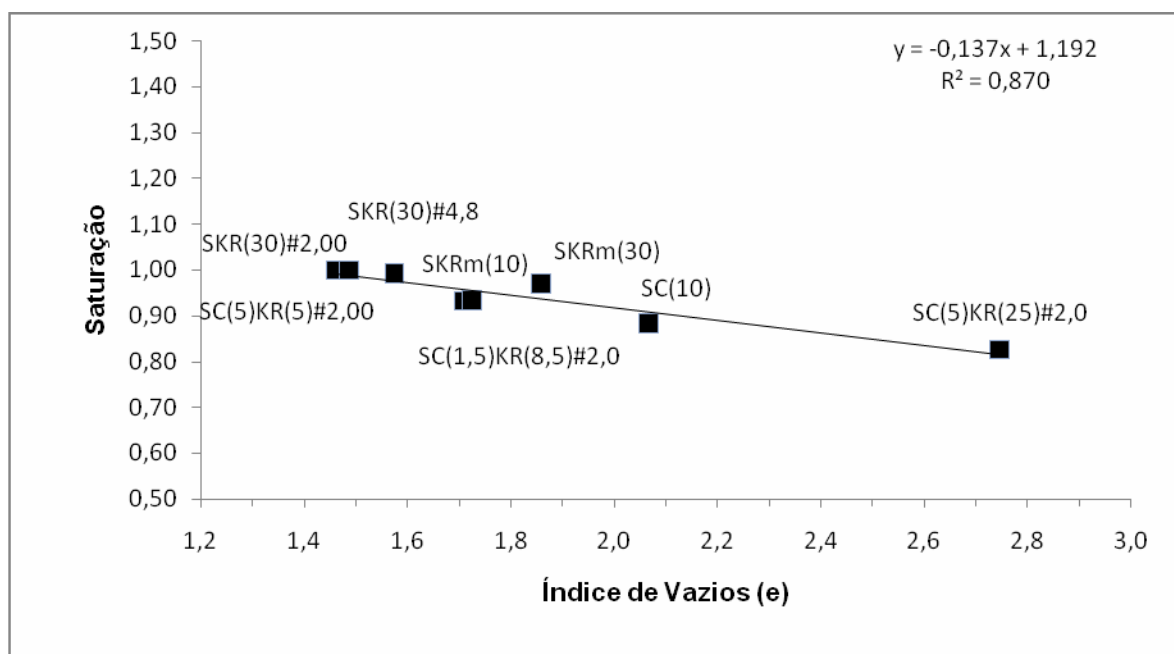
Segundo a Portland Cement Association (1962), o índice de vazios está inversamente relacionado com a estabilidade relativa e a capacidade de suporte do solo. Esses resultados são apresentados na Tabela 15 e nas Figura 34, 35 e 36.

Tabela 15: Resultados dos índices físicos das misturas que foram feitos os ensaios de Cone Fall

MISTURA	Cone Fall	Umidade (Kpa)	[*] 100 (%)	γ (KN/m ³)	γ_t (KN/m ³)	γ_d (KN/m ³)	e	S 100 (%)	[*]
SC(10)	15,60		0,69	2,64	1,45	0,86	2,07	0,88	
SKR(30)#2,00	18,04		0,62	2,50	1,64	1,02	1,46	1,00	
SKR(30)#4,8	13,96		0,62	2,50	1,58	0,97	1,57	0,99	
SC(5)KR(5)#2,00	7,58		0,62	2,61	1,70	1,05	1,49	1,00	
SC(1,5)KR(8,5)#2,00	8,11		0,62	2,58	1,54	0,95	1,71	0,93	
SC(5)KR(25)#2,00	11,78		0,59	3,83	1,63	1,02	2,75	0,83	
SKRm(10)	12,96		0,62	2,58	1,53	0,94	1,73	0,93	
SKRm(30)	30,10		0,72	2,50	1,50	0,87	1,86	0,97	

Fonte: Acervo Pessoal

Figura 34: Correlação entre o teor de saturação e o índice de vazios das misturas

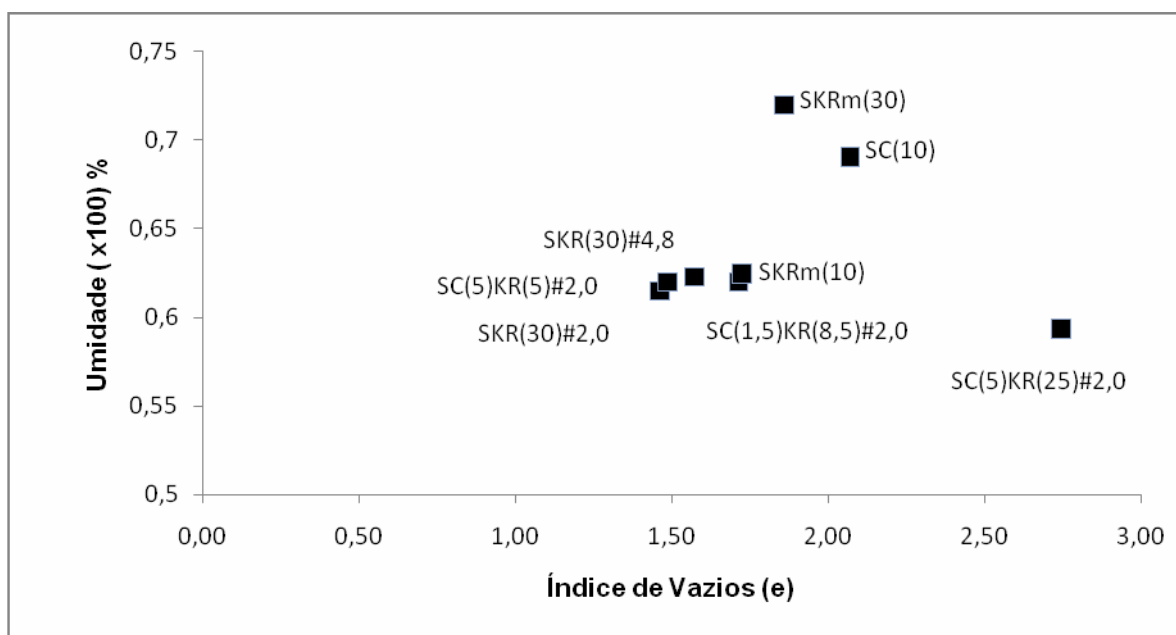


Fonte: Acervo Pessoal

As misturas analisadas estão com o teor de saturação muito próximas de 100%, sendo assim classificados como misturas parcialmente saturadas. A mistura que mais

incorporou água foi a com 5% de cimento e 25% de coproduto KR e a que possui maior valor de índice de vazios, o que mostra que essa mistura apresentou maior teor de vazios com ar do que as outras amostras.

Figura 36: Correlação entre o teor de umidade final e o índice de vazios



Fonte: Acervo Pessoal

Os resultados dos índices de vazios tendem a aumentar com o aumento do teor de umidade, o que não acontece com a mistura SC(5)KR(25)#2,0 pois possui menor valor de umidade, logo maior massa seca da mistura. A maior parte das misturas fica com valores de umidade próximos e também os índices de vazios.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Os ensaios de pozolanicidade e mineralogia permitiram concluir que o coproduto KR não é um material pozolânico e cristalino. Contudo, o coproduto apresentou características cimentantes quando incorporado ao solo e ao solo com cimento, promovendo aumento nos valores de resistência.

No que se refere às diferentes faixas granulométricas adotadas em diferentes misturas, observa-se a alteração no comportamento dos valores de resistência. Ela apresentou resultados mais elevados para menores granulometrias. Além disso, a partir dos ensaios de resistência foi constatada que houve uma pequena perda de umidade devida ao ganho de idade das amostras e, também possivelmente devido à dificuldade no isolamento do corpo de prova no fechamento por sacolas plásticas.

Os valores de Su, em resposta aos ensaios de Cone Fall Test, mostraram resultados satisfatórios e coerentes com o que foi proposto, isto é, com o uso do coproduto KR, para estabilização de solos moles. Entretanto nos ensaios de Cone Fall, percebeu-se valores mais elevados em relação ao outro ensaio de determinação de resistência, o que pode ser explicado devido à perda de umidade na superfície do corpo de prova, onde é realizado o ensaio, o que influencia no ganho de resistência. A mistura com cimento resultou em maior valor de Su, como esperado, entretanto o coproduto KR apresenta desempenho competitivo, sob ponto de vista econômico e ambiental.

Os resultados dos ensaios de adensamento demonstraram que os valores dos coeficientes de compressibilidade encontrados foram reduzidos com a adição dos aglomerantes usuais e também com o coproduto KR. E que quanto menor a granulometria deles, melhor o resultado, e maior a estabilização. O mesmo resultado foi identificado no coeficiente de adensamento, suas taxas foram minoradas com a adição do cimento e do coproduto KR.

De forma geral, conclui-se que o coproduto promoveu ganhos de resistência e que estes variam dependendo da granulometria do coproduto, isto é, quanto mais finos na mistura, maiores os resultados de Su, seja por maior facilidade na homogeneização da mistura, ou pela

maior área específica que intensifica as reações de hidratação entre cimentantes e argilominerais presentes no solo.

A expansão, apesar de não interferir no melhoramento de solos argilosos, que é o objetivo do trabalho, é sempre uma característica analisada quando se fala de escória. Portanto ao fazer essa verificação, os valores encontrados foram satisfatórios para o uso do coproduto KR.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para futuros trabalhos visam a complementação e ampliação desse estudo. Sugere-se:

- Analisar outros teores de coproduto KR juntamente do aglomerante já utilizado;
- Verificar com os mesmos ensaios utilizados nessa pesquisa e com os mesmos valores de aditivos, os resultados em diferentes solos argílicos;
- Estudar outros materiais que inicialmente não possuem valor na aplicação deles em solos que necessitam de melhora na qualidade para não serem descartados;
- Avaliar o ganho de resistência não drenada em solos moles aplicando ensaios de campo, além dos laboratoriais;
- Reavaliar um método para que a amostra perca o mínimo de umidade no decorrer das idades propostas;

REFERÊNCIAS

Ajayi-Mejebi A, Grissom WA, Smith LS and Jones EE (1991) Epoxy resin-based chemical stabilization of a fine poorly graded soil system. *Transportation Research Record* 1295: 95–108.

Al-Rawas AA, Hago A and Al-Sarmi H (2005) Effect of lime, cement and sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman *Building and Environment* 40(5): 681–687.

ALBERES, A.P.F.; MELCHIADES, F.G.; MACHADO, R.; BALDO, J.B.; BOSCHI, A.O. **Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X.** *Cerâmica*, v. 48, n. 305, p. 37-37, 2002.

AMBIENTEC – Laboratório de Emissões - NOTA TÉCNICA - Utilização de resíduos sólidos – Disponível em: <http://www.ambientec.com.br/main.php?ver=artigo&id=4>. Acesso em: 17 fev. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D4648/D4648M-10**: Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil, 2010.

ArcelorMittal. **Fluxo de Produção – Usina – Quem somos – ArcelorMittal Tubarão.** Disponível em: http://tubarao.arcelormittal.com/usina/fluxo_producao/fluxo_producao.asp. Acesso em: 10 dez. 2016.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland Comum - Especificações. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7181**: Análise granulométrica de solos. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 7183**: Determinação do limite e relação de contração de solos. Rio de Janeiro, 1982.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos - Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 12024: Solo-cimento - Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos - Procedimento.** Rio de Janeiro, 1992.

ALMEIDA, M.S.S.; MARQUES, M.E.S. **Aterrossobre solos moles: projeto e desempenho.** São Paulo, Oficina de Textos, 2010.

Bergado D, Anderson L, Miura N, Balasubramaniam A. **Soft ground improvement: in lawland and other environment.** New York: American Society of Civil Engineers; 1996.

BREHM, Feliciane Andrade. et al. **Análise da estabilização por solidificação de lodo de fosfatização em matrizes de cimento Portland e de cerâmica vermelha para a utilização na construção civil.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p 15-27, abr./jun. 2013.

Bahar B, Benazzoug M, and Kenai S (2004) Performance of compacted cement stabilized soil. *Cement and Concrete Composites* 24(7): 811–820

Bolander P (1999) Laboratory testing of non-traditional additives for stabilization of roads and trial surfaces. *Transportation Research Record* 1652: 24–3.

_____. CPR Grouting. Disponível em: http://www.engegraut.com.br/cpr_grouting/. Acesso em 20 de Dez. 2016.

Croft JB (1967) **The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization.** *Geotechnique* 17: 119–135.

CARUSO (2009). **Estudos Ambientais e Engenharia Ltda** - Disponível em: <www.osx.com.br>. Acesso em: agosto 2010

CASTELO BRANCO, Verônica Teixeira Franco et al. **O Efeito da Heterogeneidade do Agregado de Escória de Aciaria nas Propriedades de Misturas Asfálticas.** XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes realizado pela Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET. Florianópolis, 2004.

CASTELLO, R. R.; POLIDO, U. F. **Algumas características de adensamento das argilas marinhas de Vitória – ES.** In: VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações, Porto Alegre, 1986. Anais... Porto Alegre, 1986, v. 1, p. 149-159.

CASTELLO, R. R.; POLIDO, U. F. **Tentativa de sistematização geotécnica dos solos quaternários de Vitória - ES.** In: Simpósio sobre depósitos Quaternários das Baixadas Litorâneas Brasileiras: Origem, Características Geotécnicas e Experiências de Obras, Rio de Janeiro, 1988. Anais... Rio de Janeiro, 1988, v. 2, p. 3.1-3.23.

_____. **CCA Brasil Soluções Sustentáveis.** Disponível em: <http://www.ccabrasil.org.br/index.asp>. Acesso em 11 jan. 2017.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TUBARÃO - CST. **Acerita, escória de aciaria com redução de expansão.** In: Seminário escória de aciaria; a excelência na utilização do material de múltiplas aplicações. Vitória, 2003.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **"Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil"**. - Data da legislação: 05/07/2002 - Publicação DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 420/2009 - **"Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas."** - Data da legislação: 28/12/2009 - Publicação DOU nº 249, de 30/12/2009, págs. 81-84.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 430/2011 - **"Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA."** - Data da legislação: 13/05/2011 - Publicação DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89.

_____. Escória de aciaria in natura e acerita, escória de aciaria com redução de expansão. Qualidade e tecnologia aplicada à pavimentação rodoviária. Cartilha de utilização. Vitória, 2003b.

_____. Utilização de escória de aciaria LD-NP. Manual de utilização. Vitória, 2003c.

_____. **Conceitos e Ensaio da Mecânica dos Solos - Classificação dos Solos para Fins Rodoviários**. Disponível em: <http://etg.ufmg.br/~jisela/pagina/Notas%20de%20aula%20solos.pdf>. Acesso em 26 de fev. 2017.

CORREIA, A. A. S. **Aplicabilidade da técnica de deepmixing aos solos moles do Baixo Mondego**. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra. 502 p, 2011.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. 2001.

CRUZ, M., – **Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento**, Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotécnica e Fundações. Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

DALLA ROSA, A. **Estudo dos parâmetros-chave no controle da resistência de misturas solo-cinza-cal**. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

DER-MG - Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais. **DMA-1**. Método de ensaio para avaliação do potencial de expansão da escória de aciaria – Adaptação do PTM 130. 1982. Pennsylvania Testing Method. 1982.

_____. DeepSoilMixing. Disponível em: <http://www.kellerholding.com/deep-soil-mixing.html>. Acesso em 05 de fev. 2017.

_____. **Departamento Nacional de Produção Mineral.** Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/acesso-a-informacao/estatisticas>. Acesso em 11 jan. 2017.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo** / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. – 2. ed. rev. atual. – Rio de Janeiro, 1997.

_____. Ensaio de Determinação de Massa Específica. Disponível em: <http://www.geoteste.com.br/servicos>. Acesso em 19 de fev. 2017.

_____. Estudos Geotécnicos de laboratório de Solos. Disponível em: <http://loctest.com.br/portfolio/estudos-geotecnicos-de-laboratorio-de-solos/>. Acesso em 23 de fev. 2017

_____. Ensaio de Penetração de Cone. Disponível em: <http://www.construcaocivil.info/ensaio-de-penetracao-de-cone-astm-c7802012/>. Acesso em 20 de jan. 2017.

EuroSoilStab. **Development of Design and Construction Methods to Stabilize Soft Organic Soils: Design Guide for soft soil stabilization.** CT97-0351, European Commission, Industrial and Materials Technologies Programme (Rite-EuRam III), Bruxelas. 2002.

FINARDI, J., **Revisão dos Processos e dos Reagentes para Dessulfuração de Ferro Líquido, Conferência Internacional sobre Dessulfuração e Controle de Inclusões da ABM.** Volta Redonda, RJ, 1997, pg 19-90

_____. Geopesquisas Serviços. Disponível em: <http://www.geopesquisa.com/Services.aspx>. Acesso em 09 de fev. 2017.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa.** 4ª edição, São Paulo. Ed Atlas, 2002.

GONÇALVES, R. De. M. **Incorporação de Coproduto de Aciaria KR e Polímero PDC em Solos para Base de Pavimentos.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória. 2016.

GUMIERI, A.G. (2002) – **Estudo da viabilidade técnica da utilização da escória de aciaria do processo LD como adição em cimento** (Doutorando em Engenharia). Pós graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HOLT, C. **Chemical Stabilization of Inherently Weak Subgrade Soils for Road Construction – Applicability in Canada.** In: Annual Conference of The Transportation of Canadá. Halifax, Nova Escócia. 2010.

IAB - Instituto Aço Brasil. **Relatório de Sustentabilidade Sectorial.** 2016. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Sustentabilidade_AcoBrasil_2016.pdf. Acesso em: 10 dez 2016. INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA - IBS. Anuário estatístico da indústria siderúrgica brasileira - 2005.

_____. **Estudo sobre Aplicações de Escórias Siderúrgicas.** Relatório Final, 104p, 1999.

_____. Instituto Brasileiro de Siderurgia. Balanço social da siderurgia, 2002.

INGLES, O. G; METCALF, J.B. **Soil Stabilization – Principles and Practice**. Sidney: Butterworths, 1972. 374p.

JOHN, V.M. Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio. Tese de Doutorado. São Paulo : EP USP, 1995.

Khair A, Nalluli C and Kilkenny WM (1991) Soil–cement tiles for lining irrigation canals. *Irrigation and Drainage System* 5(2): 151–163.

KIRMSE, O.J. – **Estudo do Comportamento Metalúrgico do Reator Kambara através de Modelagem Física** – Dissertação de Mestrado, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, 2006, p.19-57.

KITAZUME, M; TERASHI, M. **Factors Affecting Strength Increase**, In: Costal Development Institute of Technology (CDIT), *The Deep Mixing Method: principle, design and construction*, chapter 2, Tokyo, Japan, Costal Development Institute of Technology, 2001.

KORT, D.A. **Aspectos on soil investigation for embankment on soft soil**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SITE CHARACTERIZATION, ISC-4, Porto de Galinhas, v. 1, p. 157-165, 2012.

LEMOS, Leandro Rocha, et al. **"Maximizing hot metal desulfurization in a Kanbara reactor/Aumento da eficiencia de dessulfuracao do gusa liquido em um reator Kanbara."** *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, vol. 8, no. 1, 2011, p. 31+. AcademicOneFile, Accessed 11 Jan. 2017.

LIU, C.; EVETT, J.B. **Soils and foundations**. 6th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.

LOPES, L. S. E. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo-Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 208 f, 2011.

NASCIMENTO, J.F. (2003). **Estudo da expansibilidade em escória de aciaria para uso em pavimentação rodoviária**, dissertação de mestrado, UFMG.

MACHADO, A. T. **Estudo comparativo dos métodos de ensaio para avaliação da expansibilidade das escórias de aciaria**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 135p, São Paulo, 2000.

Malko, J. A C. **Aplicabilidade de Enzimas para Melhoramento de Solos em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 121 f. 2015.

_____. **MASSA ESPECÍFICA** Laboratório de solos 2012 Prof.: João Guilherme Rassi Almeida Disciplina: Laboratório de Solos Pontifícia Universidade Católica de Goiás.

MASUERO, A. B.; VILELA, A. C.; DAL MOLIN, D. **Utilização de escórias de aciaria e de cobre como adições para concretos.**In: Internationalcongressof concrete technology, 1998, Buenos Aires. Anais.Buenos Aires, p. 447-460, 1998.

MATSUO, M.; SHOGAKI, T. **Effects of Plasticity and Sample Disturbance on Statistical Properties of Undrained Shear Strength.**Soils and Foundations, v. 28, n. 2, p. 14-24, 1988.

Mendonça, A.O; Tavares, L.C; Brunes, A.P; Monzón, D.L.R; Villela, F.A. **Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada.** Biosci. J., Uberlândia, v. 29, n. 5, p. 1154-1162, Sept./Oct. 2013.

Miller G and Azad S (2000) Influence of soil type on stabilization with cement kiln dust. Construction and Building Materials 14(2): 89–97.

Mitchell JK (1976) Fundamentals of Soil Behaviour. Wiley, New York, NY, USA.

Motz, H., and Geiseler, J. 2001———. “**Products of steel slags an opportunity to save natural resources.**” WasteManage., 21, 285–293.

NASCIMENTO FILHO, V.F. **Técnicas analíticas nucleares de fluorescência raio-x por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF).** Departamento de Ciências exatas/ESALQ, USP, SP. Julho. 1999.

NipponSlagAssociation.**Characteristicsandapplicationsofironandsteelslag.**Disponível em: <http://www.slg.jp/e/slag/usage.html>. Acesso em: 02 nov. 2016.

NOGUEIRA, E. G. **Estudo de algumas soluções de tratamento de solos moles para construção de aterros no trecho sul do rodanel.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Geotécnica. Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2010.

PEDROSA, Rogério Antônio Alves. **Estudo da viabilidade técnica e econômica do uso de agregados de escória de aciaria em concreto betuminoso usinado a quente.** NUGEO, Área de concentração: Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010. (Dissertação de Mestrado).

PEDREIRA, C. L. S; GOULARTE, C. L. **Estabilização Química de Solo com Adição de Cimento ou Cal como Alternativa de Pavimento.** In: V Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul, 2009, Pelotas/RS. Anais de Congresso. Pelotas/RS. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. 2009.

Petry TM, Little DN. **Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures** – history, practice, and future.JMaterCivEng 2002;14(6):447–60.

PEREIRA, E. A. C. **Aspectos técnicos da gestão de resíduos nas siderúrgicas integradas a coque.** Metalurgia & Metais, são Paulo, v. 51, p. 122-128, 1995.

PORTELINHA, F. H. M. **Efeitos da Cal e do Cimento na Modificação dos Solos para Fins Rodoviários: Mecanismos de Reação, Parâmetros de Caracterização Geotécnica e Resistência Mecânica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 2008.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudo na cultura da cana-de-açúcar.** Jaboticabal: Funep, 2001. 67p.

RODRIGUES, G. L. C. **Caracterização e Avaliação da Expansibilidade de Escórias de Aciaria LD Não Tratadas e Tratadas.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2007.

ROHDE, L. **Escória de aciaria elétrica em camadas granulares de pavimentos – estudo laboratorial.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2002.

SANDRONI, S.S.; CONSOLI, N.C. **Sobre a prática da Engenharia geotécnica com dois solos difíceis: os extremamente moles e os expansivos.** In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, Gramado. Anais eletrônicos: 8ª Palestra (PA08). 2010.

SANTOS, M.; LIMA, D.; BUENO B. **Estabilização dos Solos com Cal e Betume.** 6ª Reunião de Pavimentação Urbana, p. 74-97 – Santos, 1995.

Sezer A, Inan G, Yimaz HR and Ramyar K (2006) Utilization of a very high lime flyash for improvement of Izmir clay. *Building and Environment* 41(2): 150–155.

SCHAEFER, V. R., MITCHELL, J. K., RYAN, P. E., BERG, R, FILZ, G. M. e DOUGLAS, S. C. **Ground Improvement in the 21st century: a comprehensive web-based information system.** Geocongress 2012, 2012.

SHENG, G.; HUANG, P.; WANG, S.; CHEN, G. Potential Reuse of Slag from the Kambara Reactor Desulfurization Process of Iron in an Acidic Mine Drainage Treatment. *Journal of Environmental Engineering*. 140(7). 2014.

Sherwood, P. T. 1995. **Alternative materials in road construction: A guide to the use of waste, recycled materials and by-products,** Thomas Telford, London.

Shi, C. J., and Qian, J. S. 2000. “**High performance cementing materials from industrial slags—A review.**” *Resources, Conservation Recycling*, 29, 195–207.

SILVA, Prepedigna Delmiro Elga Almeida da. **Estudo do Reforço de Concreto de Cimento Portland (Whitetopping) na Pista Circular Experimental do Instituto de Pesquisas Rodoviárias.** Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001. 376p.

SILVA, E. A. da, MENDONÇA, R., L de. e DOBELE, C., H., M., 2002, “**Utilização da Escória de Aciaria em Todas as Camadas do Pavimento**”. 16º Encontro de Asfalto, trabalho convidado, Rio de Janeiro, RJ, Dezembro.

SILVA, A.C. & SILVA, I. A., **Estudo Comparativo do Pré-Tratamento do Gusa Líquido em Reatores Diversos: Carro Torpedovs Reator Kambara**, Projeto de Pesquisa Apresentado à FAPEMIG, 2002.

SOUZA, E. B. DE O. **Escórias De Aciaria e Resíduos de Concretos Refratários em Componentes de Pavimentação**. Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte. 2007.

_____.Stabtec. Disponível em: <http://www.geosonda.com.br/stabtec.php>. Acessoem: 18 de jan. 2017.

Tang C, Shi B, Gao W, Chen F and Cai Y (2007) Strength and mechanical behaviour of short polypropylene fiber reinforced and cement stabilized clay soil. *GeotextilesandGeomembranes* 25(3): 194–202.

TAKANO, C., **Termodinâmica de Cinética no Processo de Dessulfuração de Ferro e Aço**, Conferência Internacional sobre Dessulfuração e Controle de Inclusões da ABM. Volta Redonda, RJ, 1997, pg 1-18.

TESSARI, C. L; COBE, R. P. **Melhoramento de Solo com Incorporação De Resíduos de Siderurgia**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Espírito Santo. 2015.

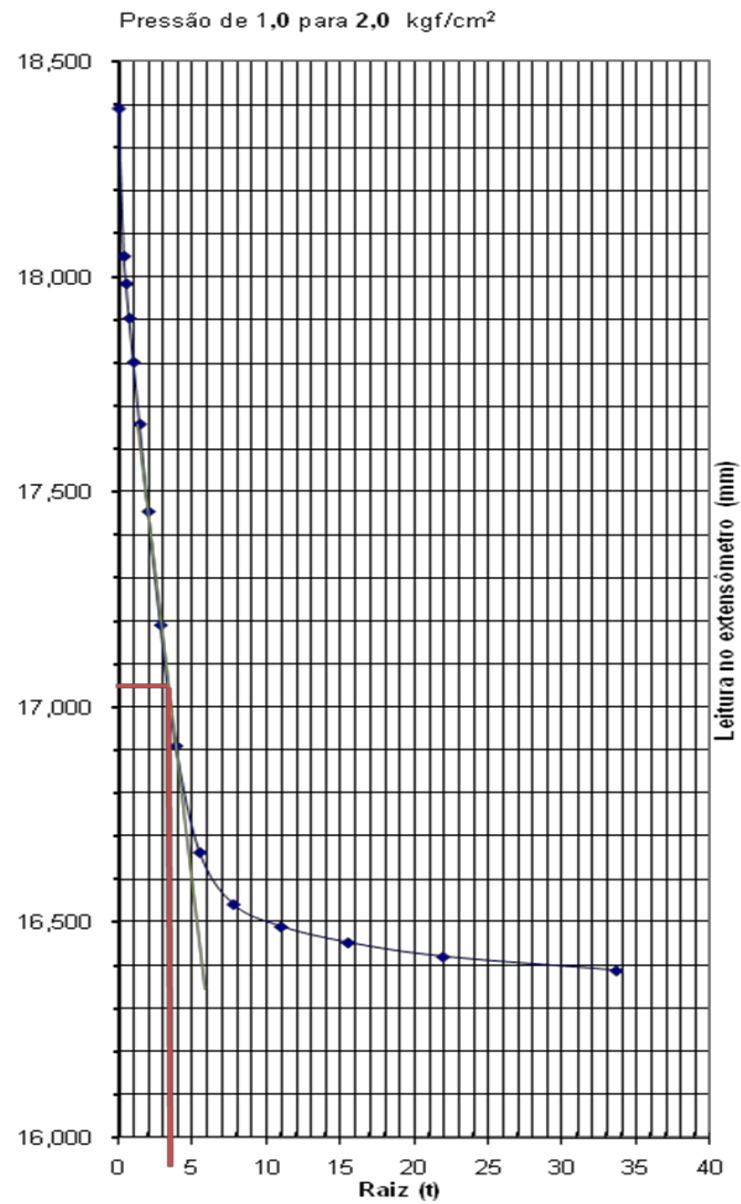
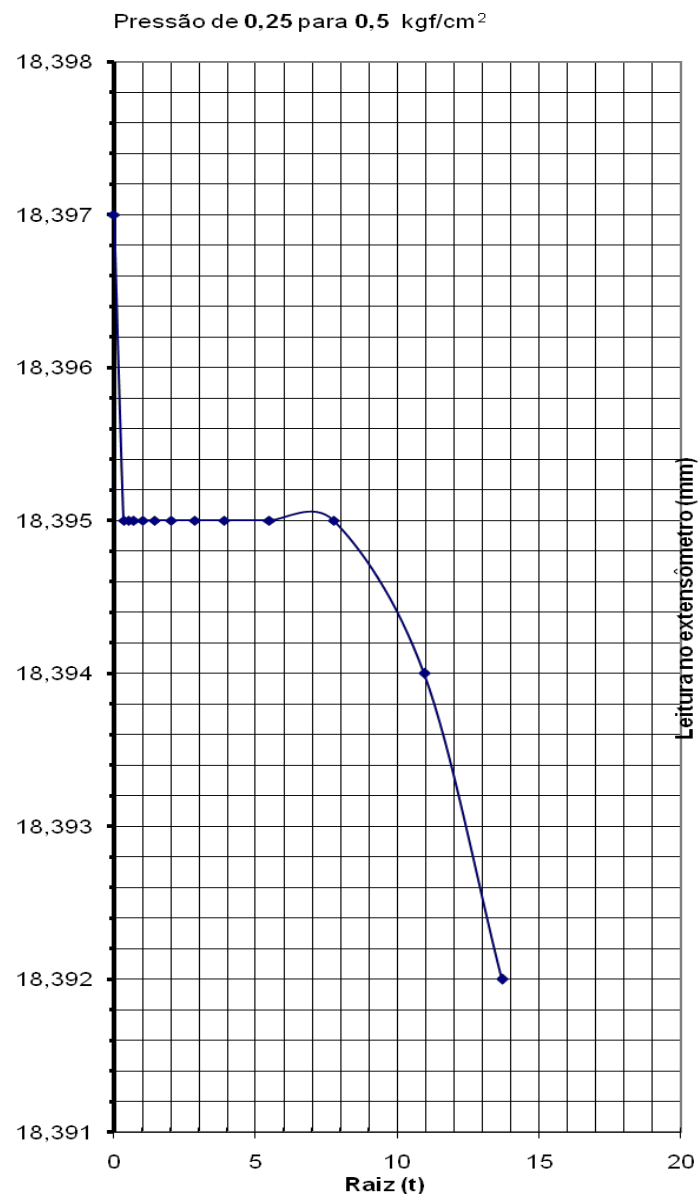
Tingle JC and Santoni R (2003) Stabilization of clay soils with non-traditional additives *Transportation Research Record* 1819: 72–84.

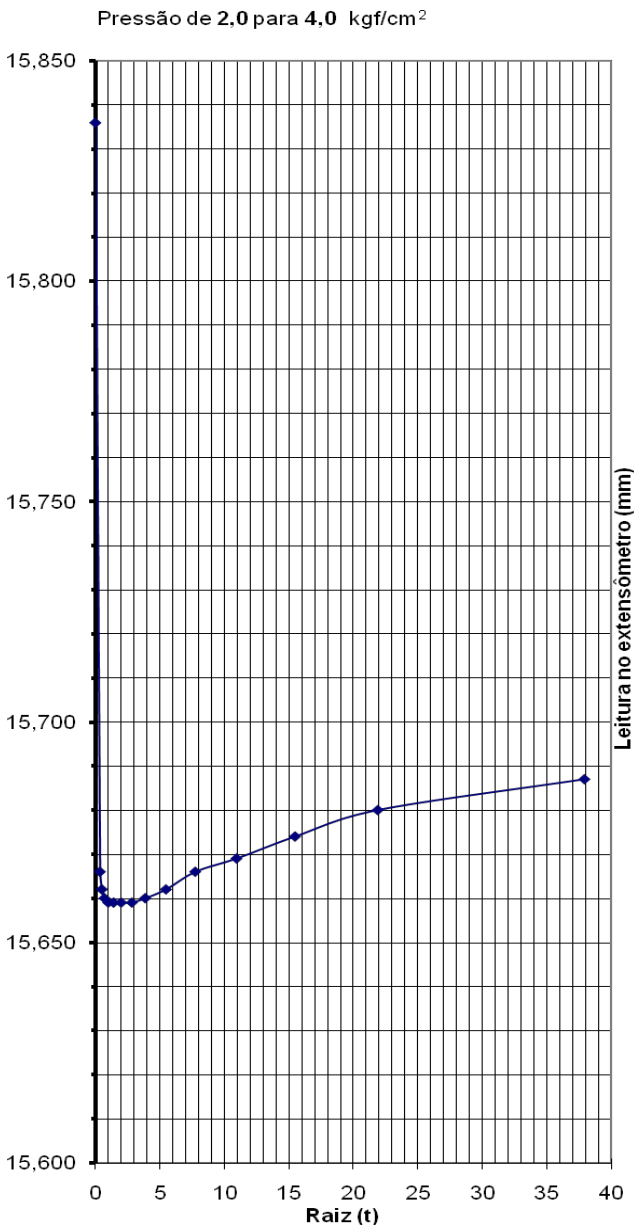
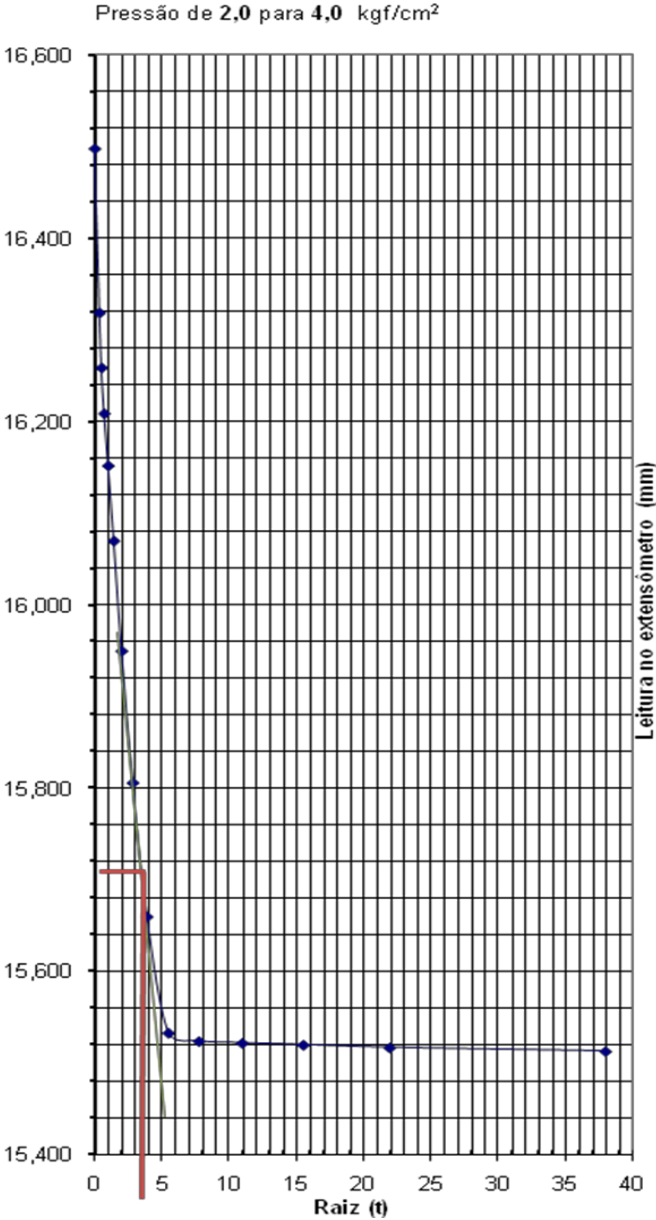
TONG, ZHIBO; MA, GUOJUNL; CAI, XUN; XUE, ZHENGLIANG; WANG, WEI; ZHANGL,

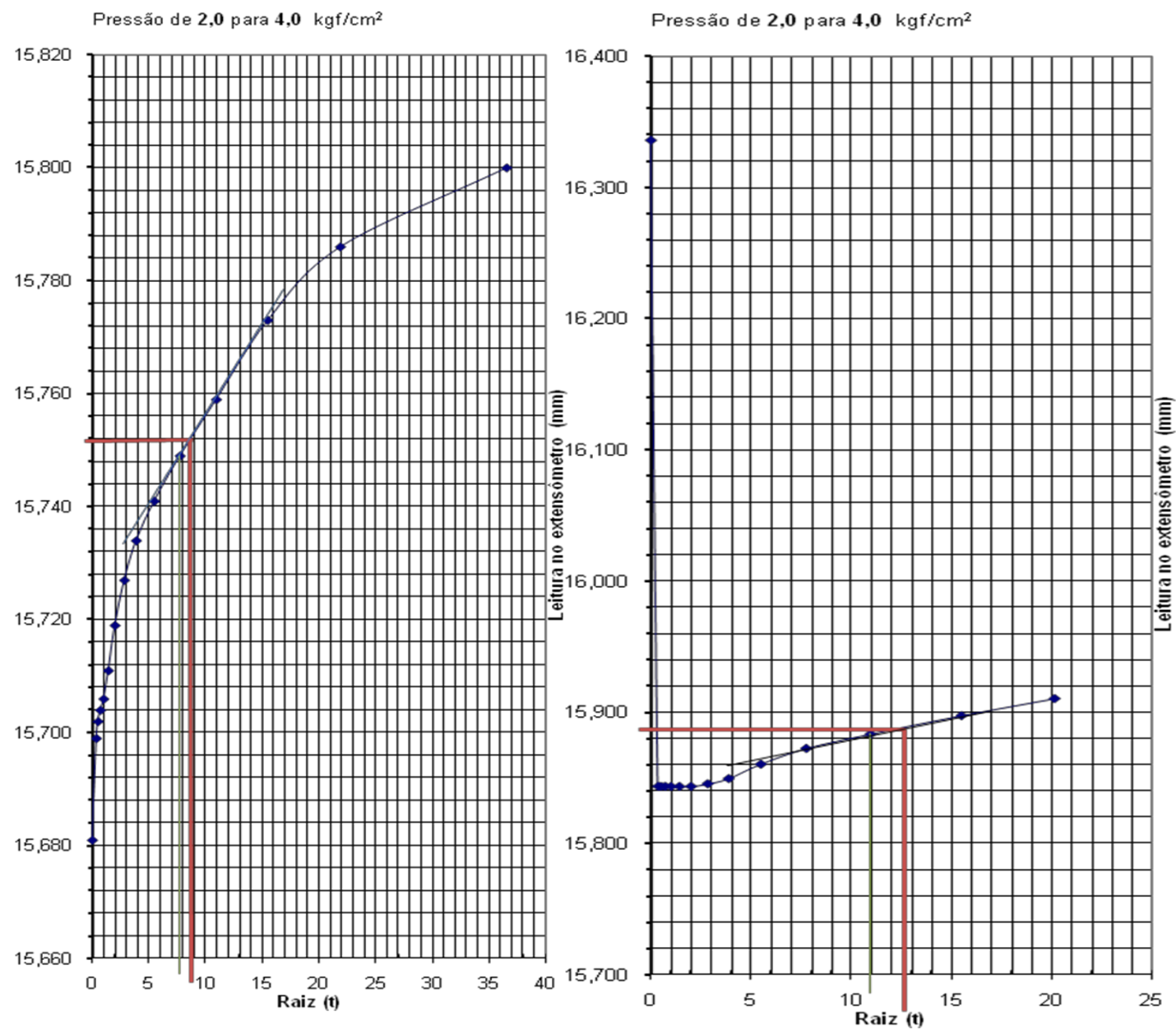
XIANG.CharacterizationandValorizationofKanbaraReactorDesulfurizationWasteSlagof Hot Metal Pretreatment. *WasteBiomass Valor* 7:1–8. 2

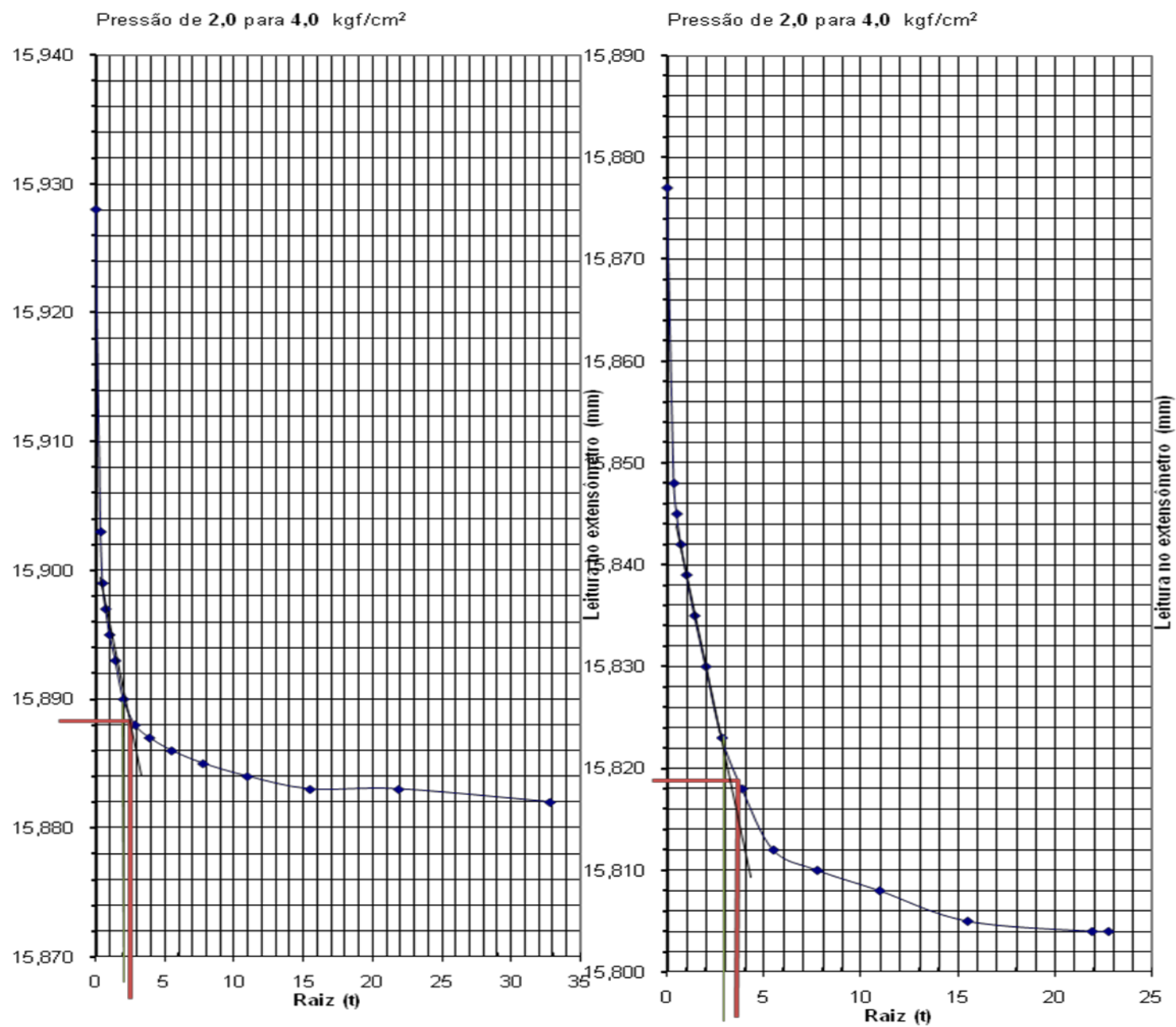
APÊNDICE

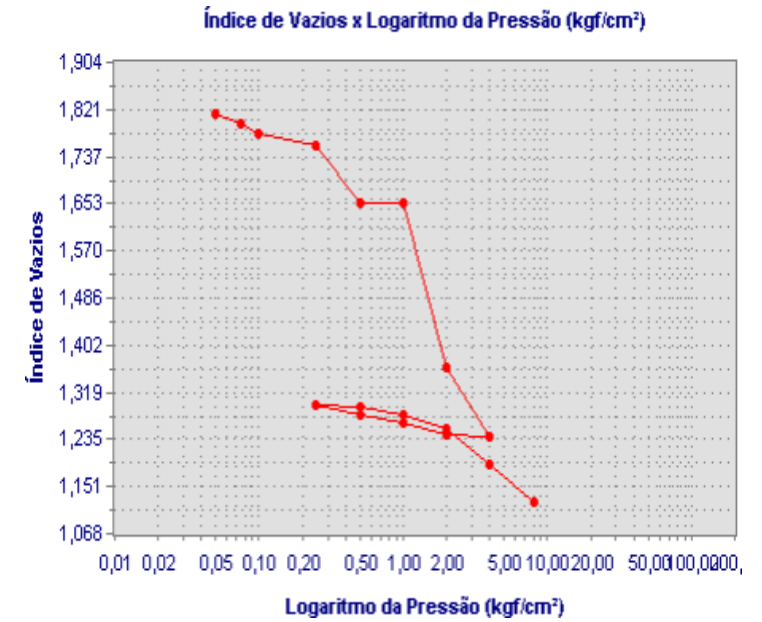
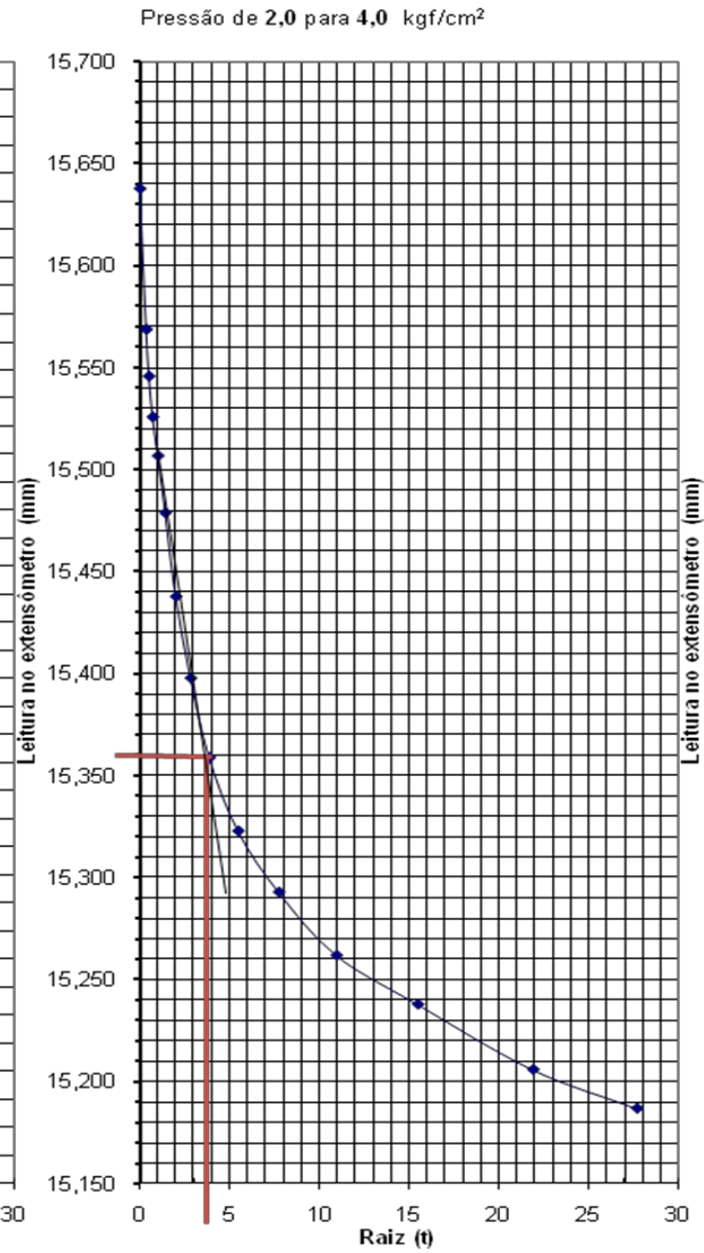
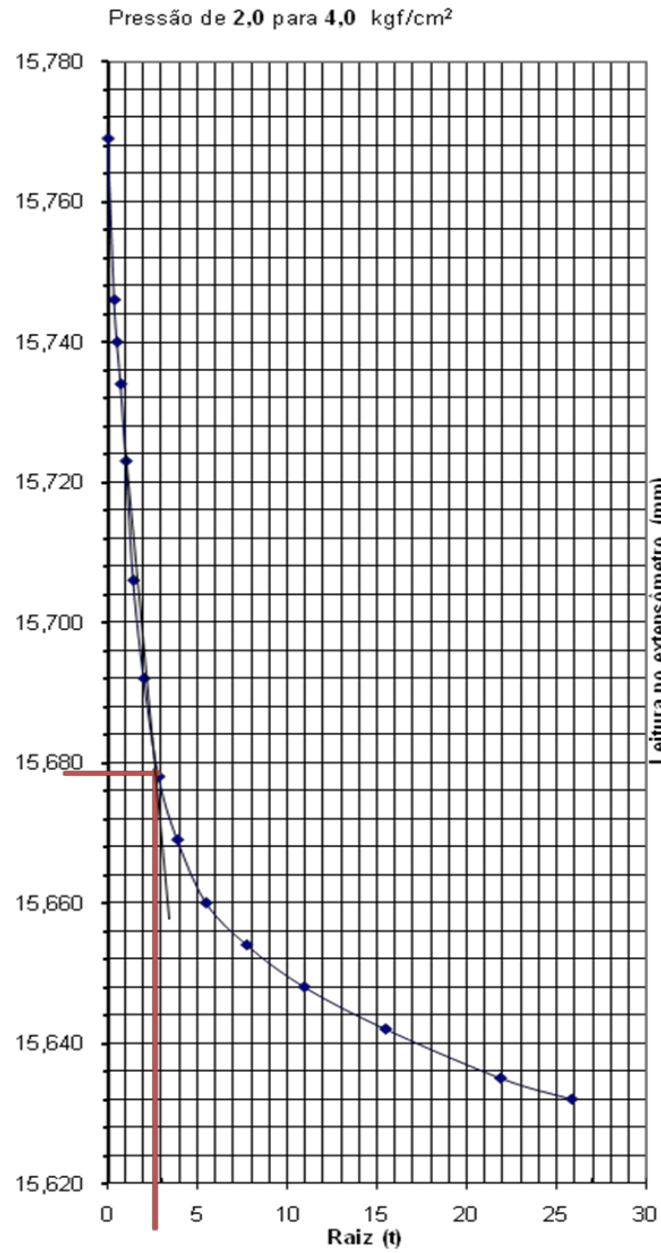
Adensamento: Solo Puro



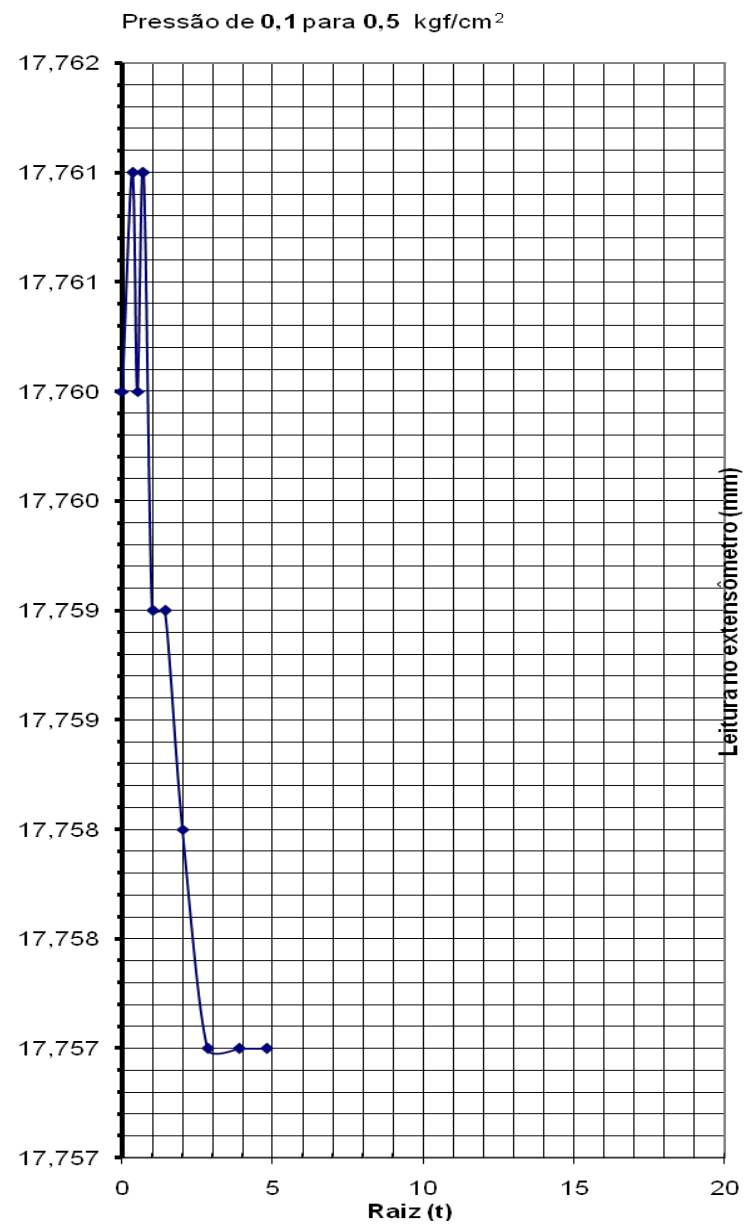
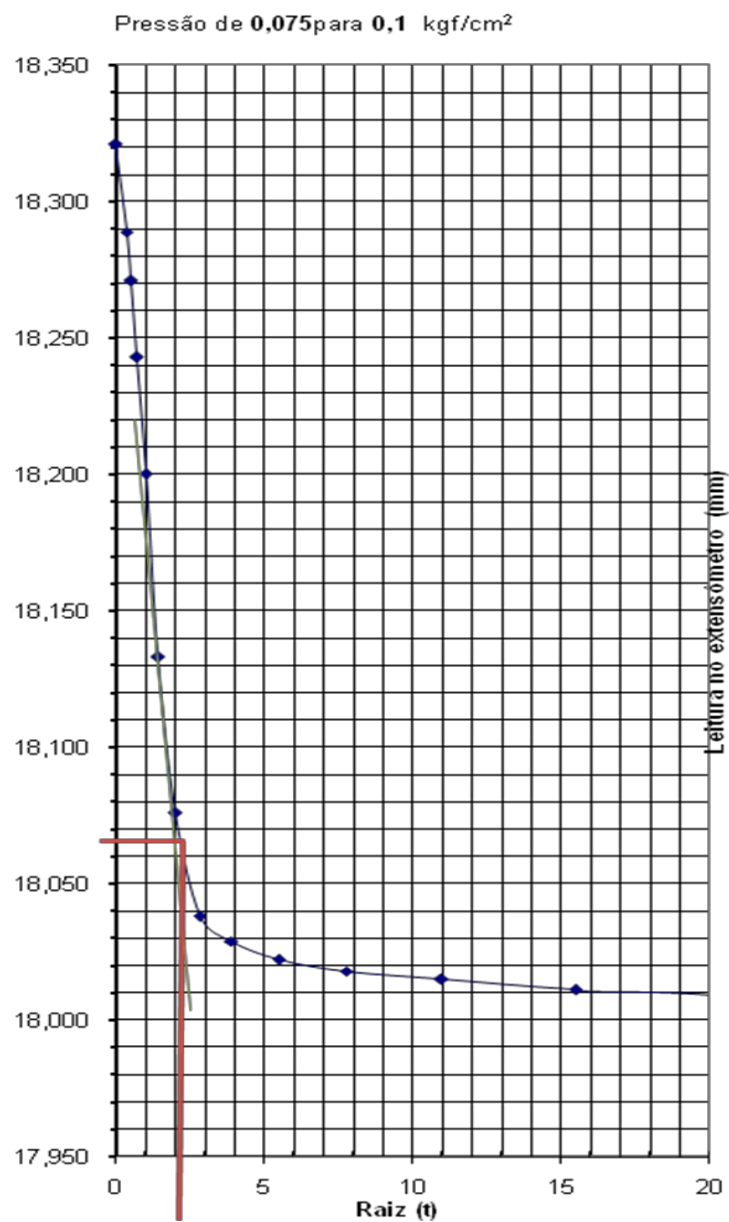


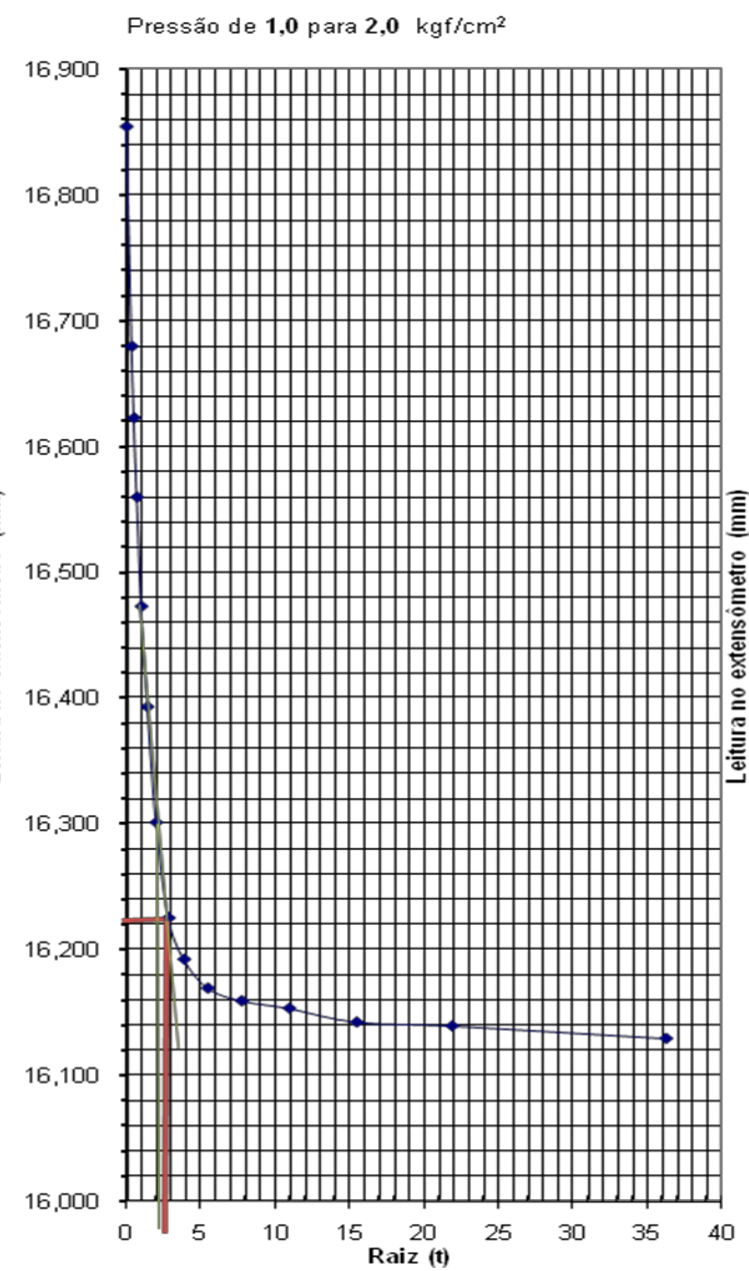
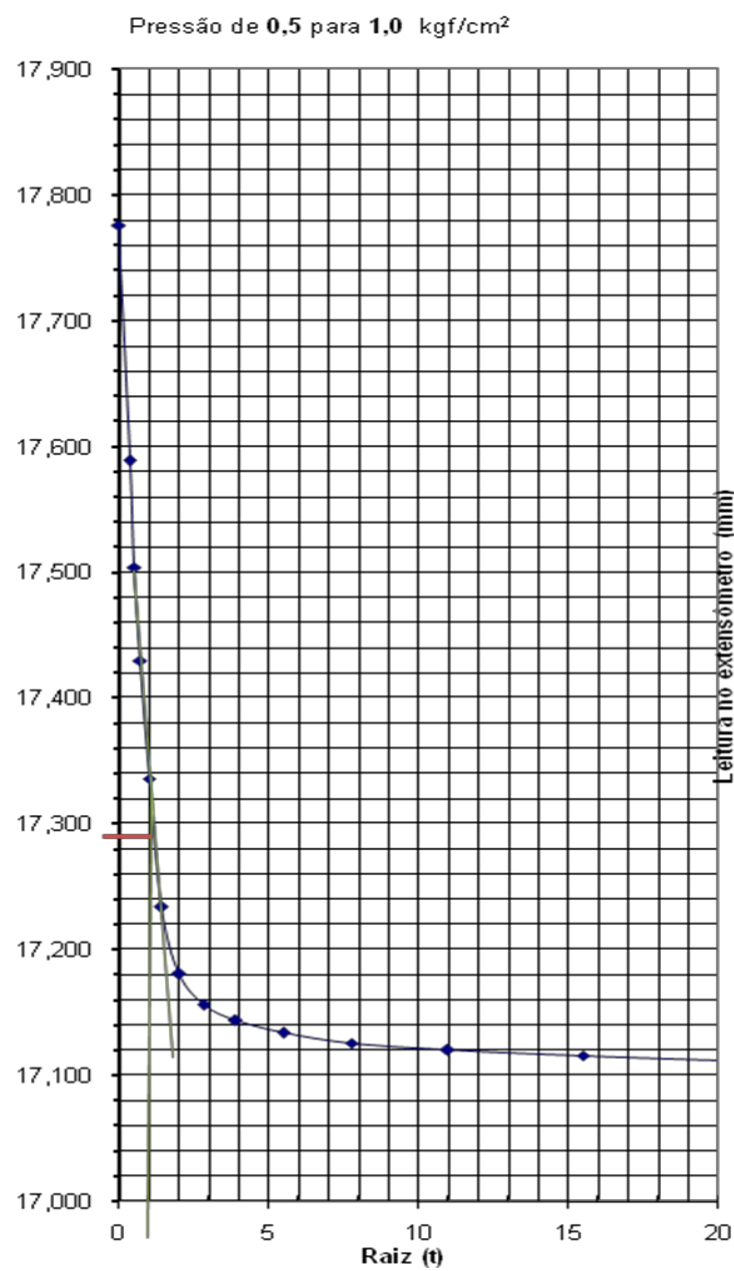


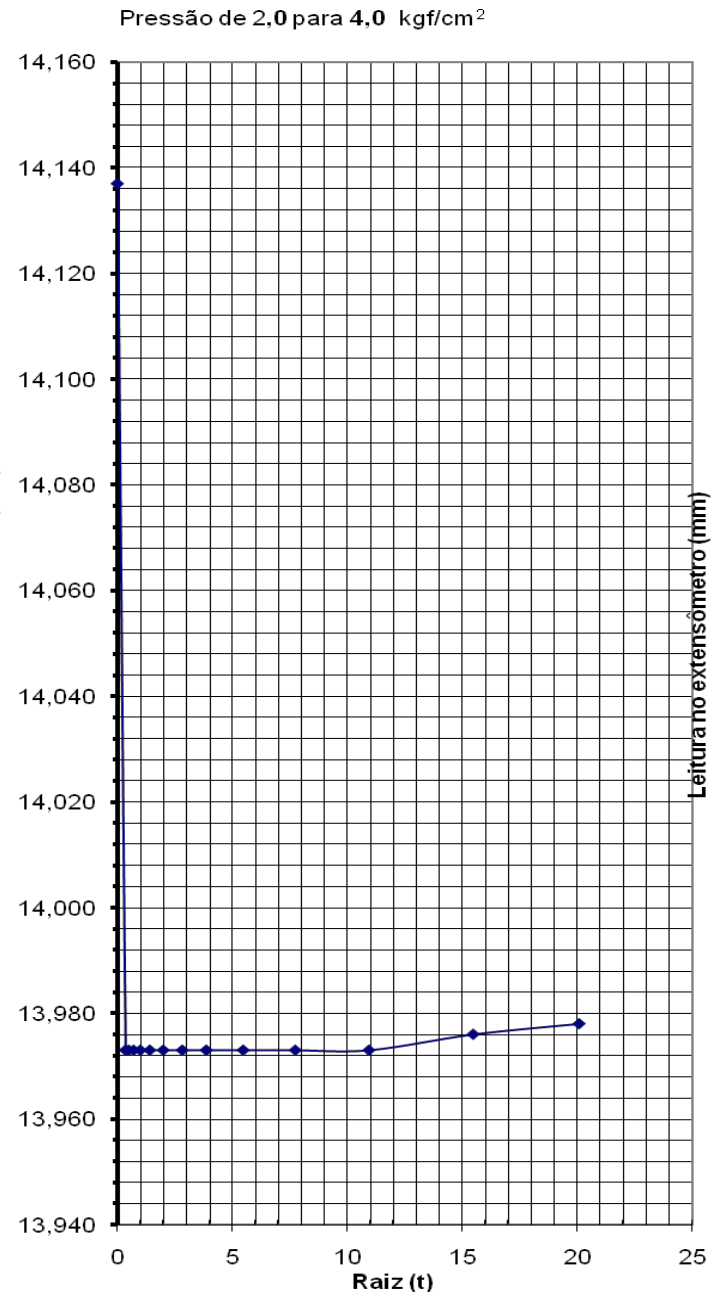
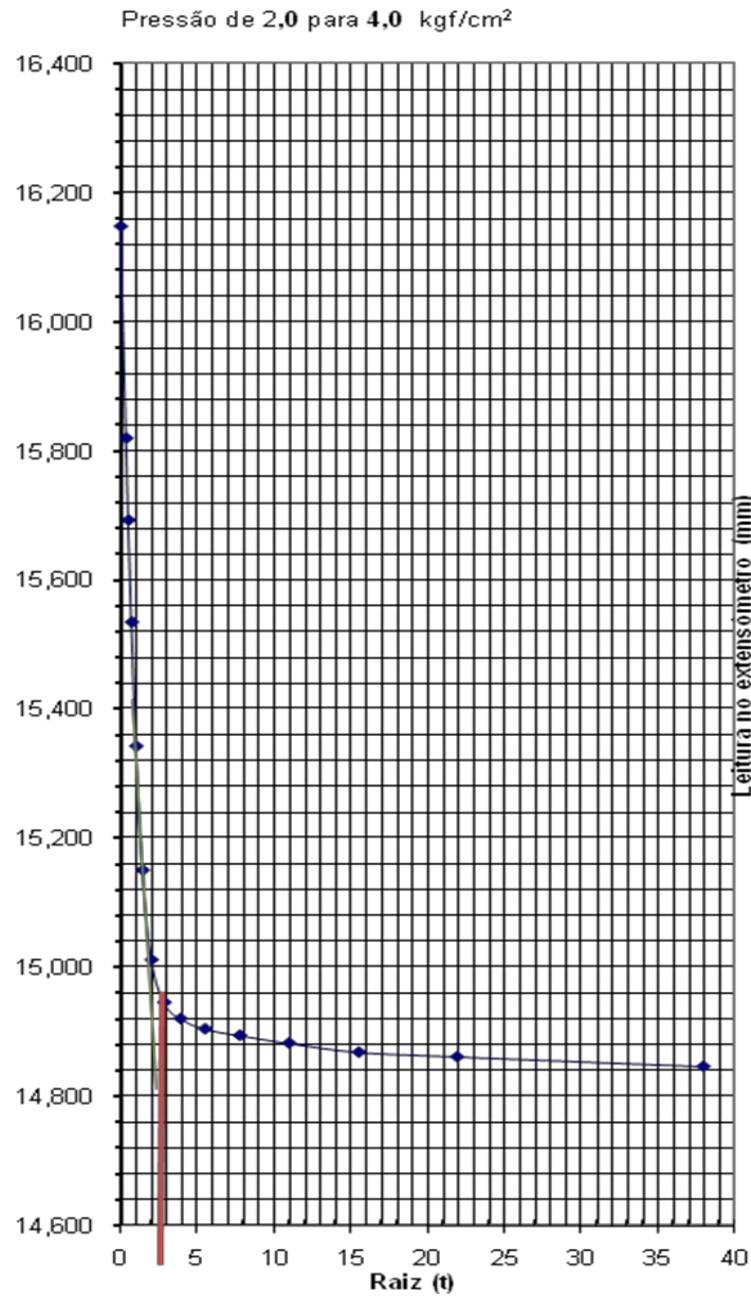


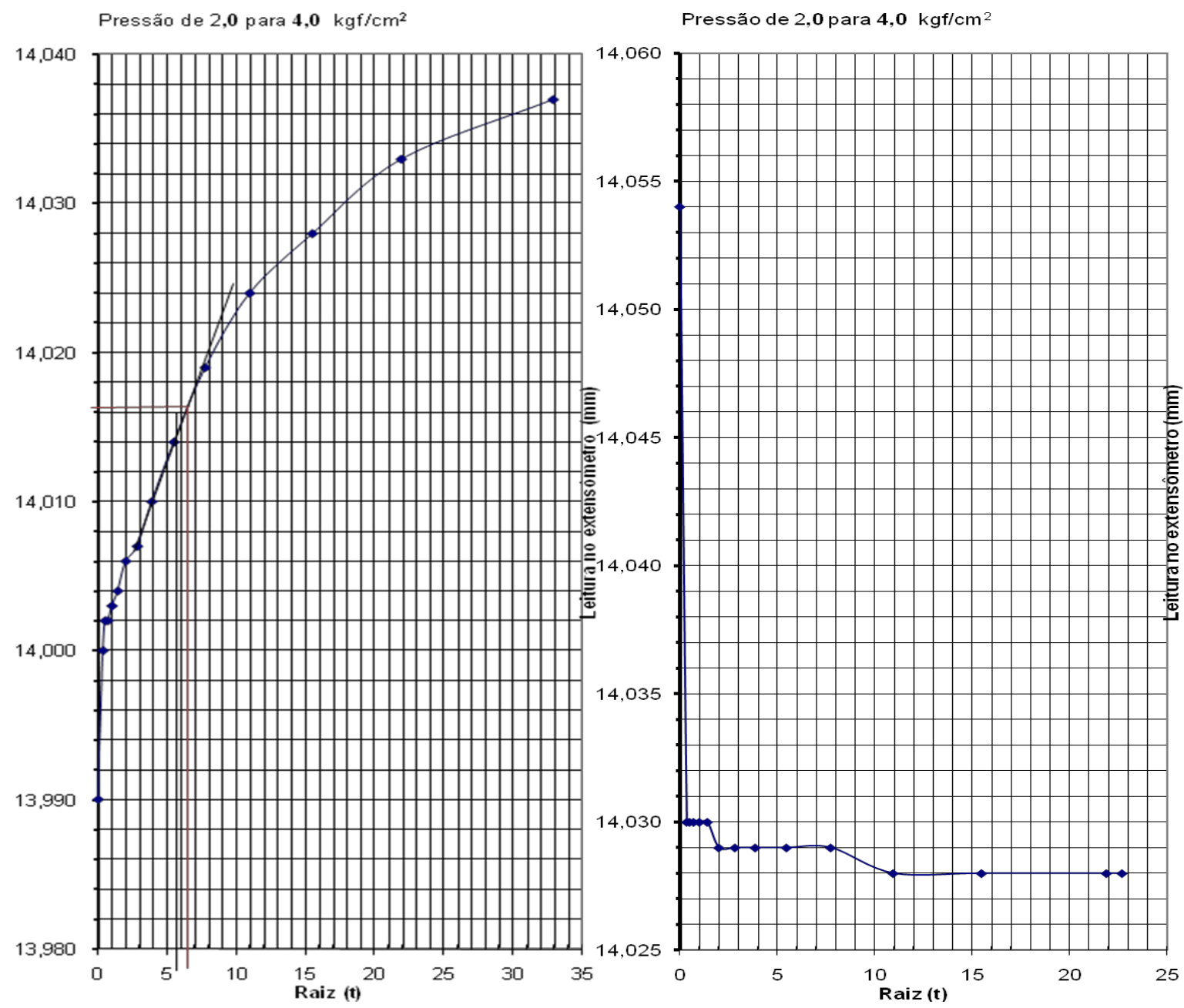


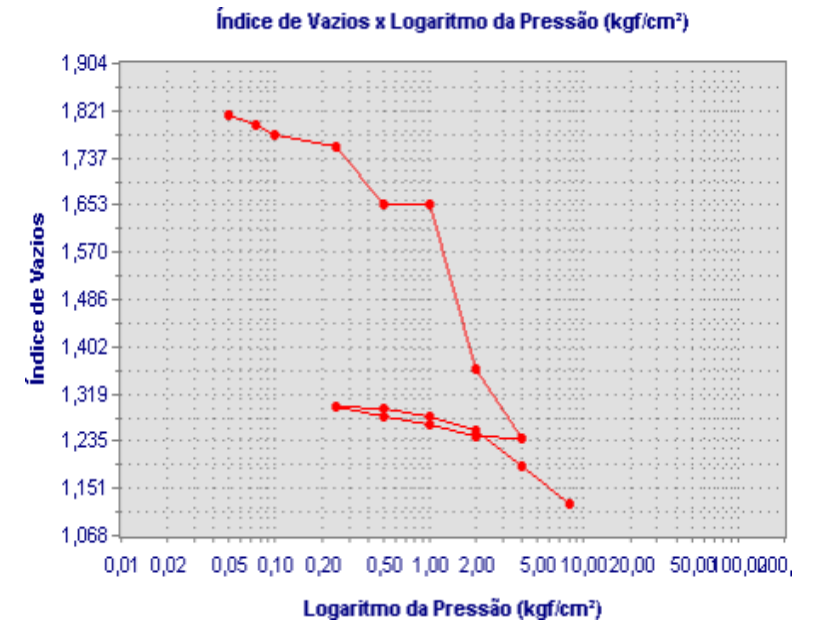
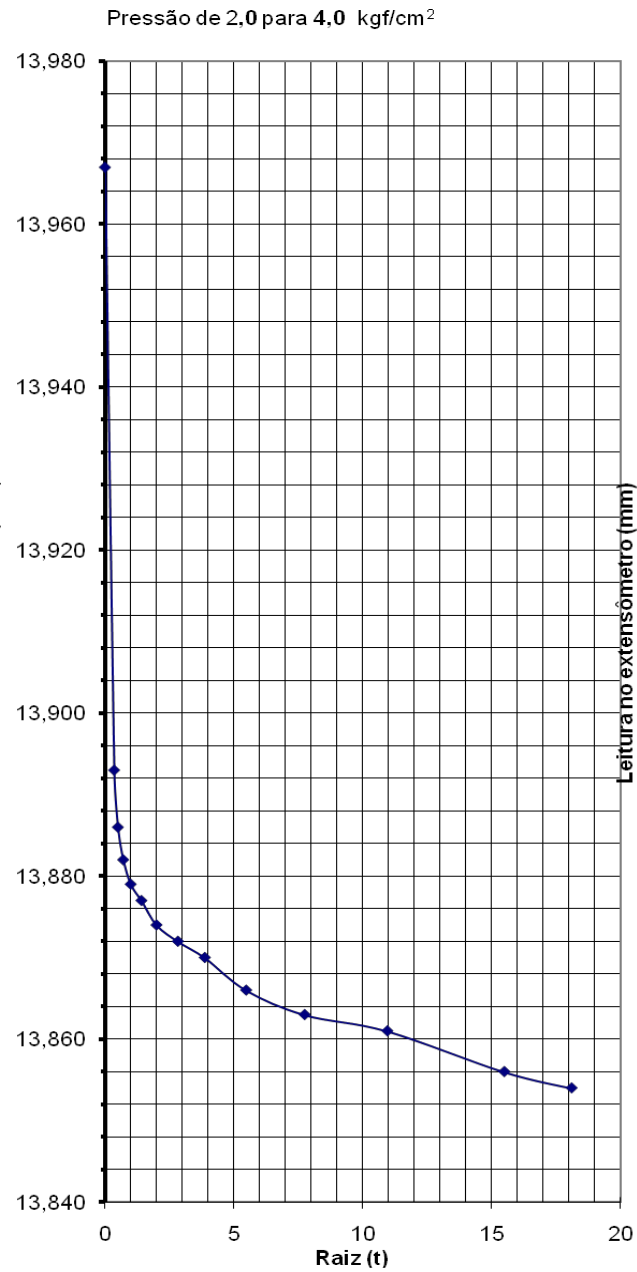
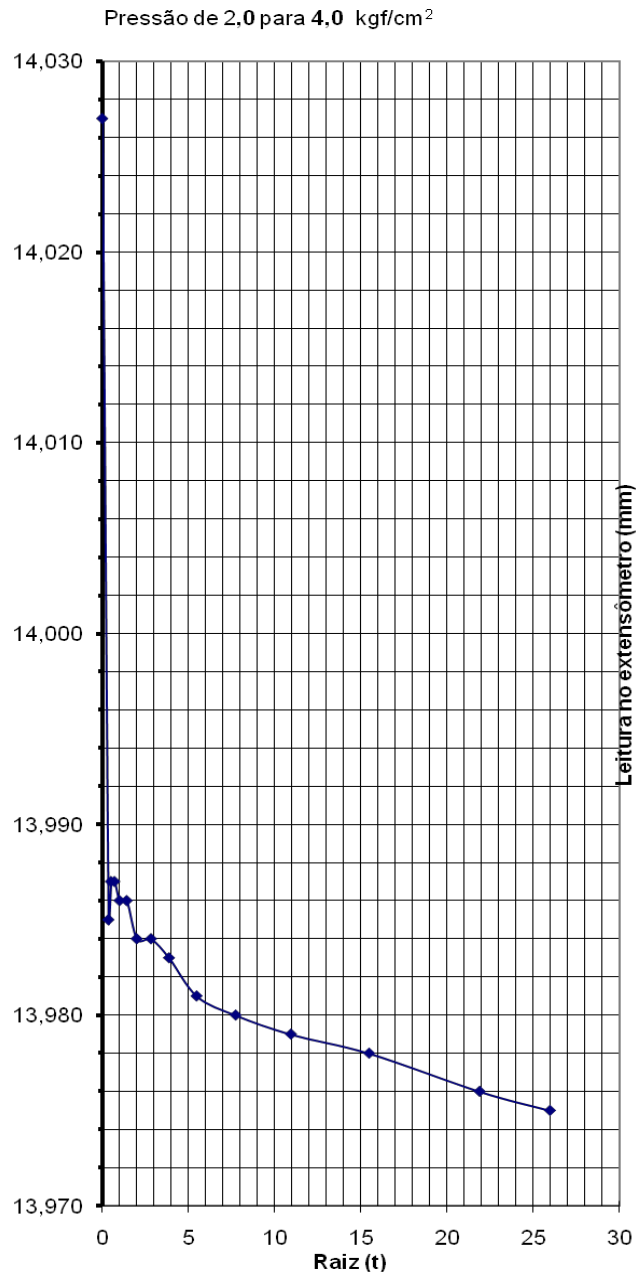
Adensamento: SOLO +30% KR



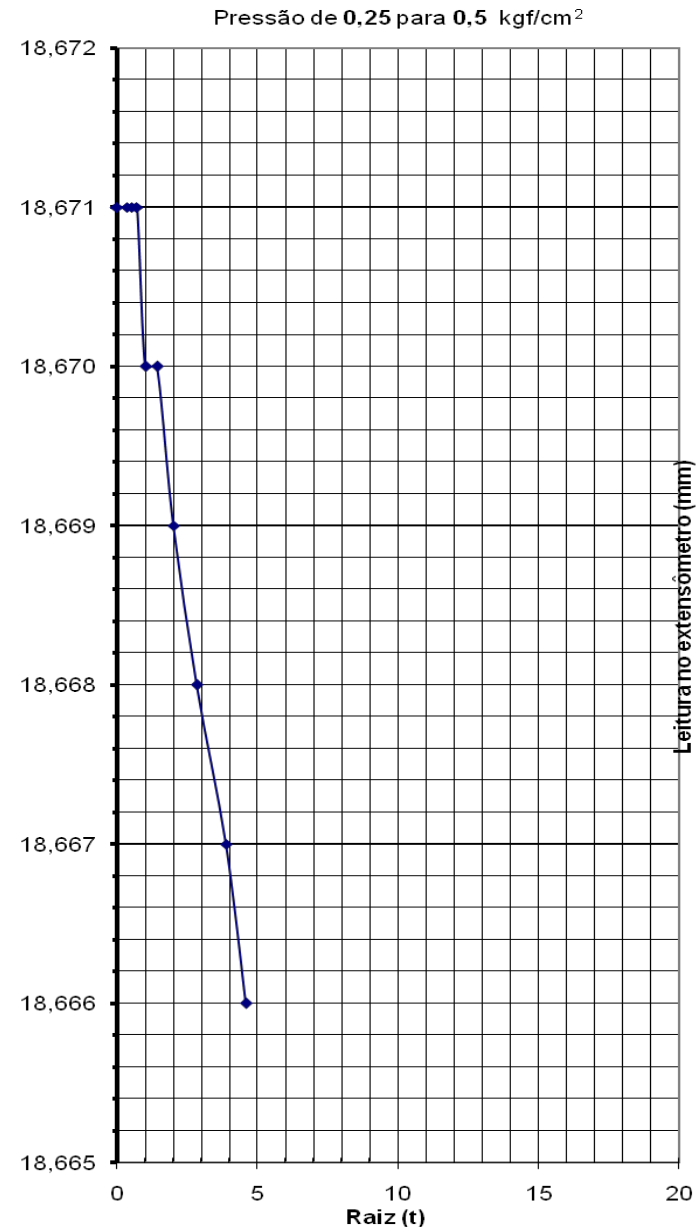
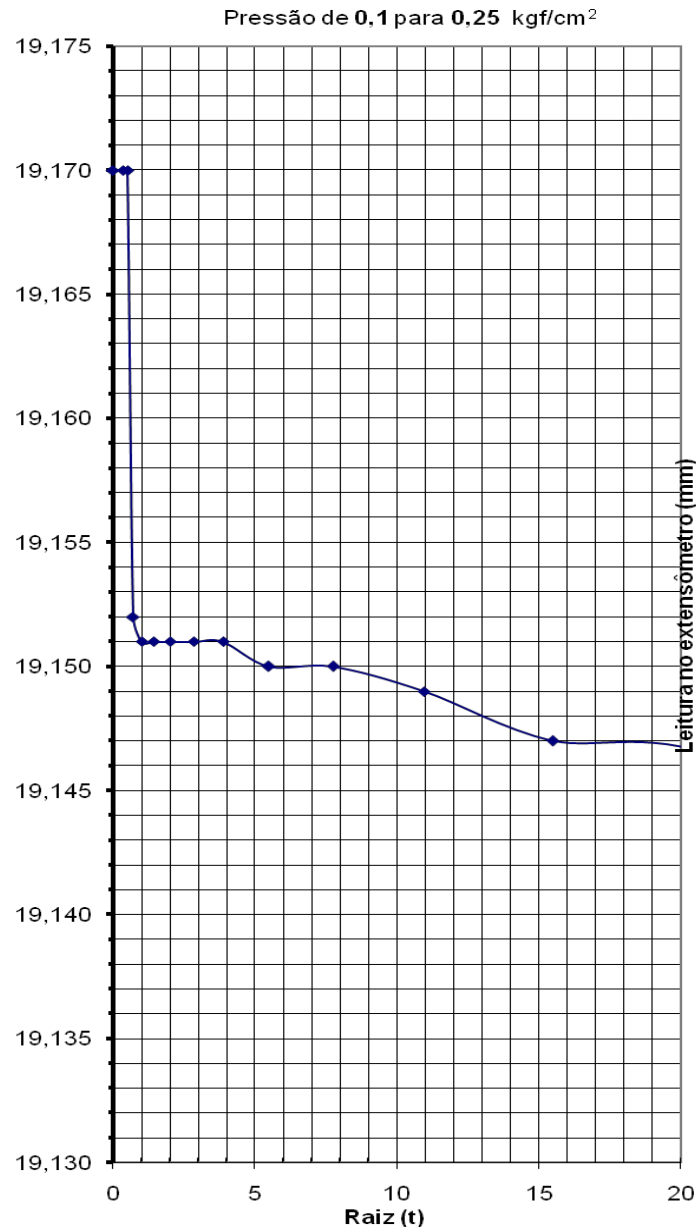


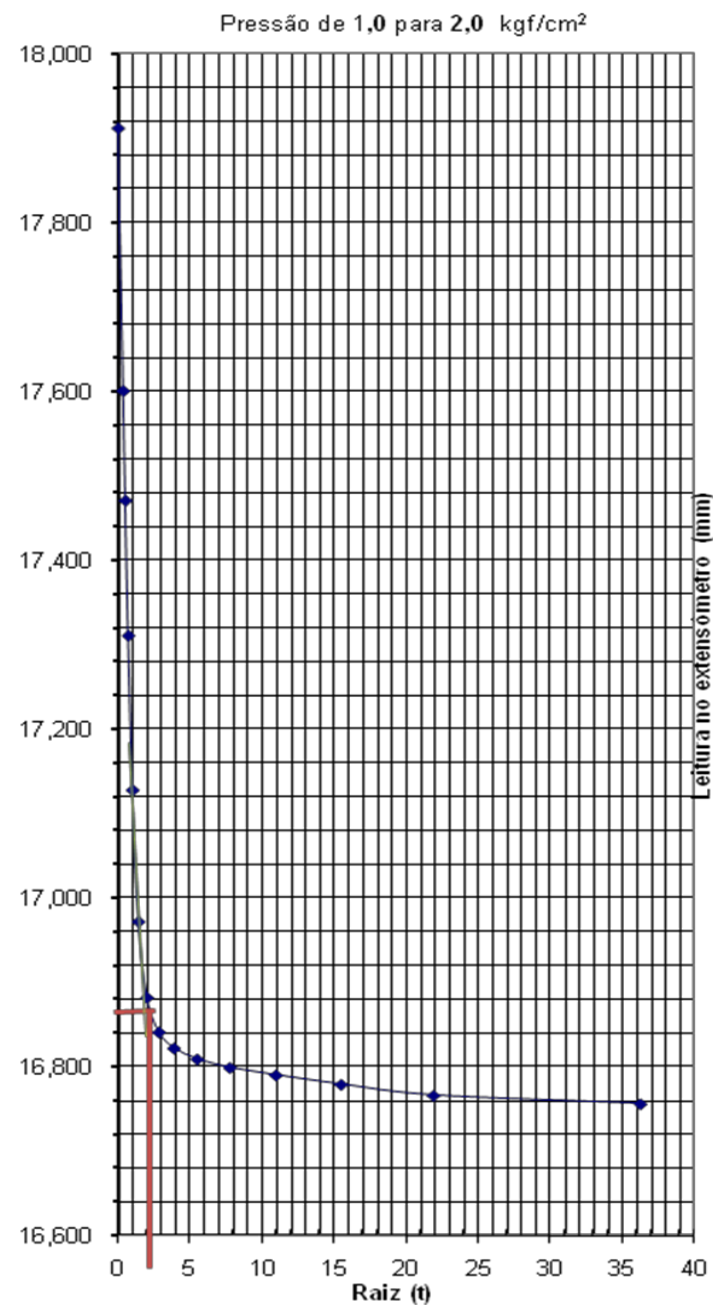
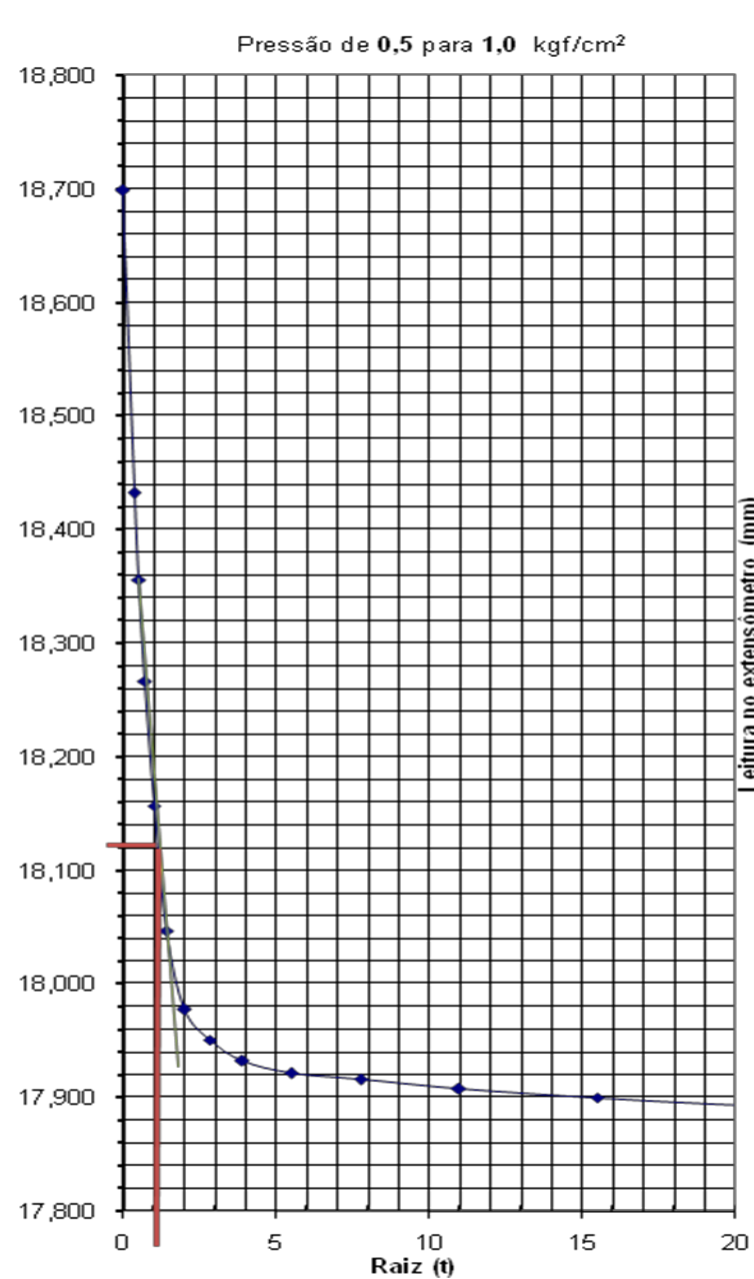


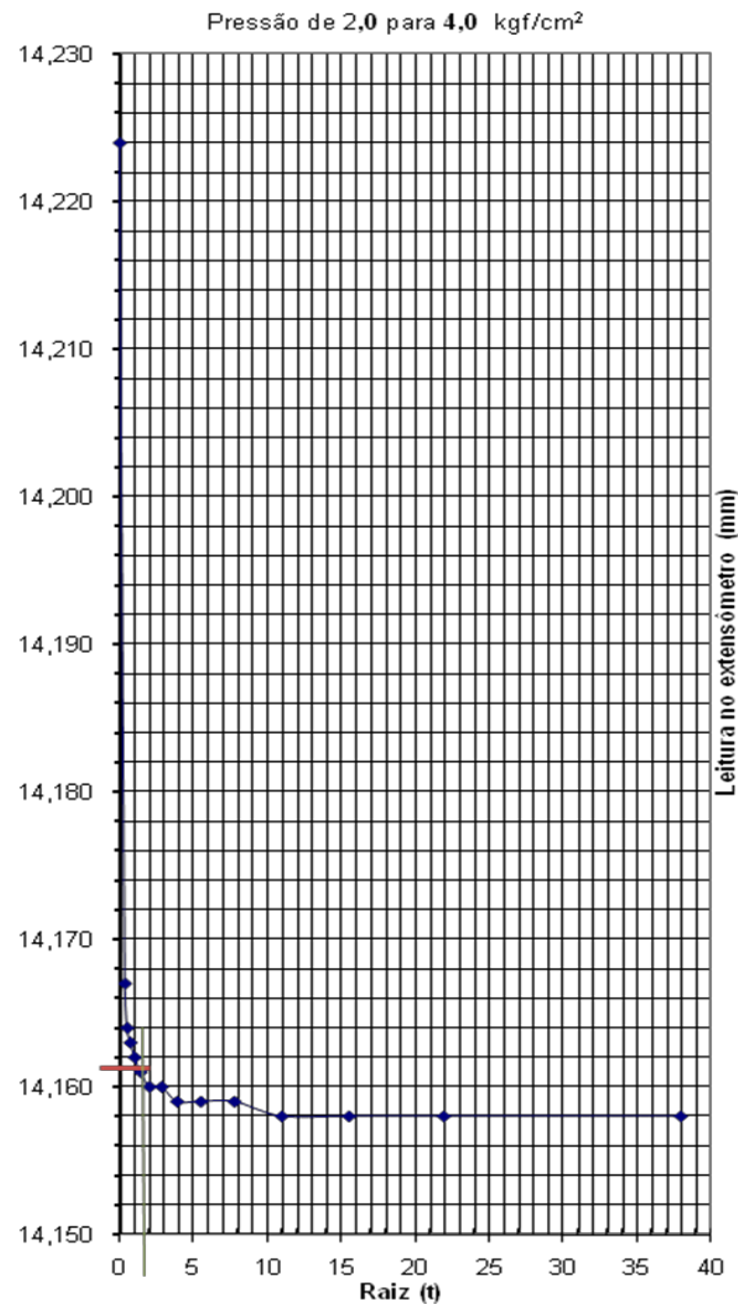
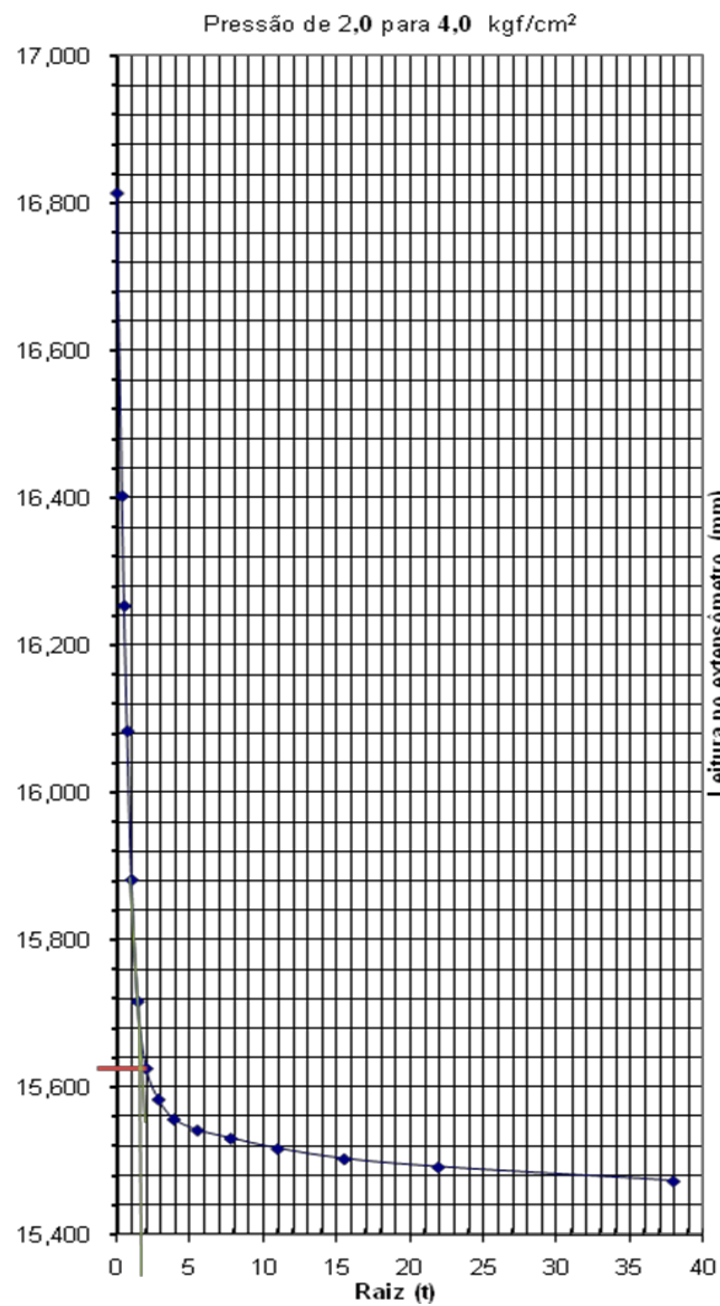


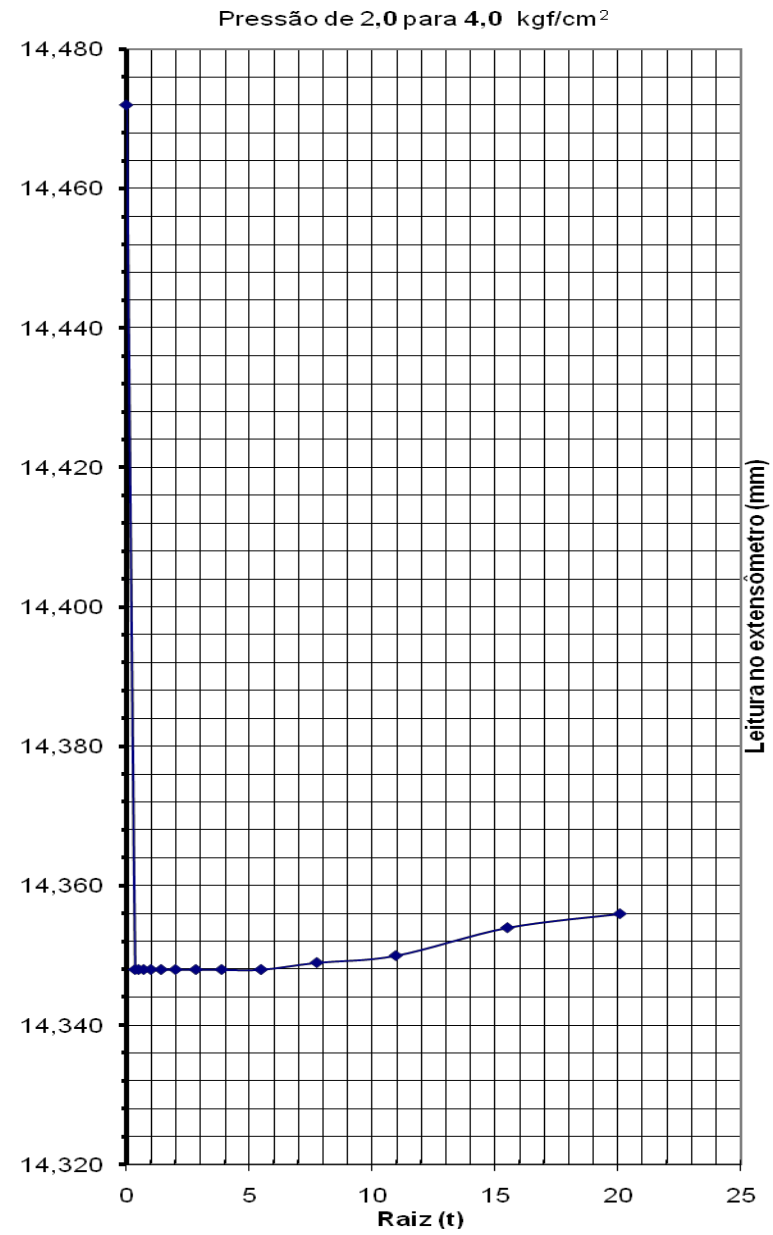
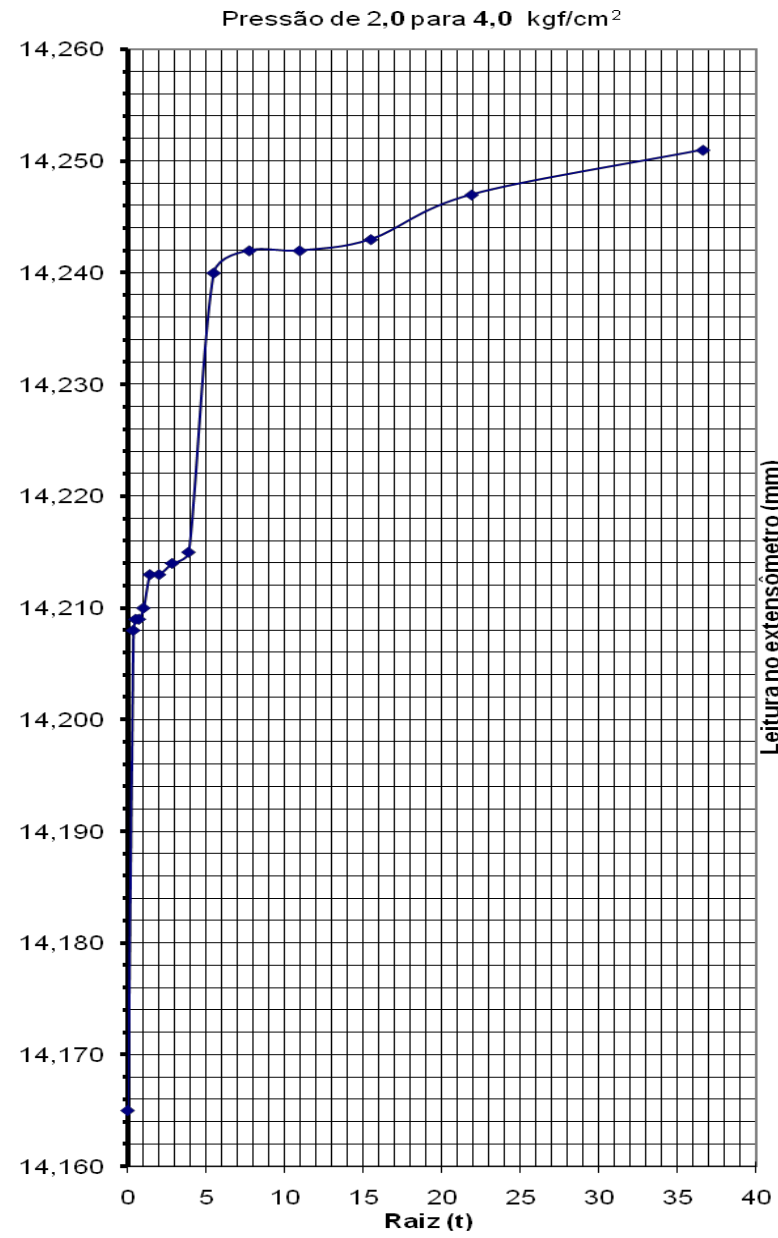


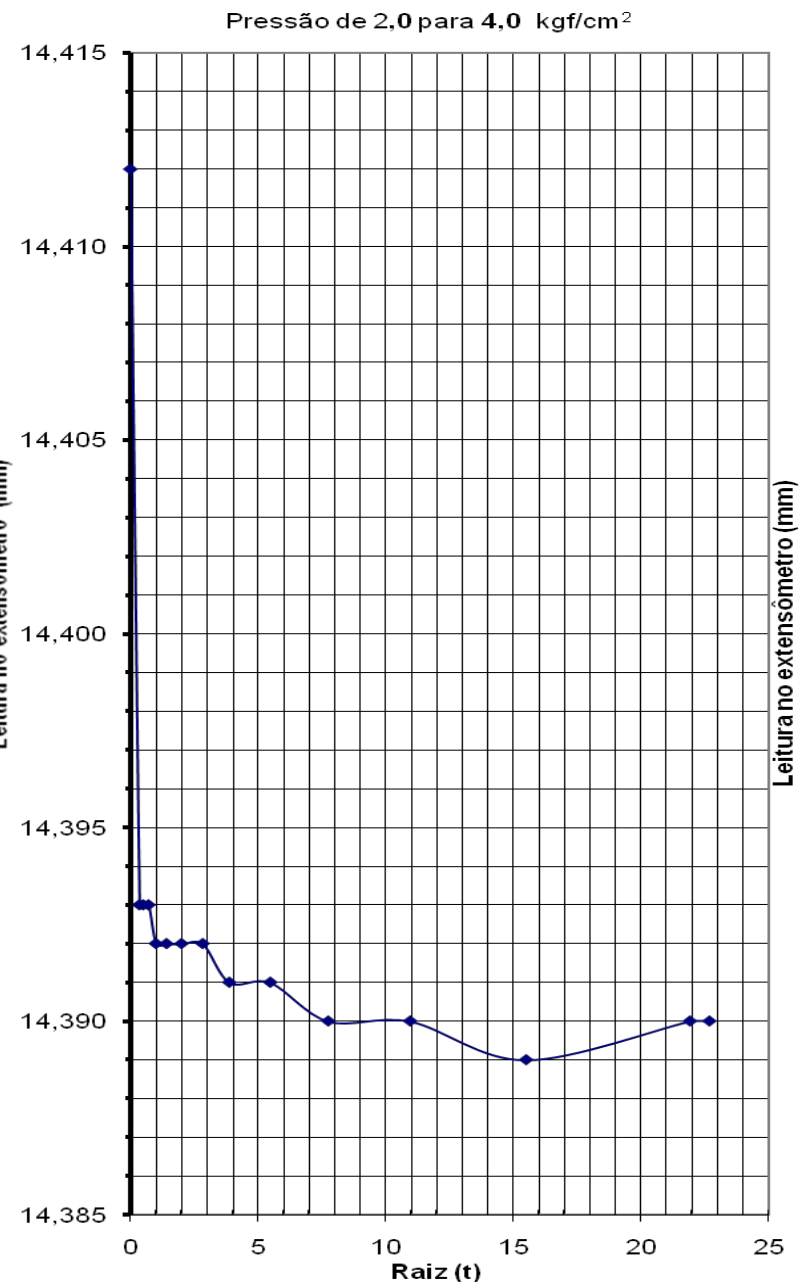
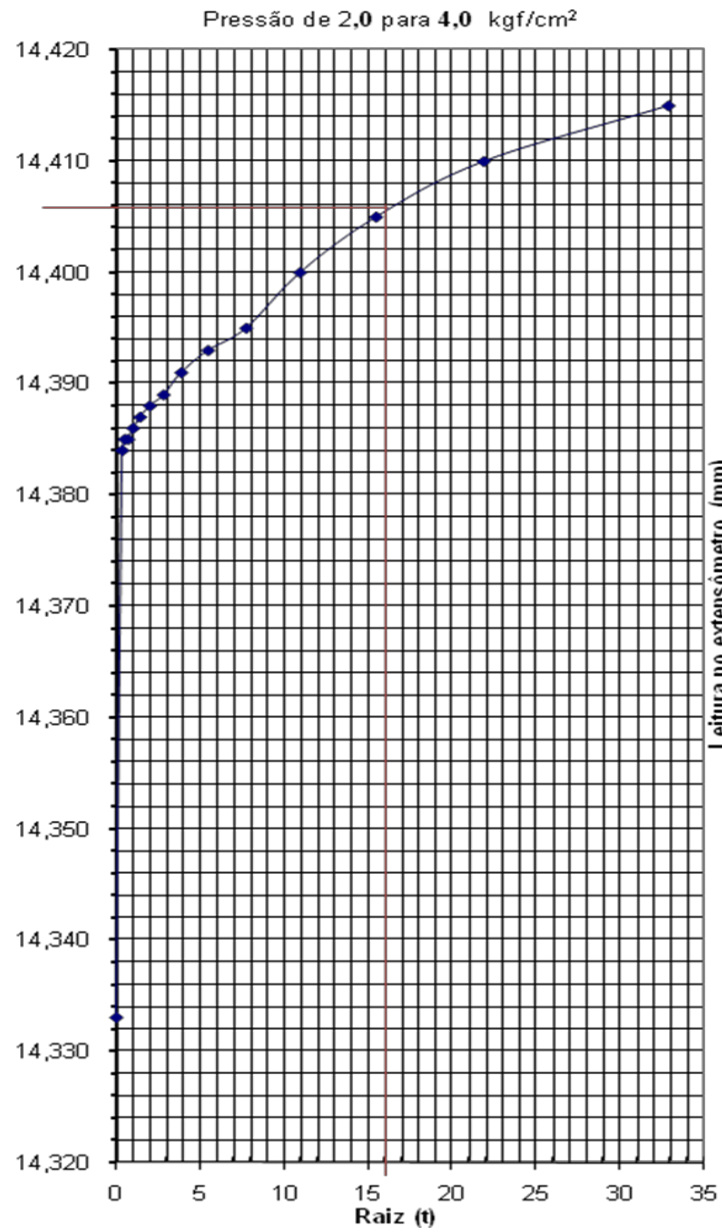
Adensamento: Solo + 30%KR Moída

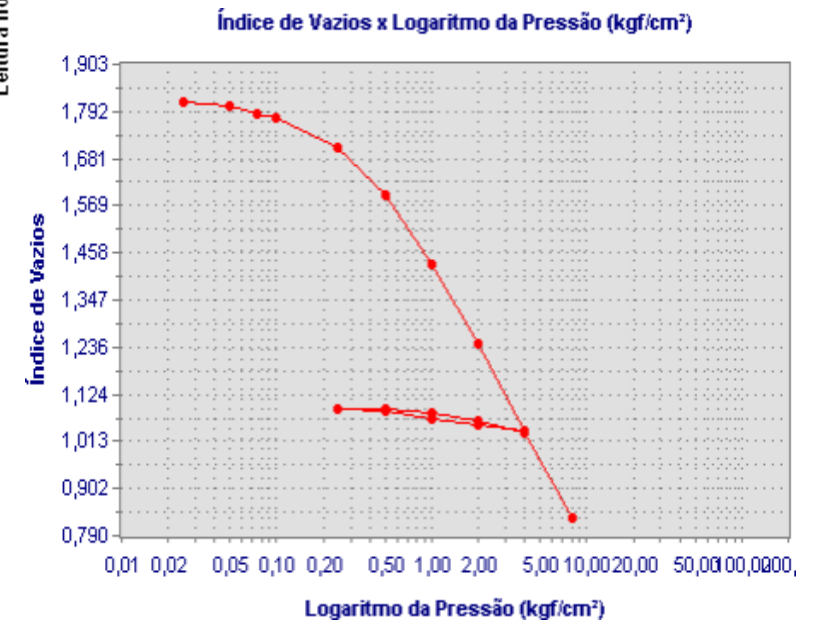
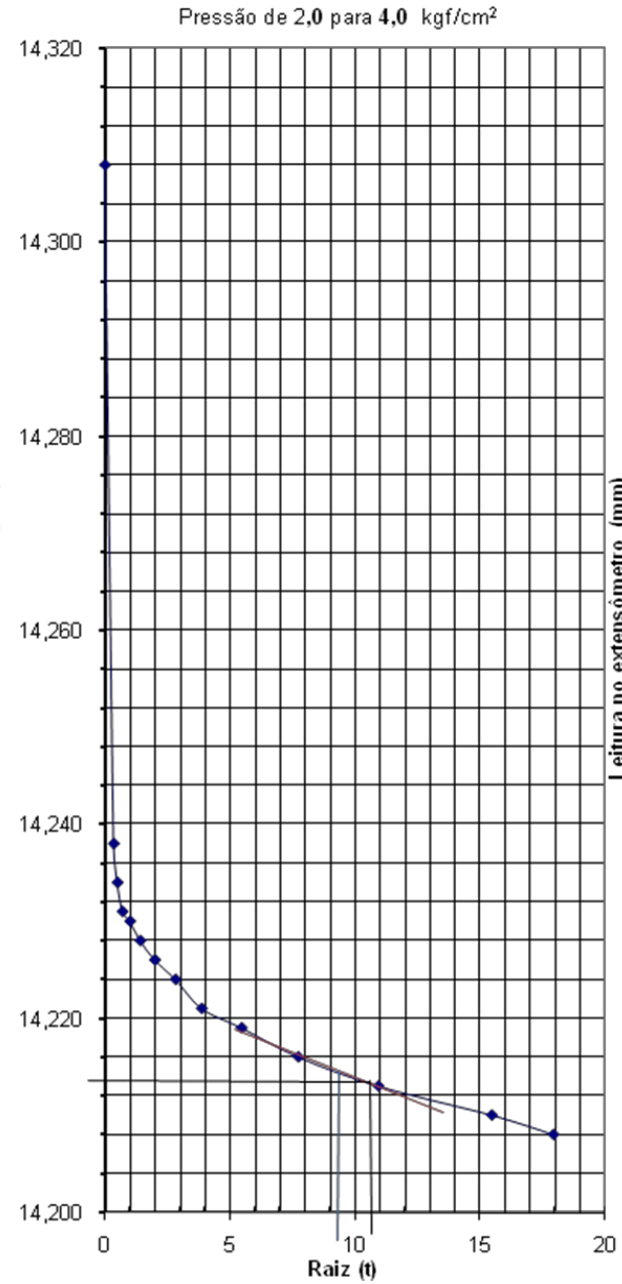
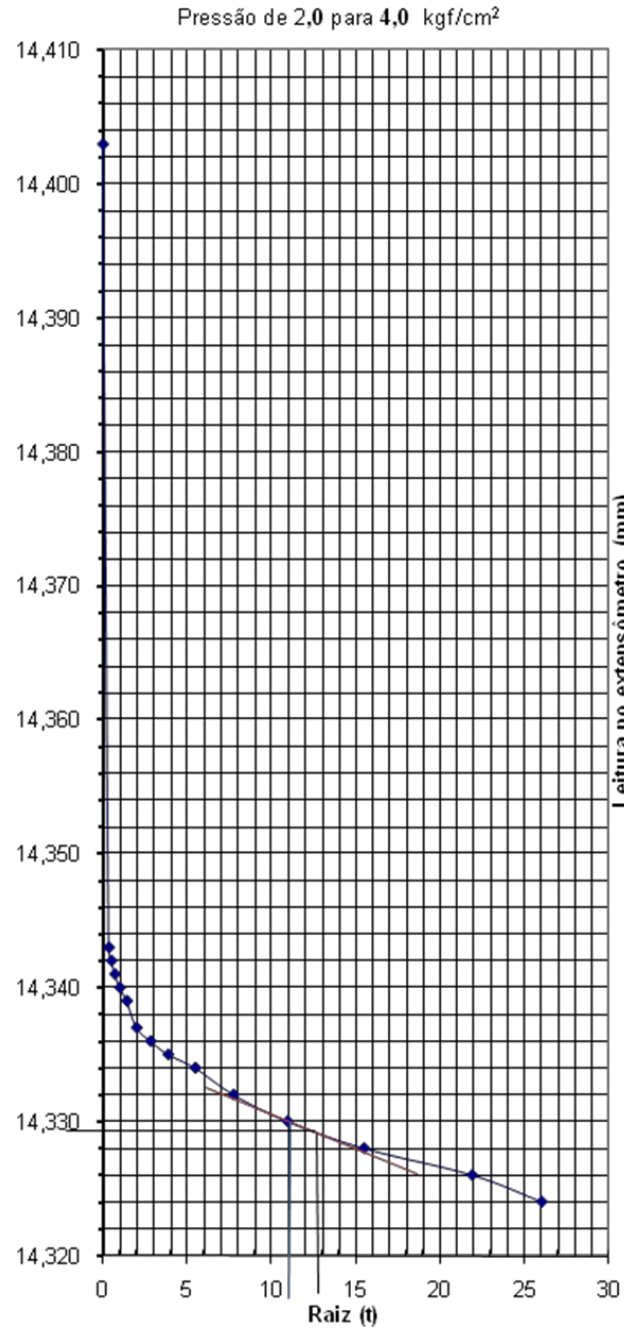




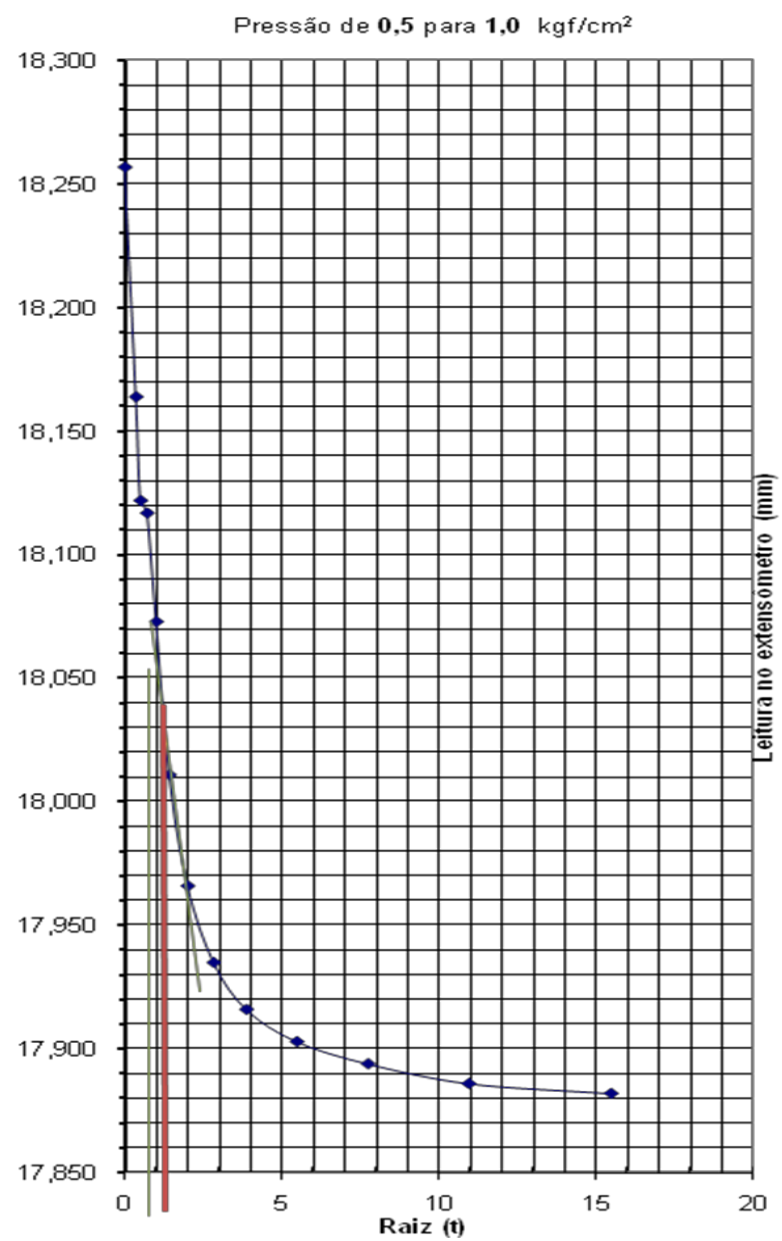
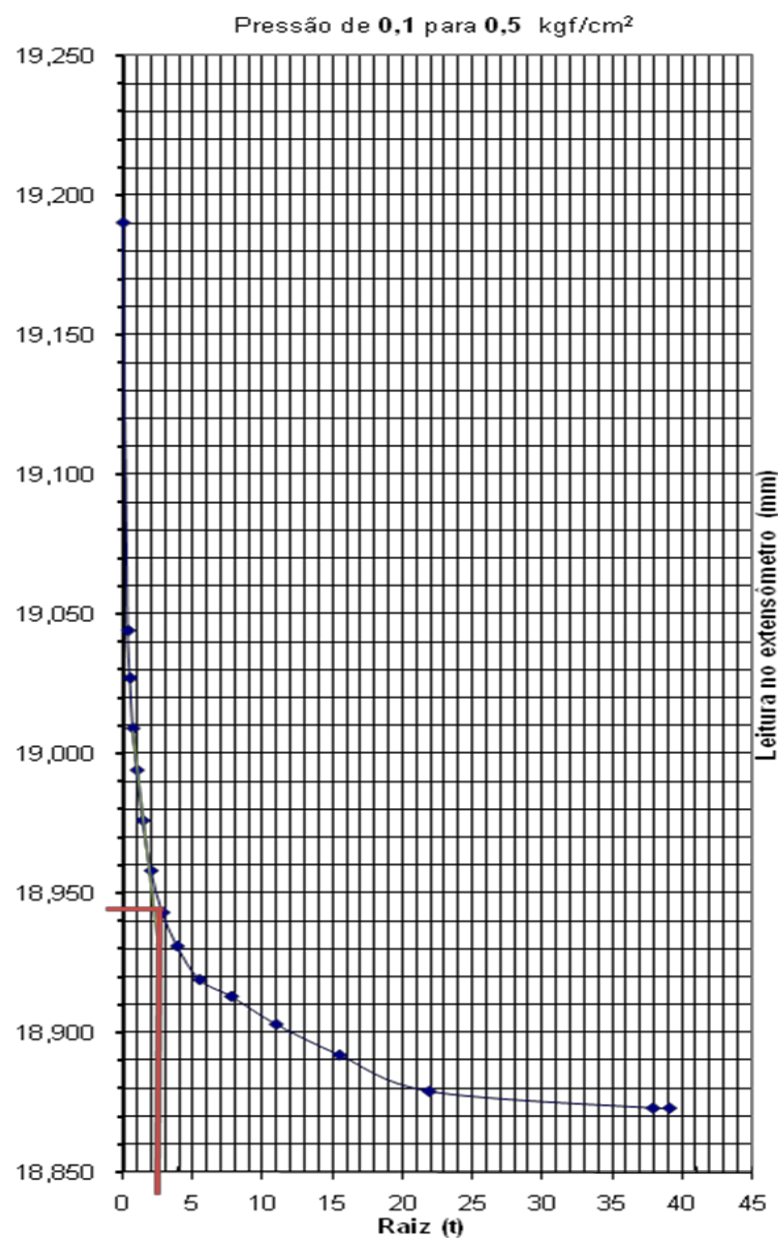


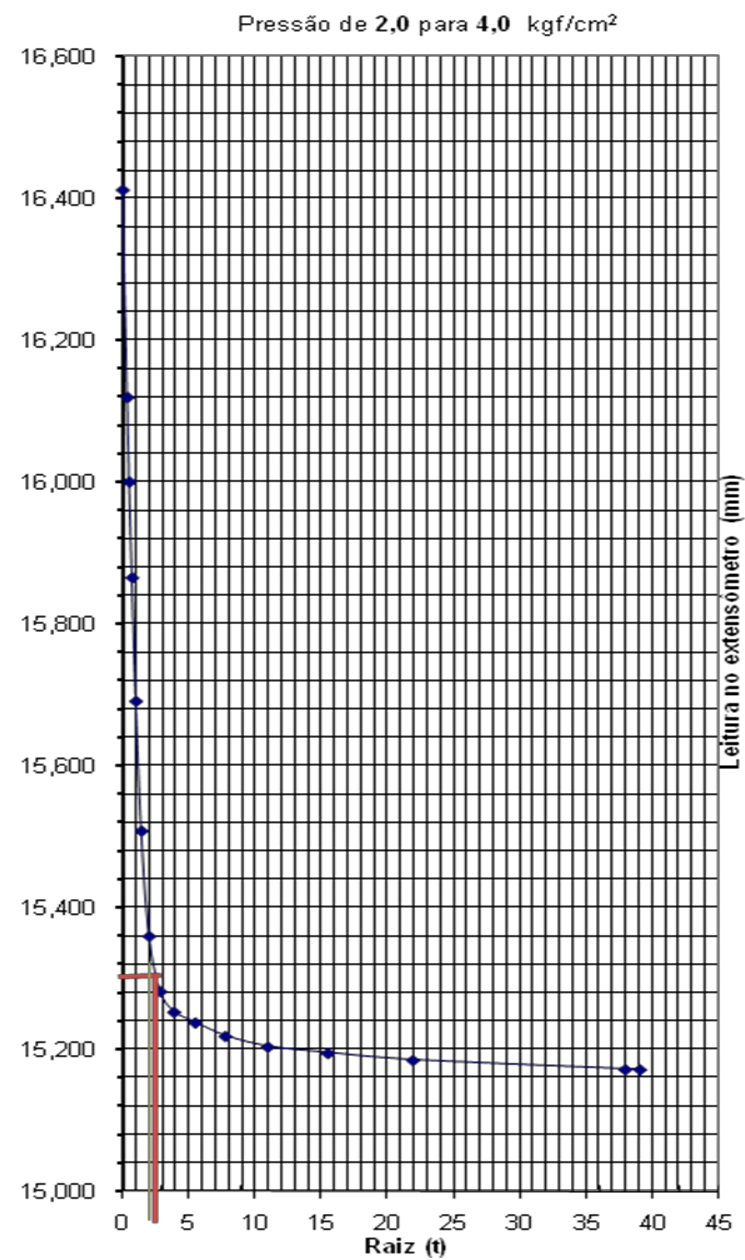
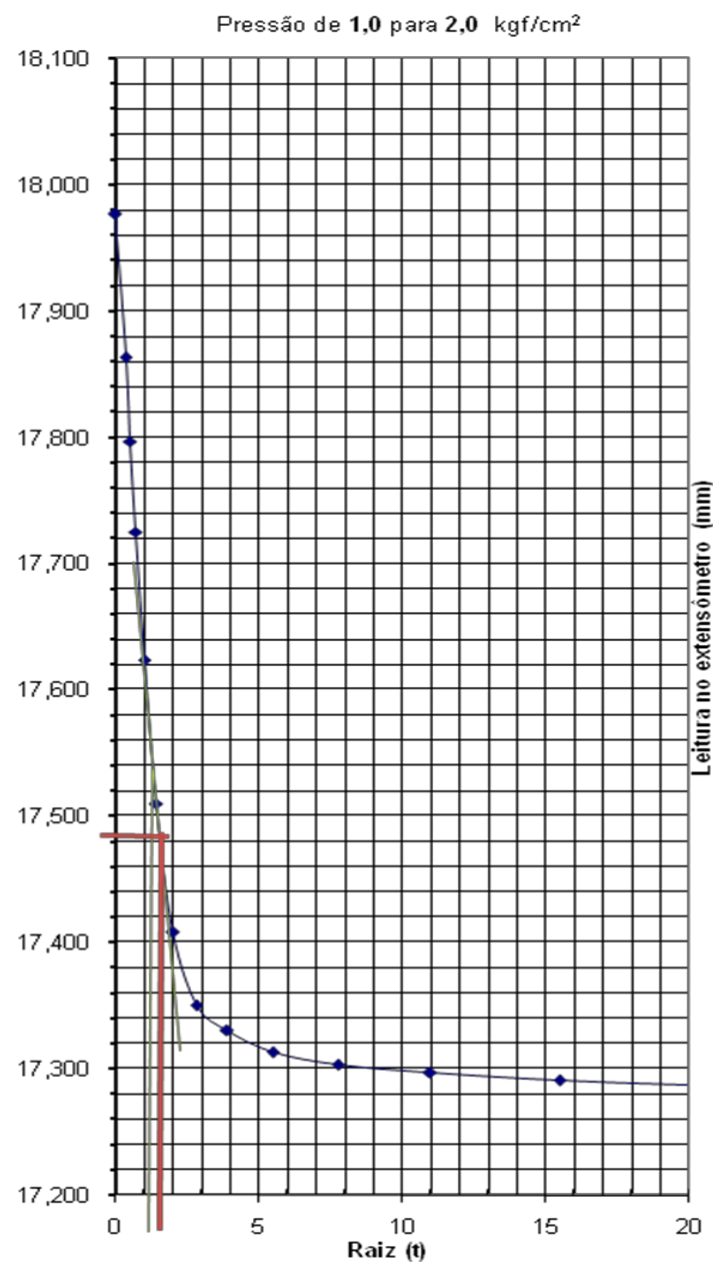


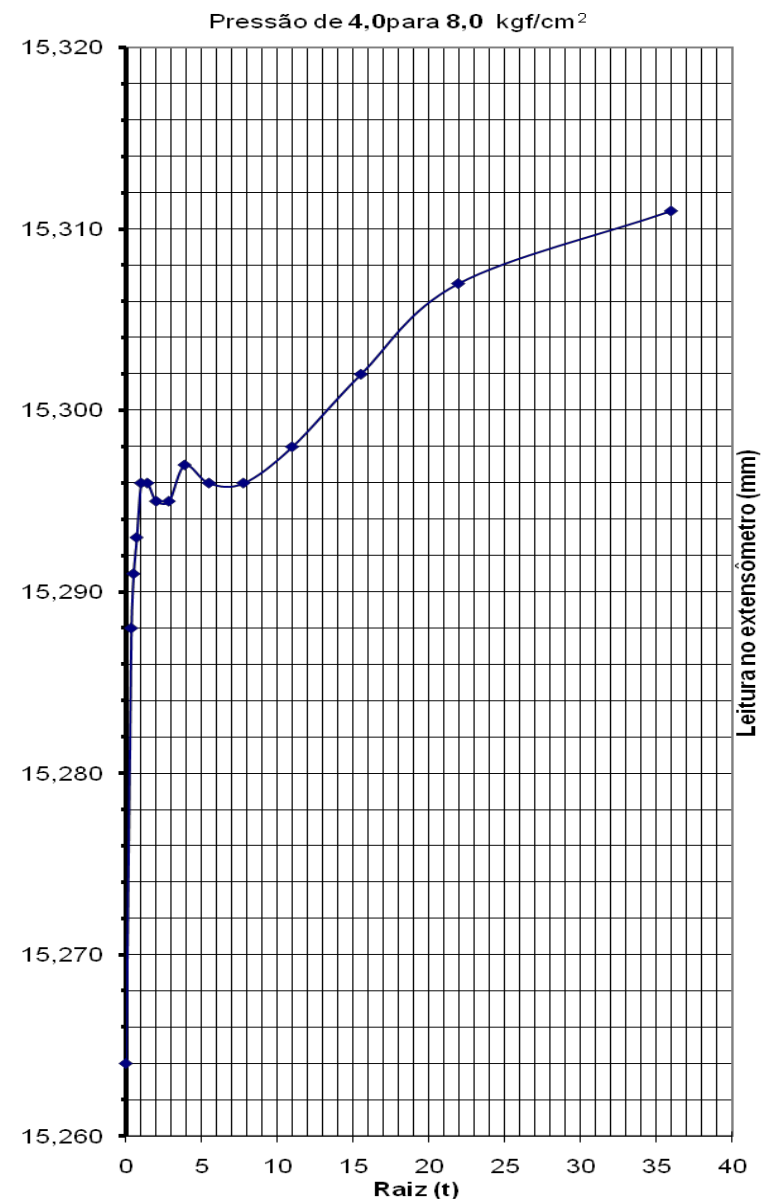
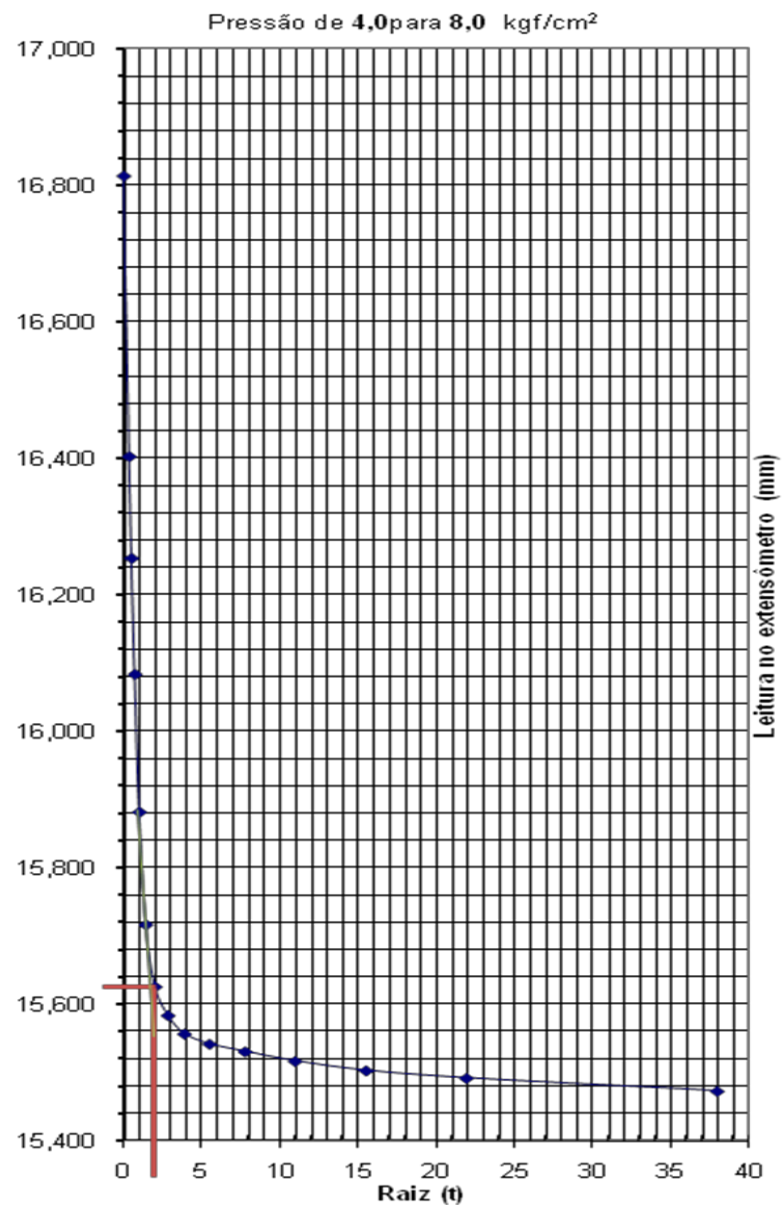


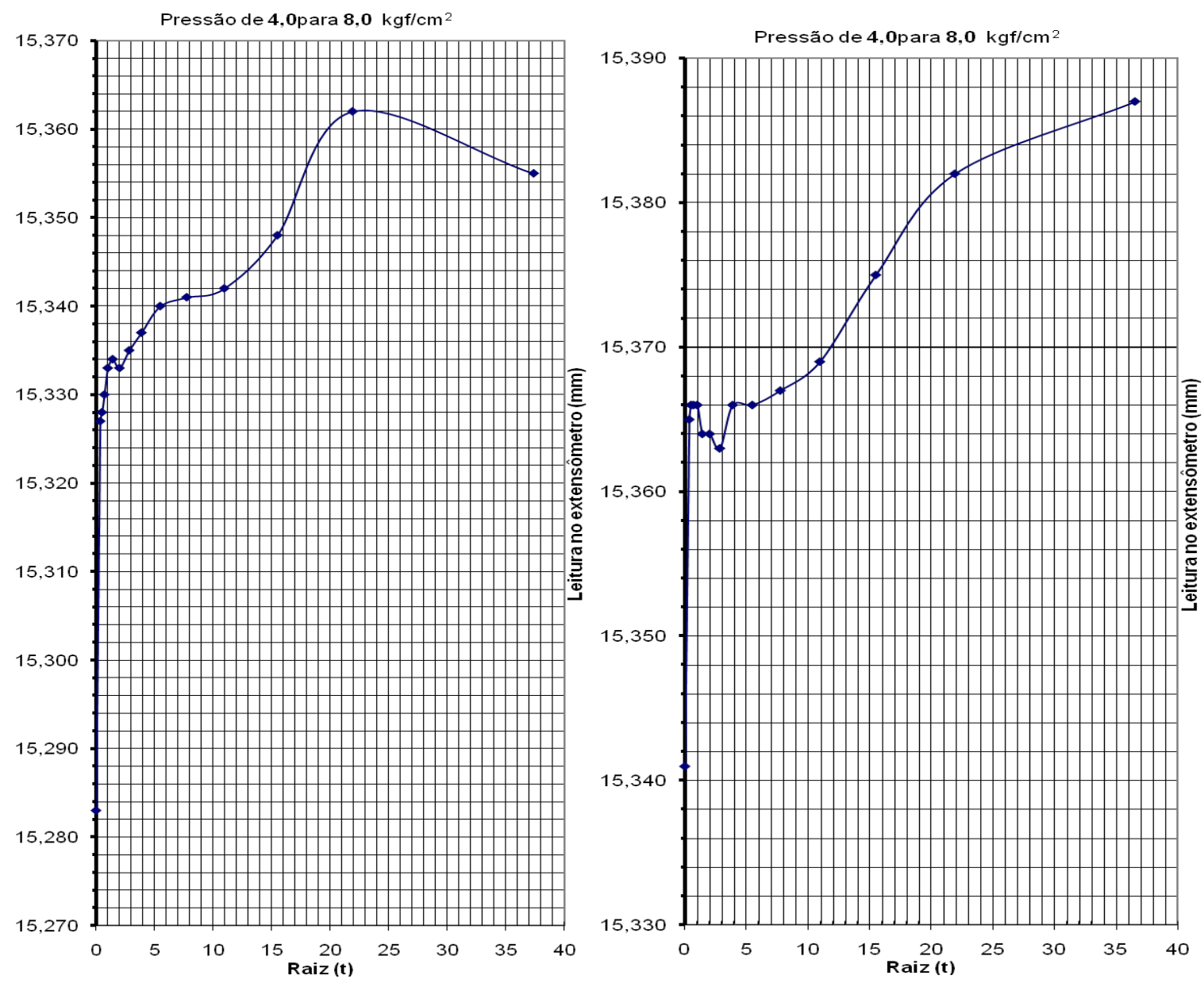


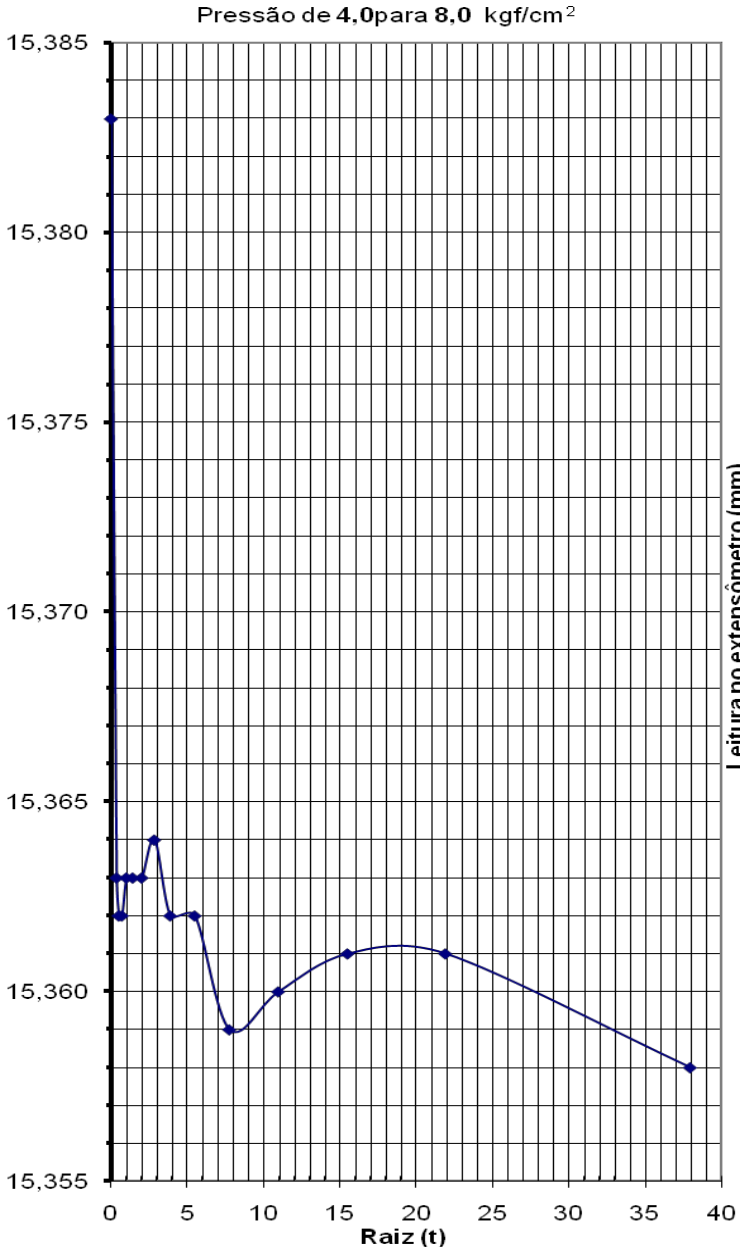
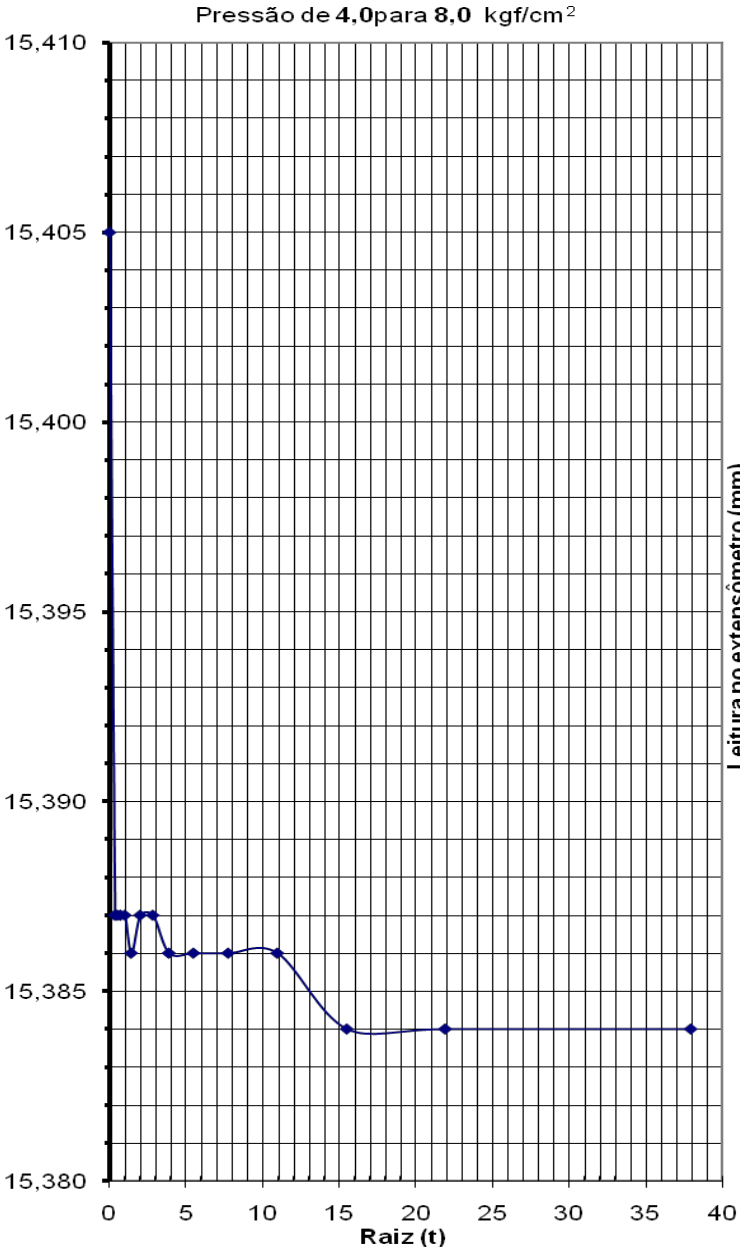
Adensamento: Solo + 10% Cimento

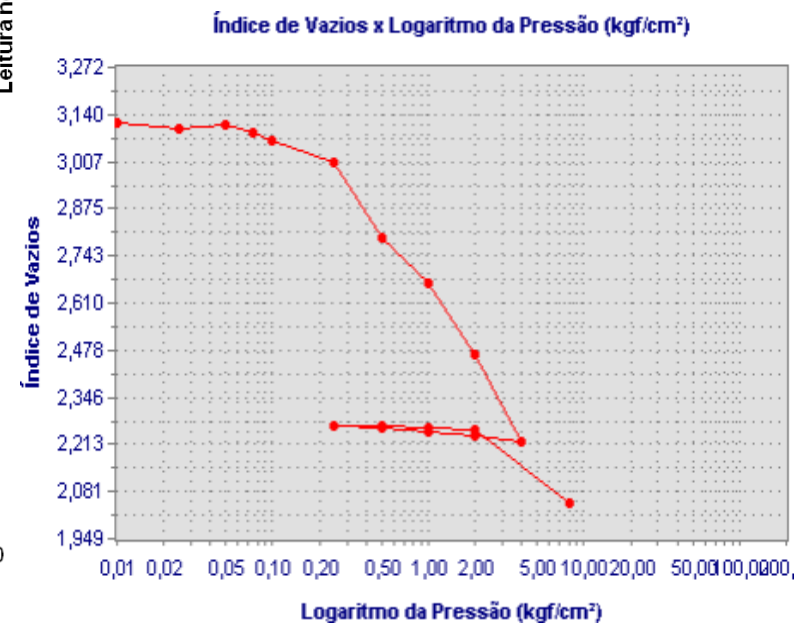
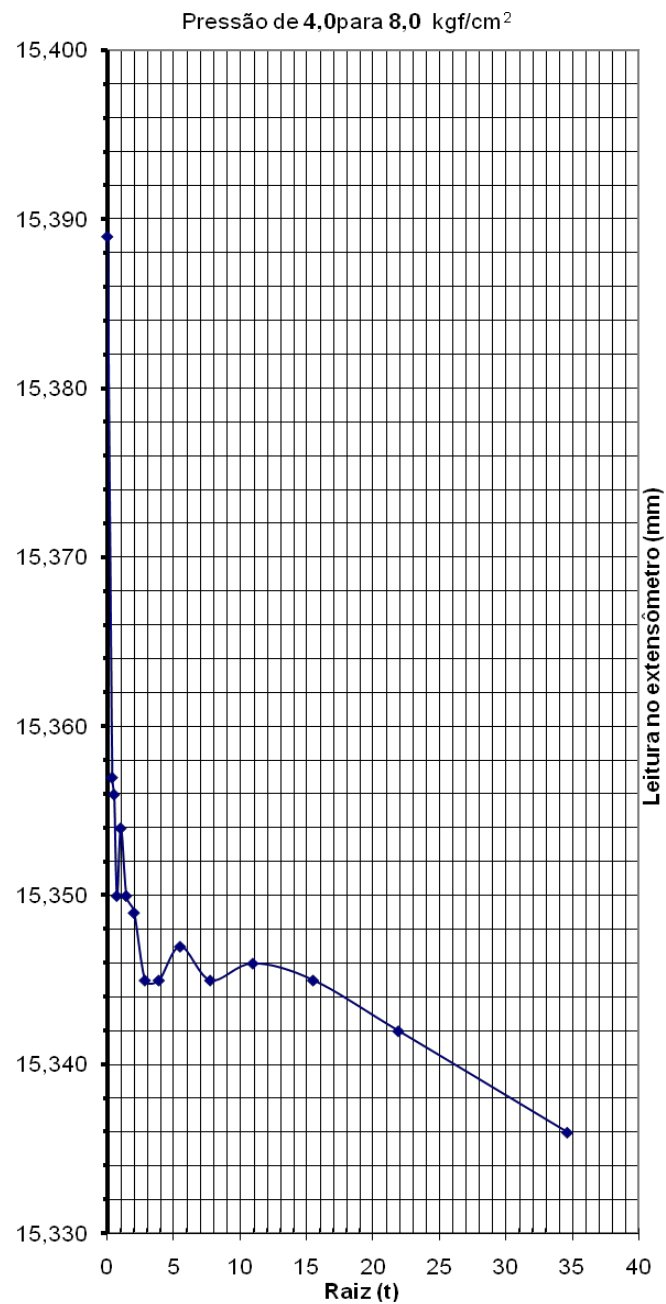
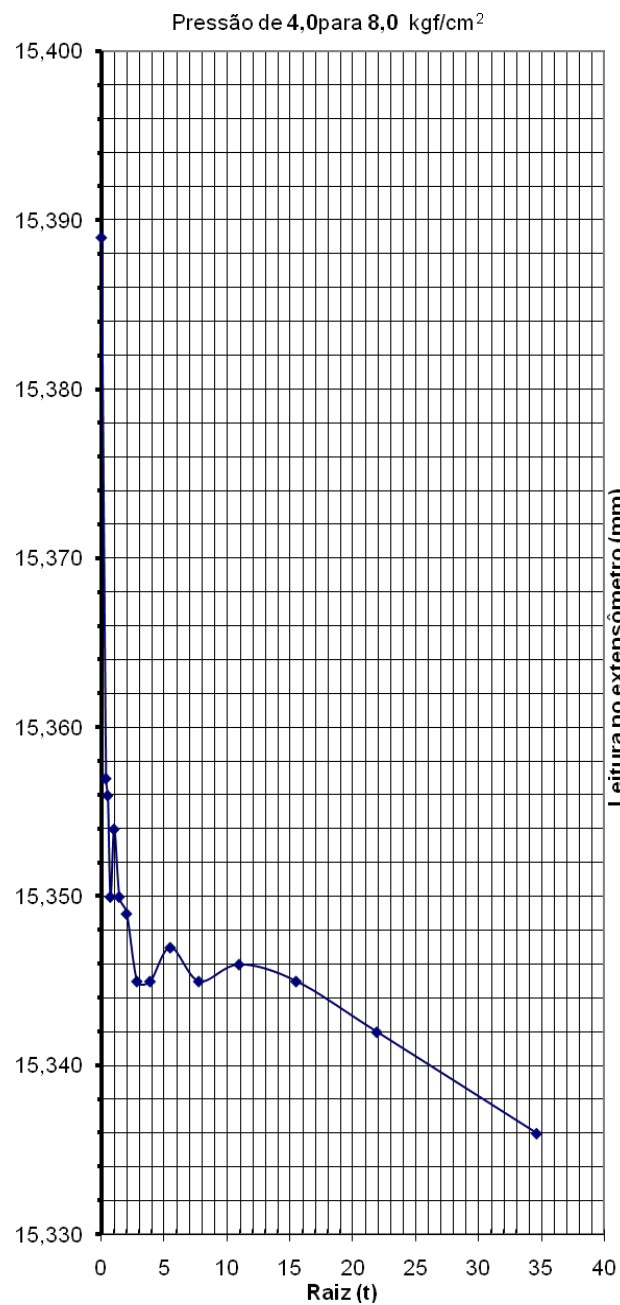




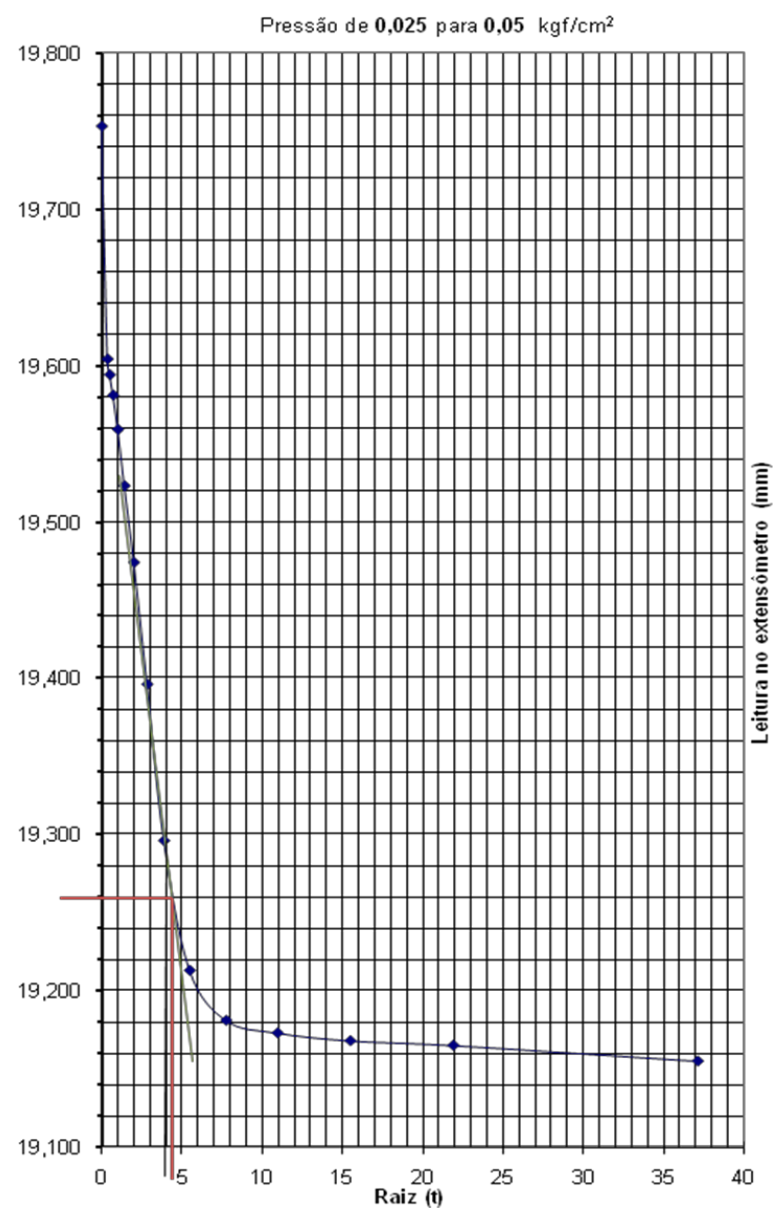
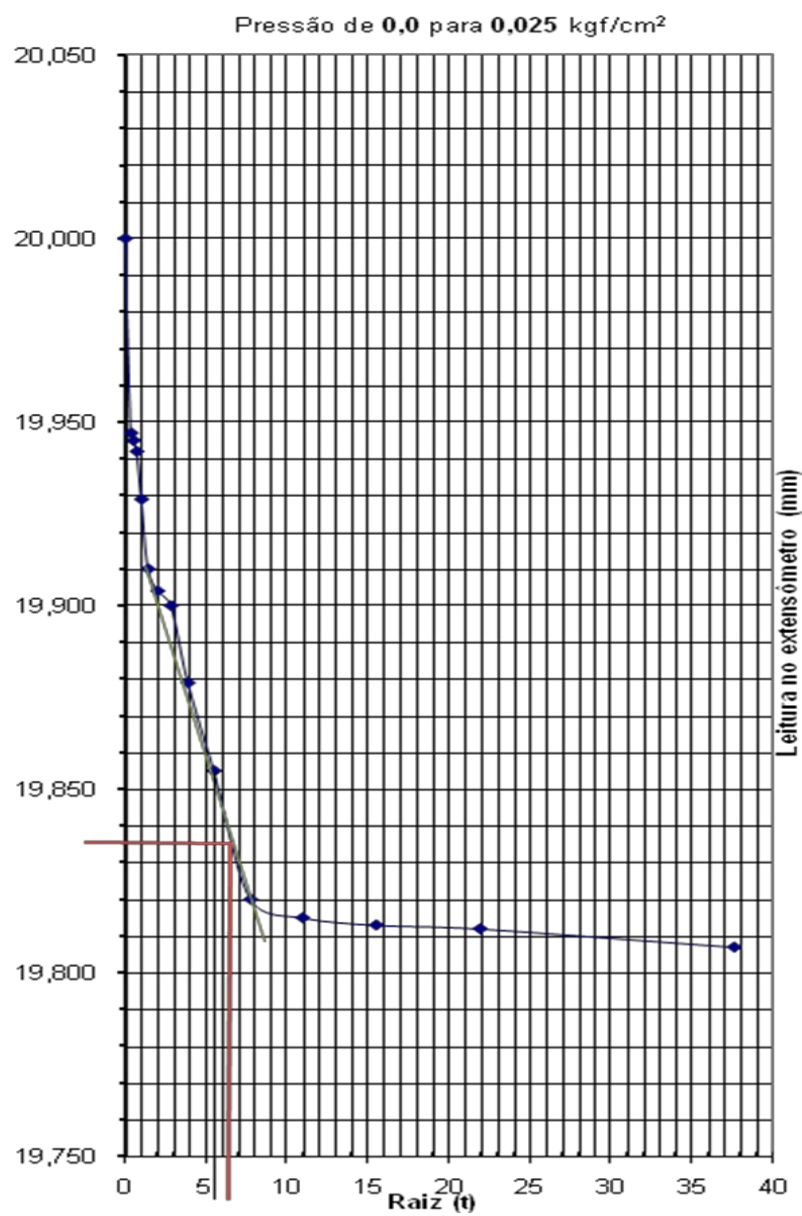


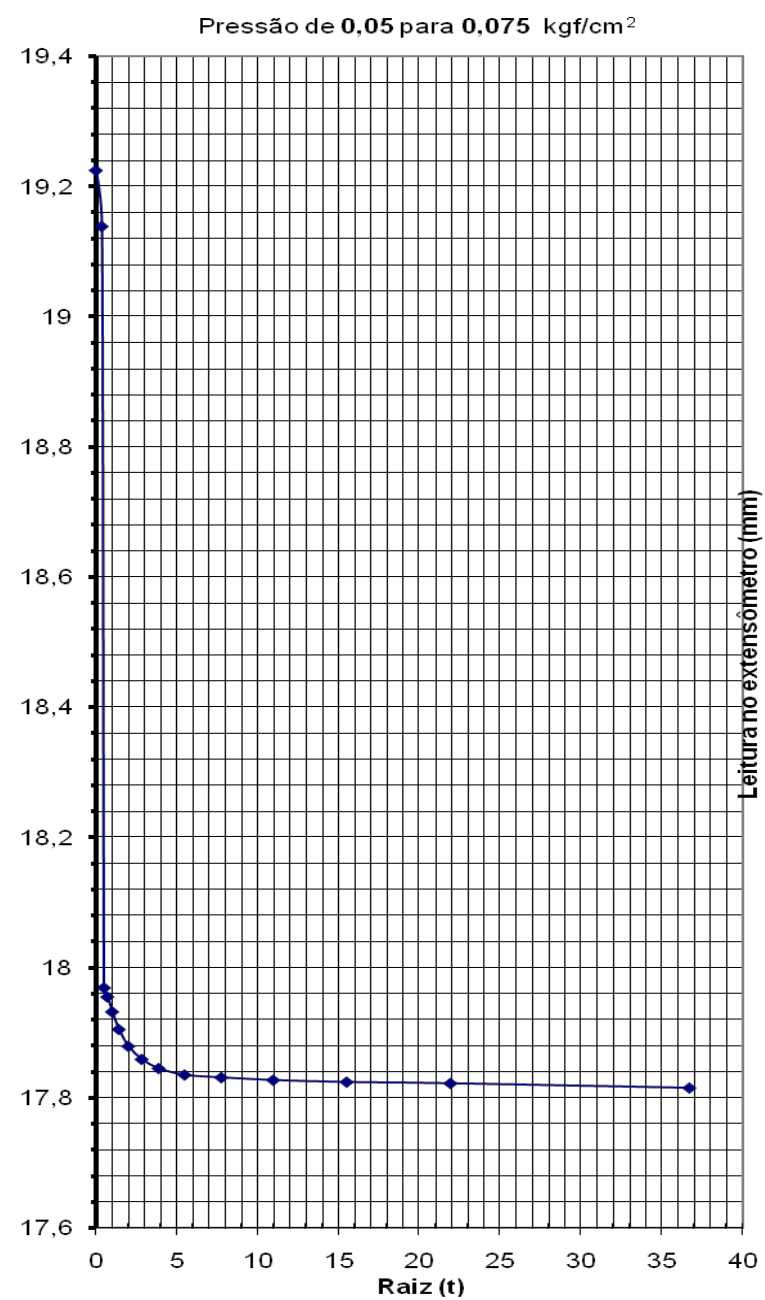
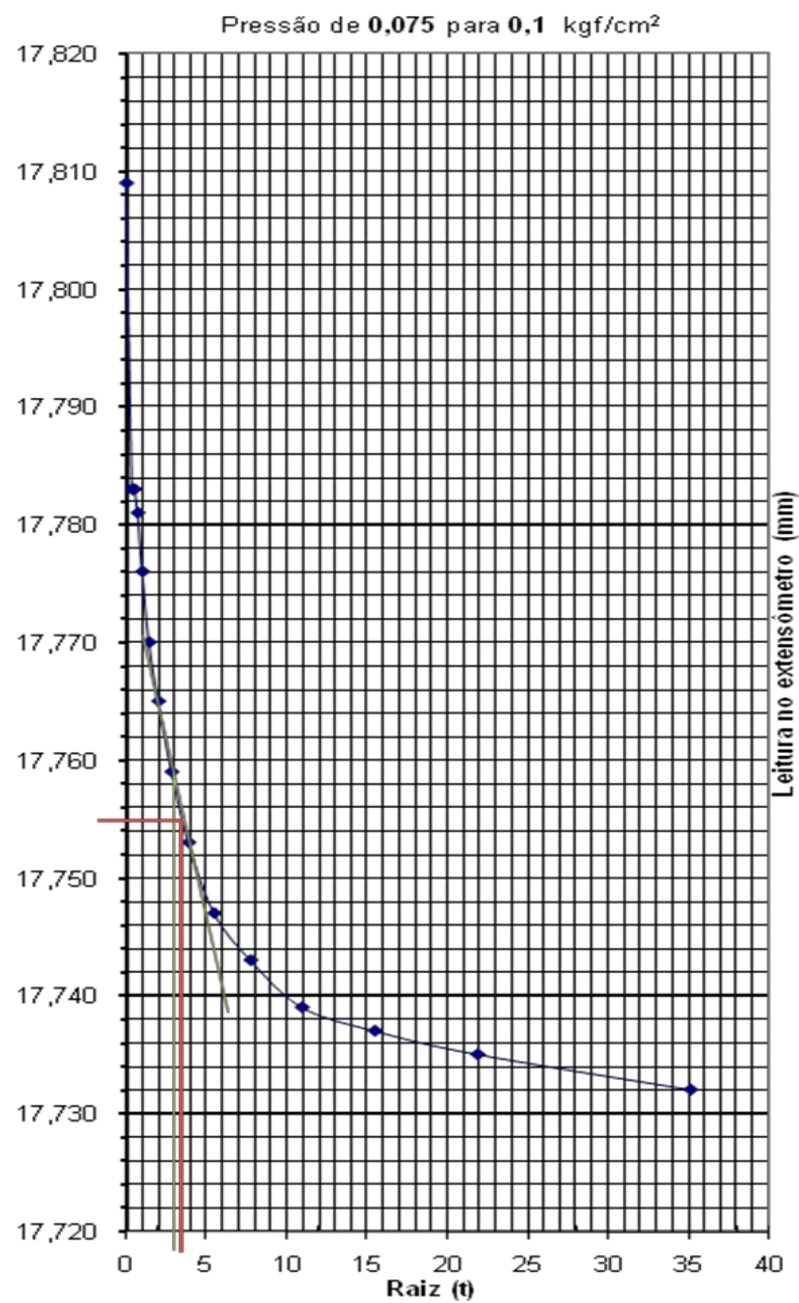


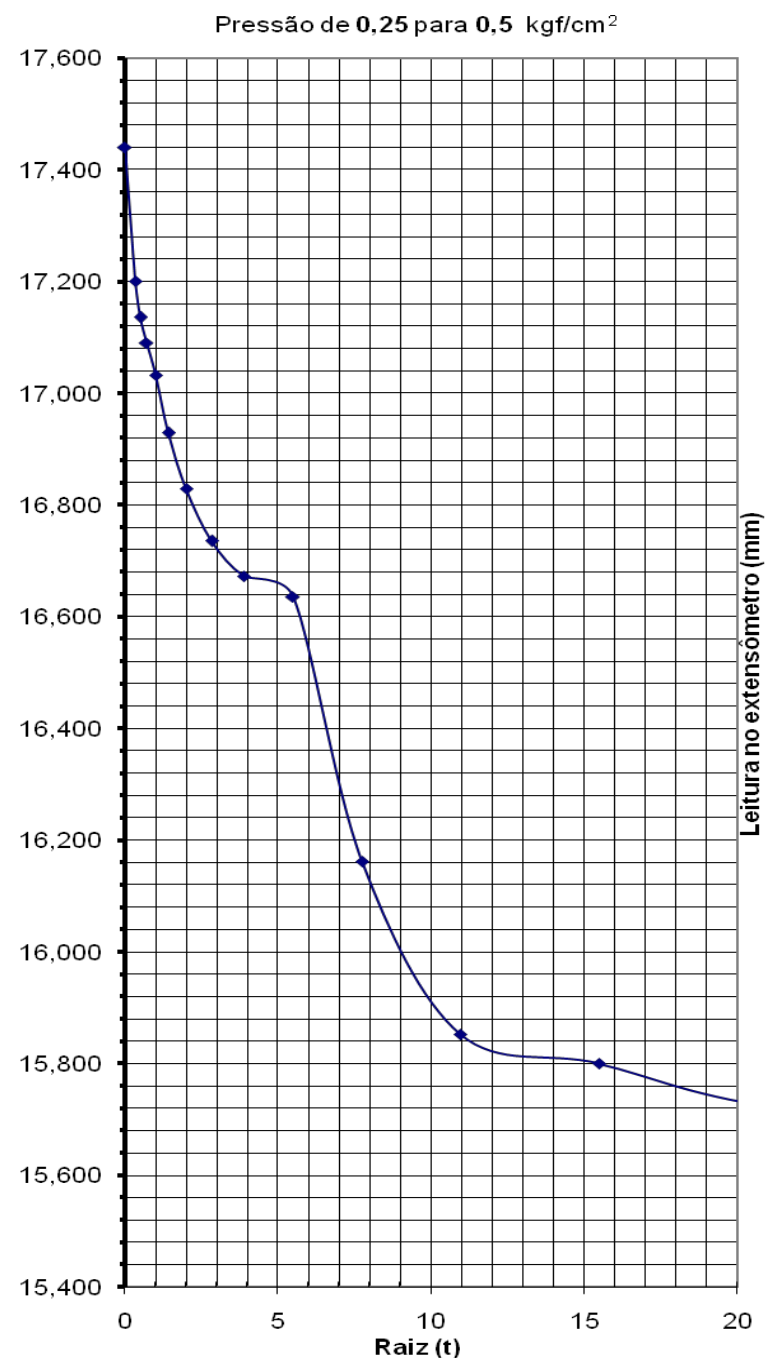
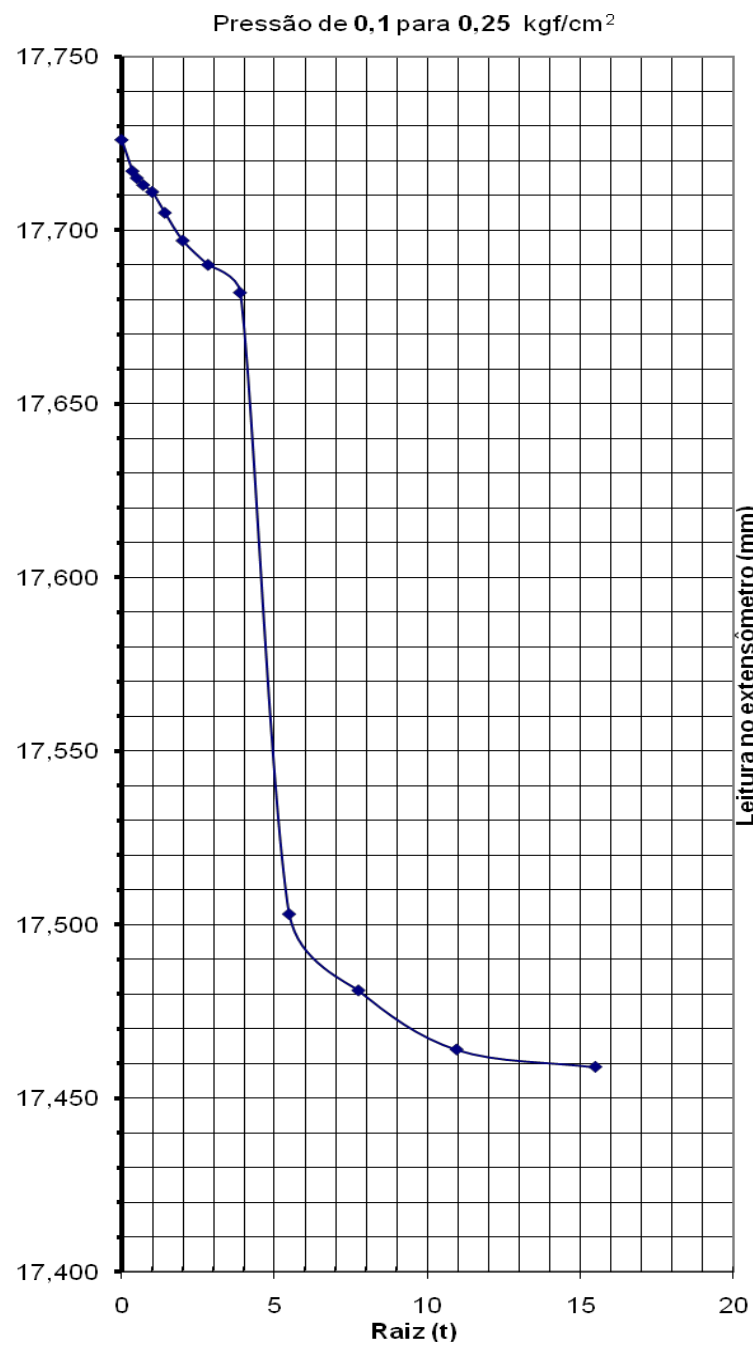


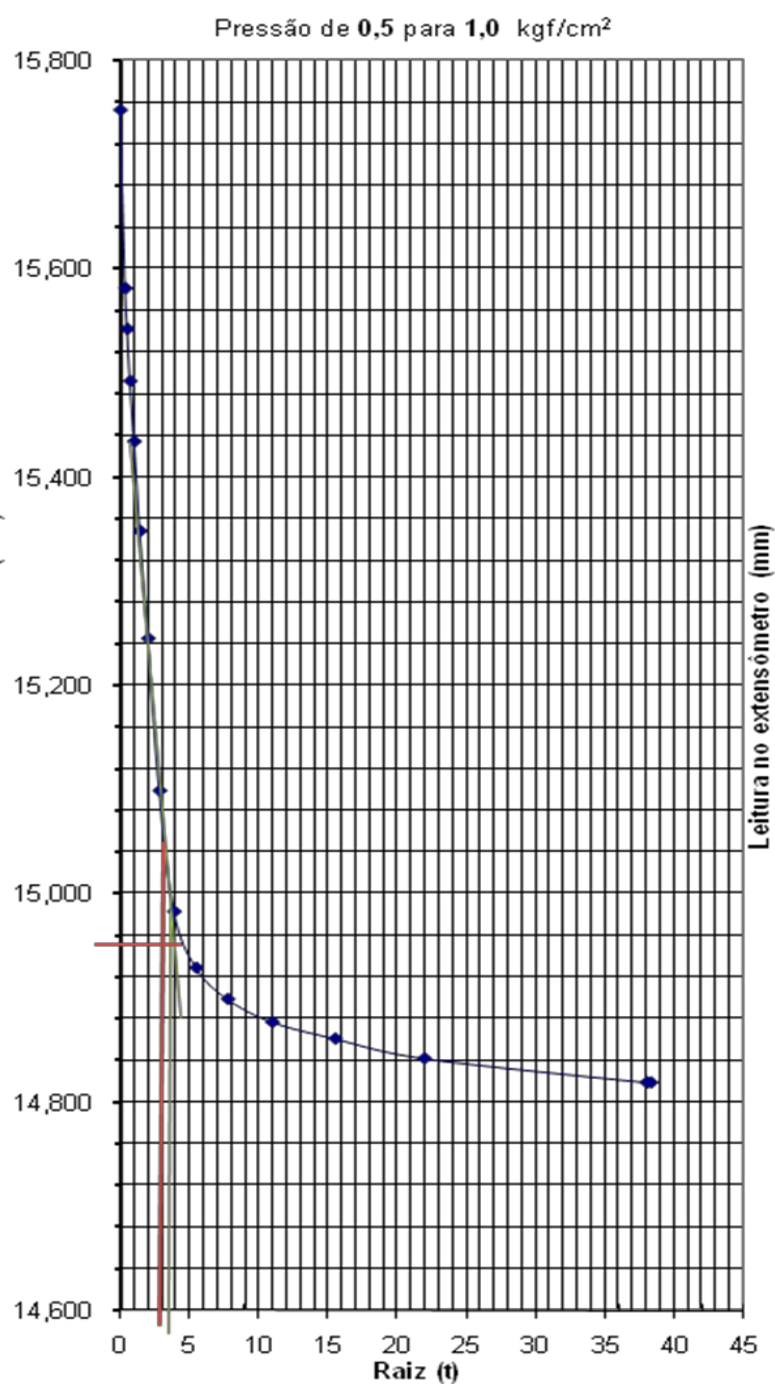
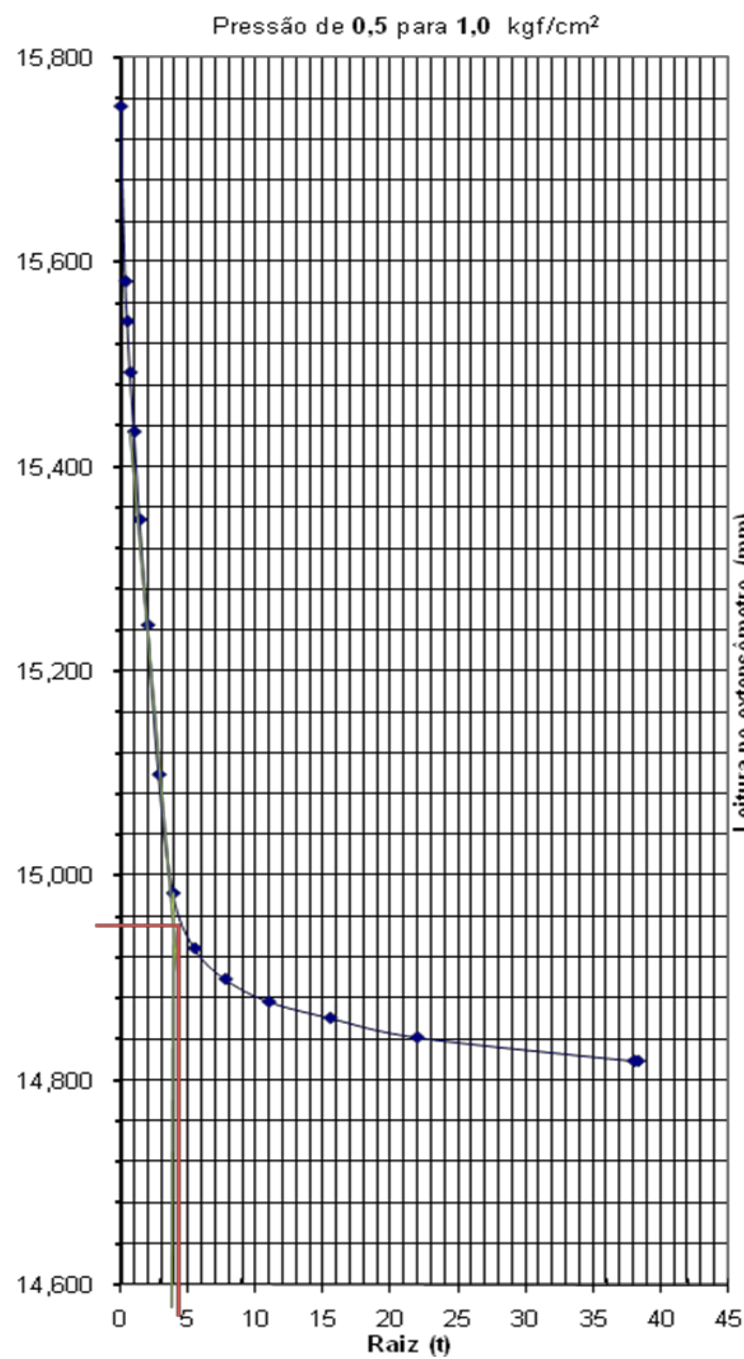


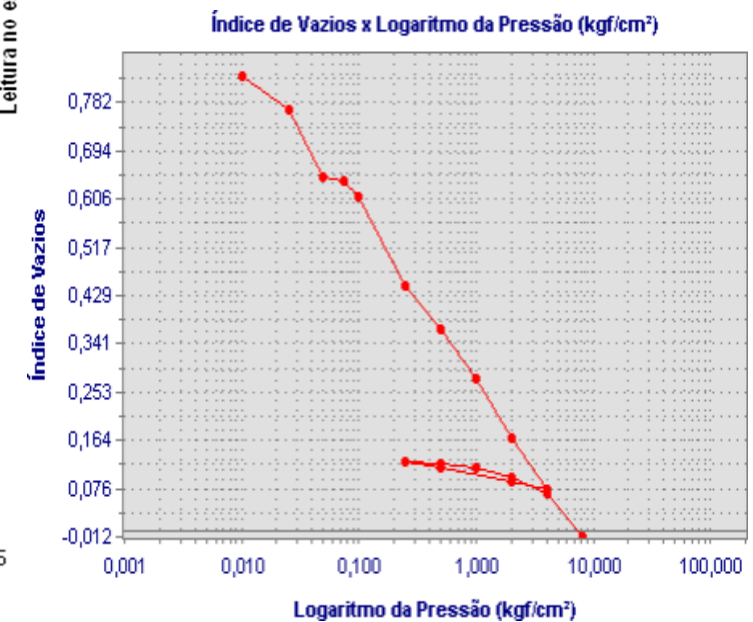
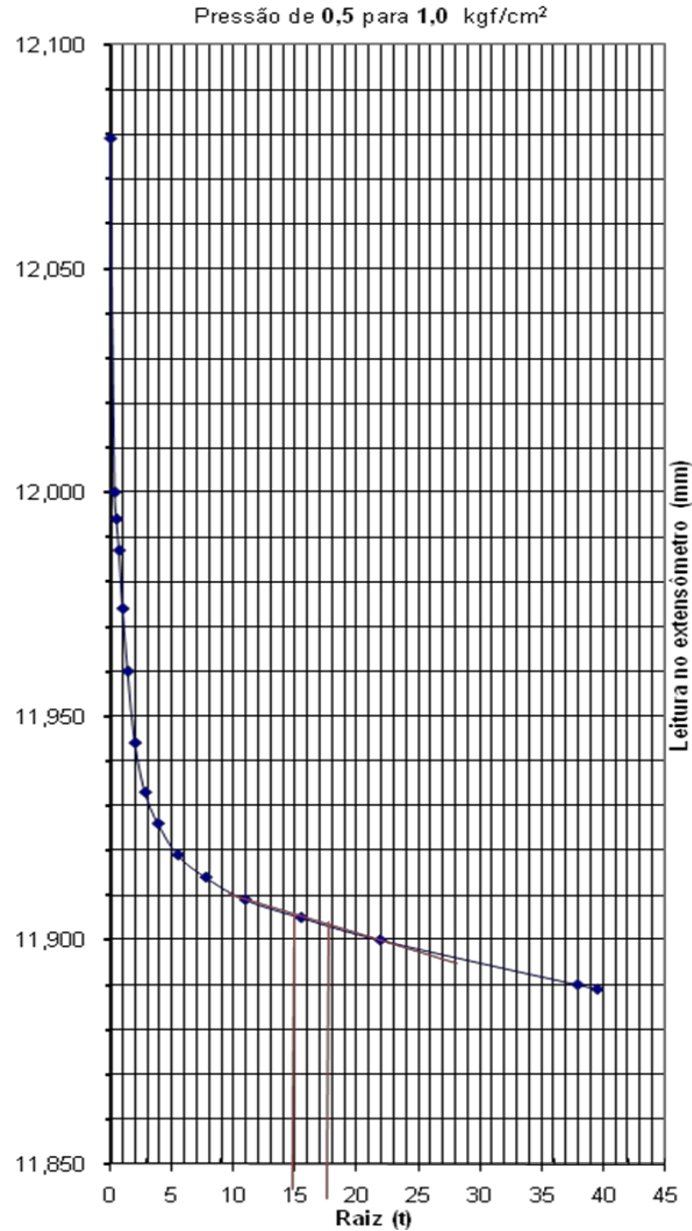
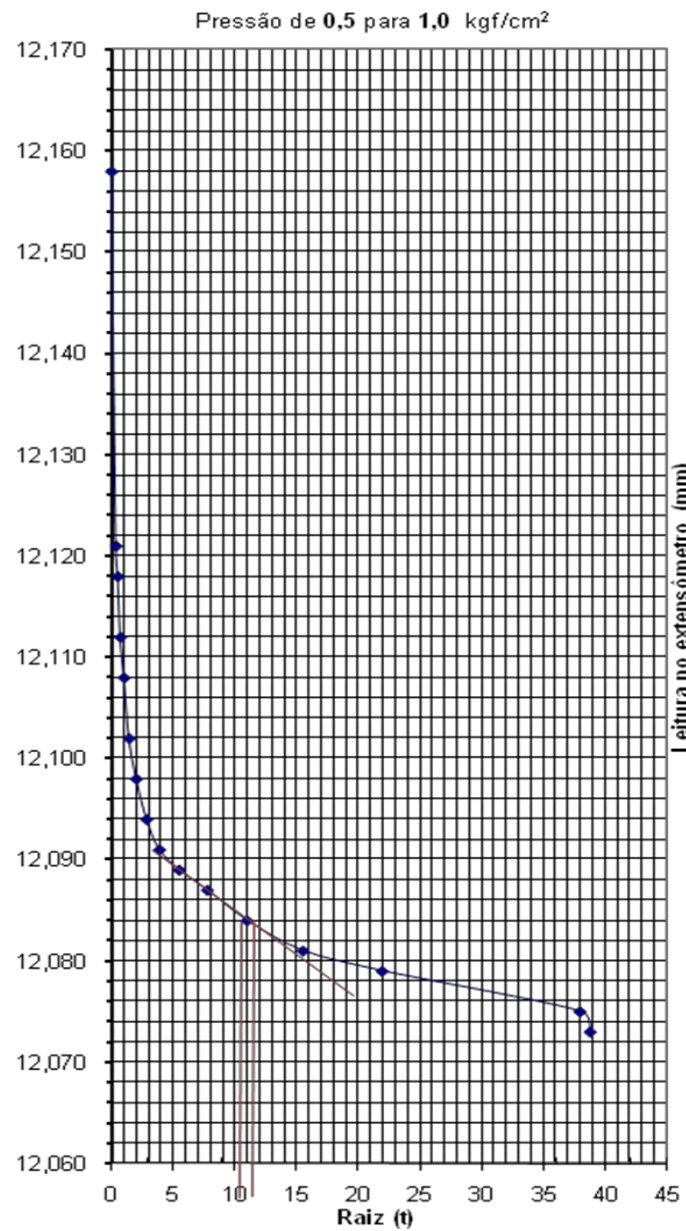
Adensamento: Solo + 30% Areia



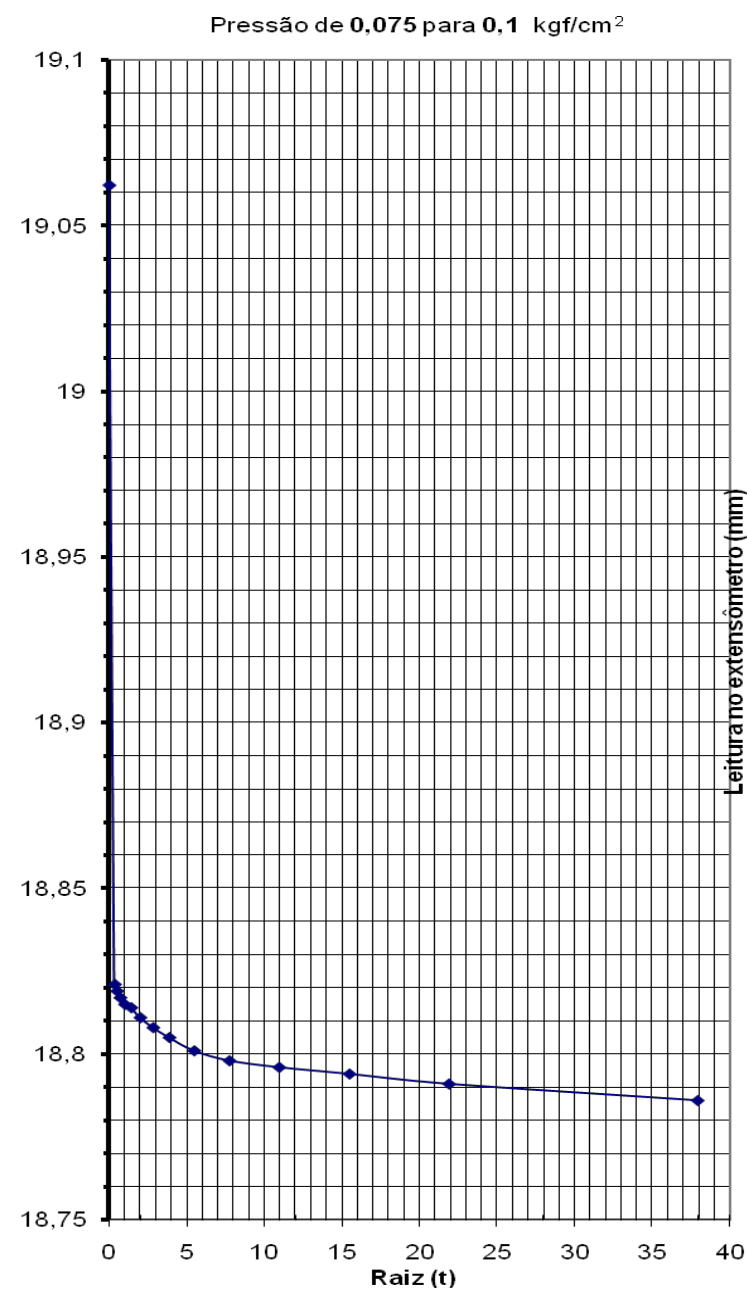
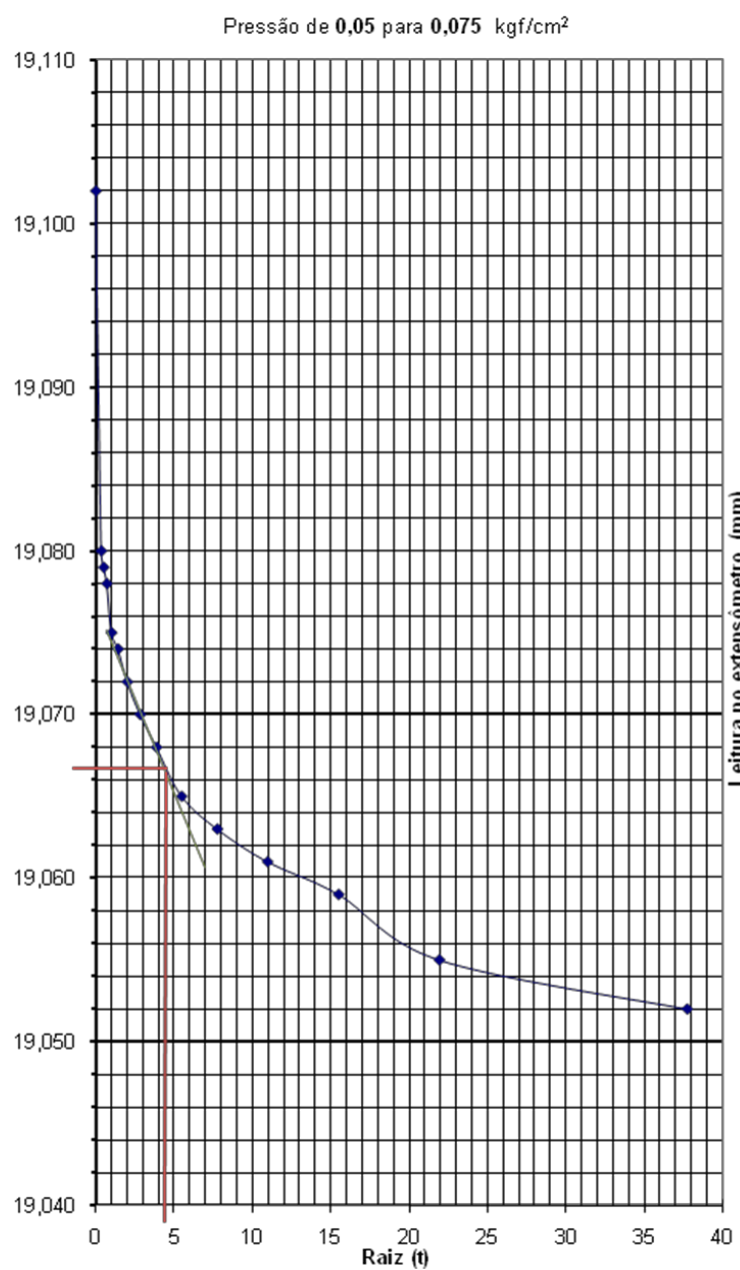


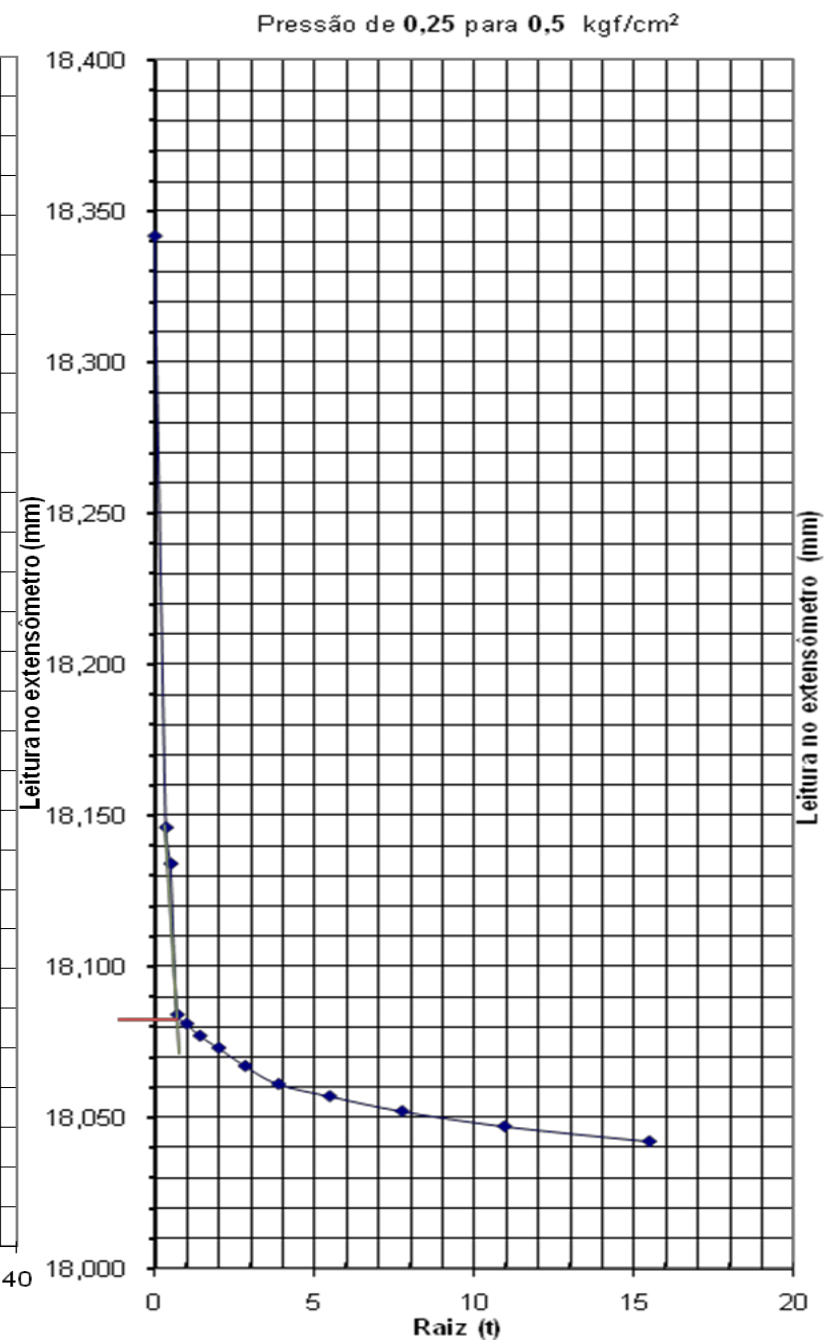
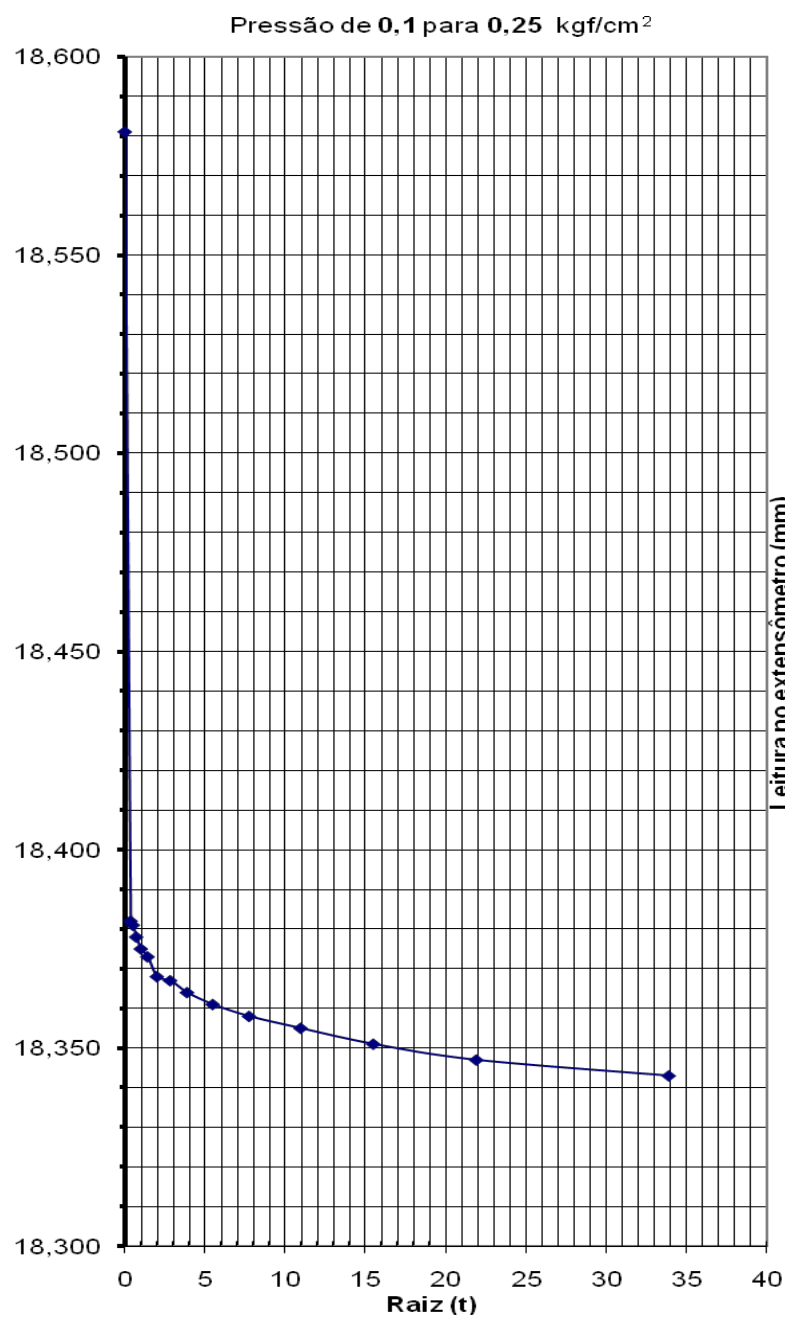


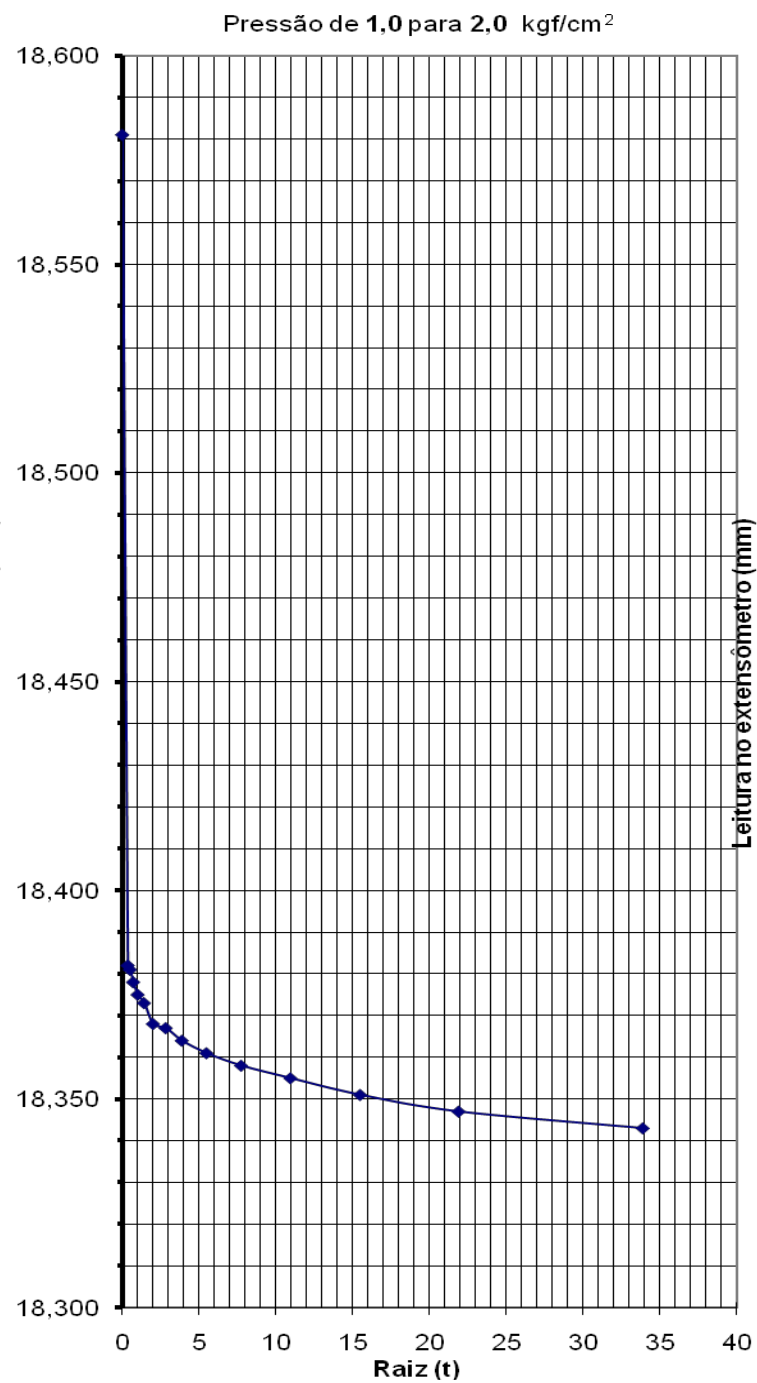
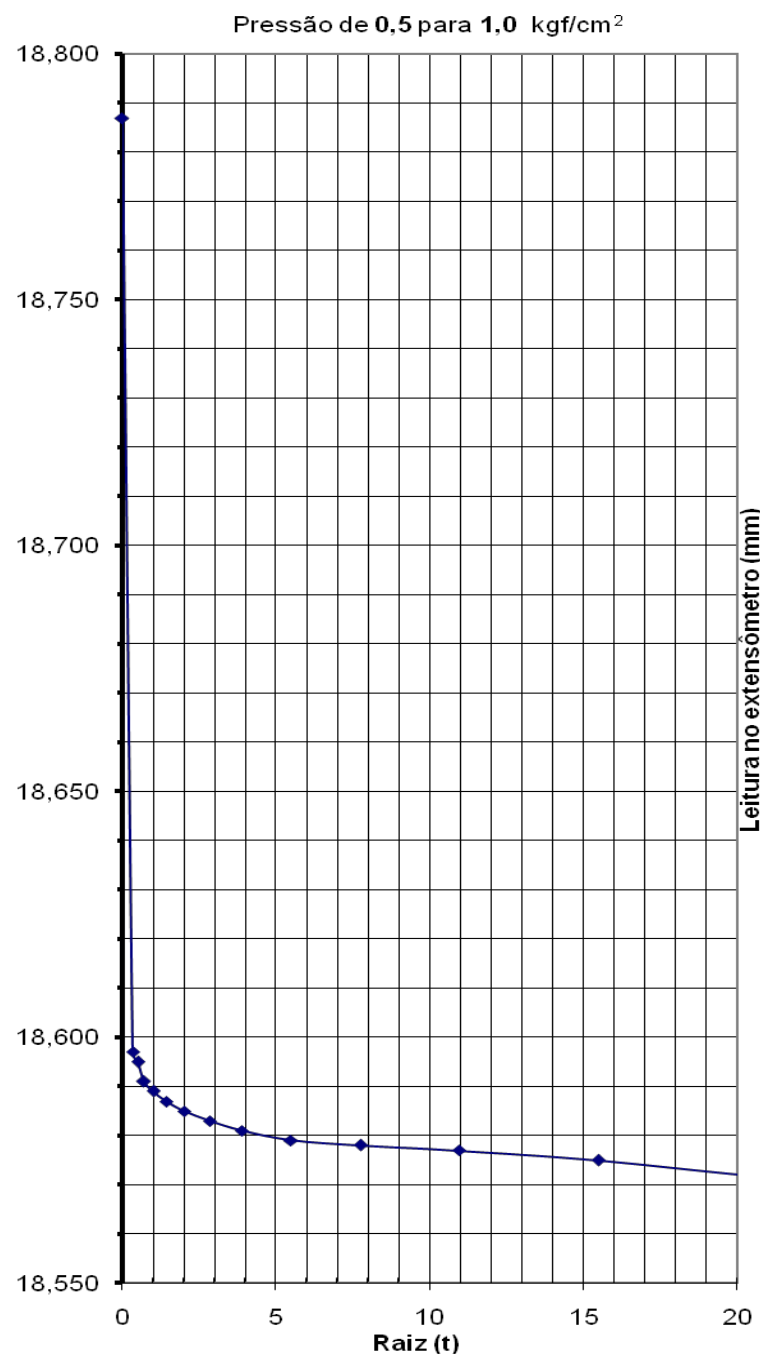


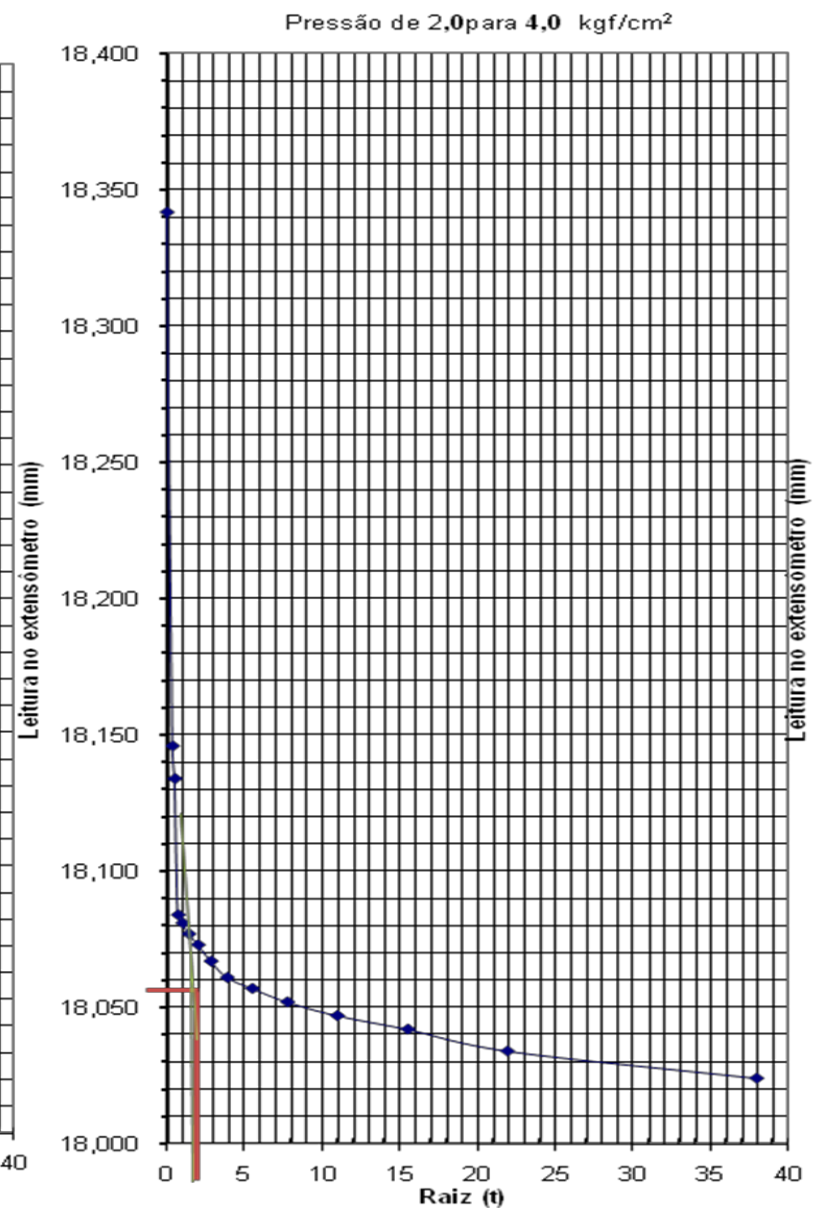
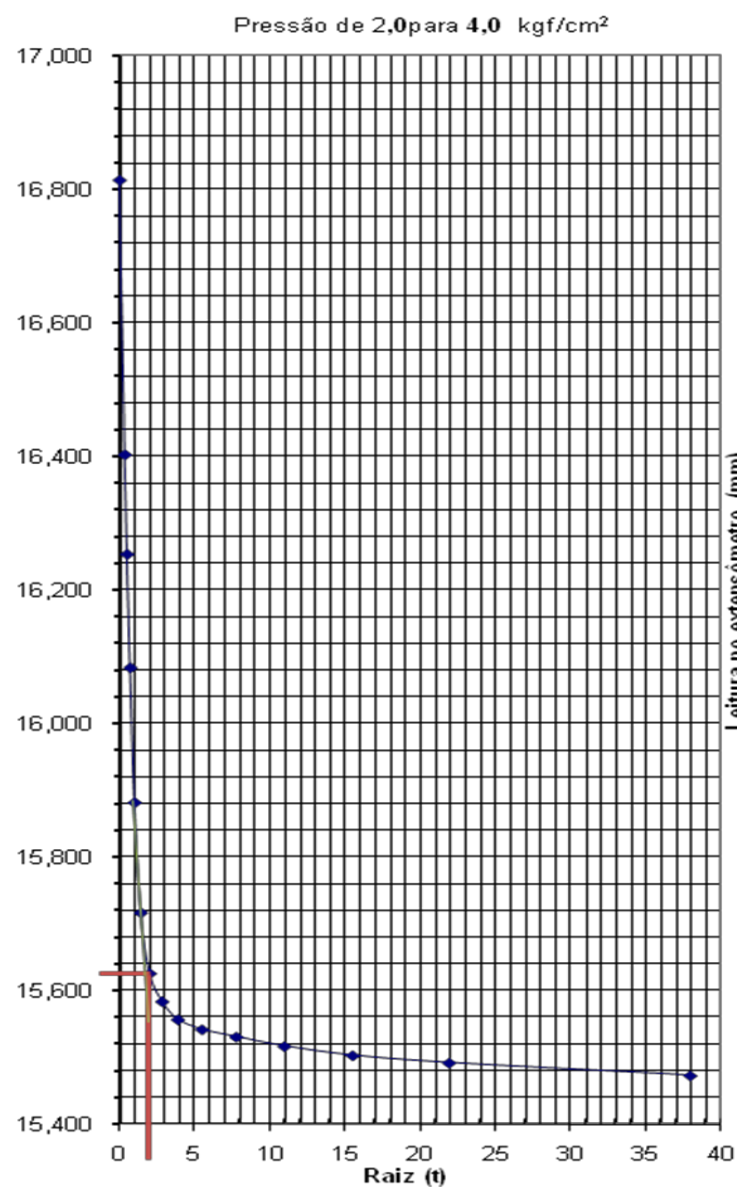


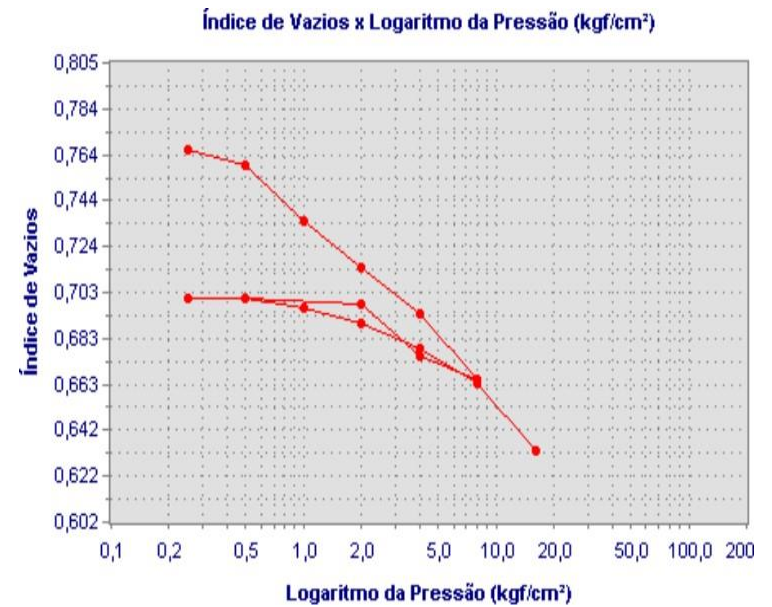
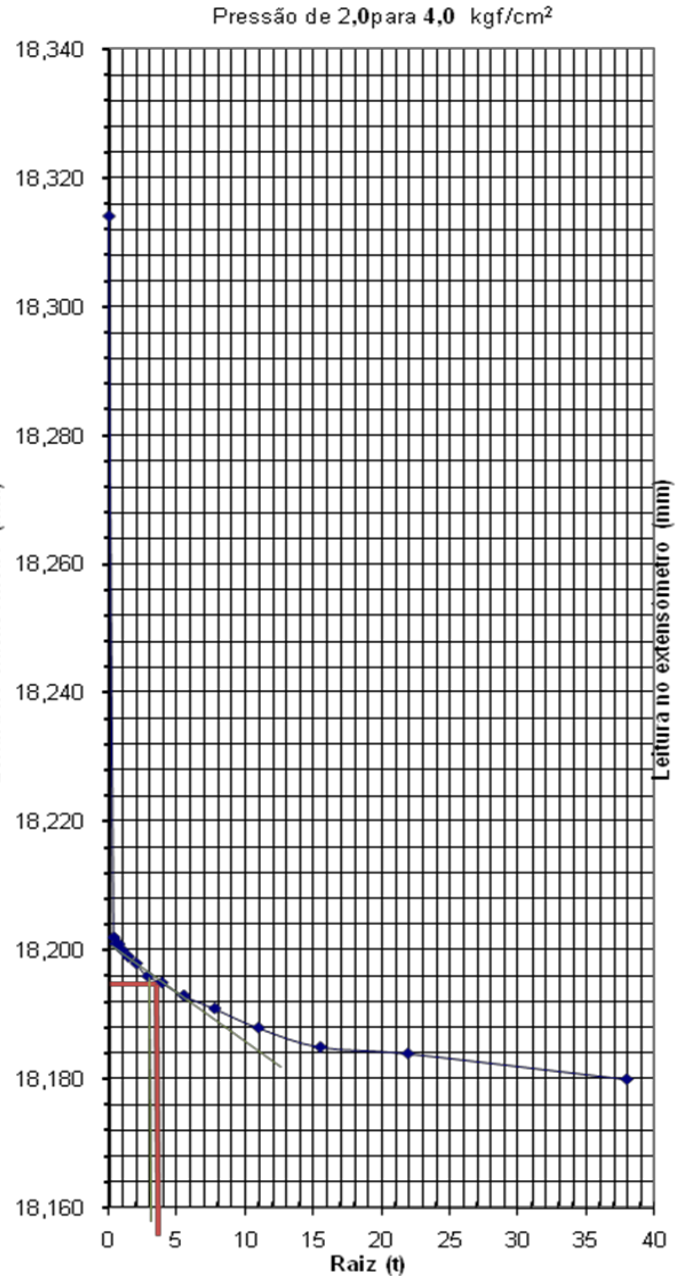
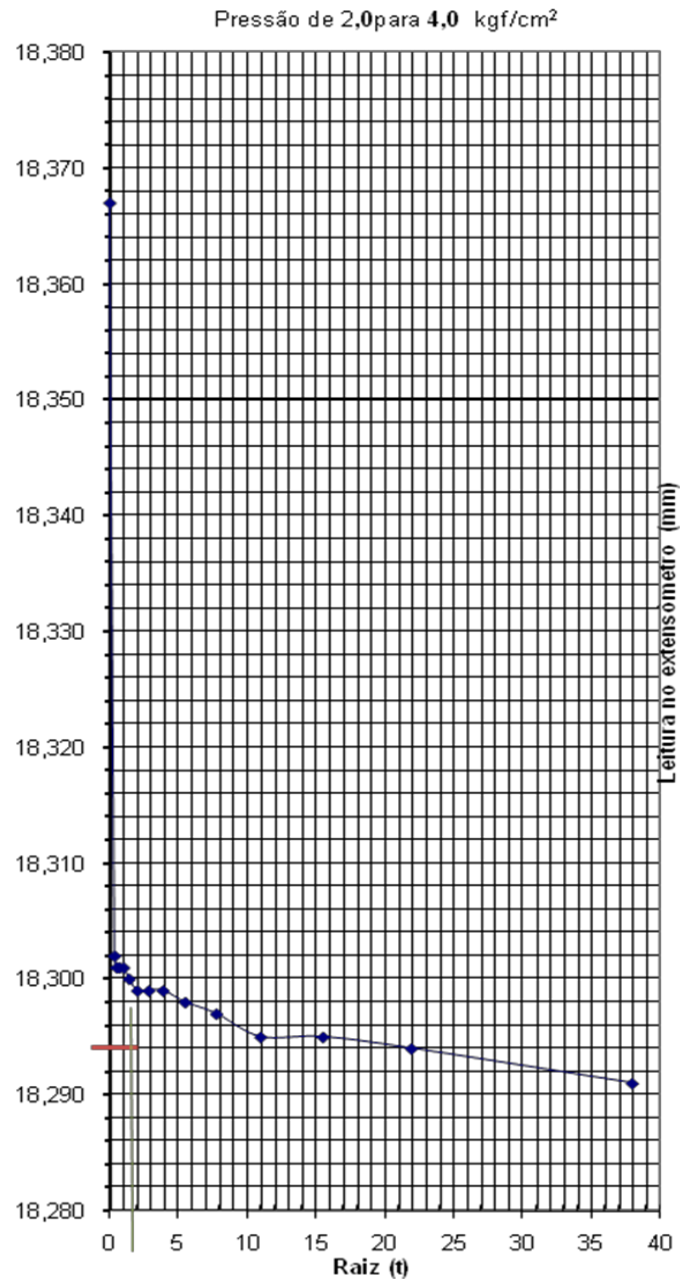
Adensamento: Solo + 30% Cimento



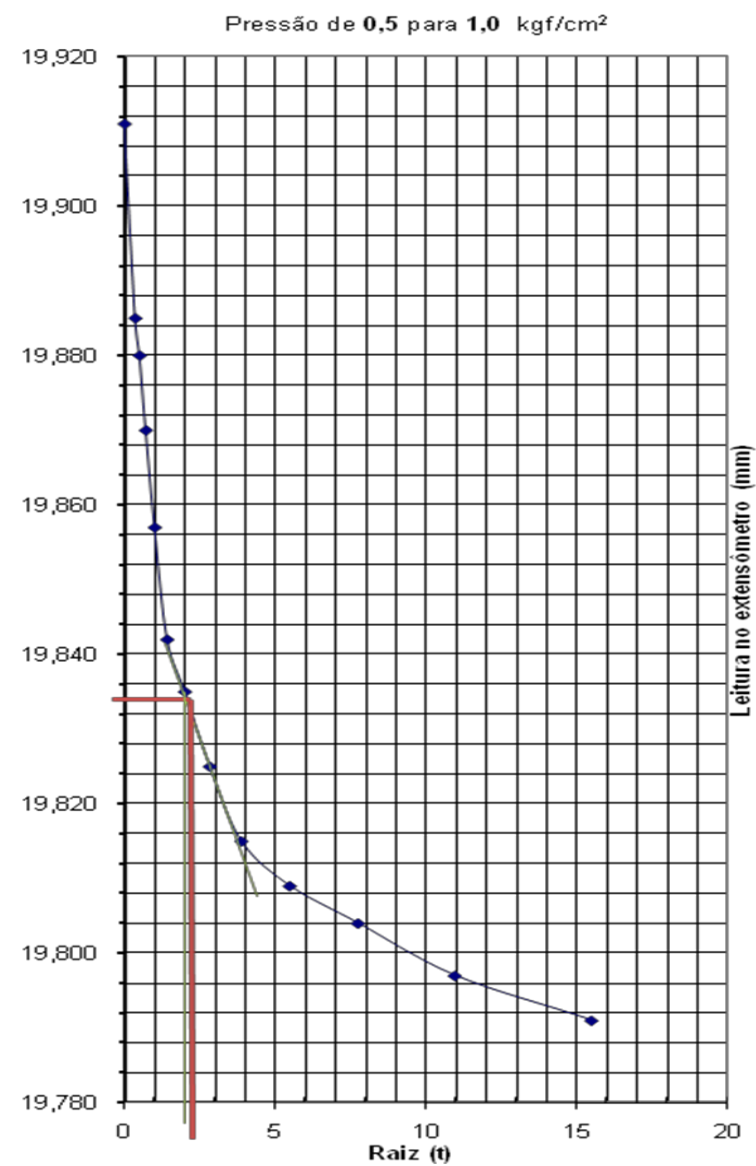
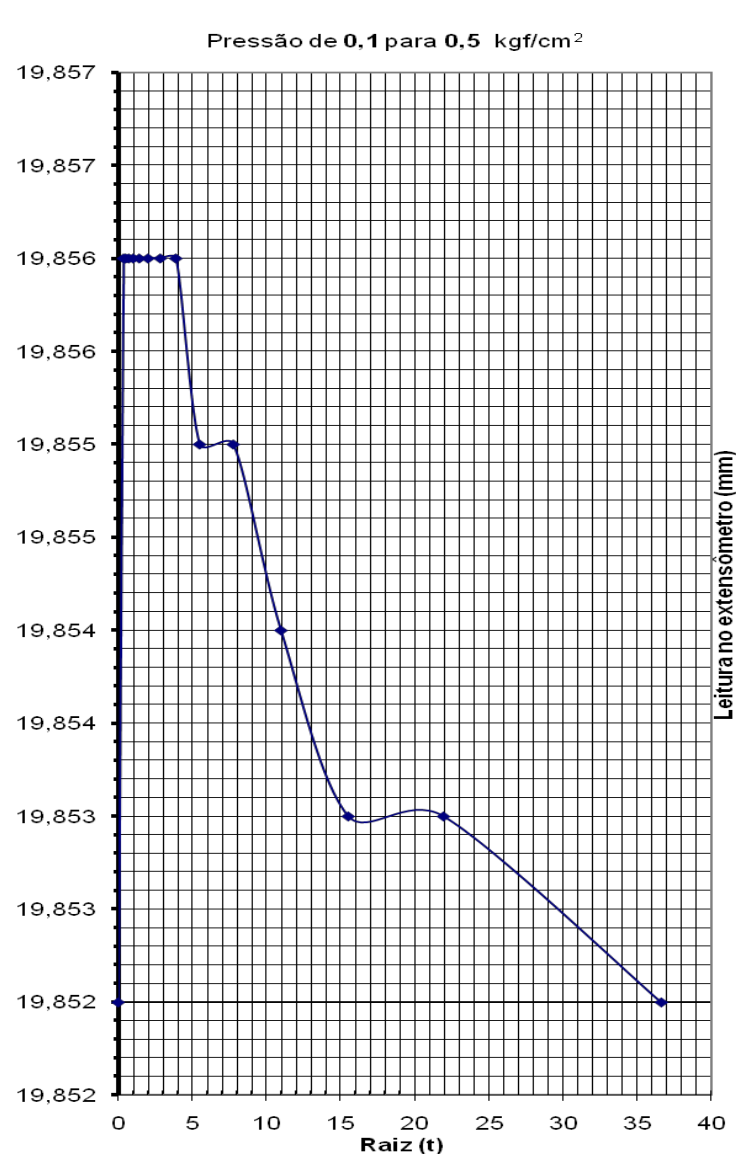


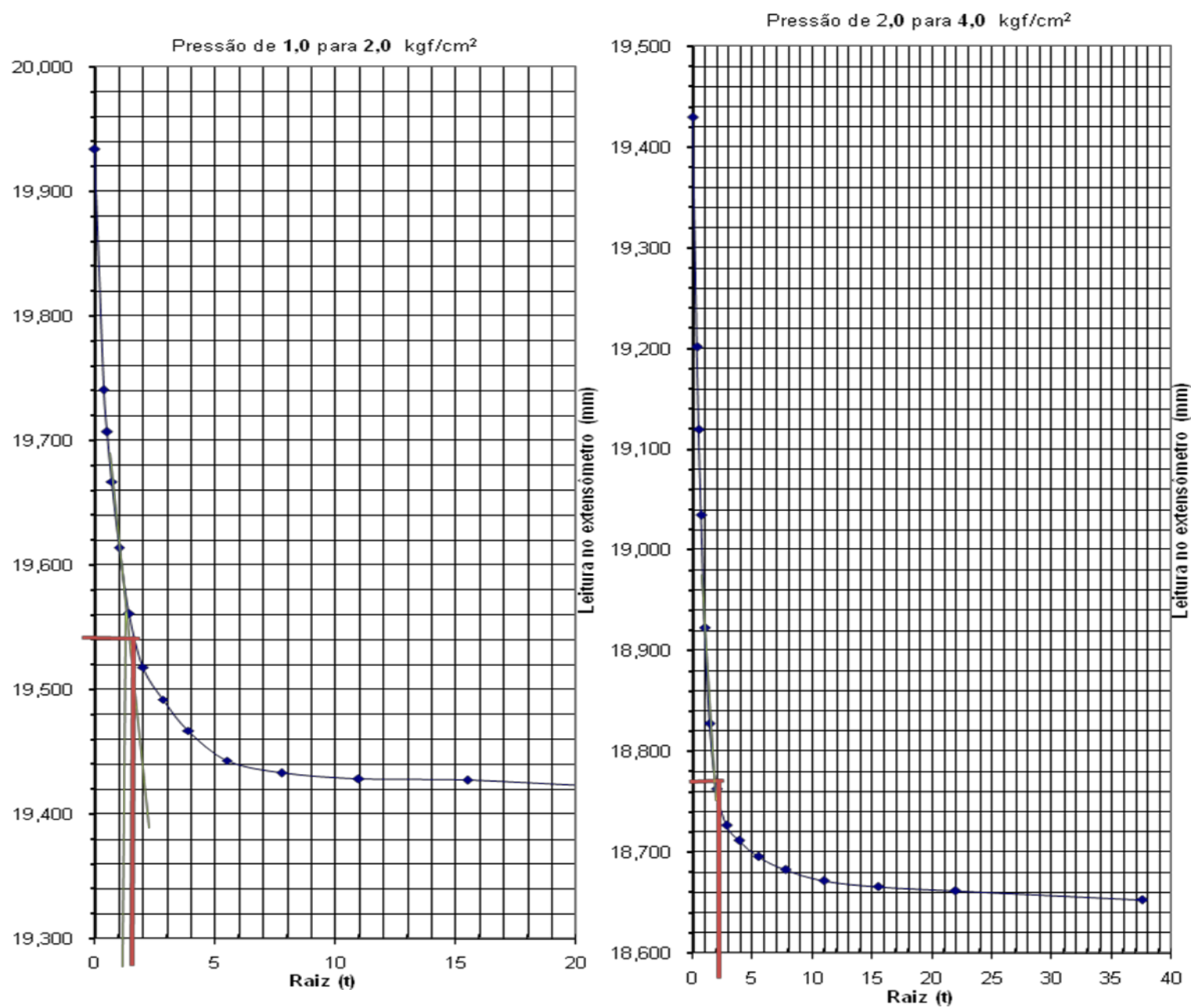


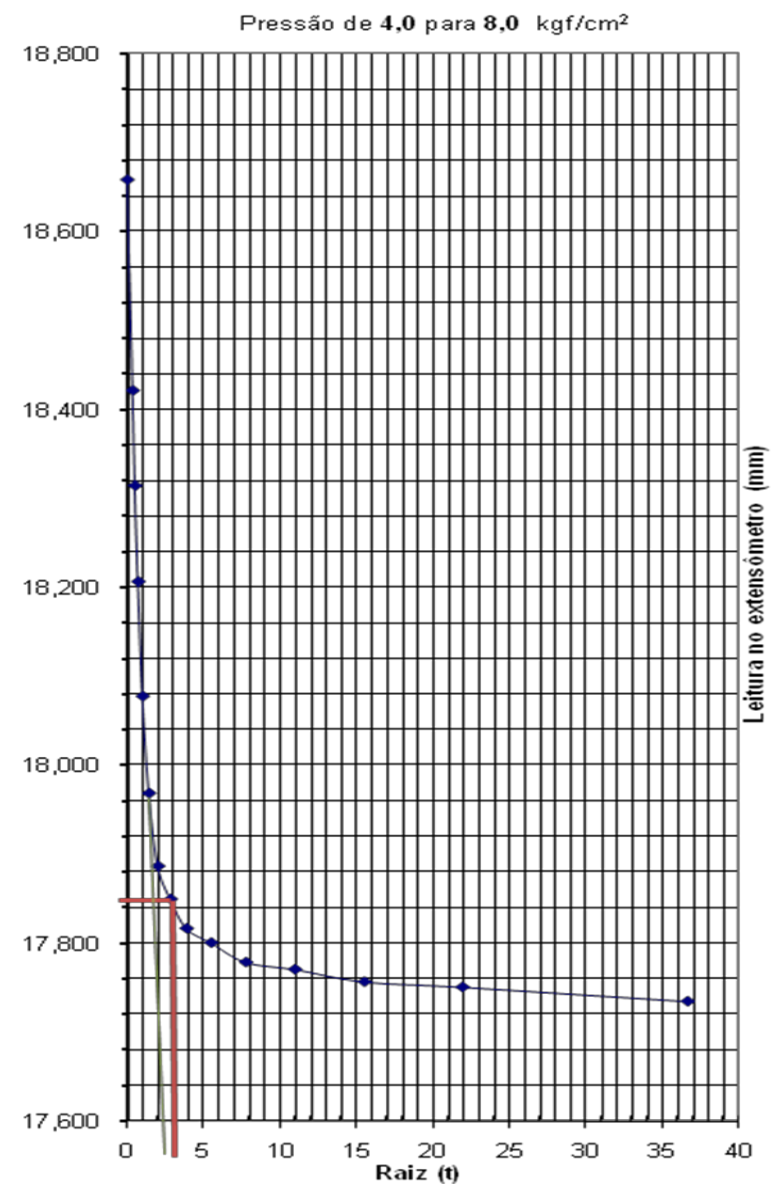
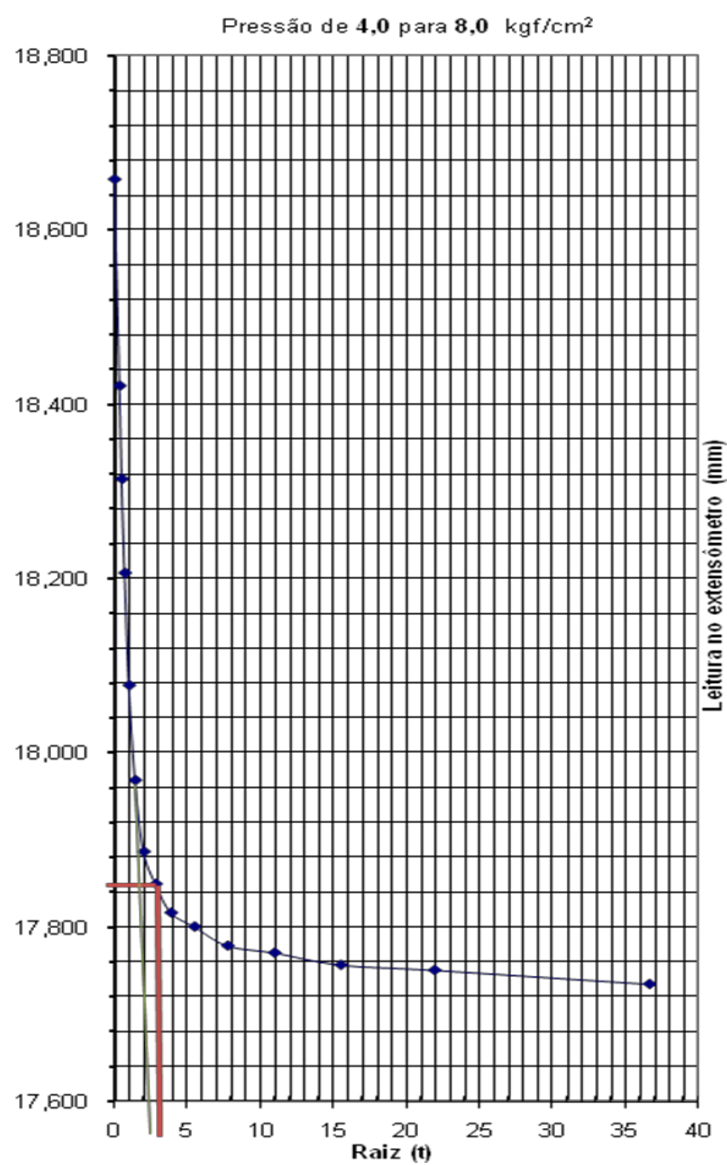


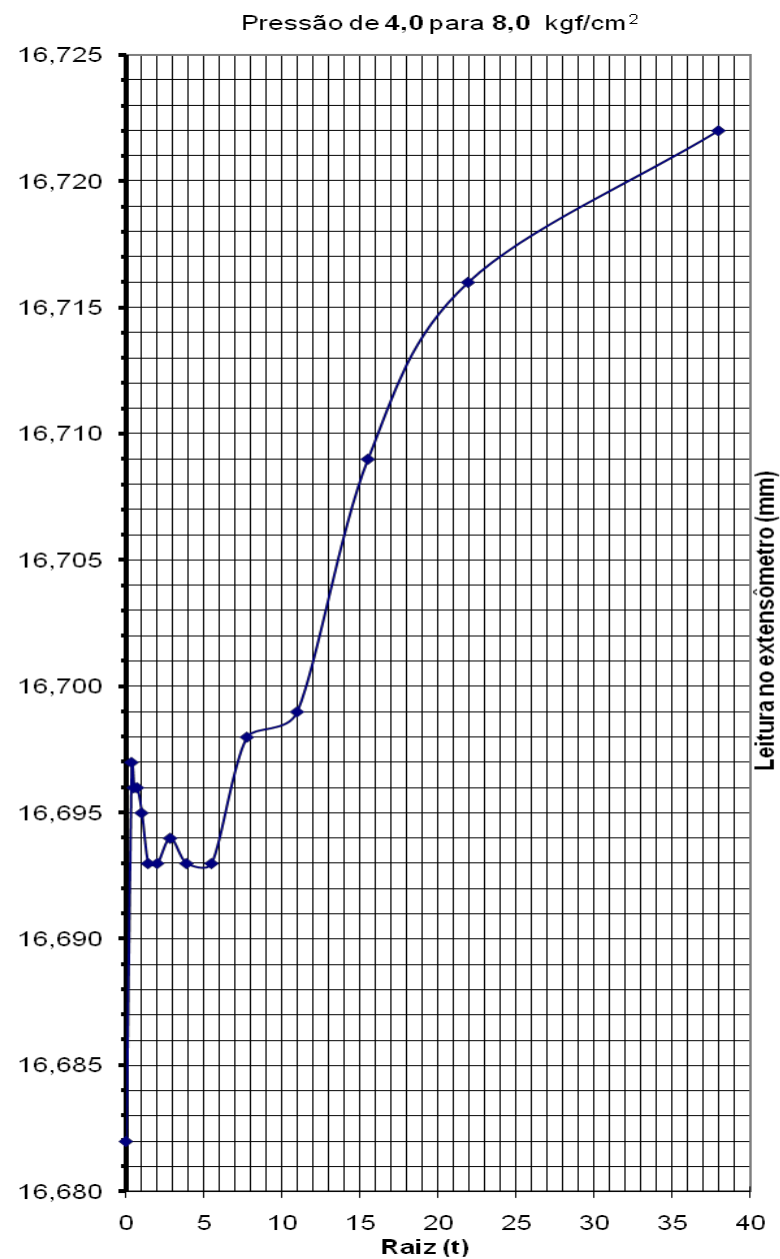
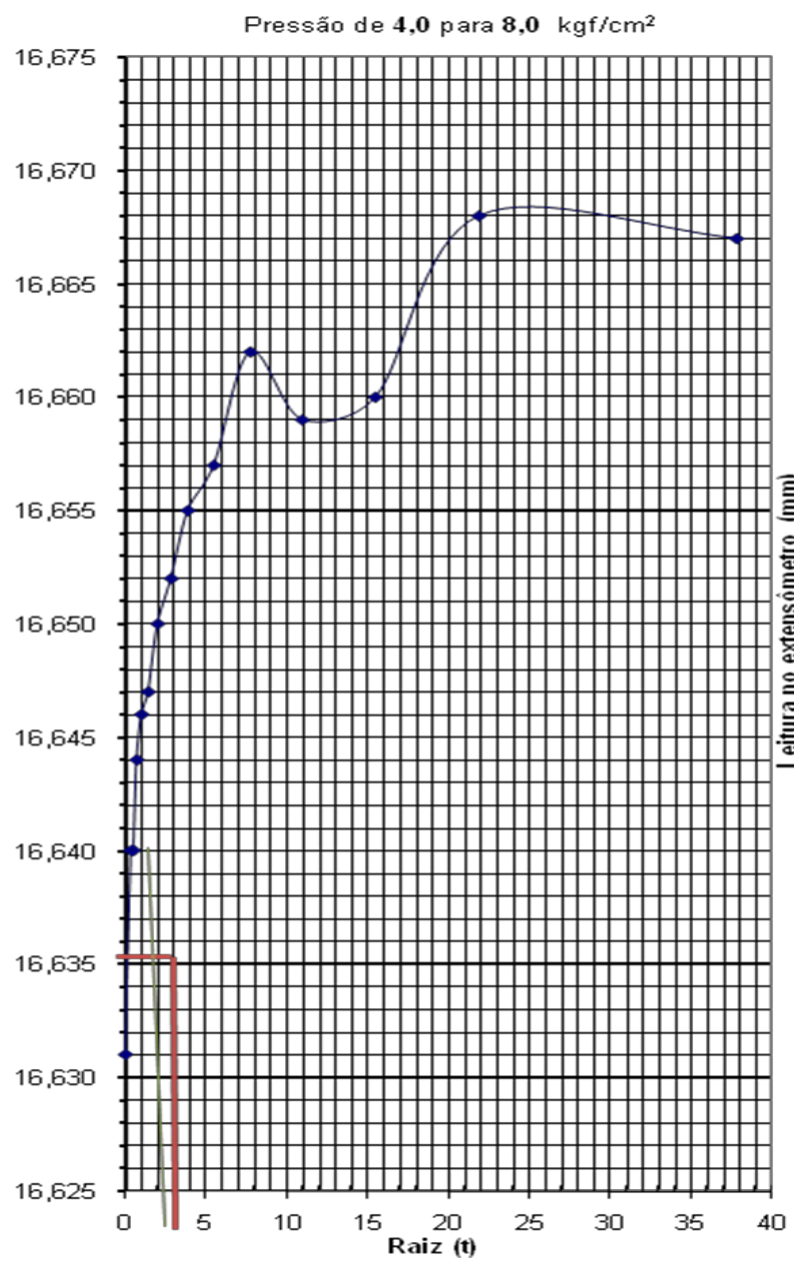


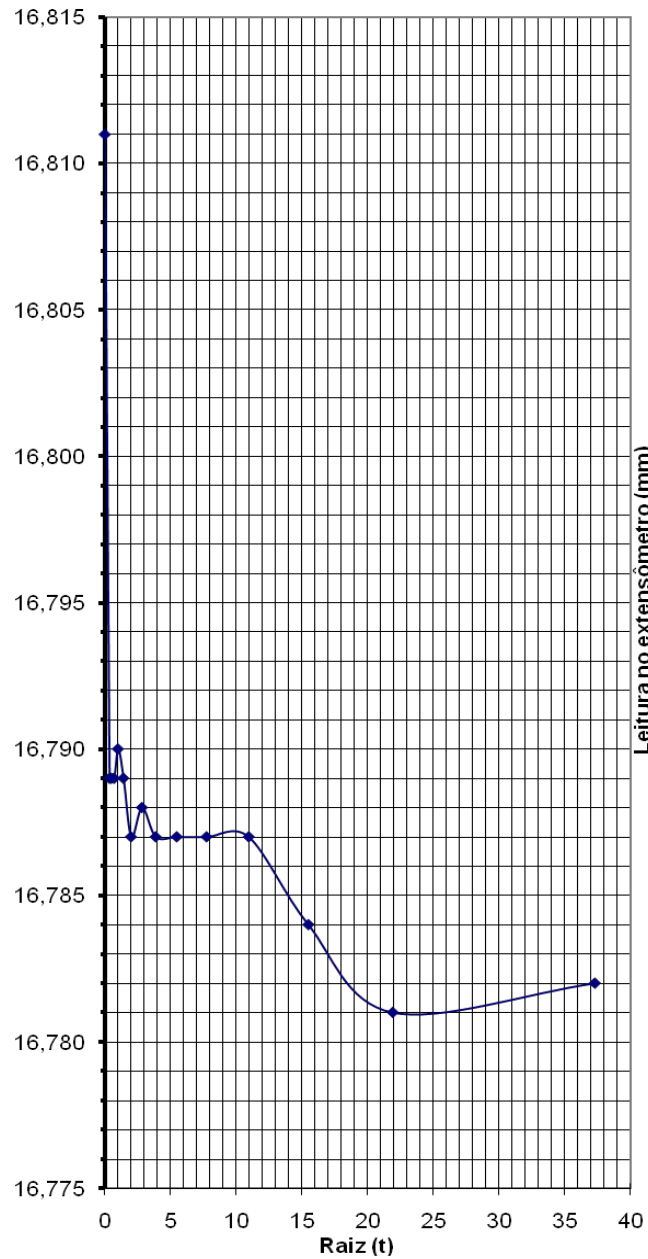
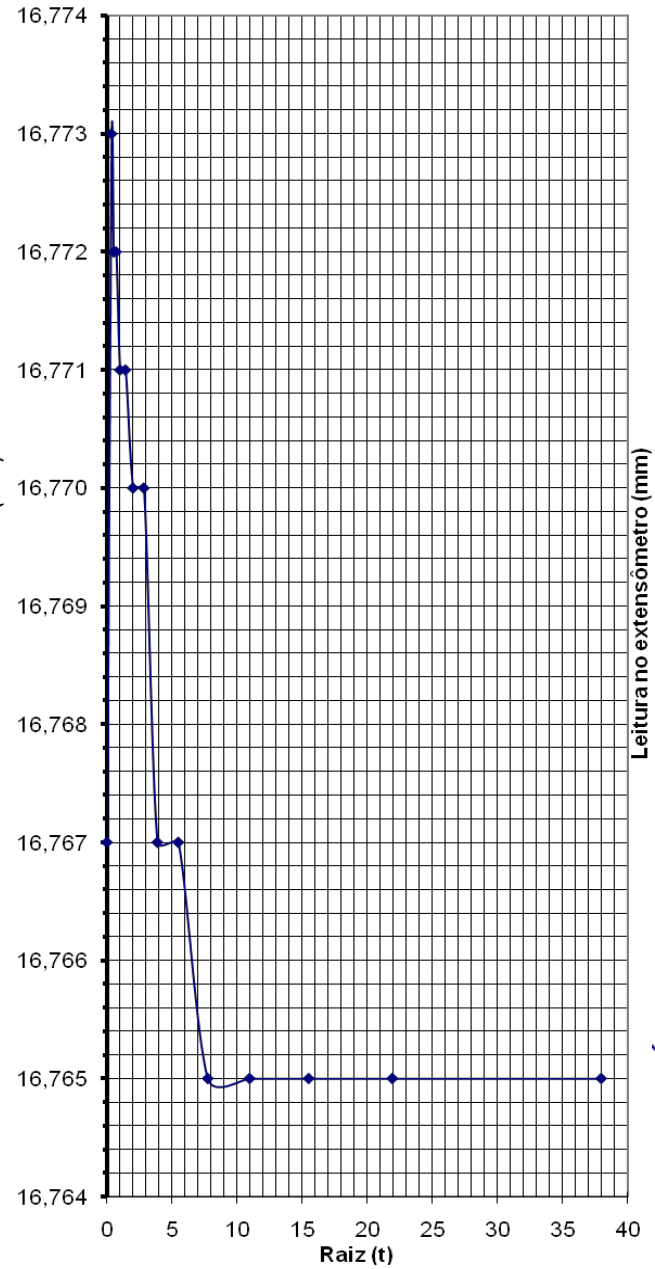
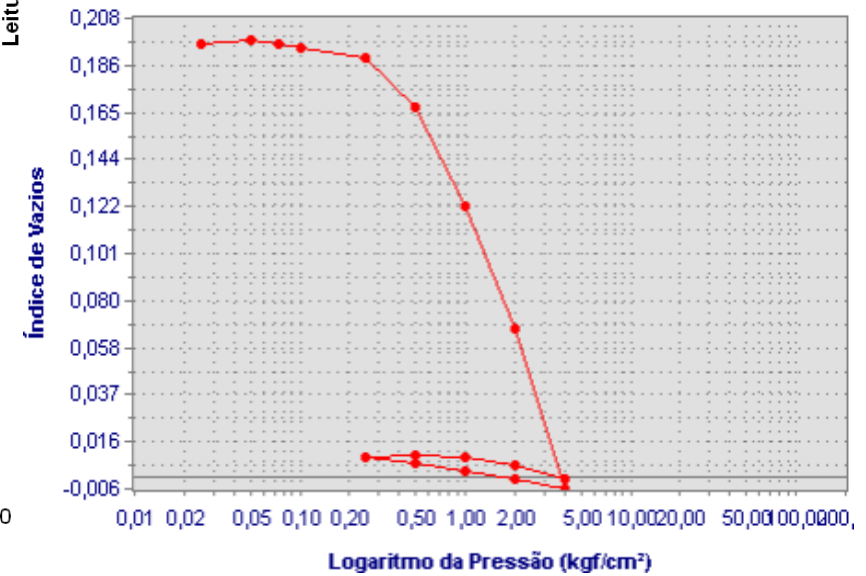
Adensamento: Solo+KR#4,8mm 30%



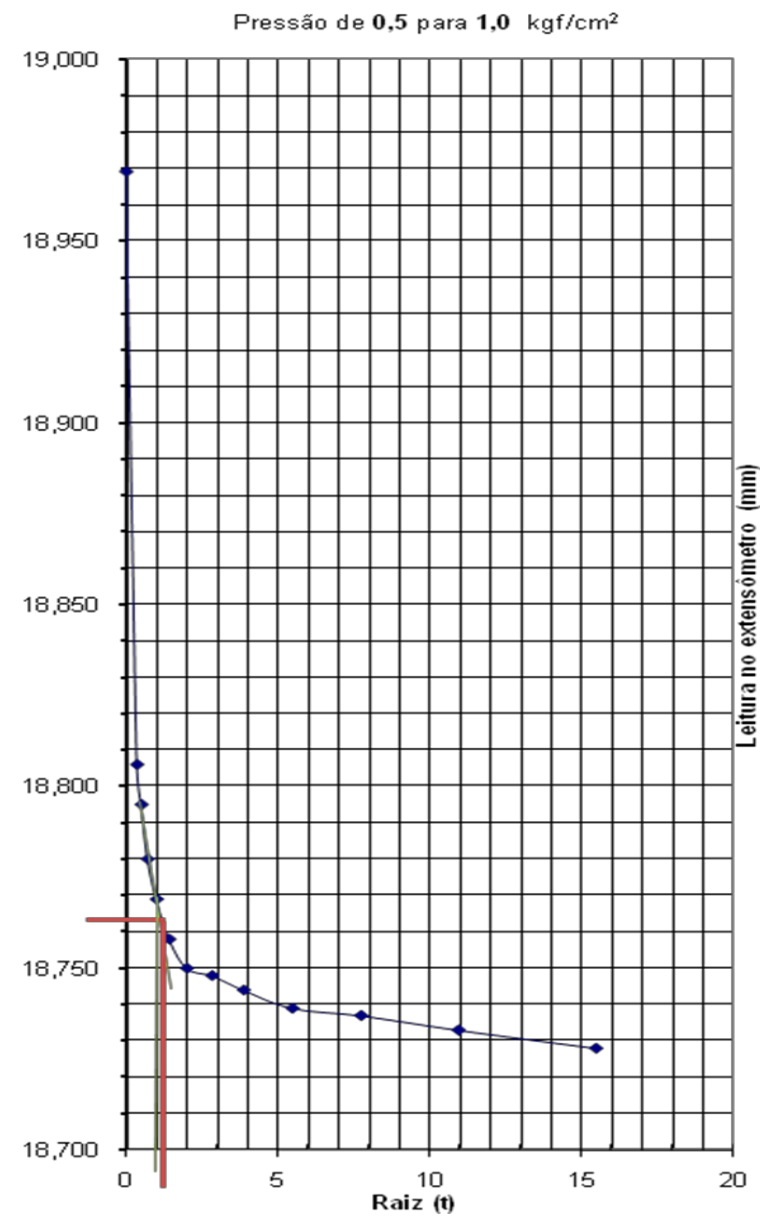
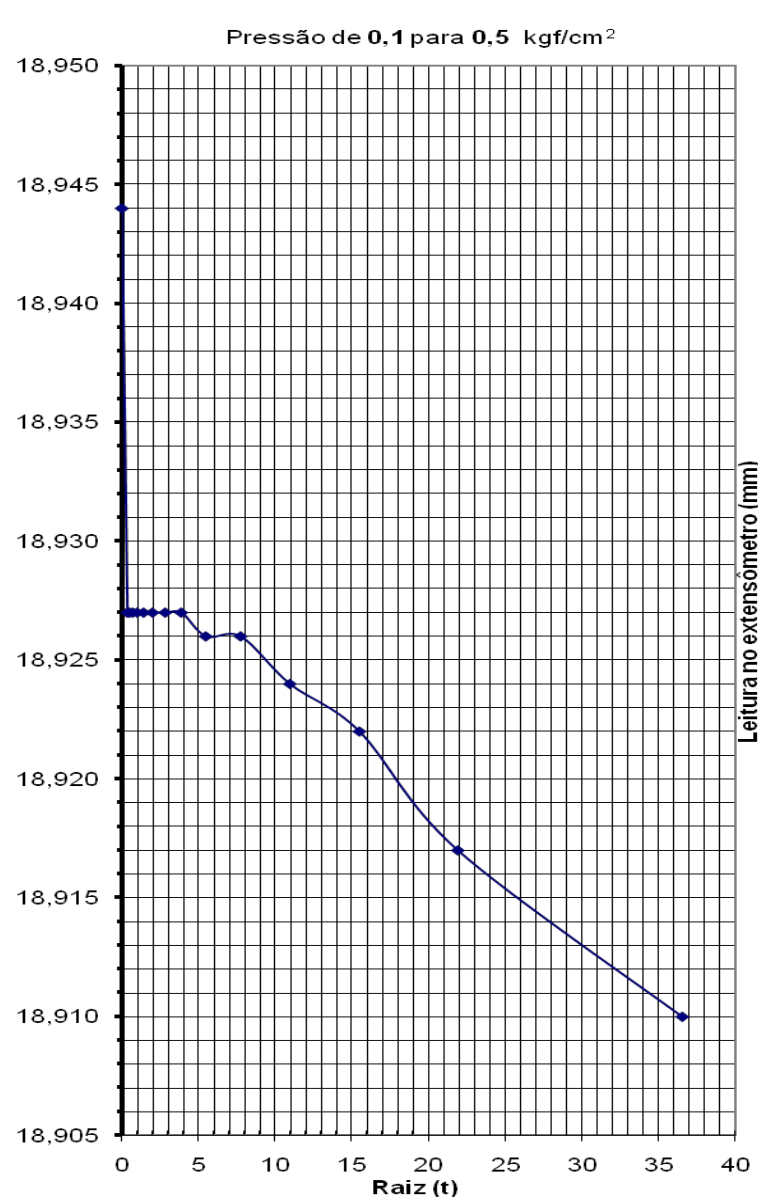


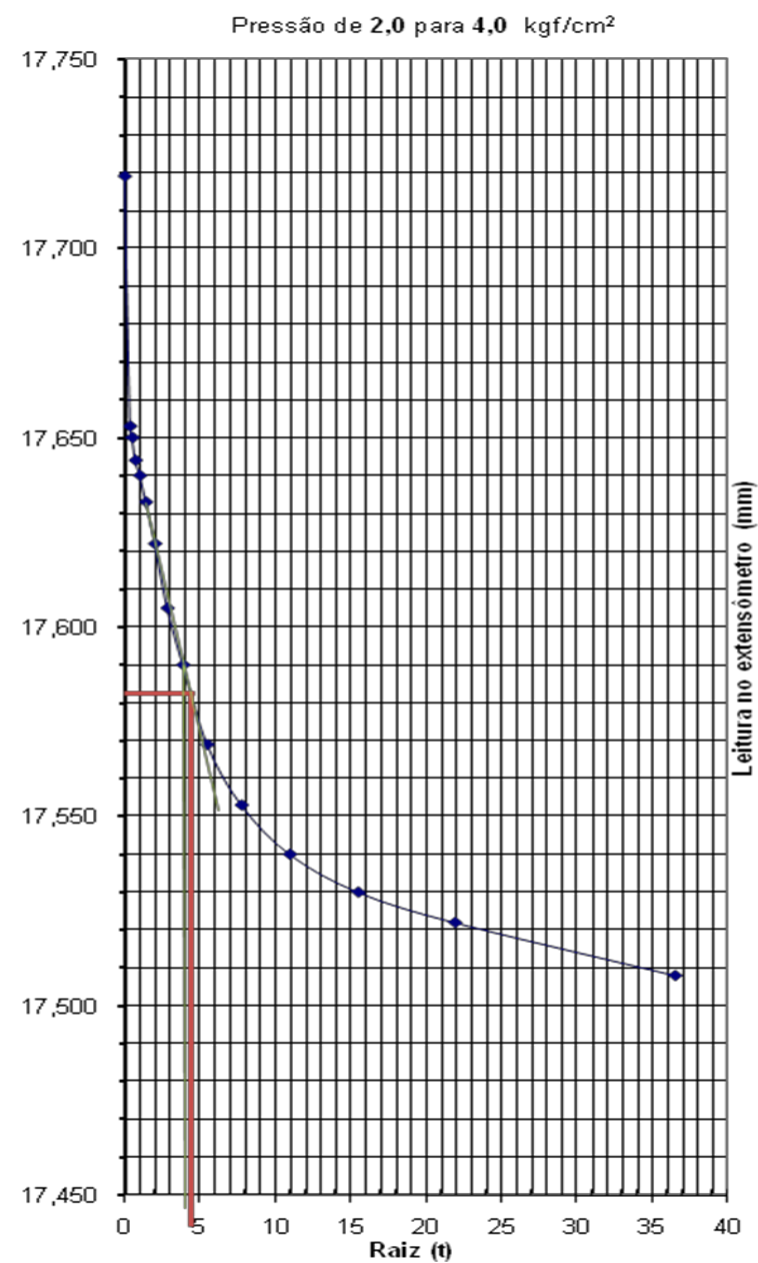
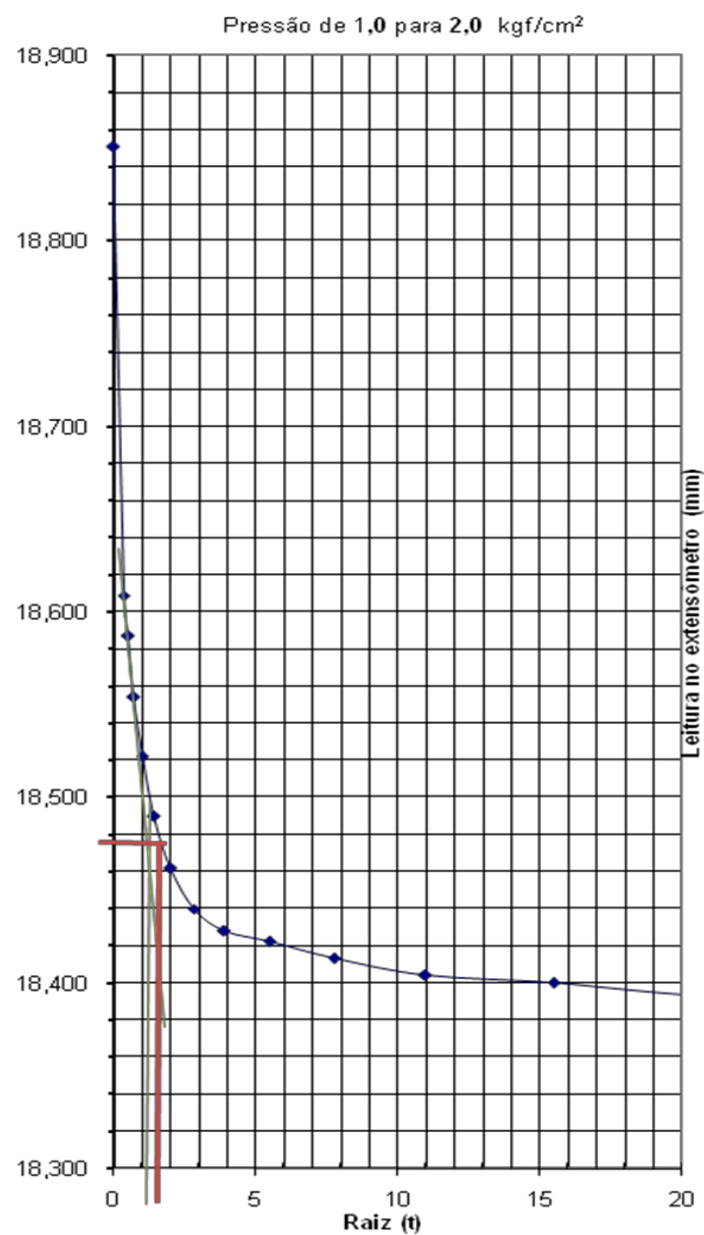


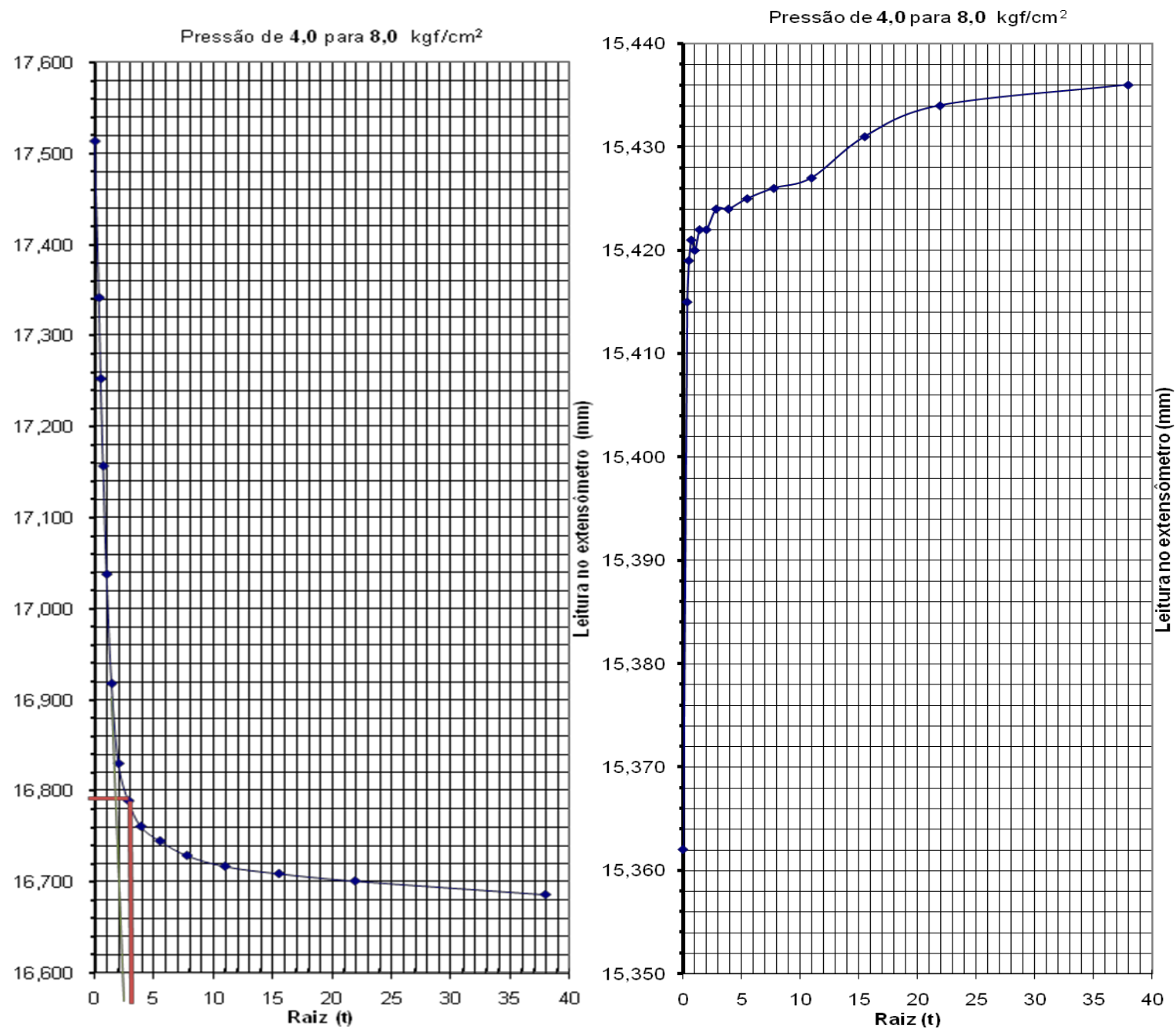


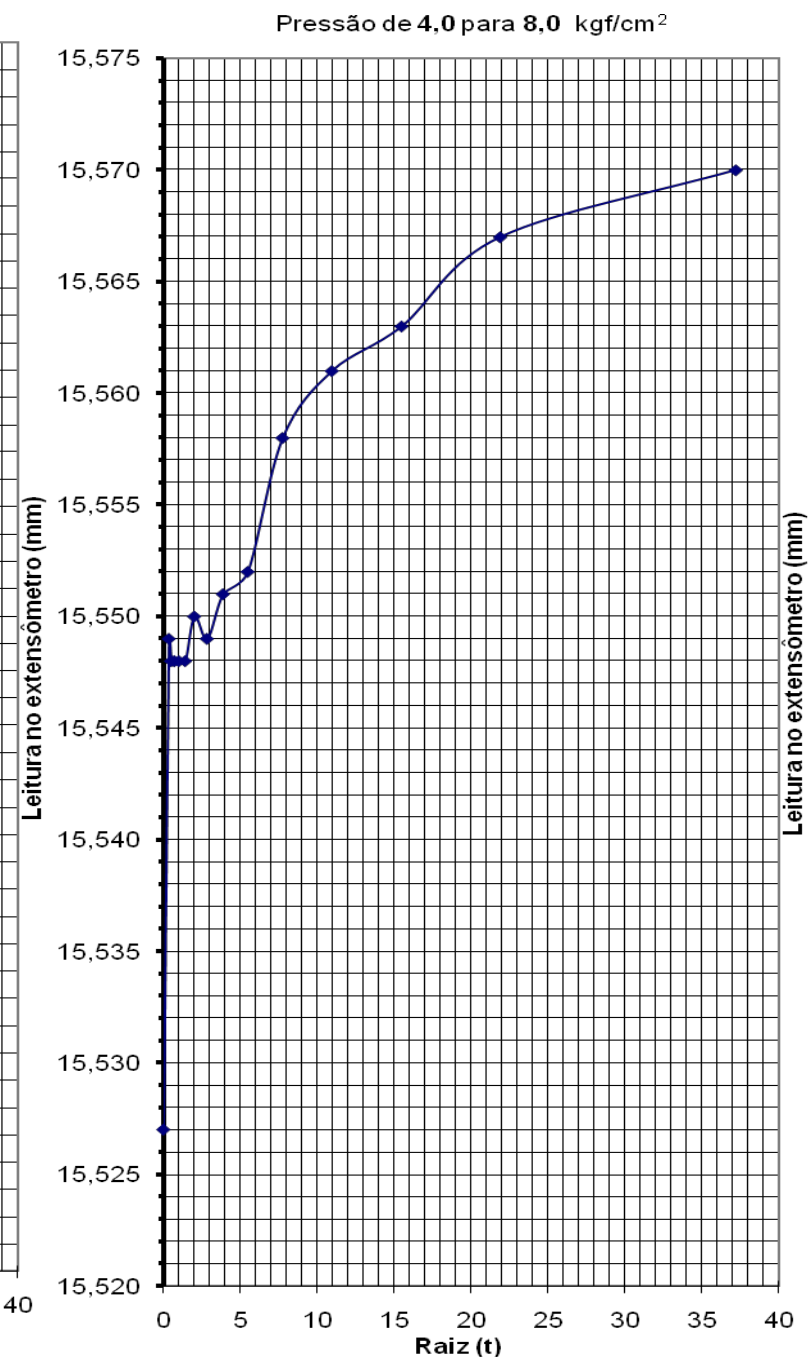
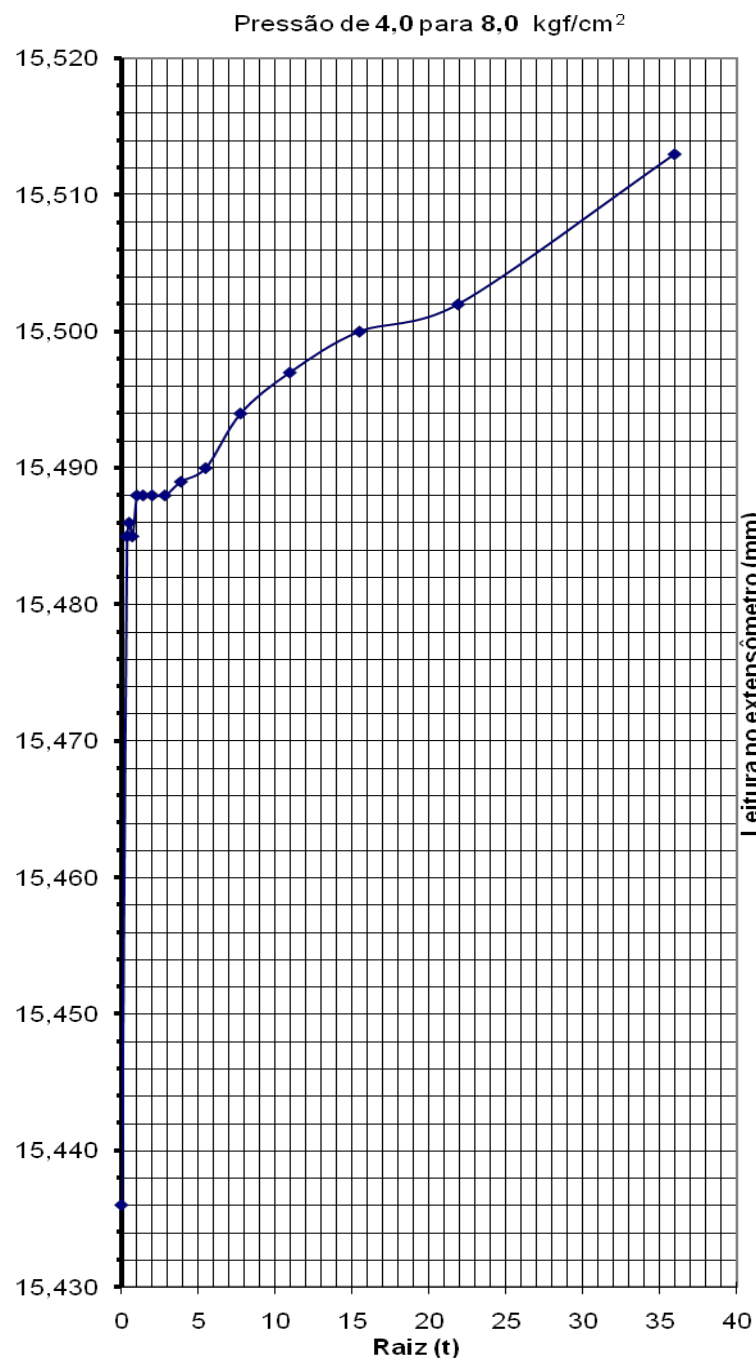
Pressão de 4,0 para 8,0 kgf/cm²Pressão de 4,0 para 8,0 kgf/cm²Índice de Vazios x Logaritmo da Pressão (kgf/cm²)

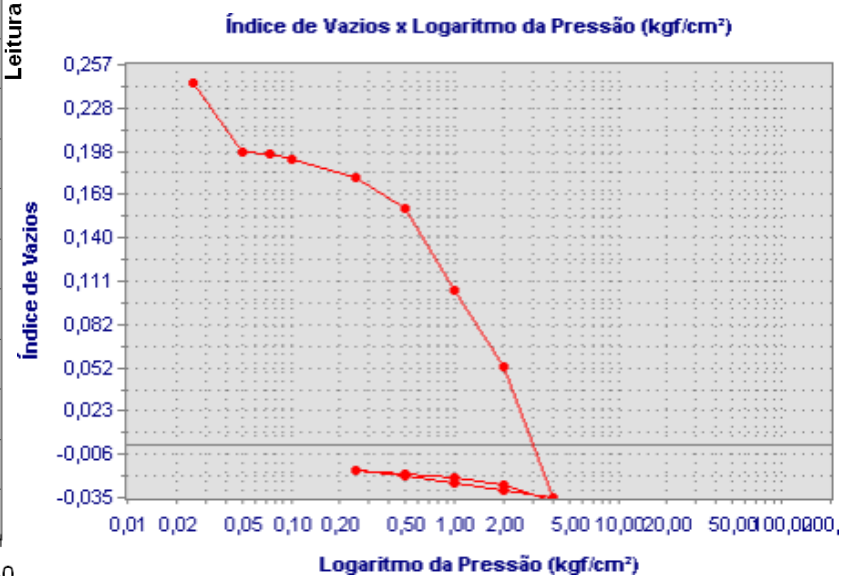
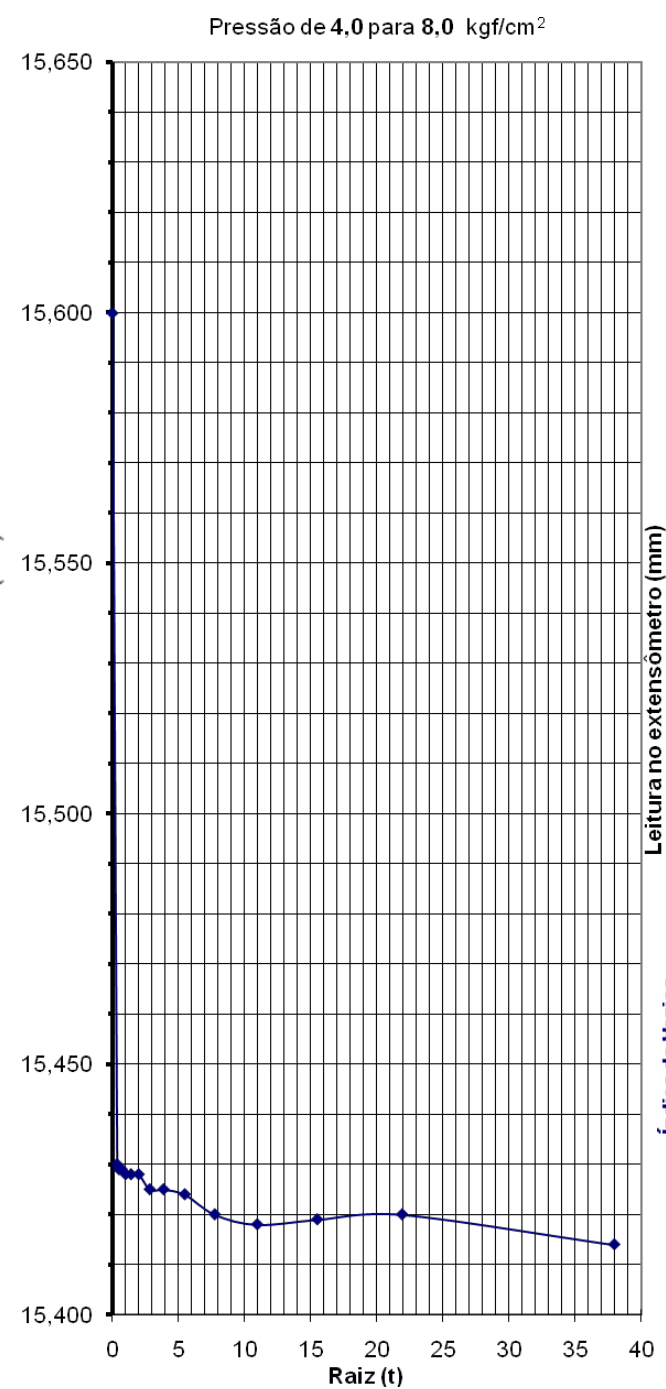
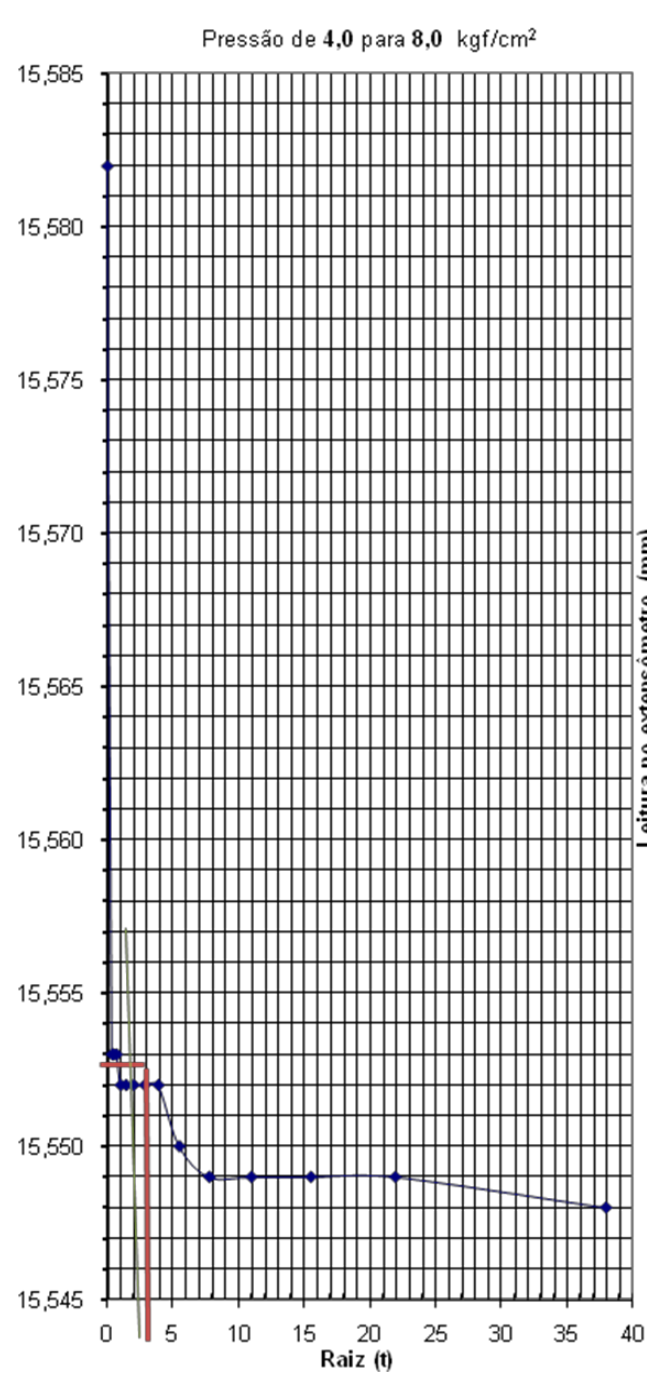
Adensamento: Solo + KR#2,0mm 30%



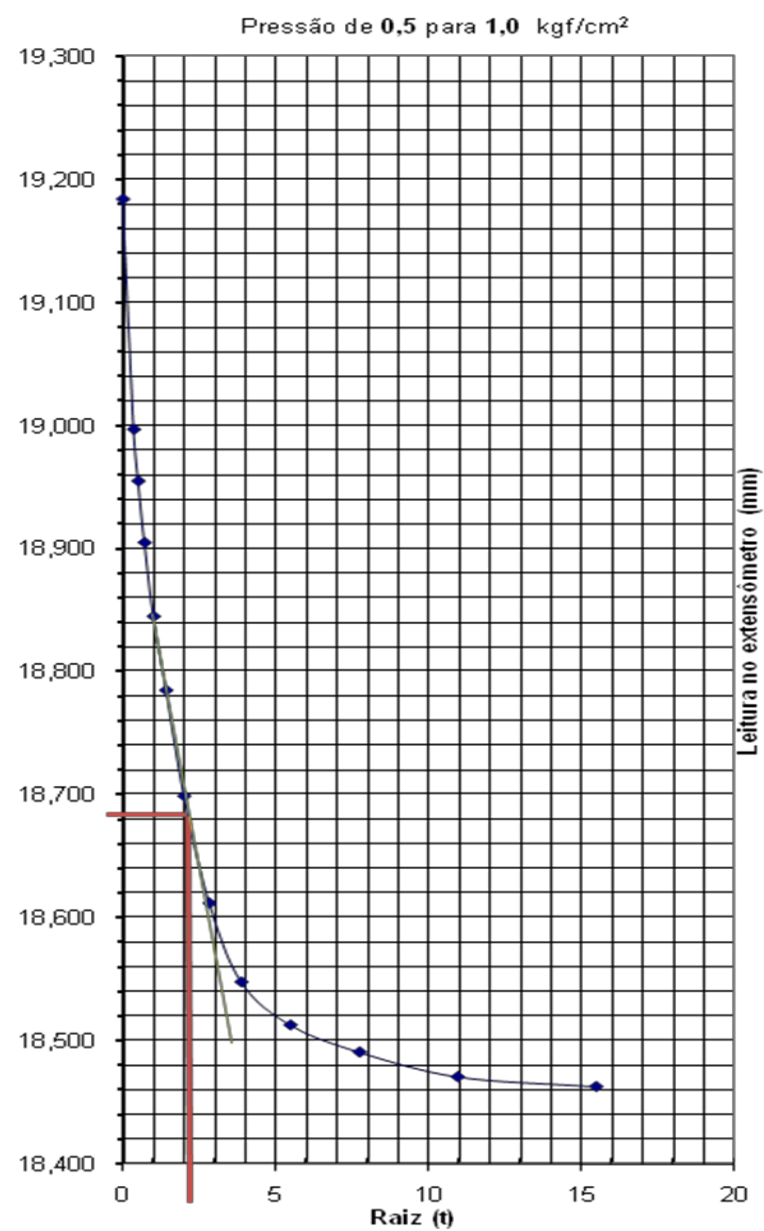
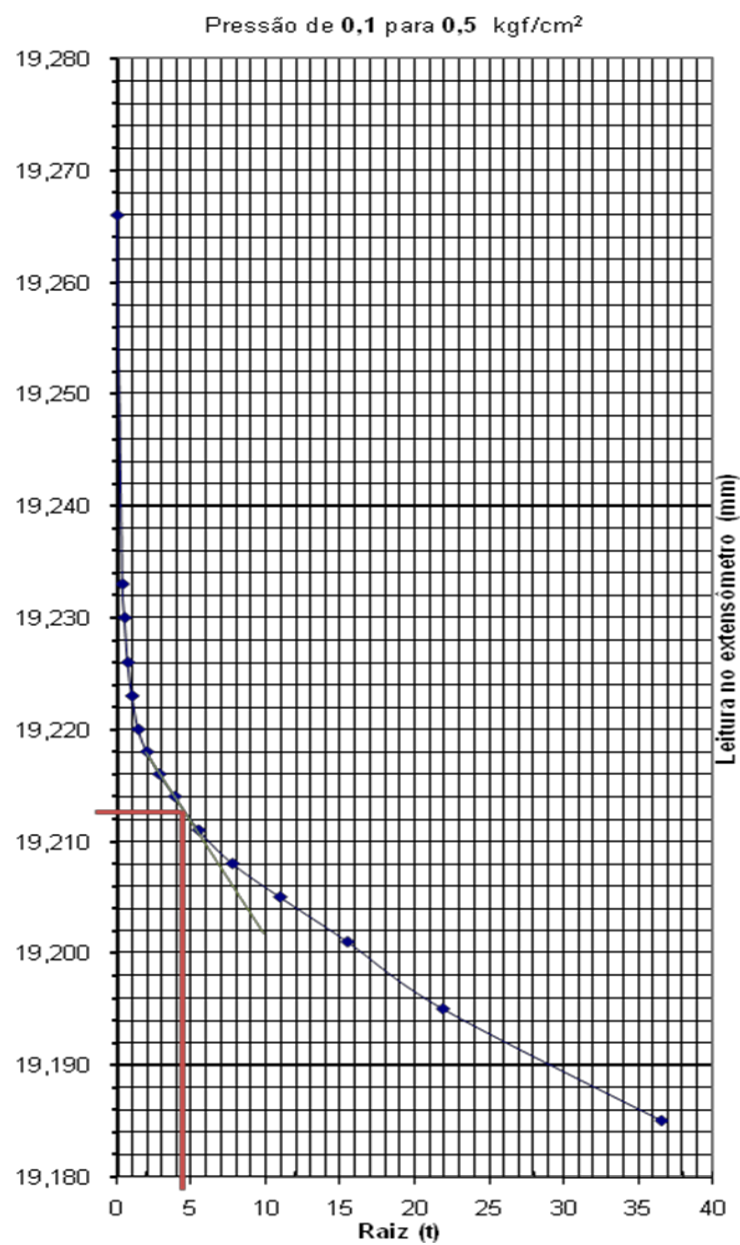


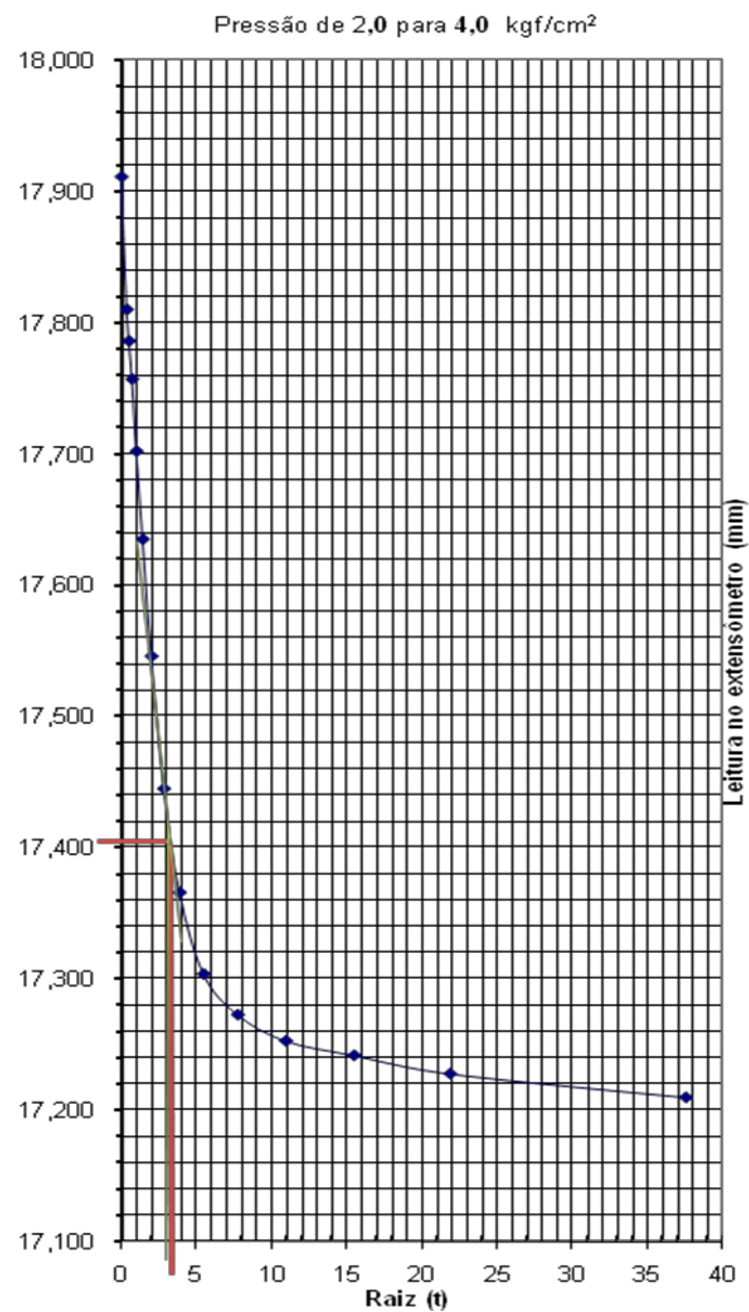
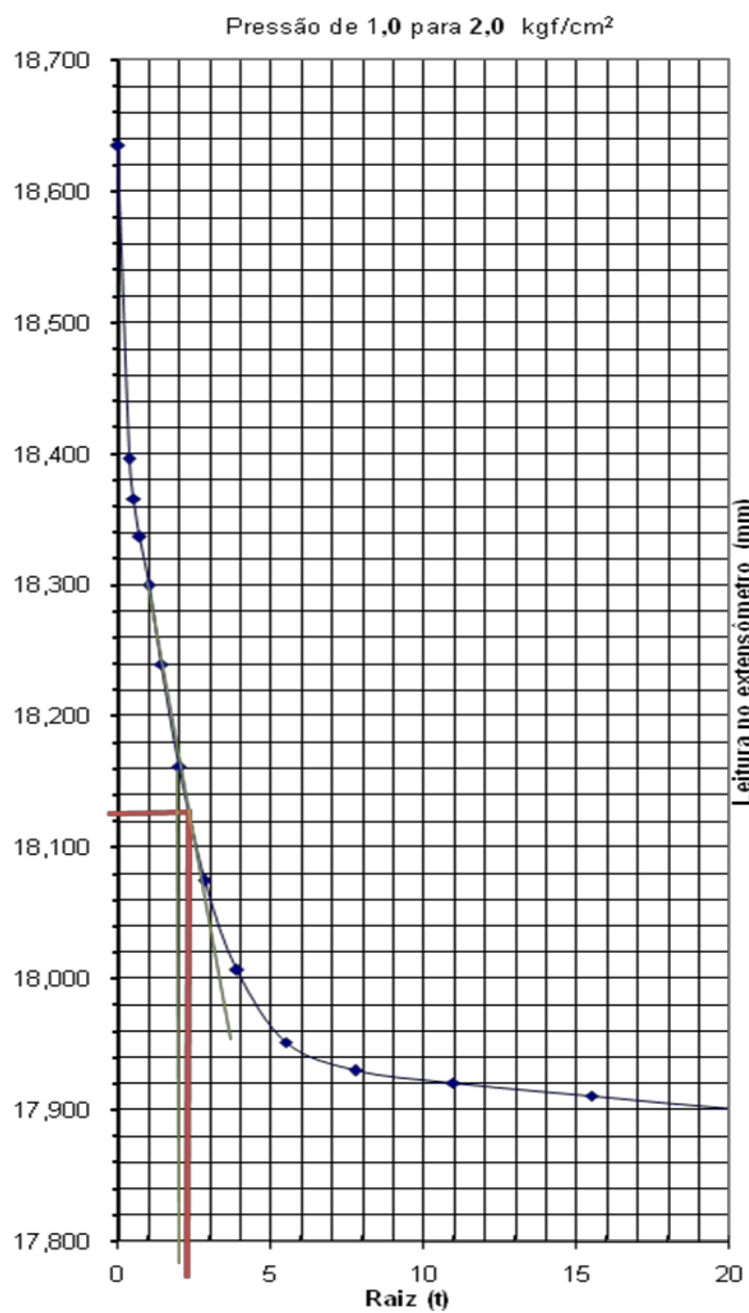


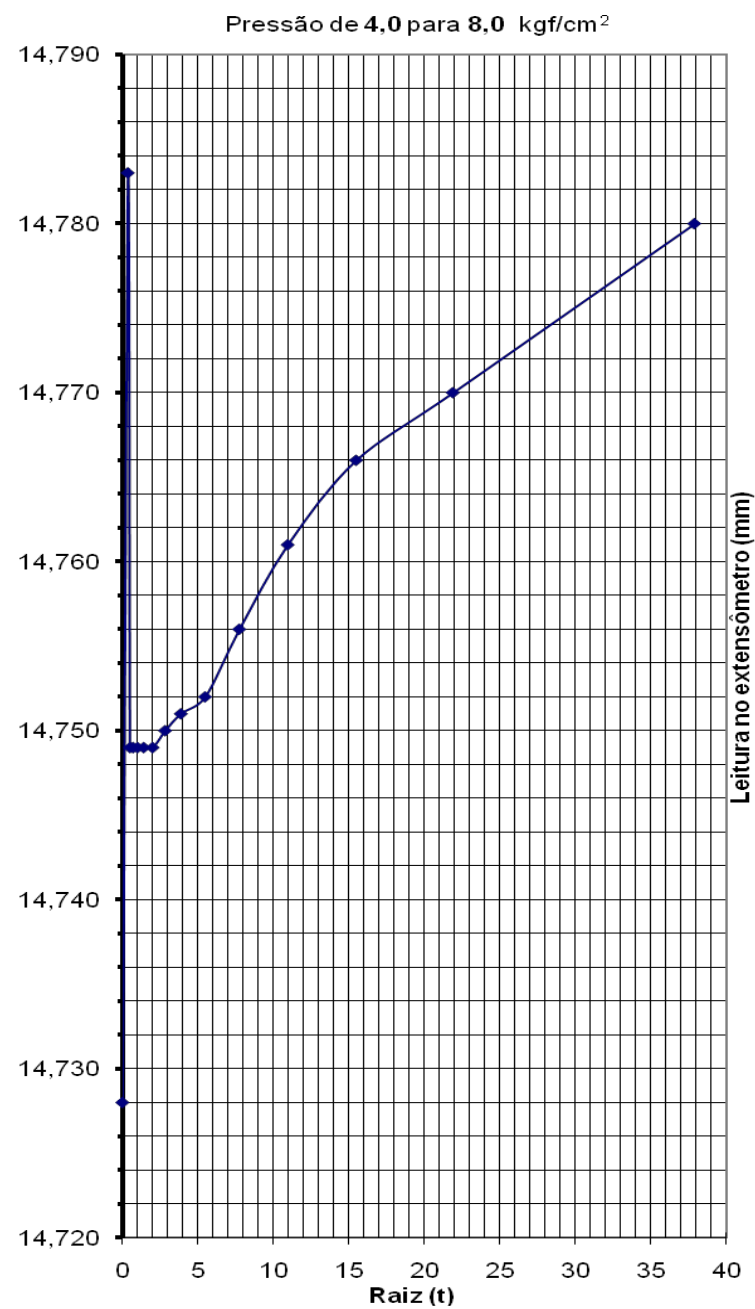
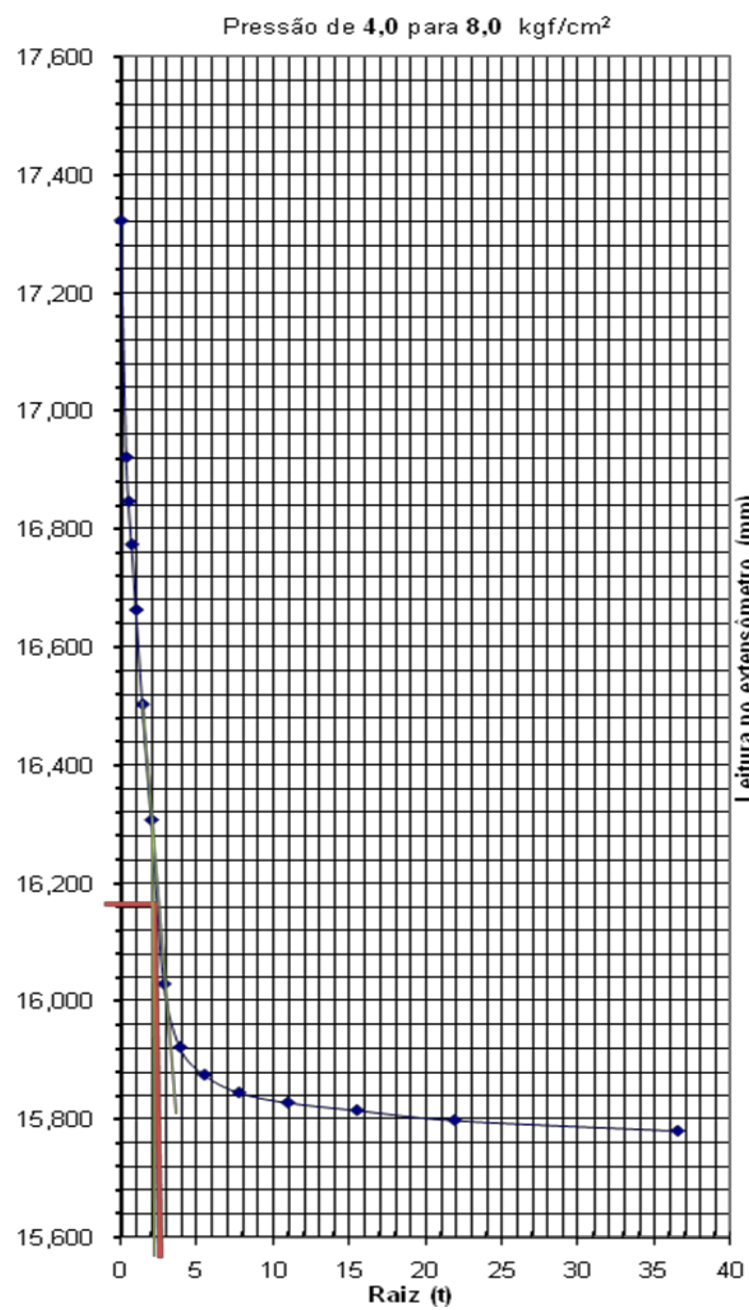


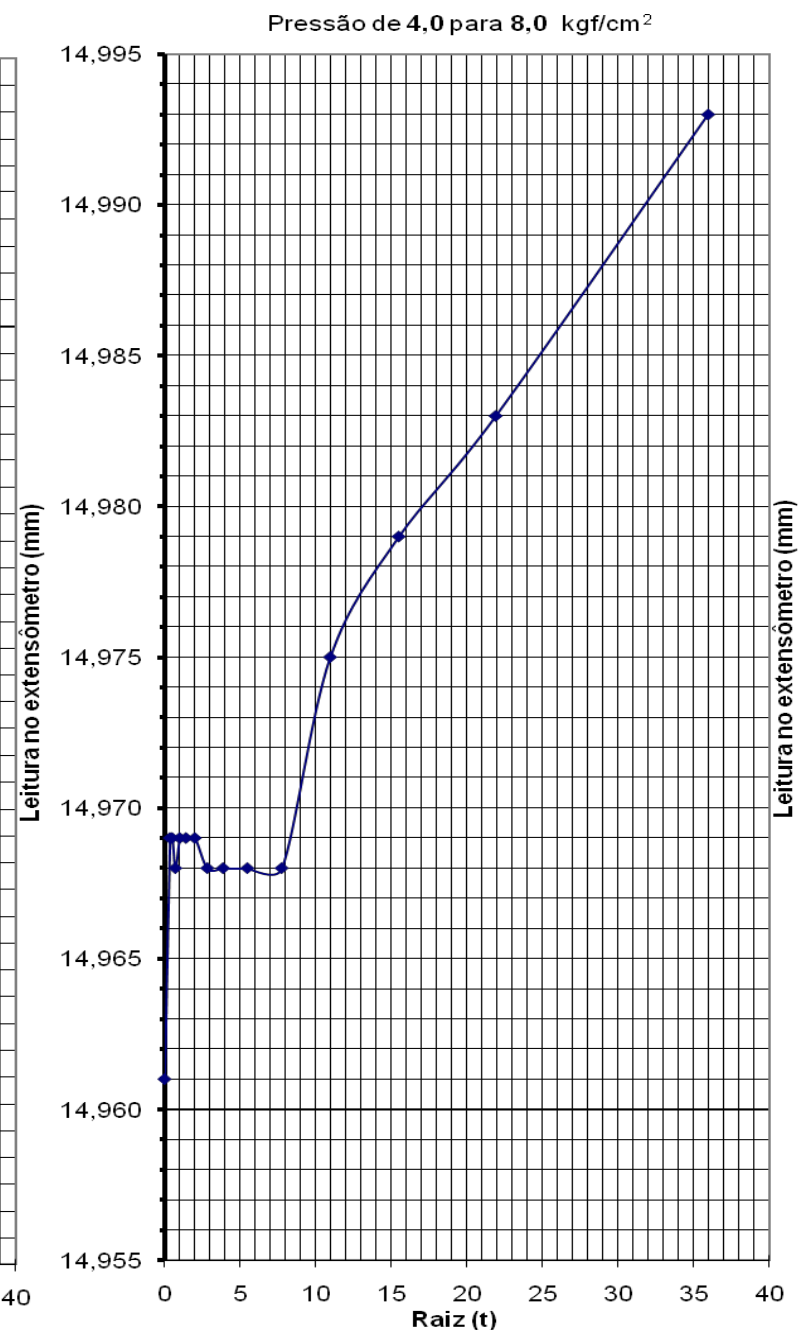
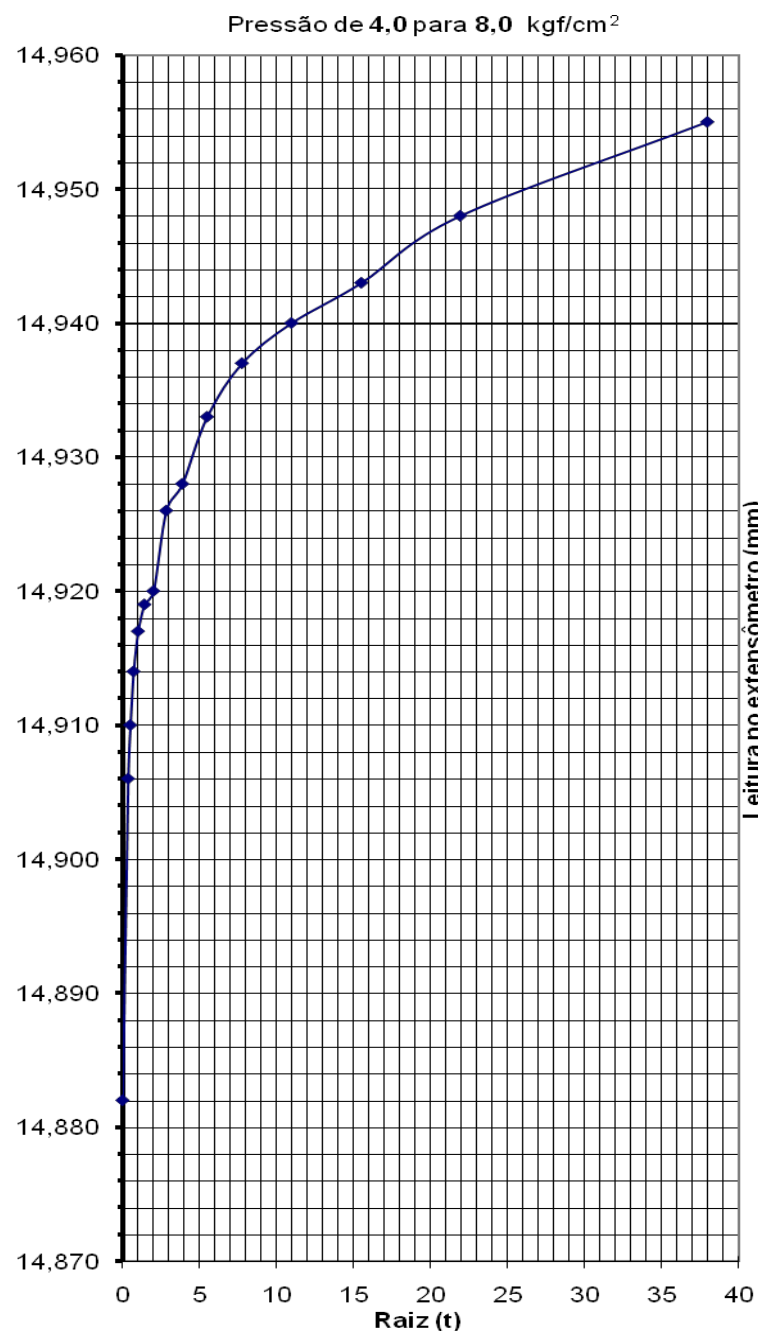


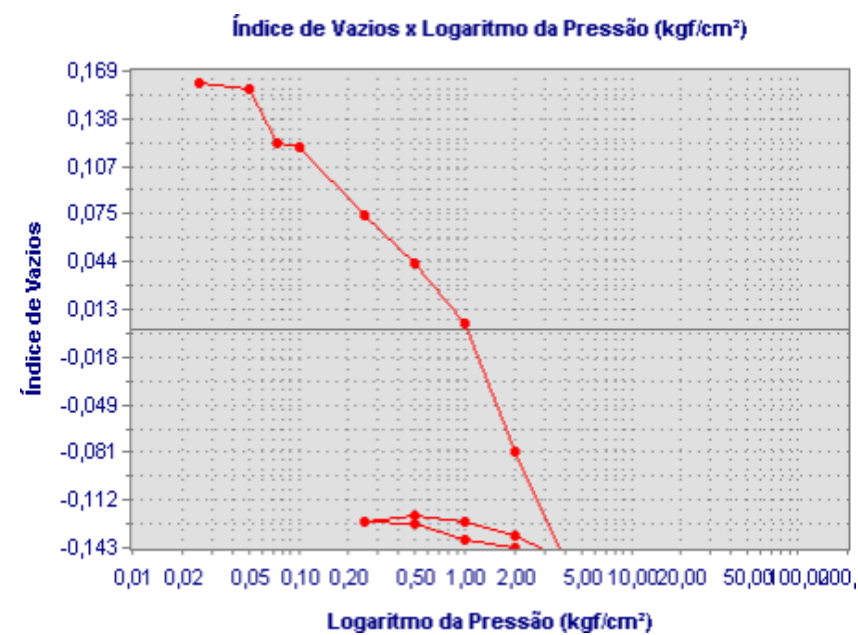
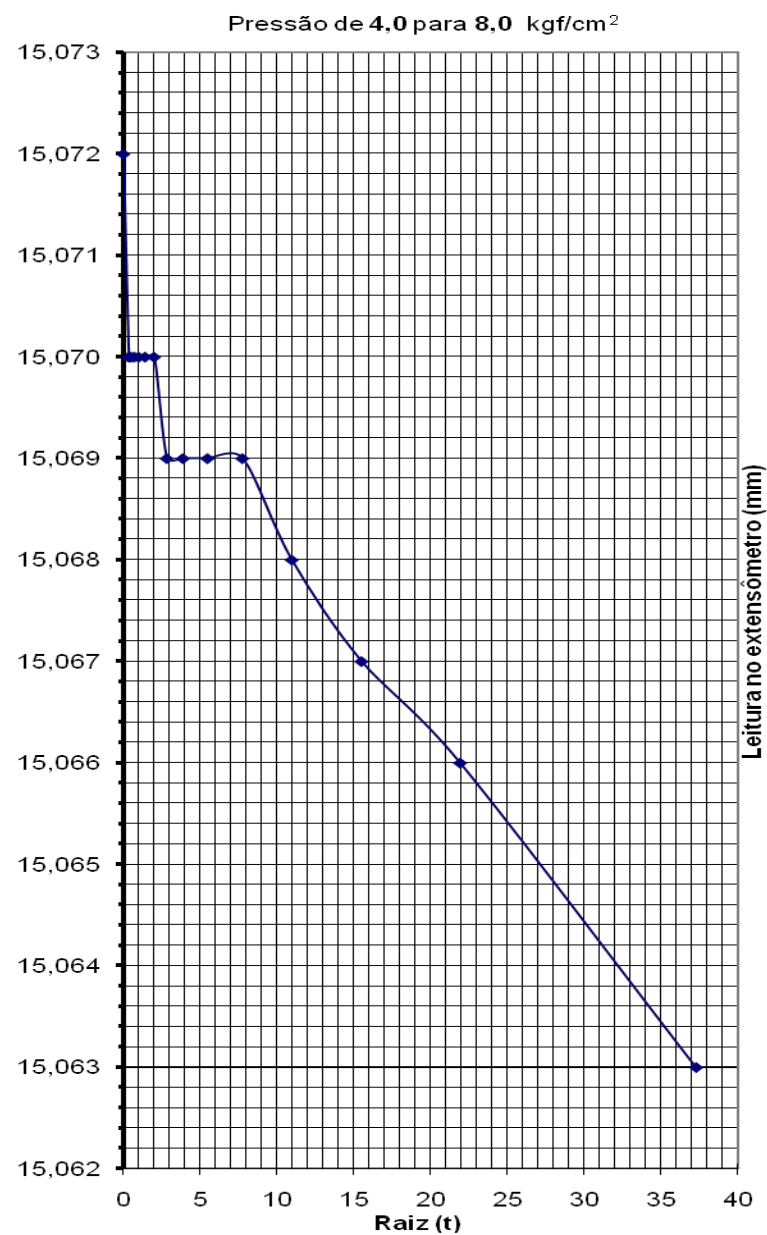
Adensamento: Solo + KR Moída 10%



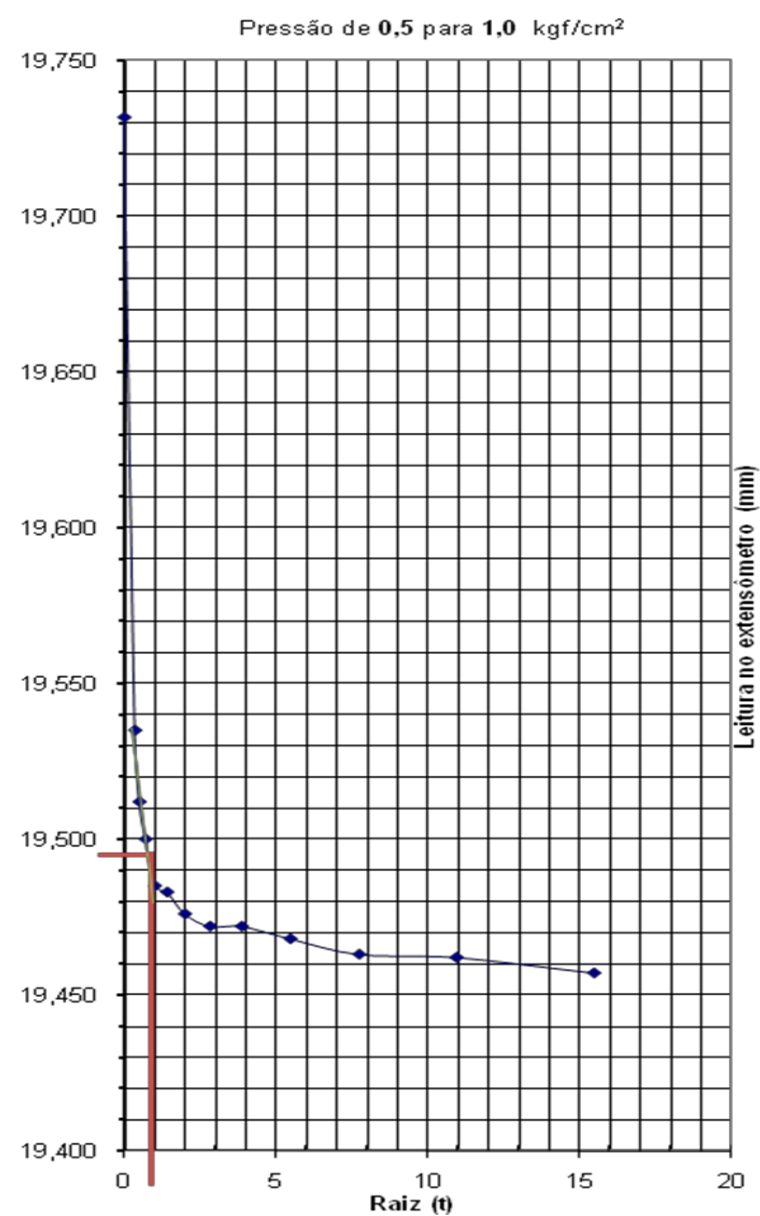
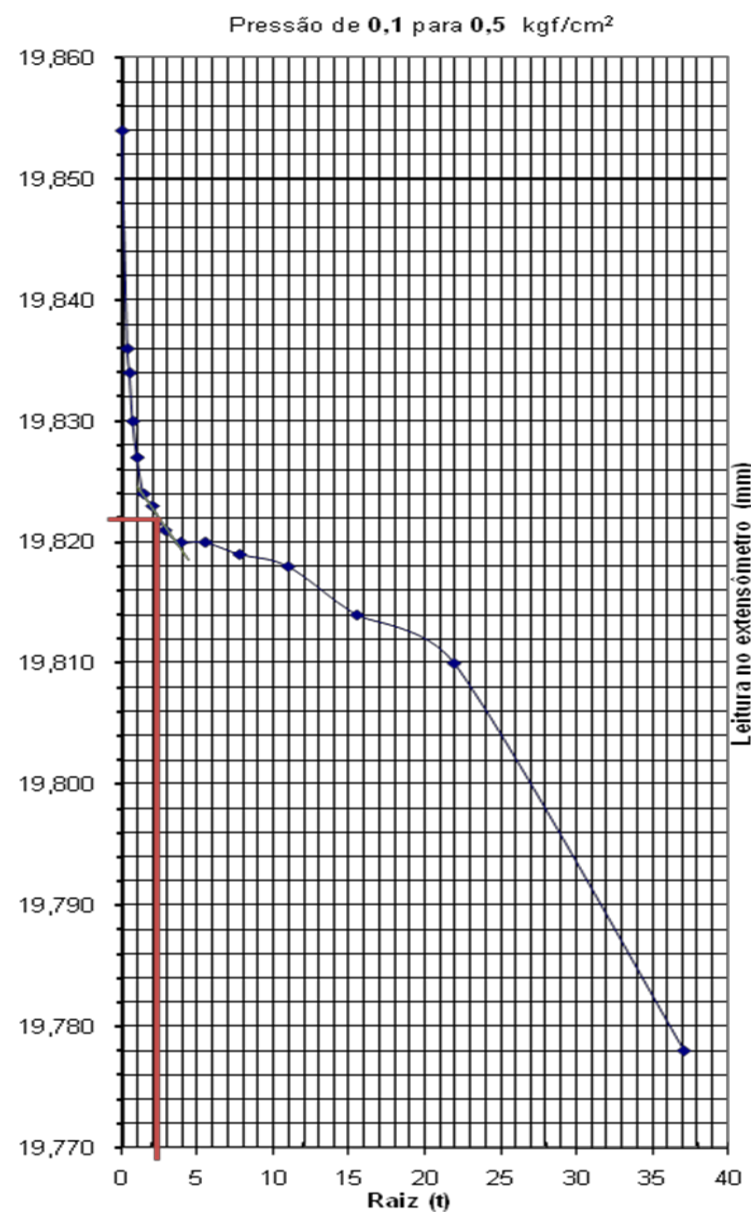


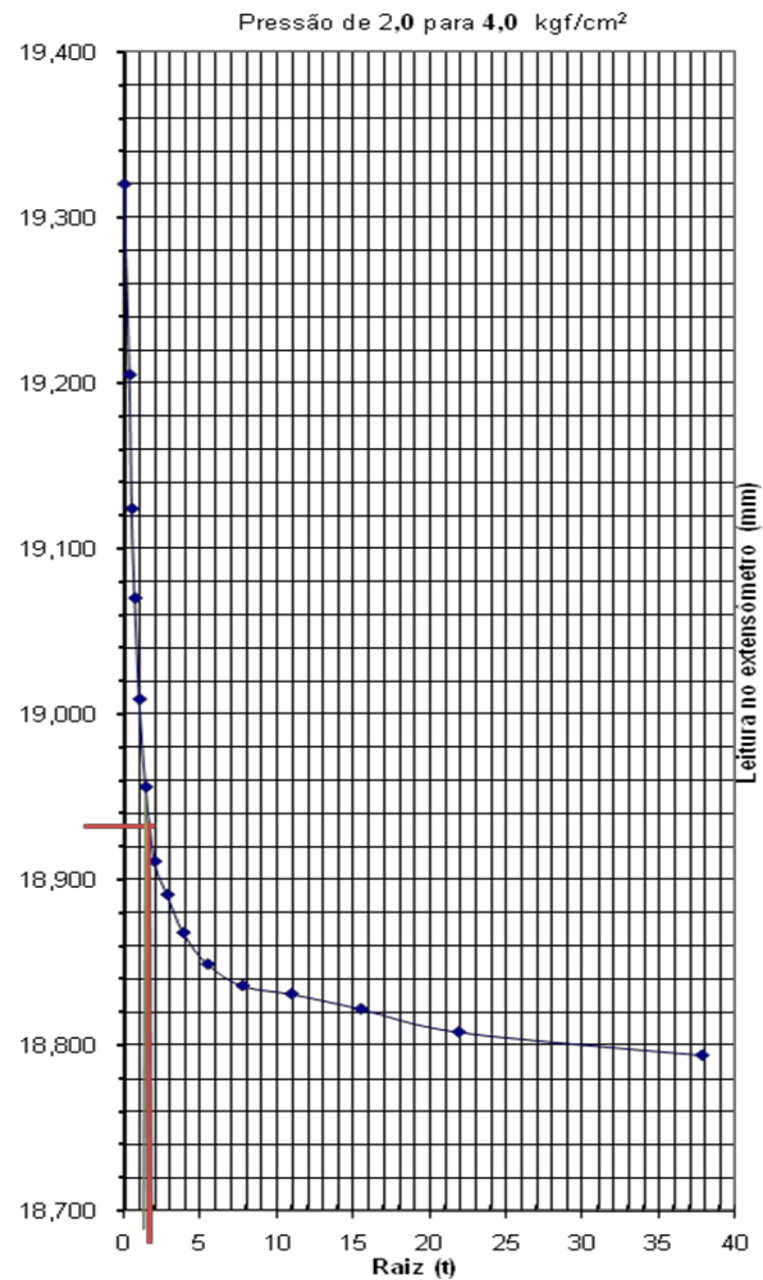
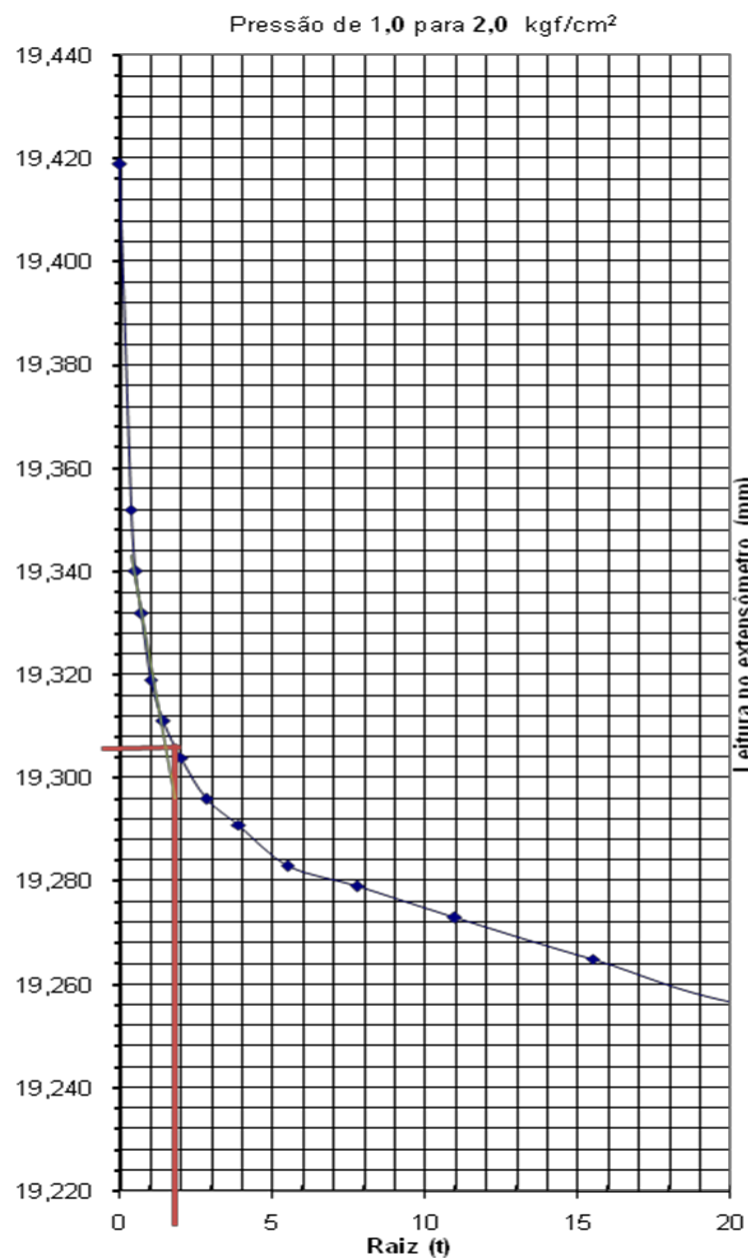


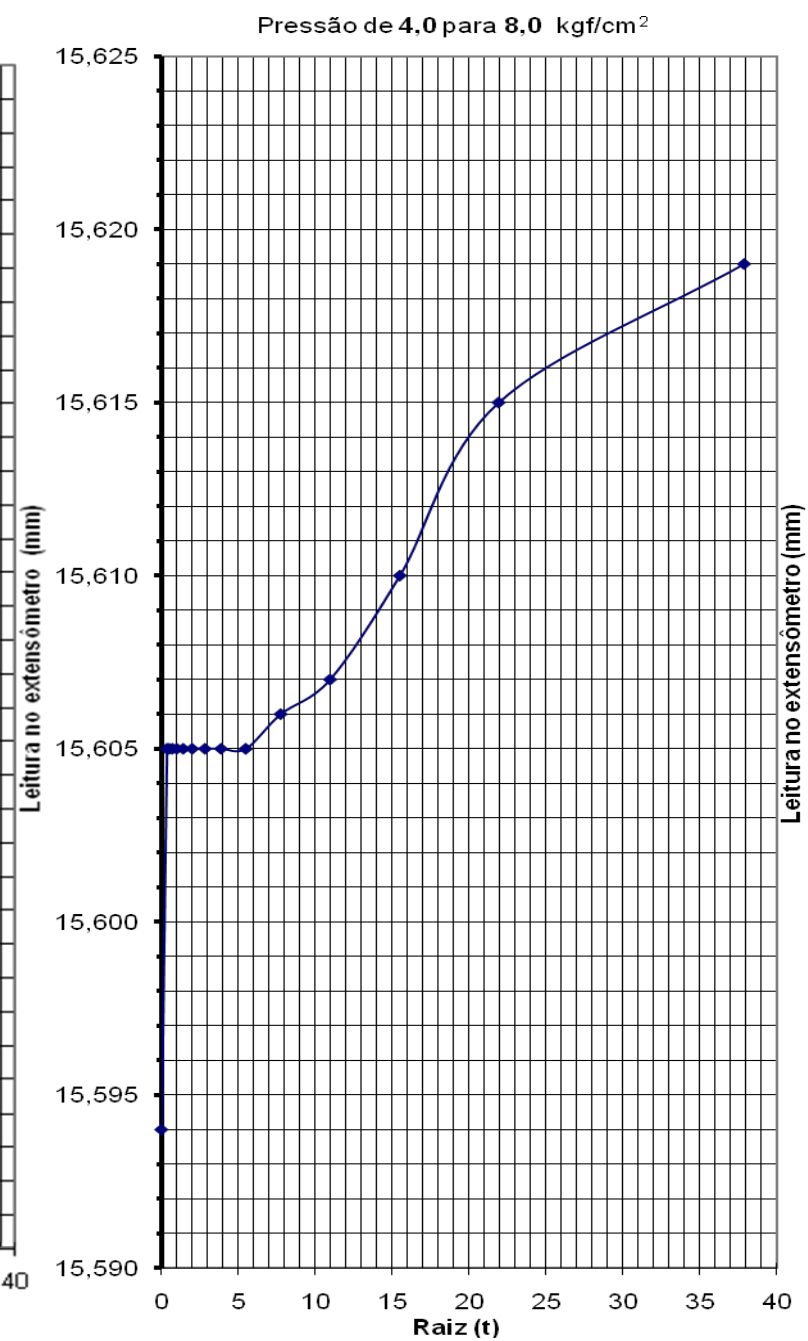
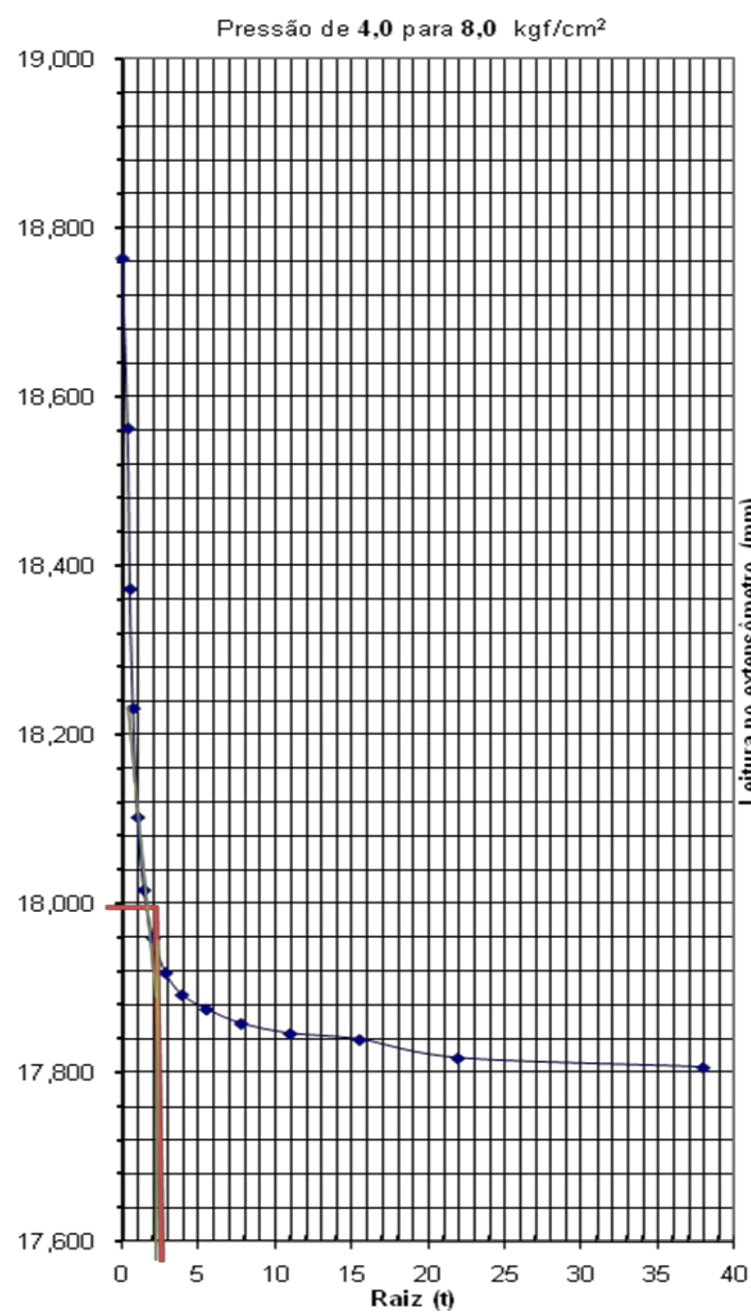


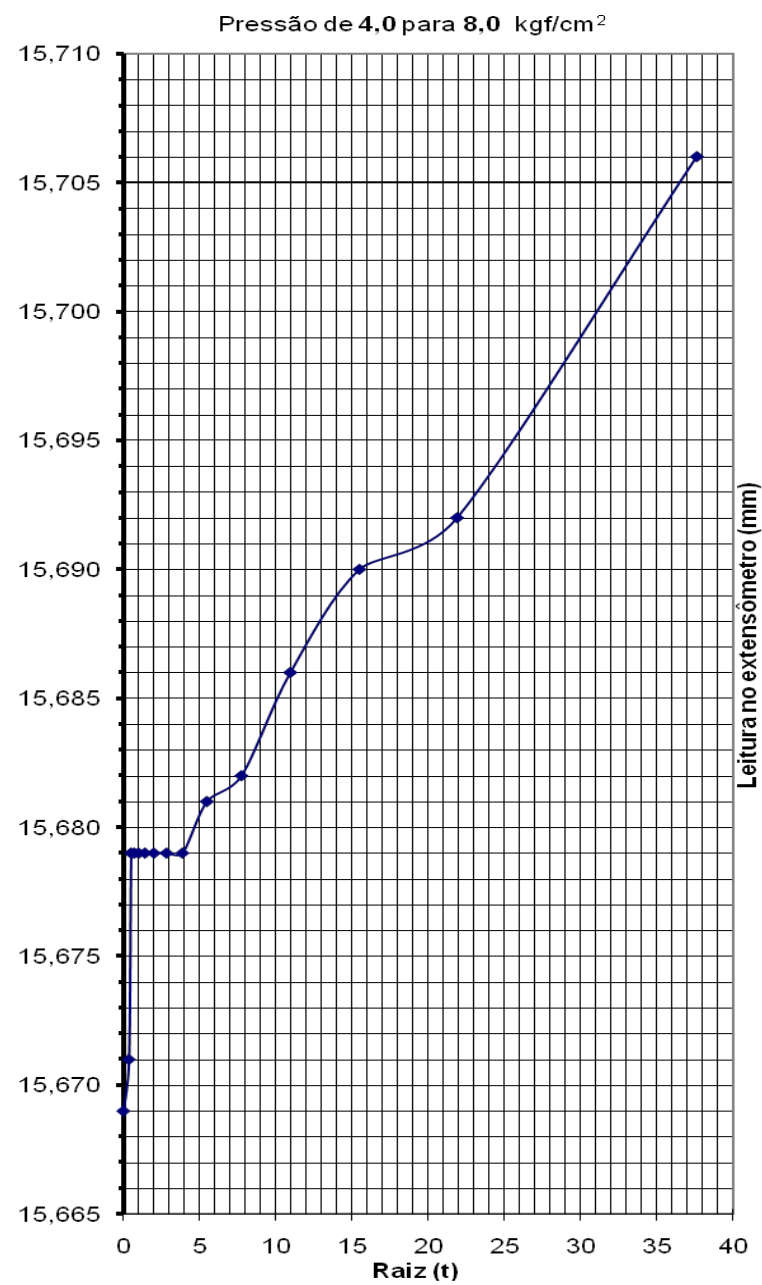
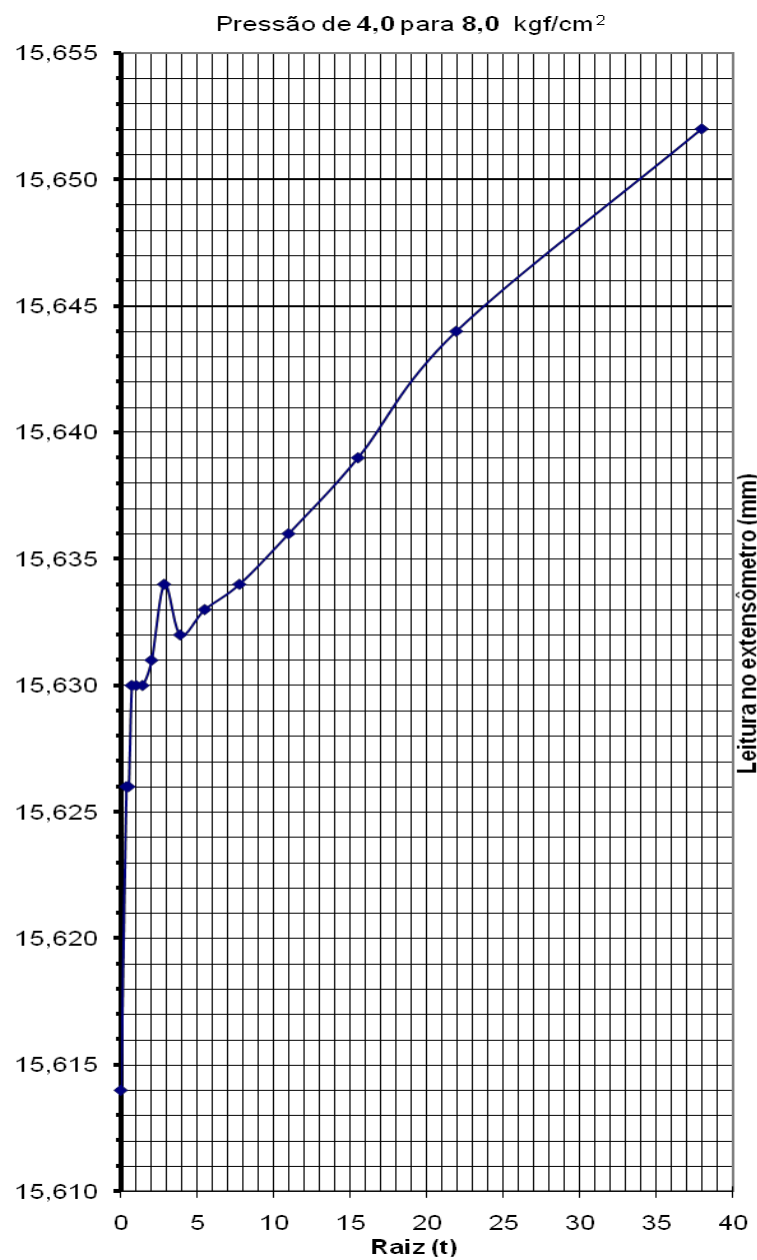


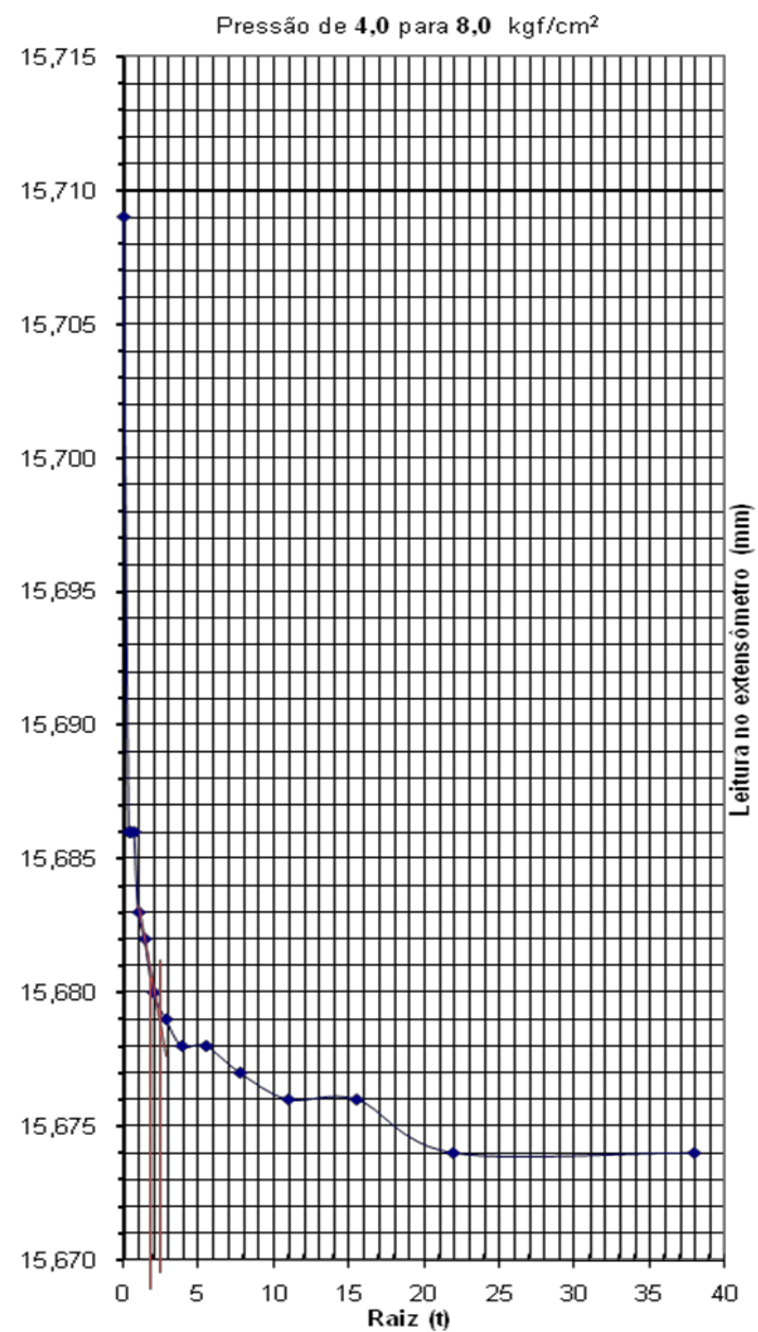
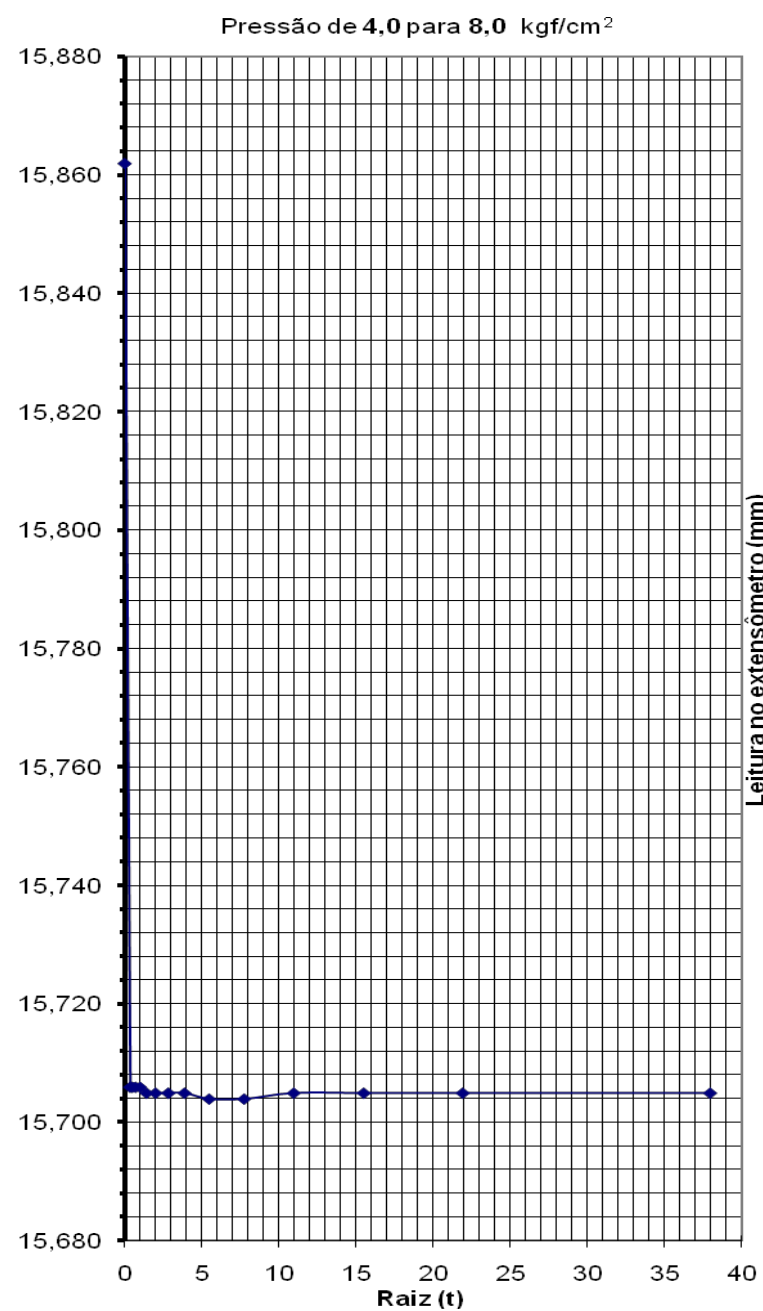
Adensamento: Solo + KR#2,0 25% + Cimento 5%

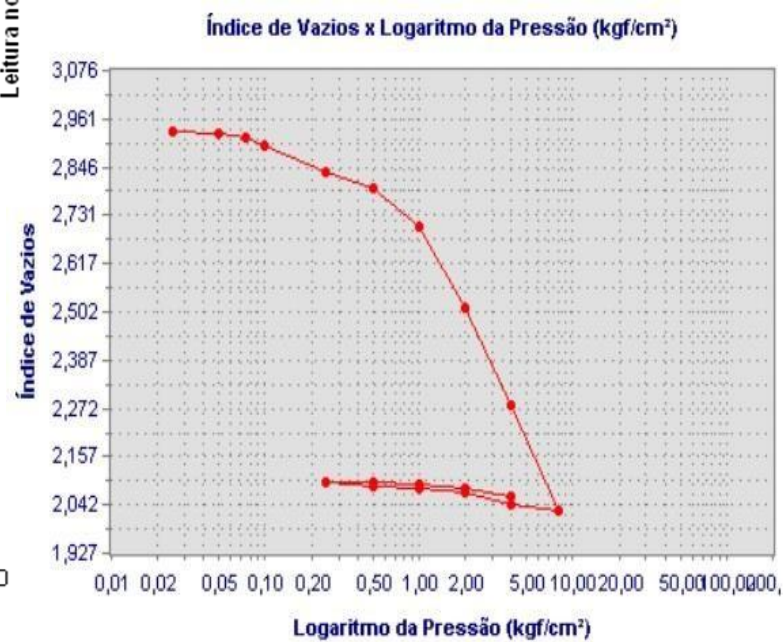
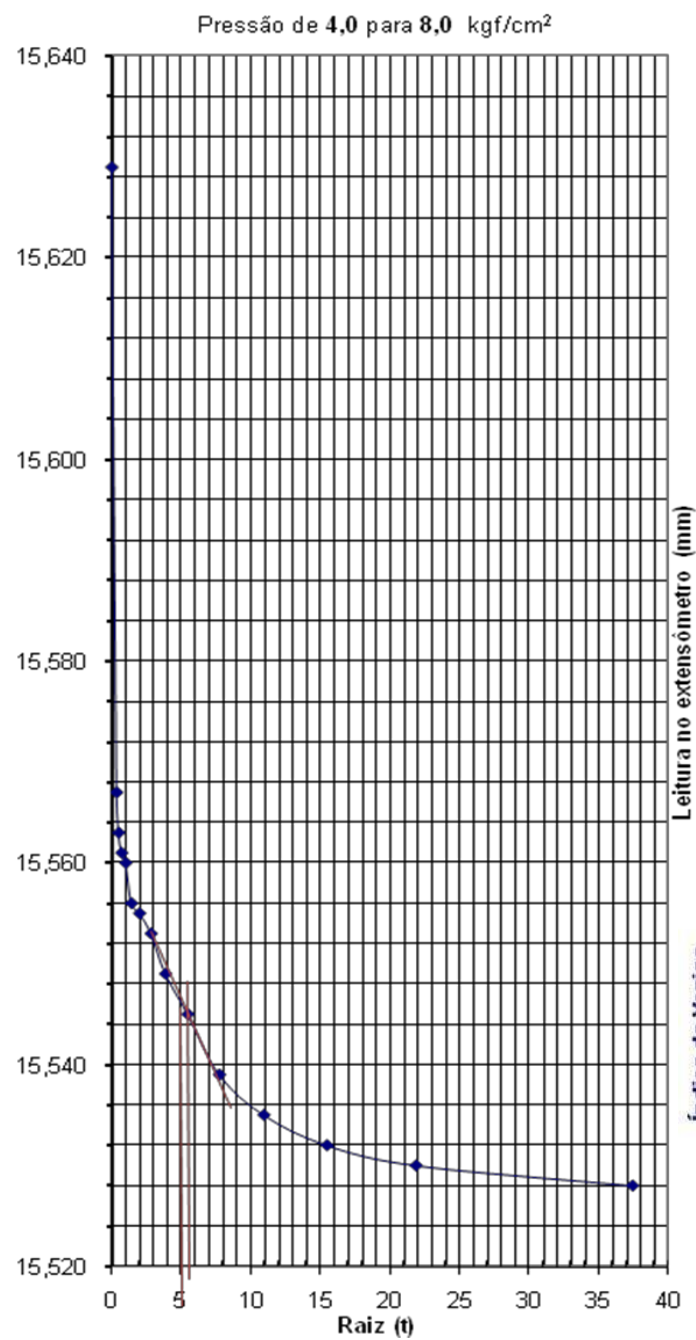
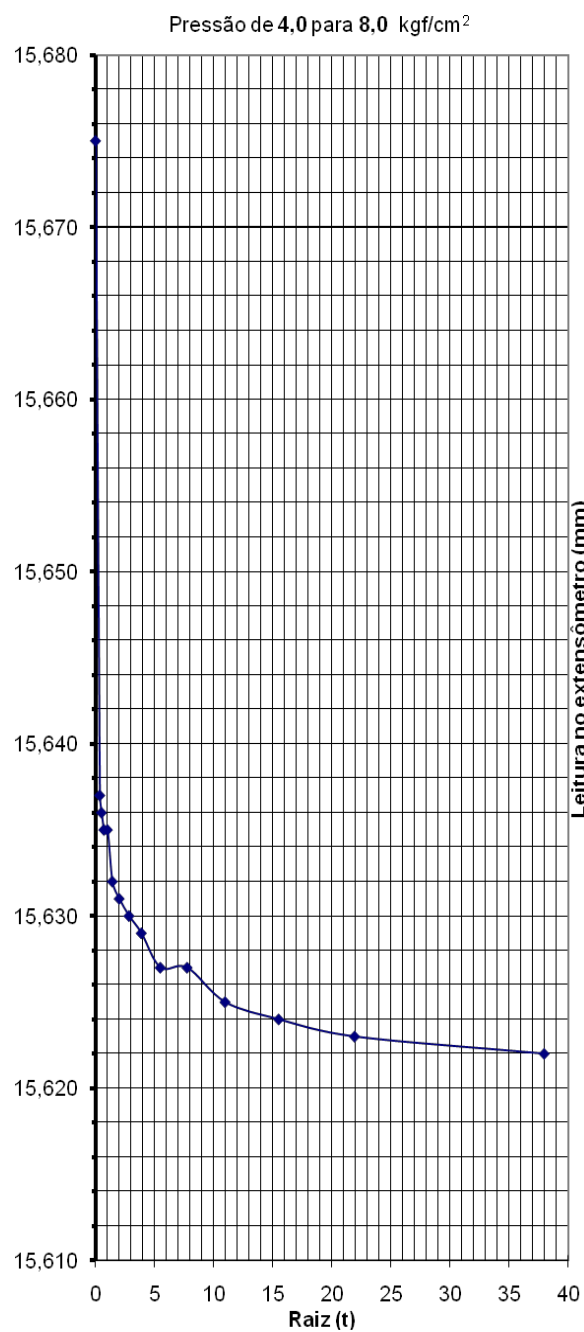




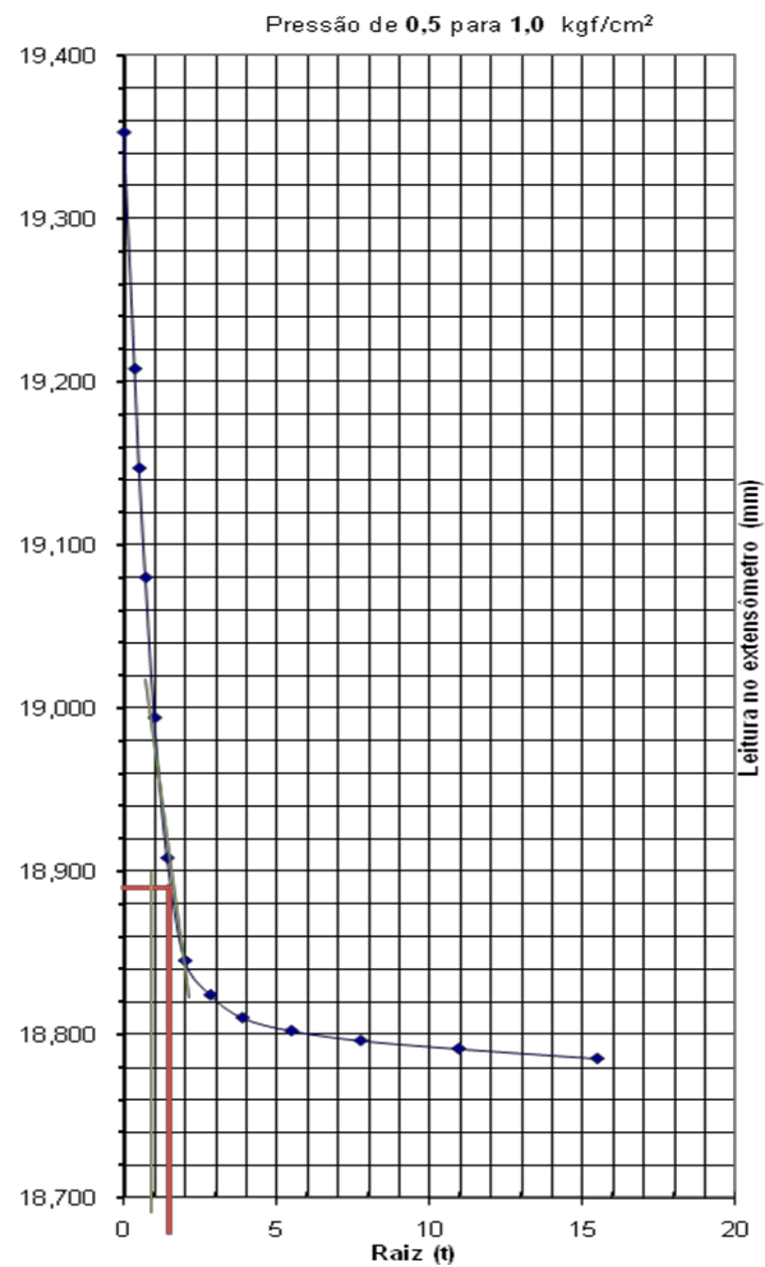
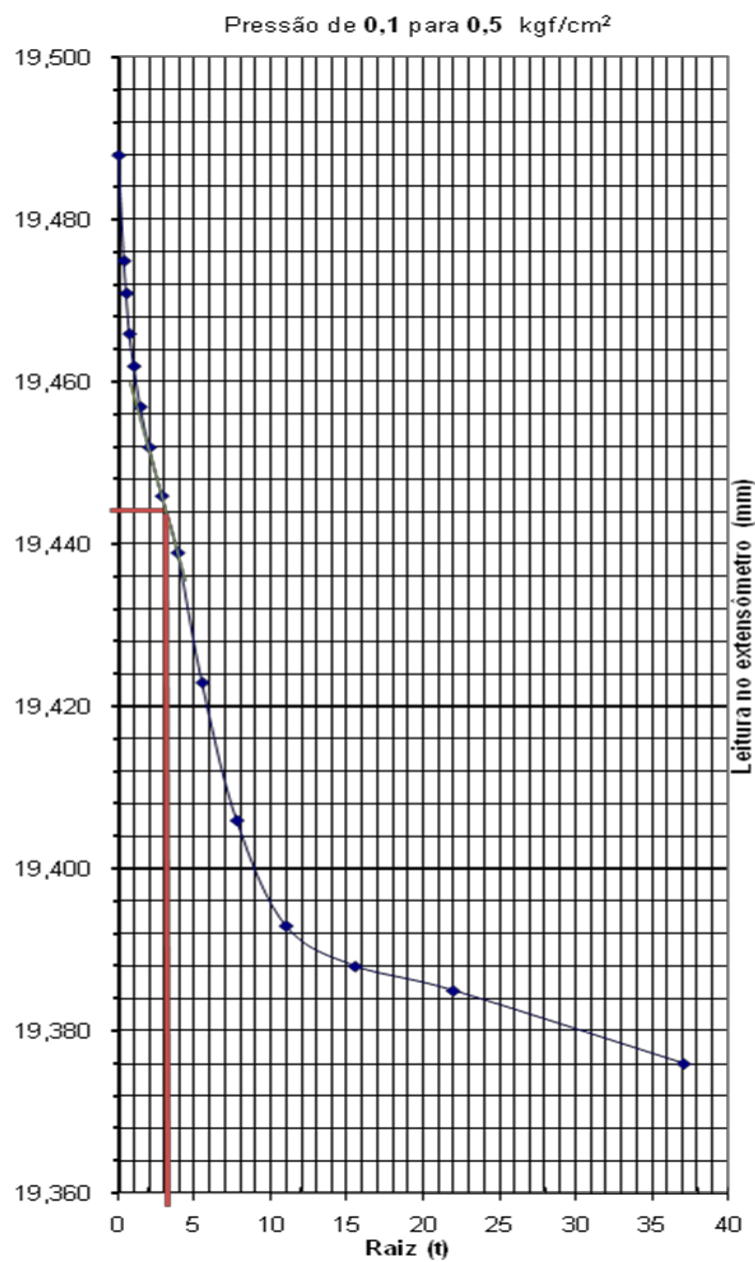


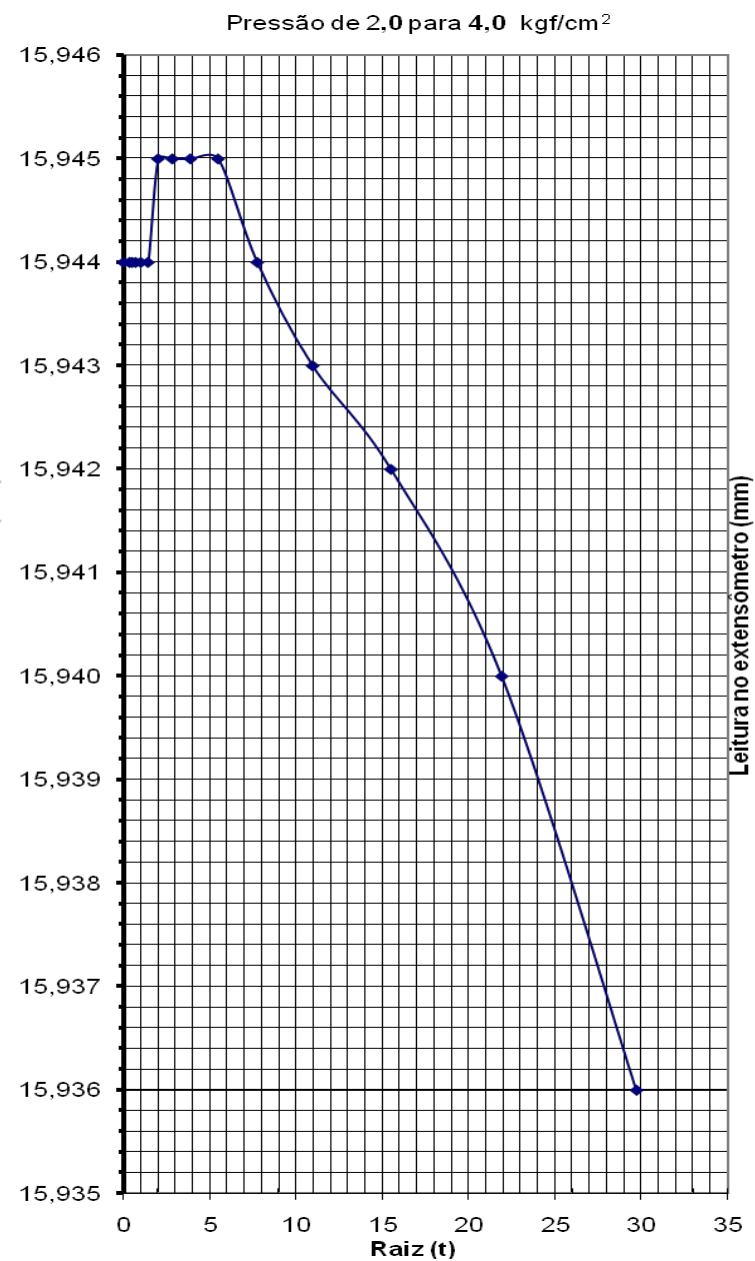
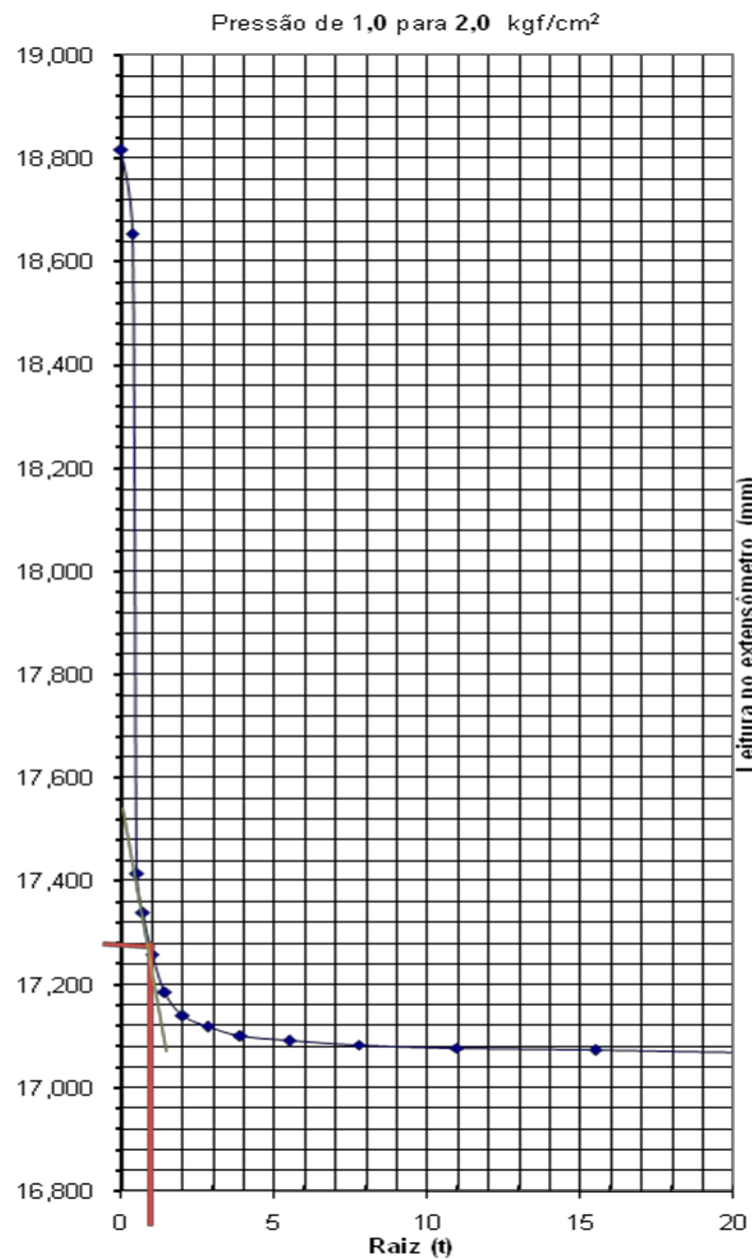


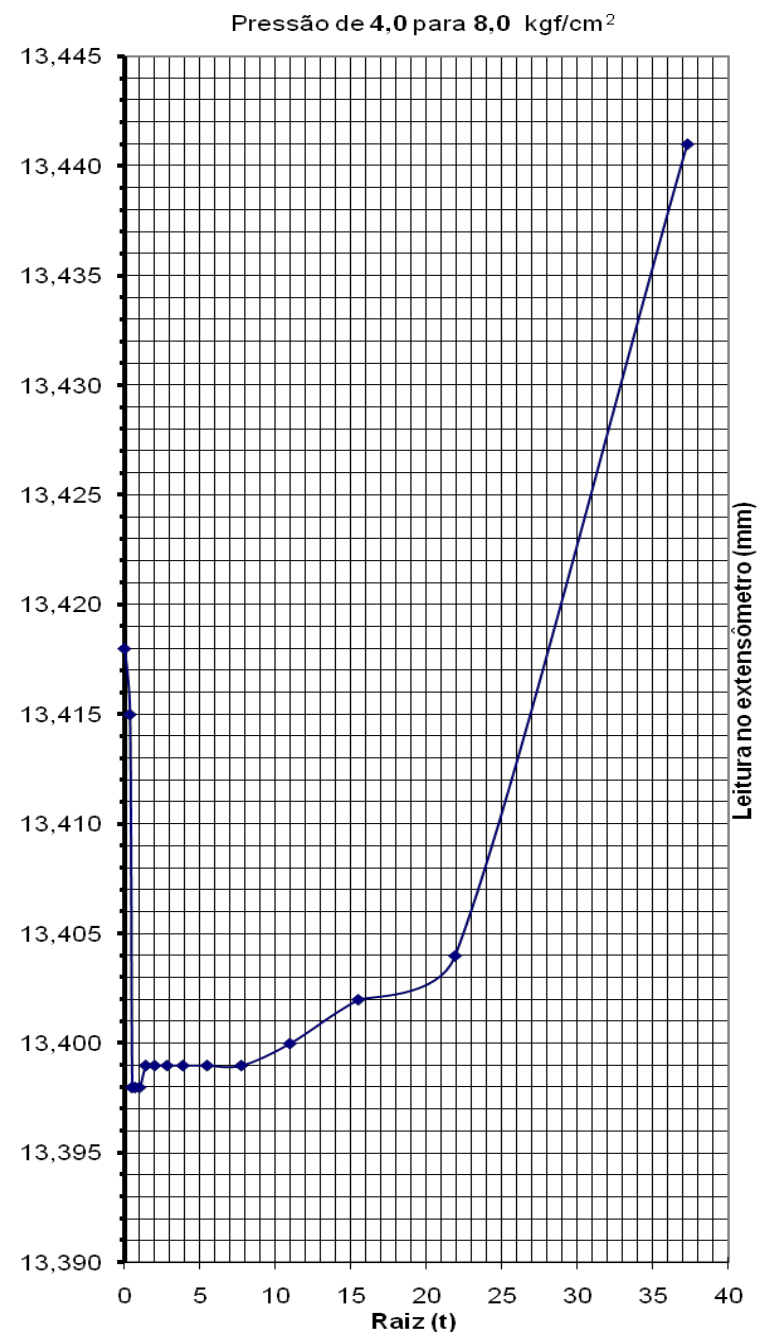
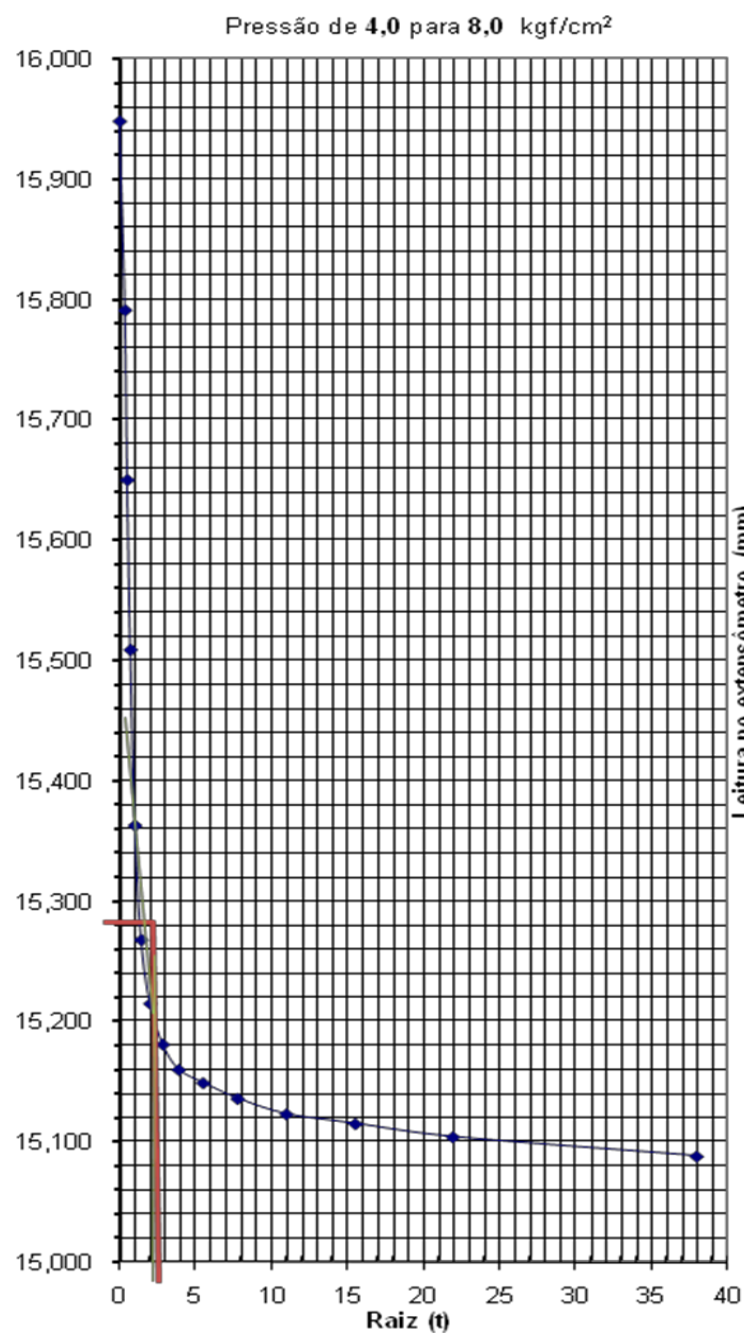


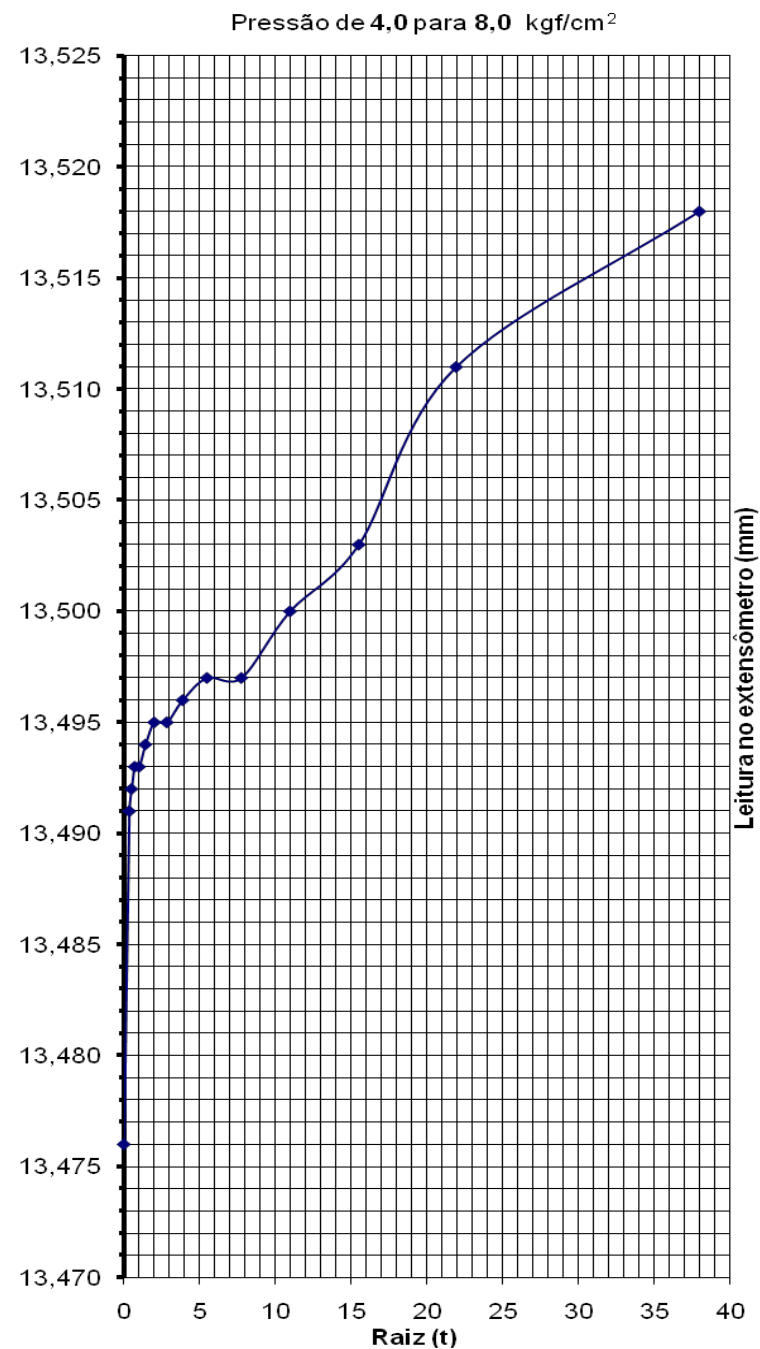
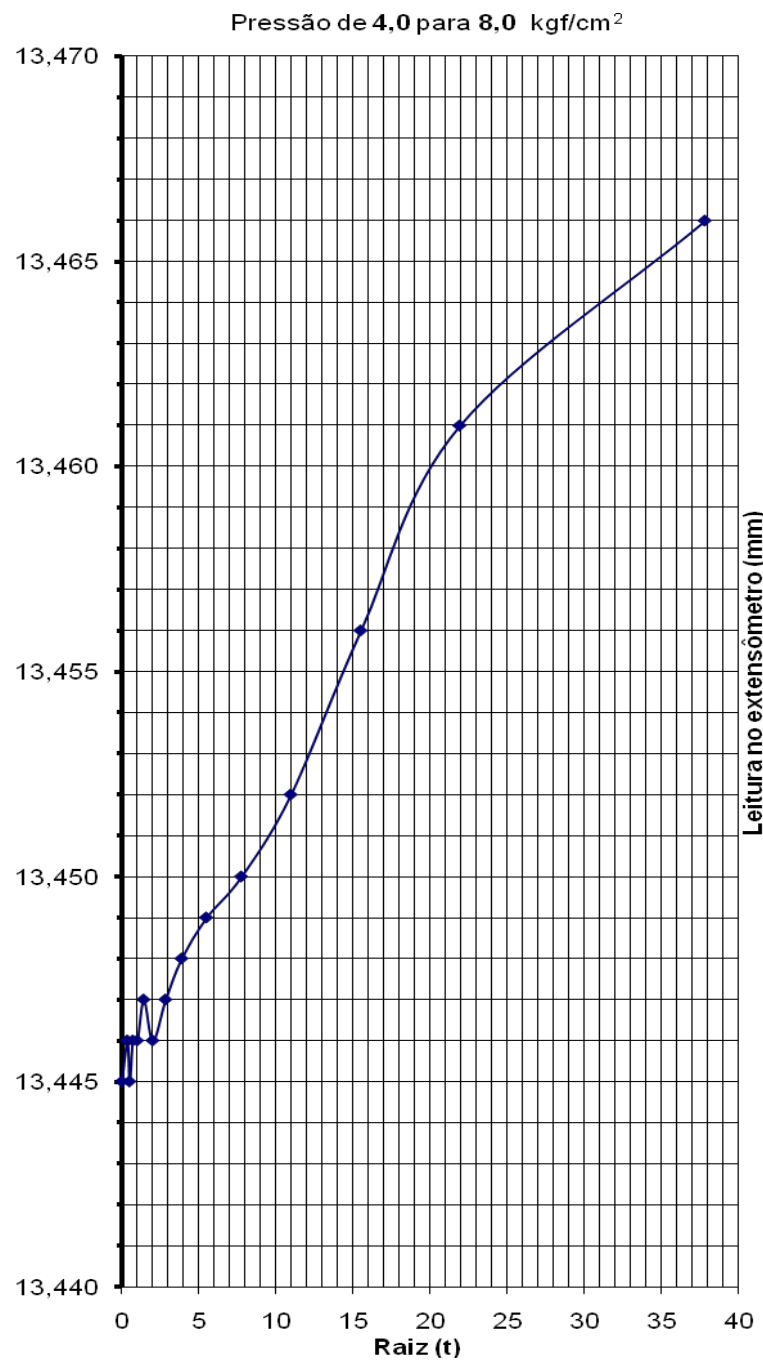


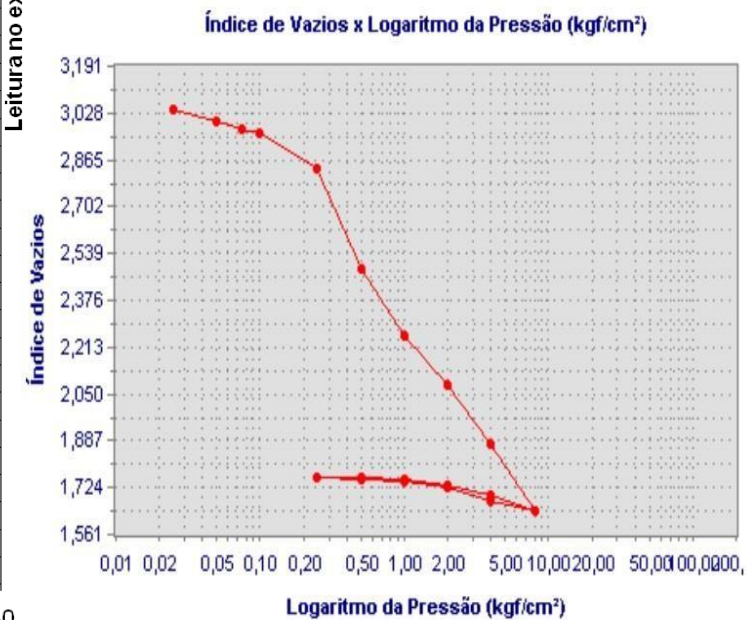
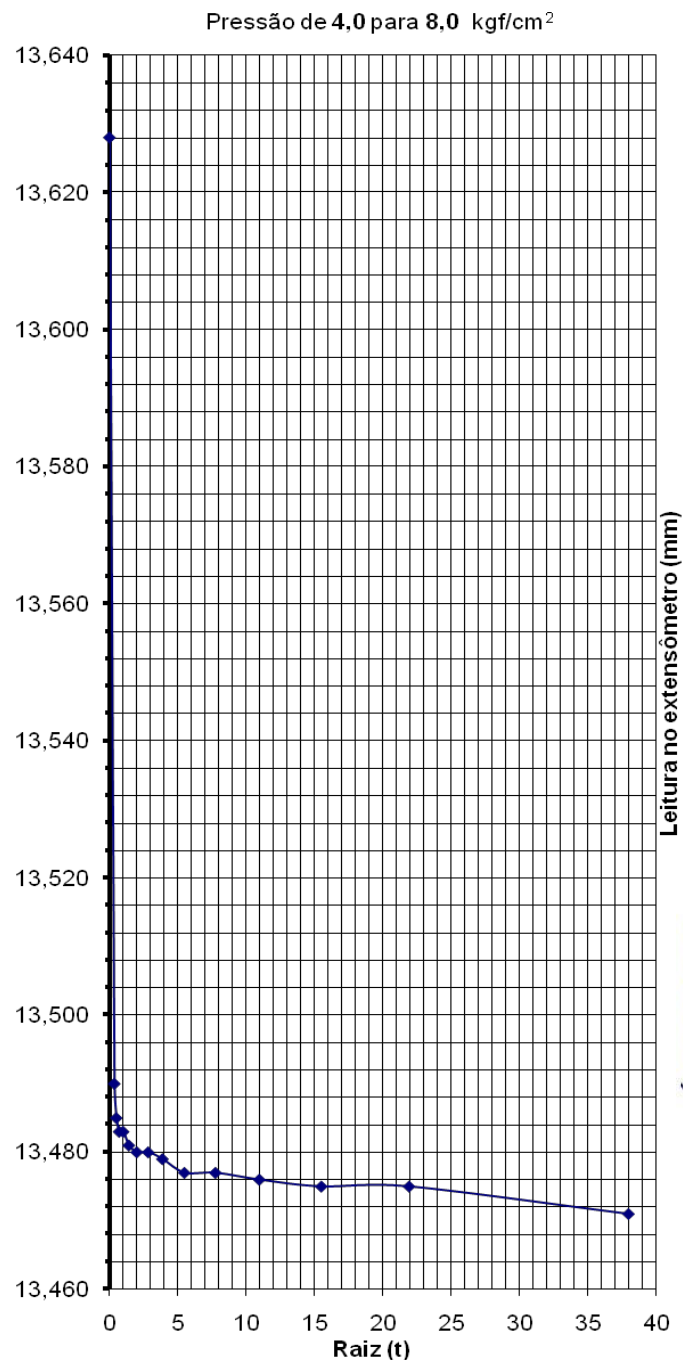
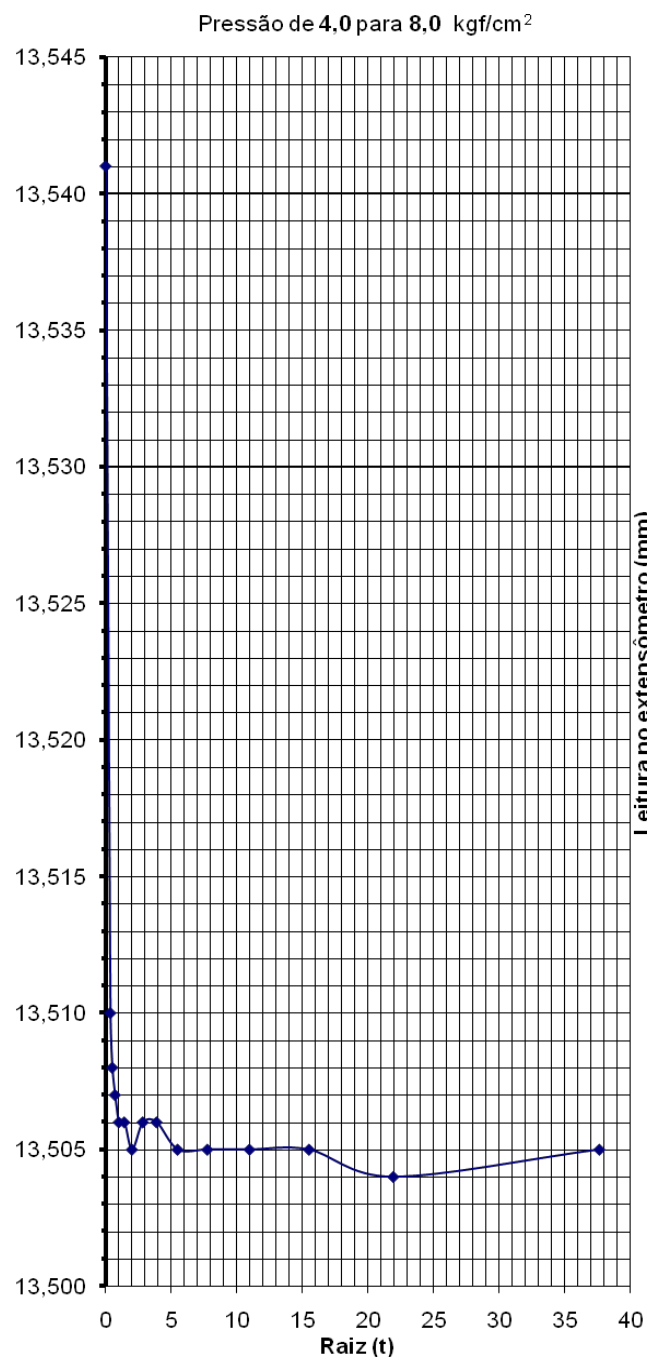
Solo + KR#2,0 27,5% + Cimento 2,5%



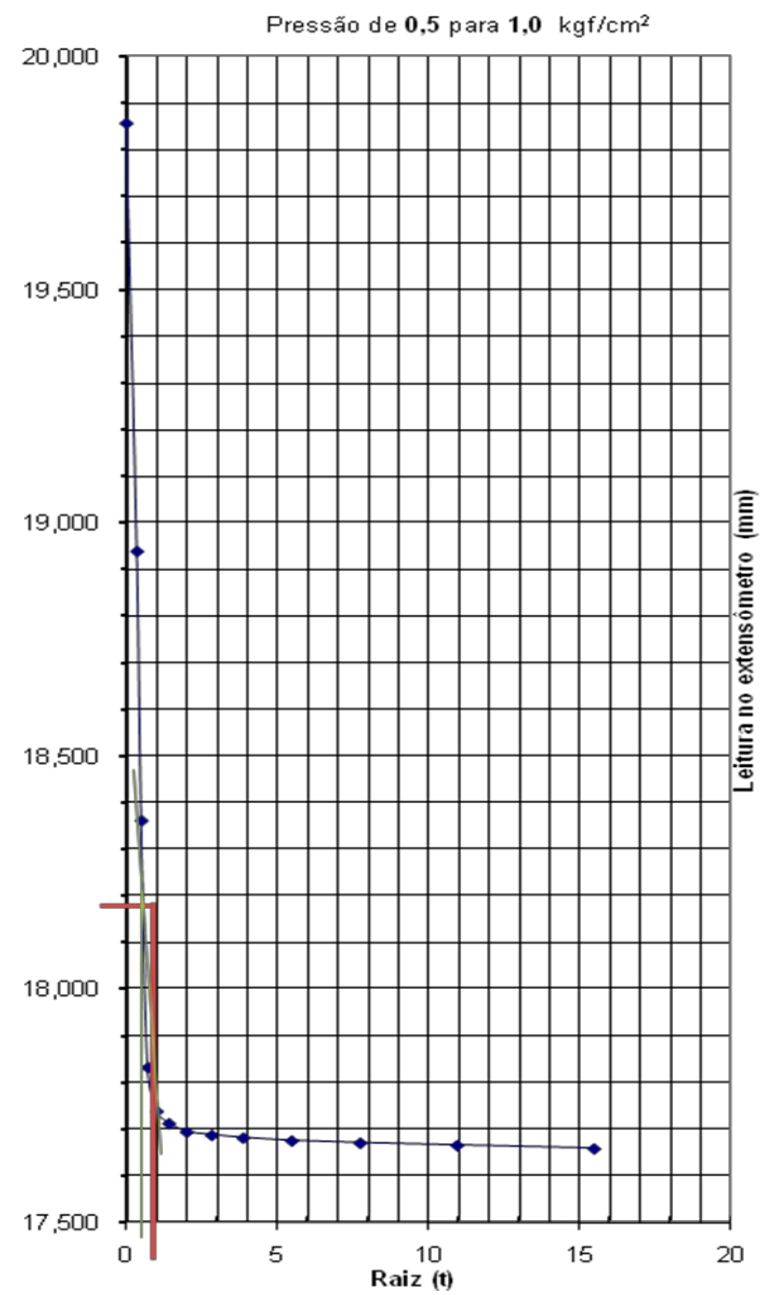
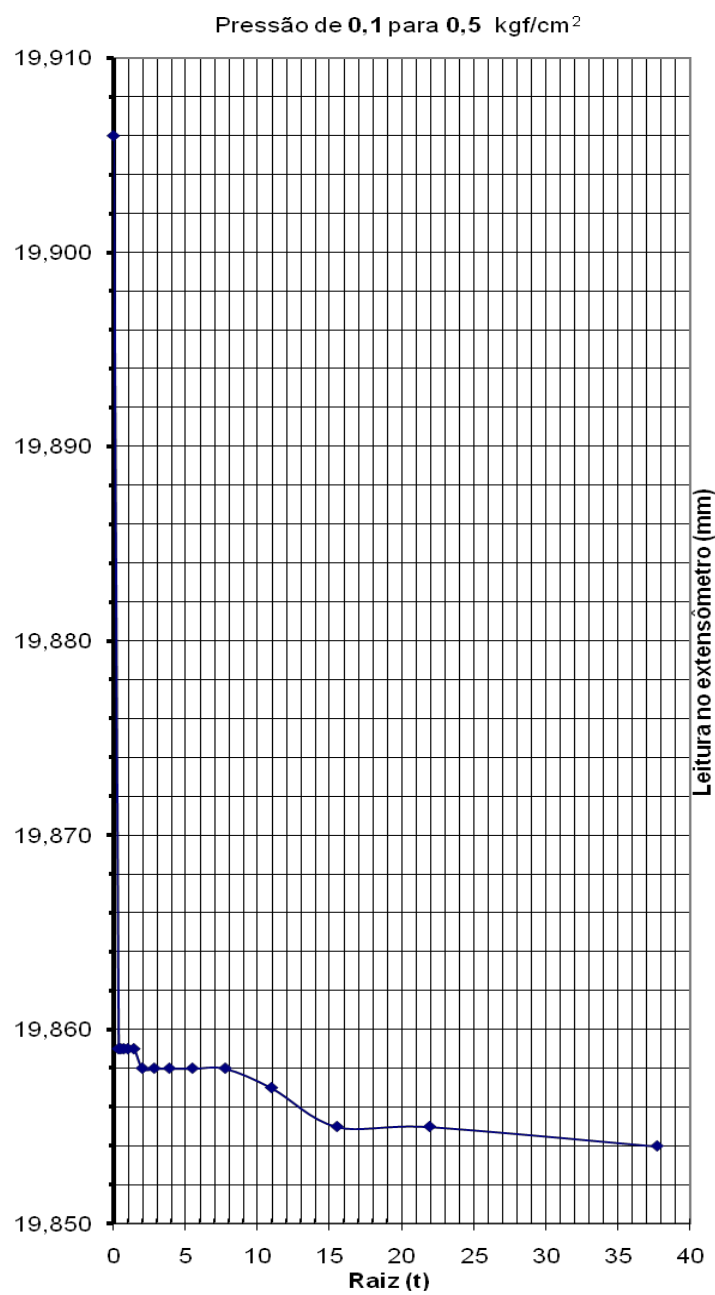


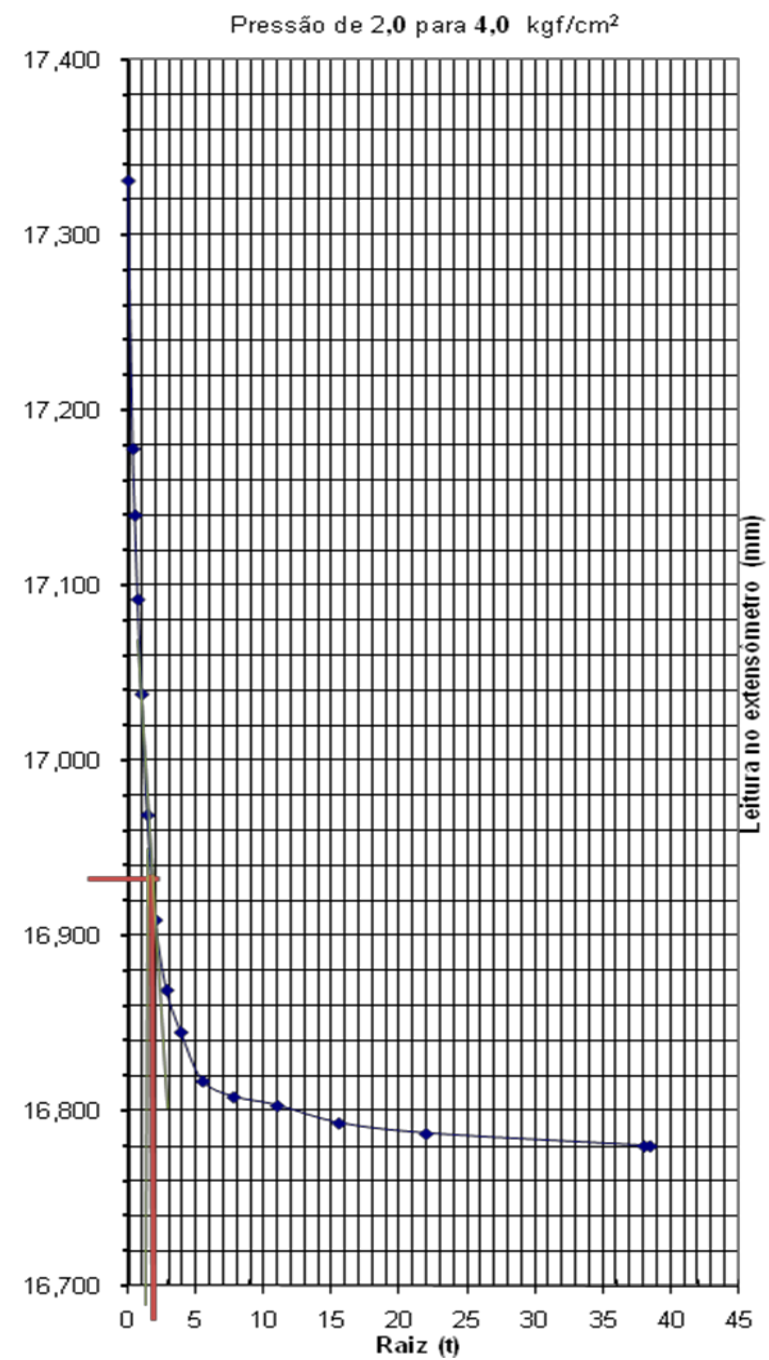
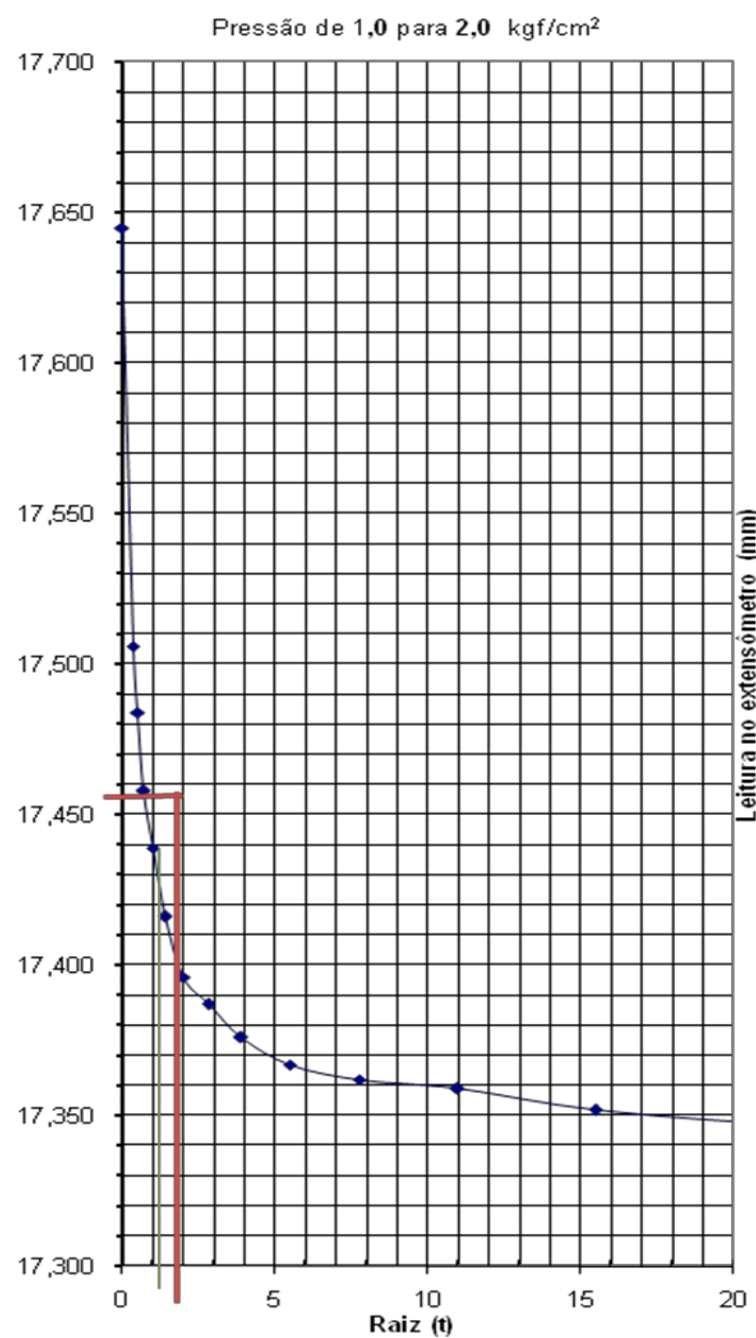


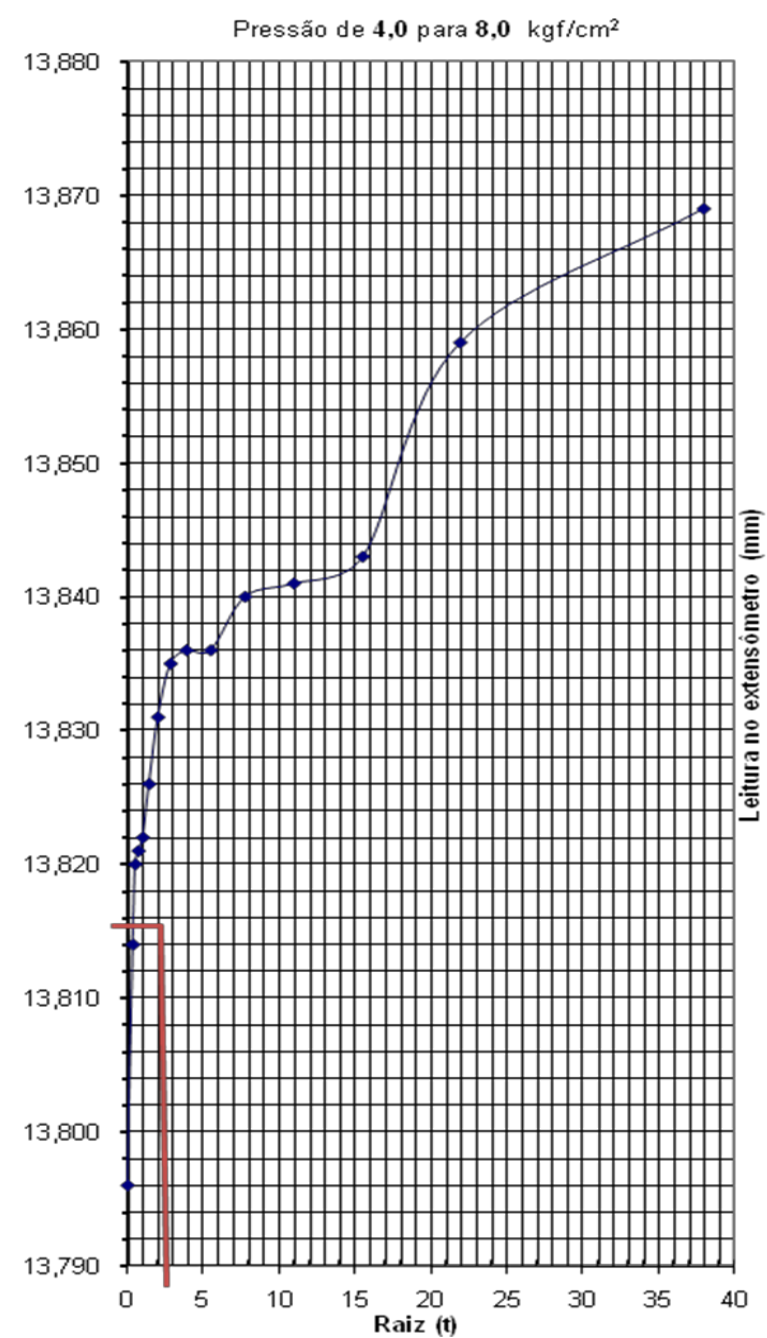
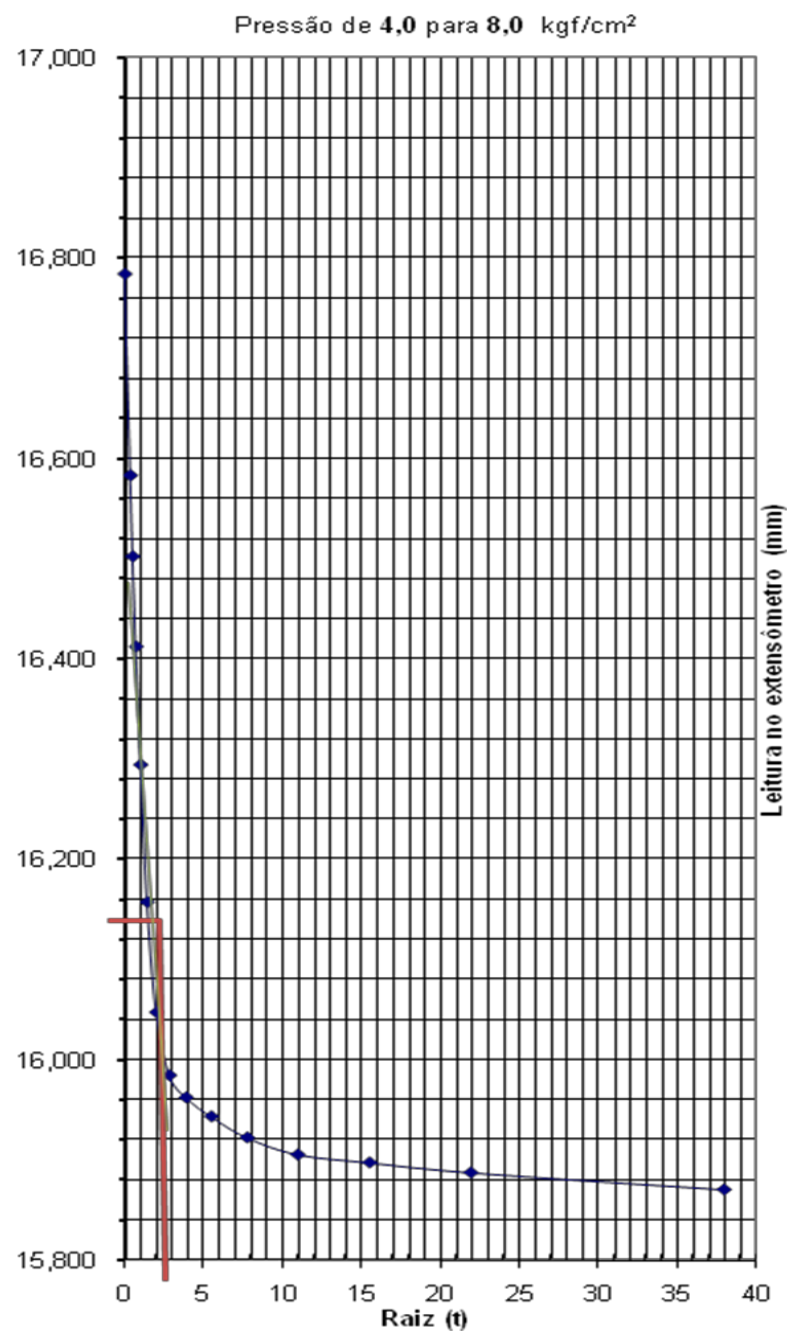


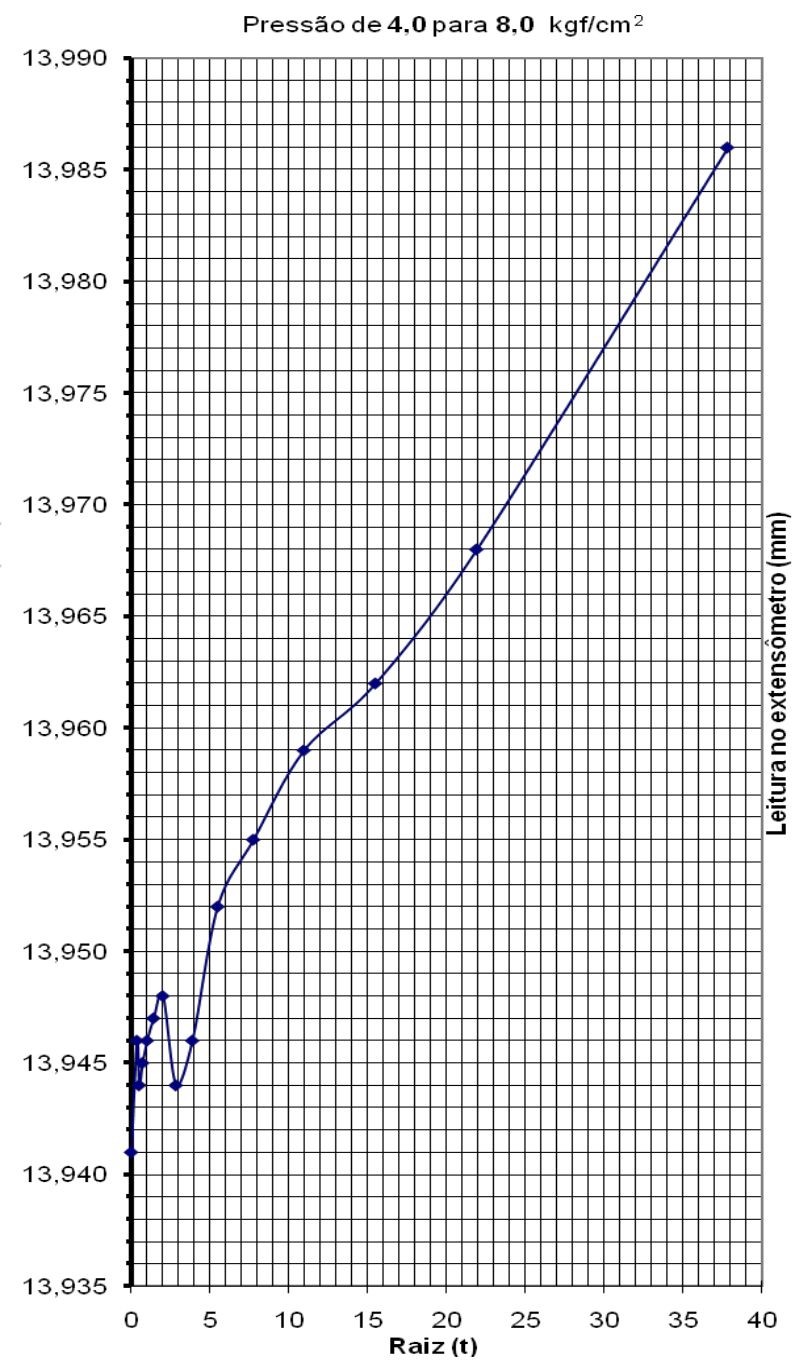
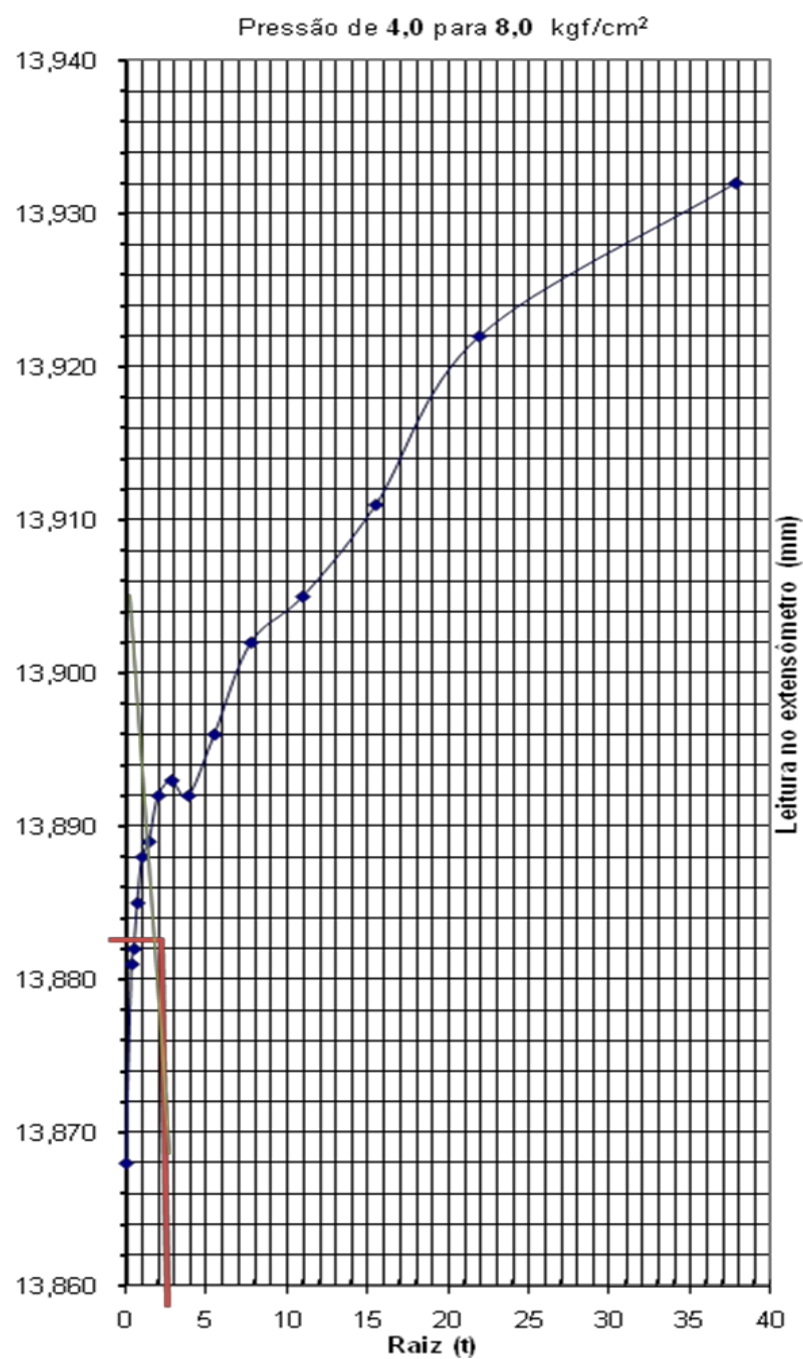


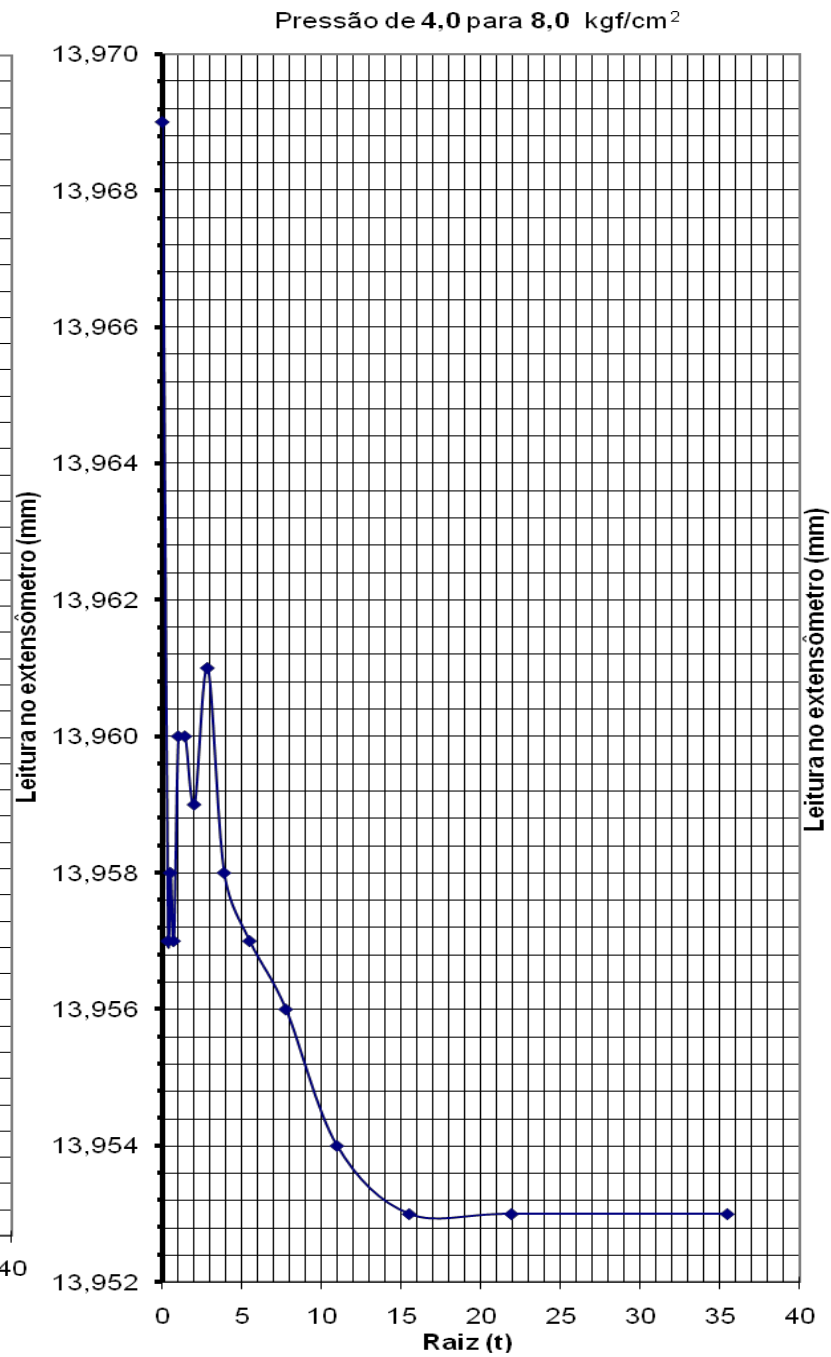
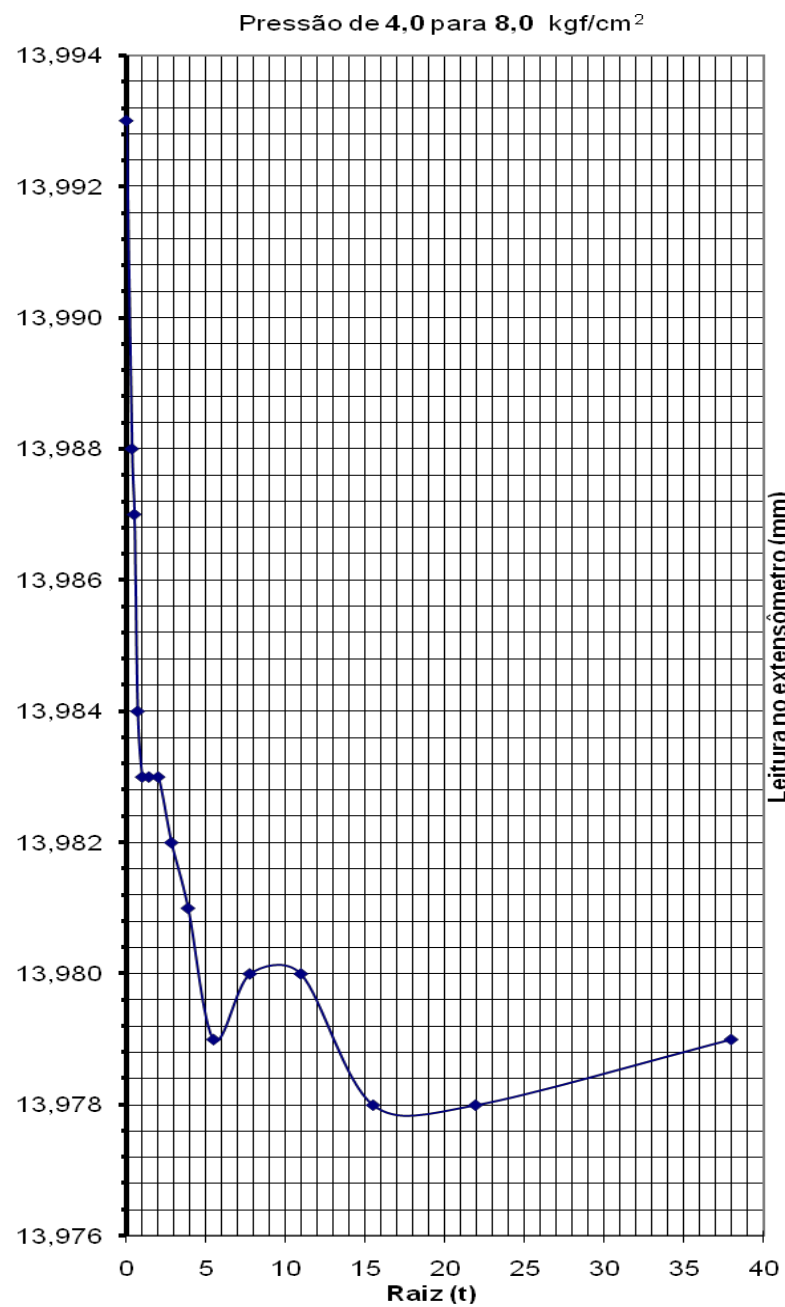
Solo + KR#2,0 5% + Cimento 5%

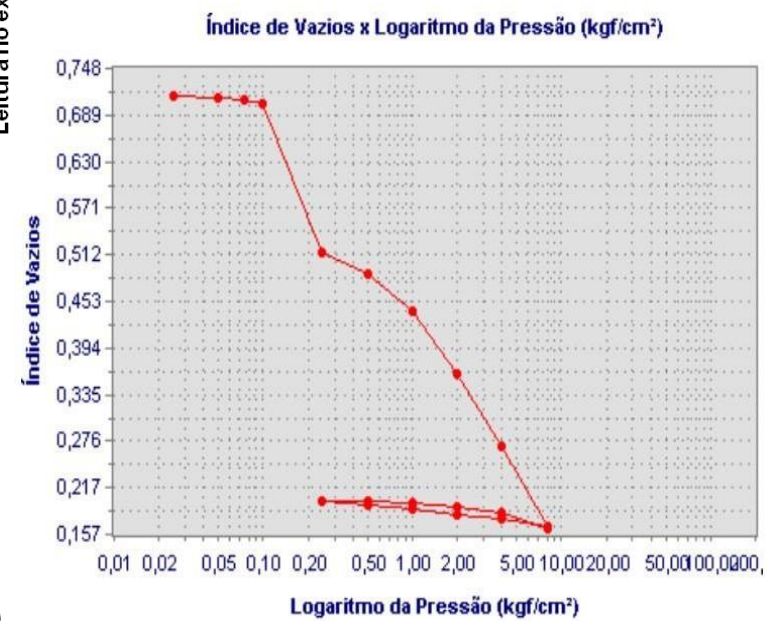
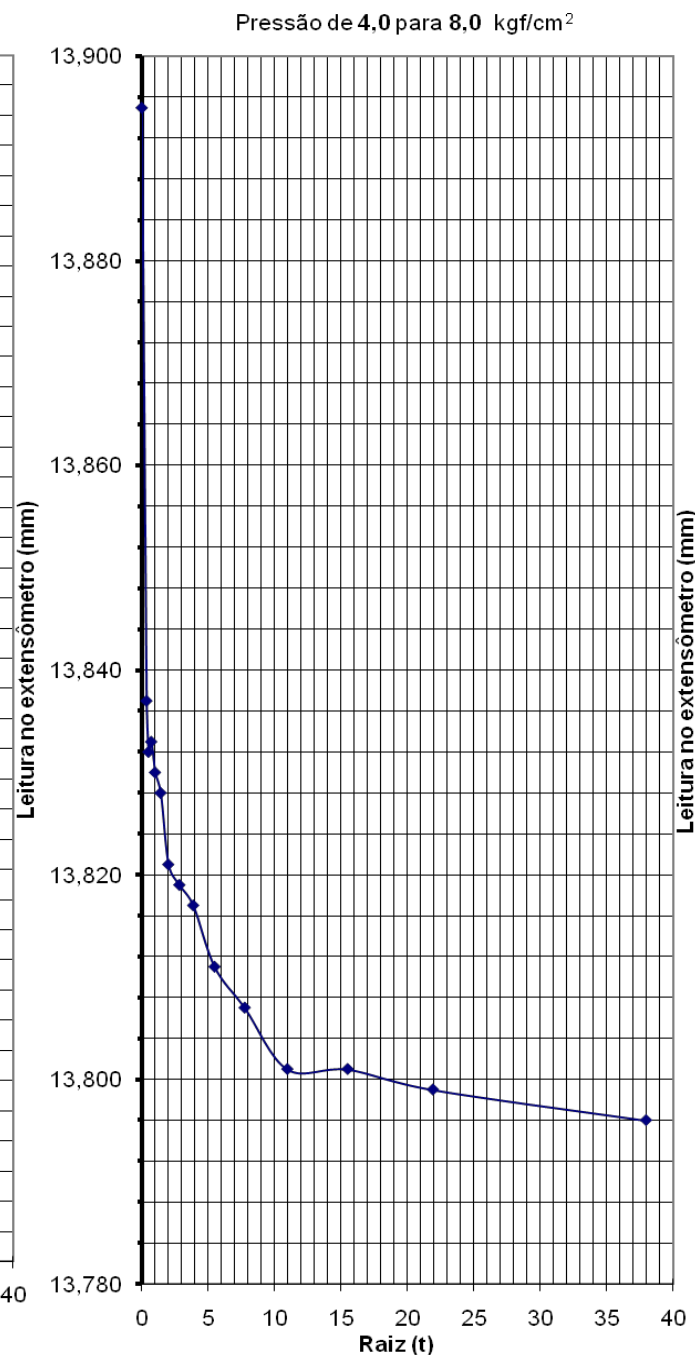
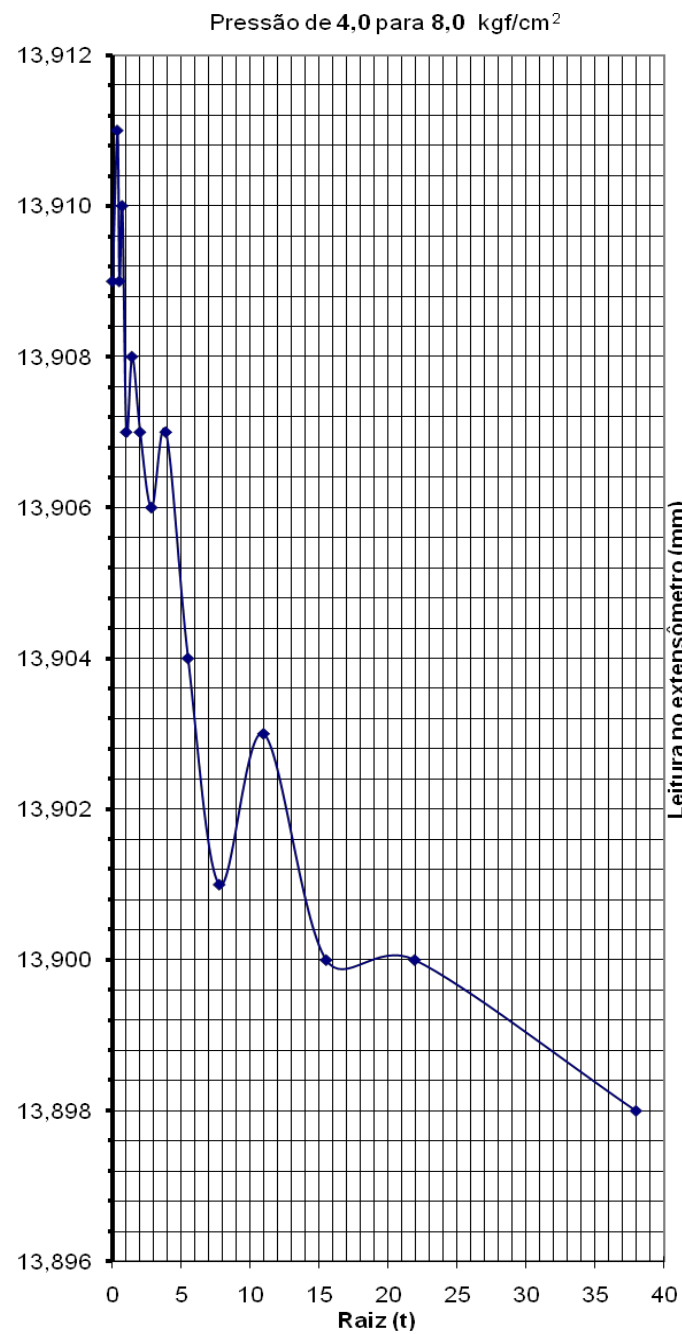




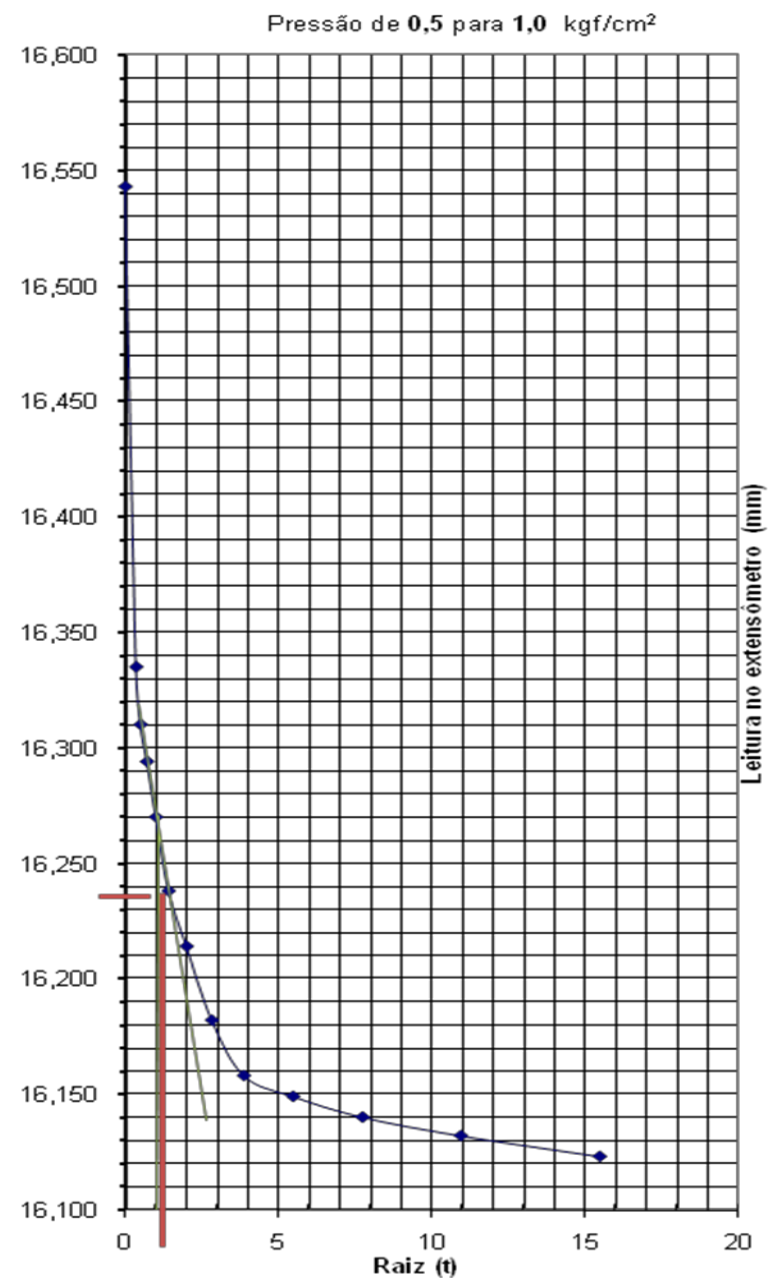
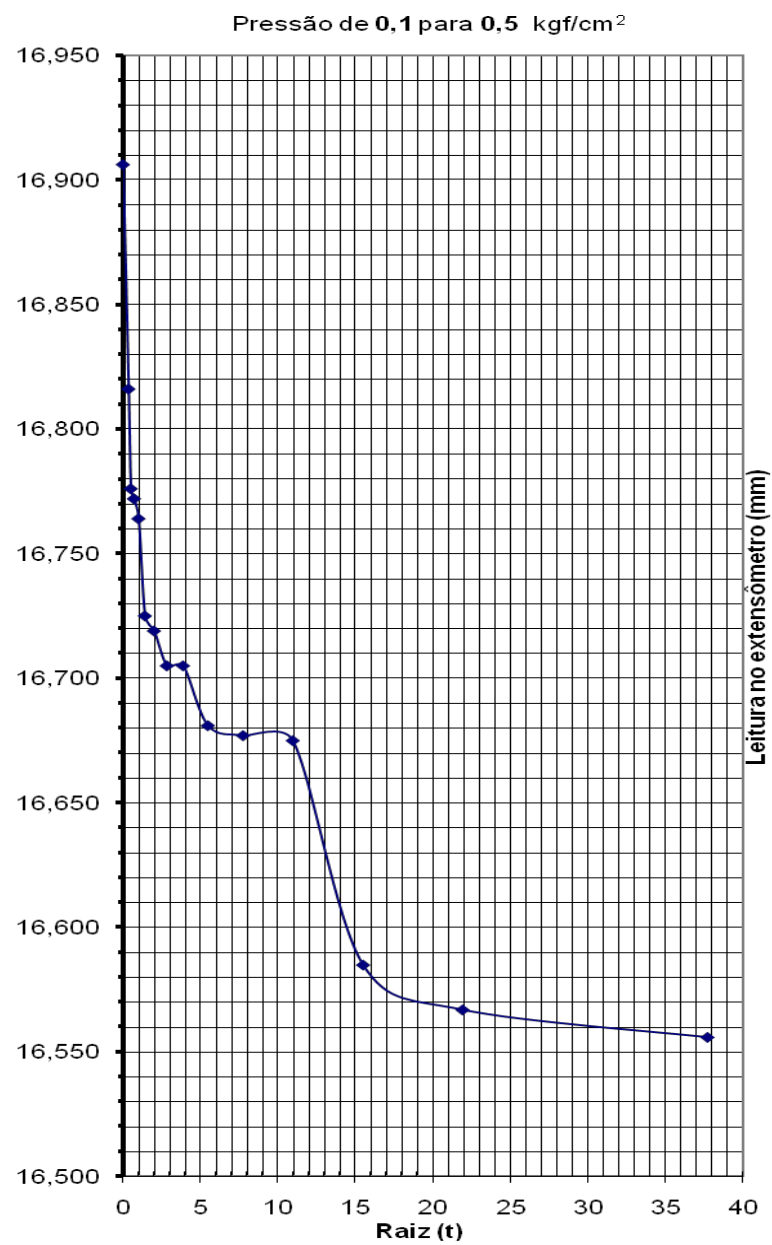


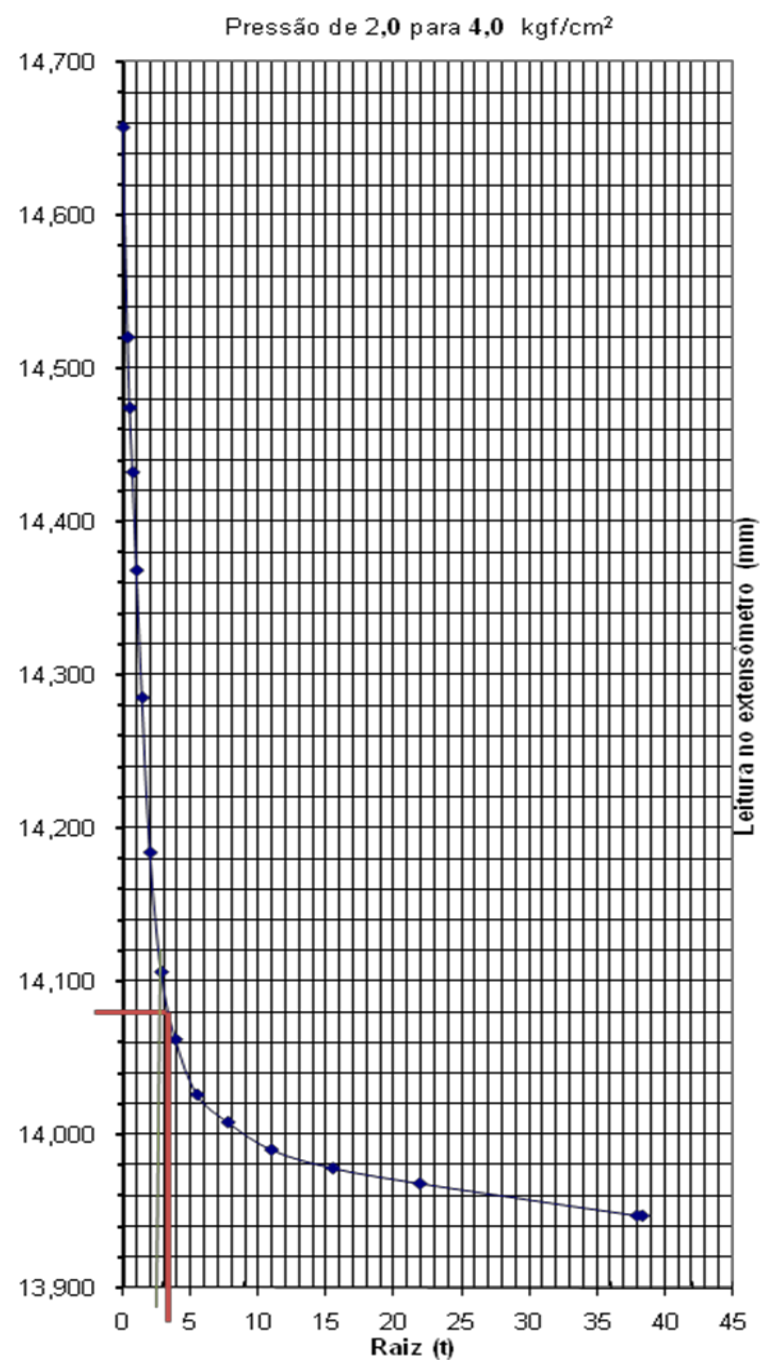
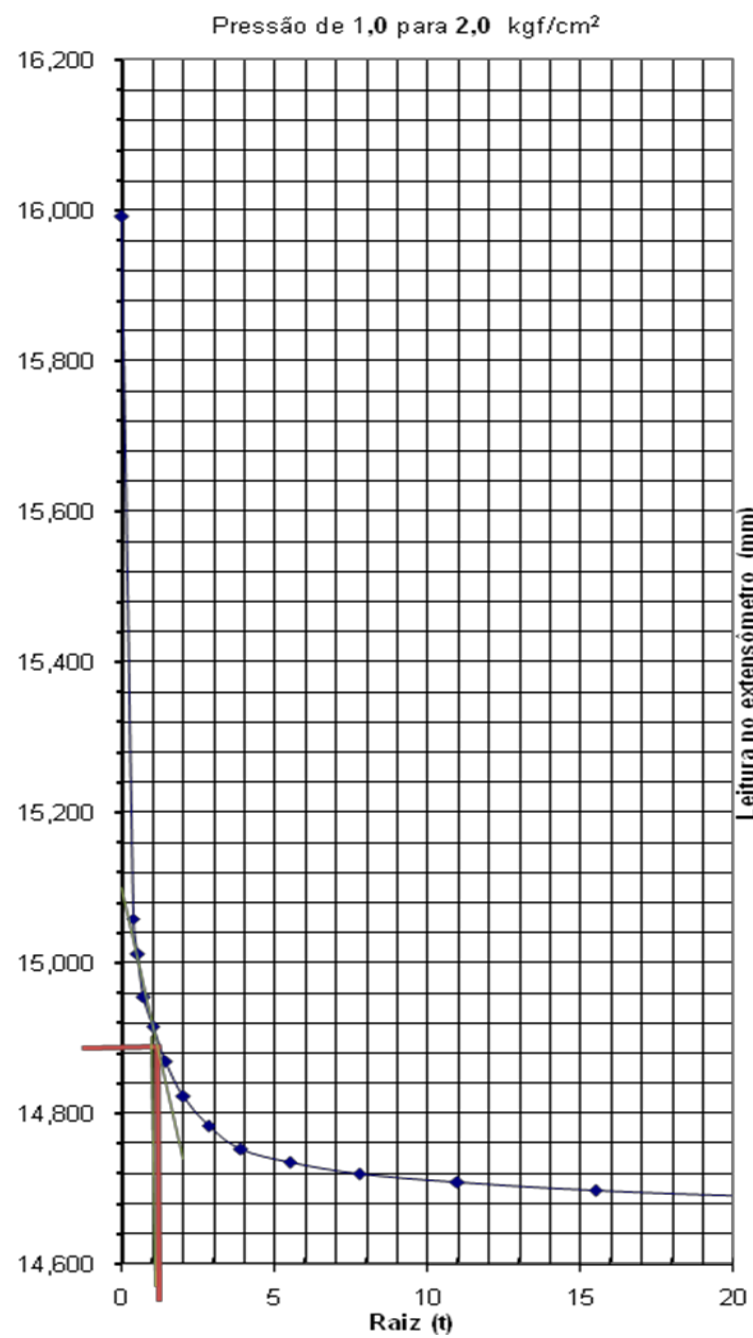


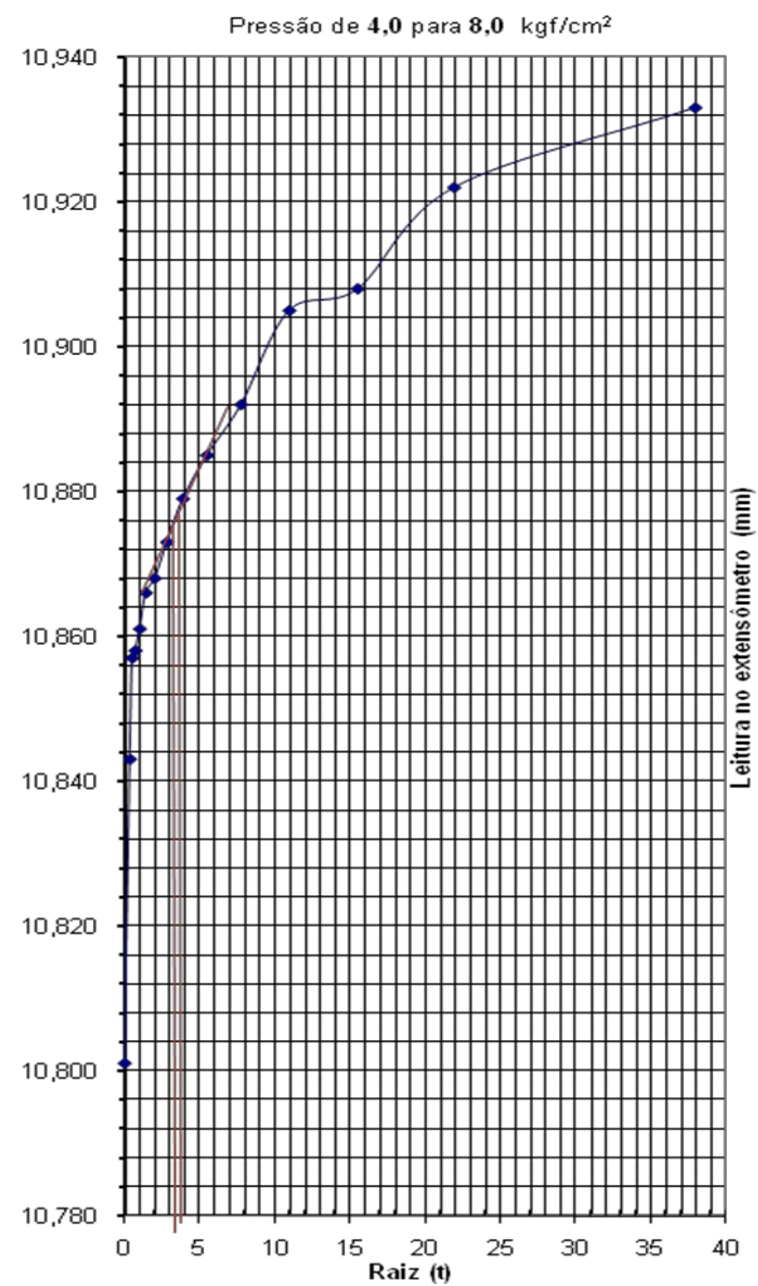
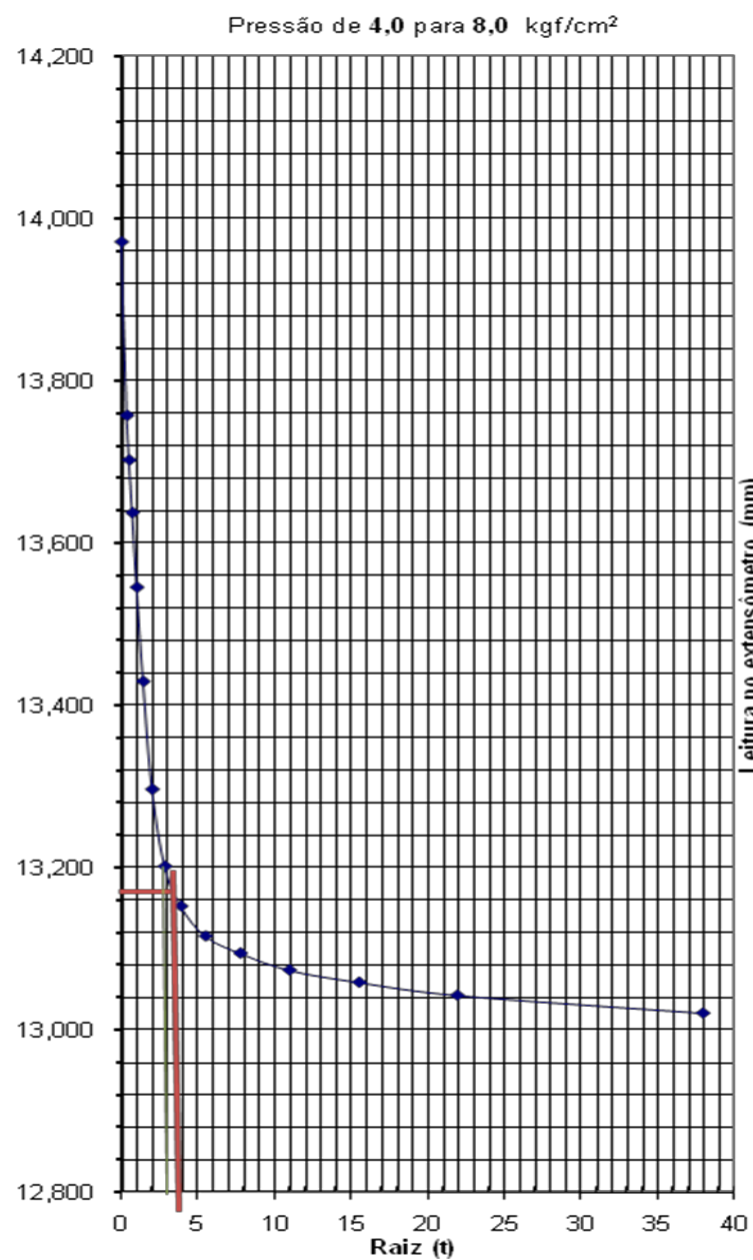


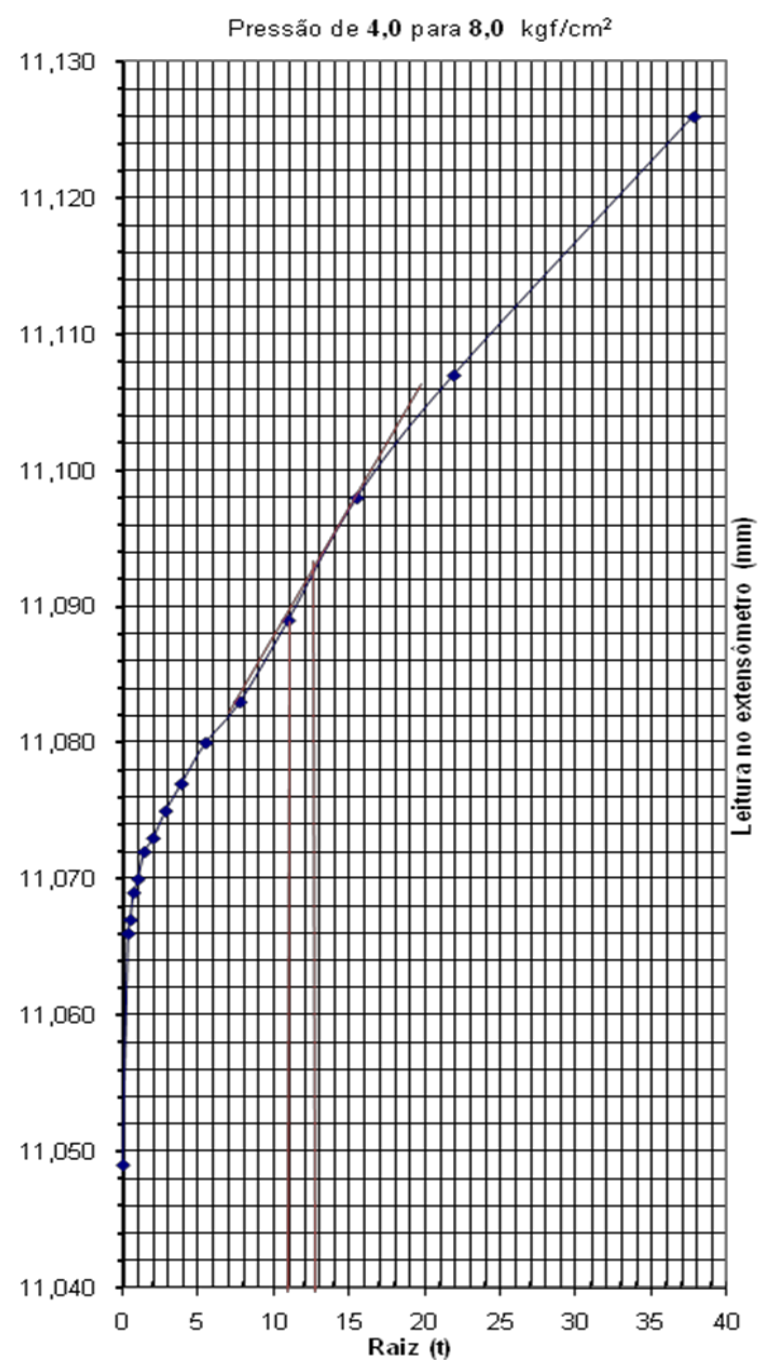
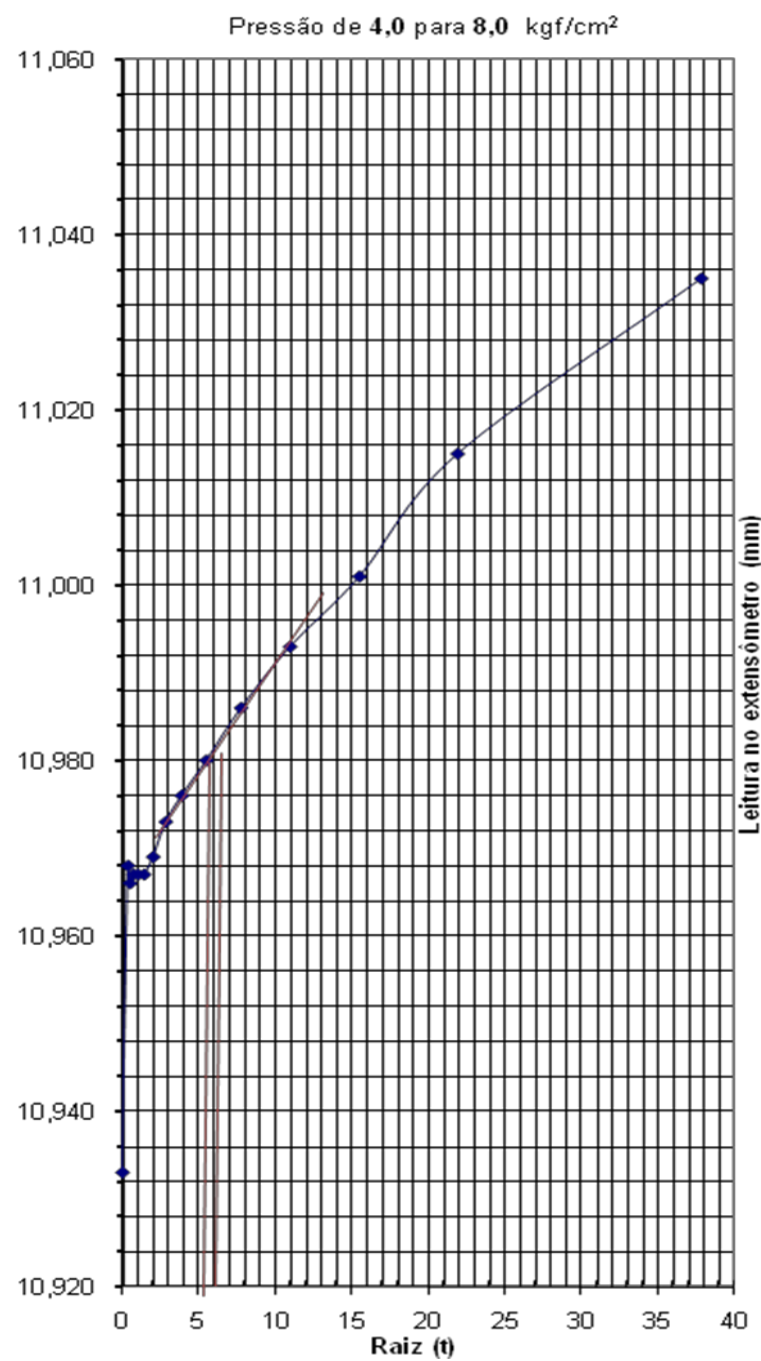


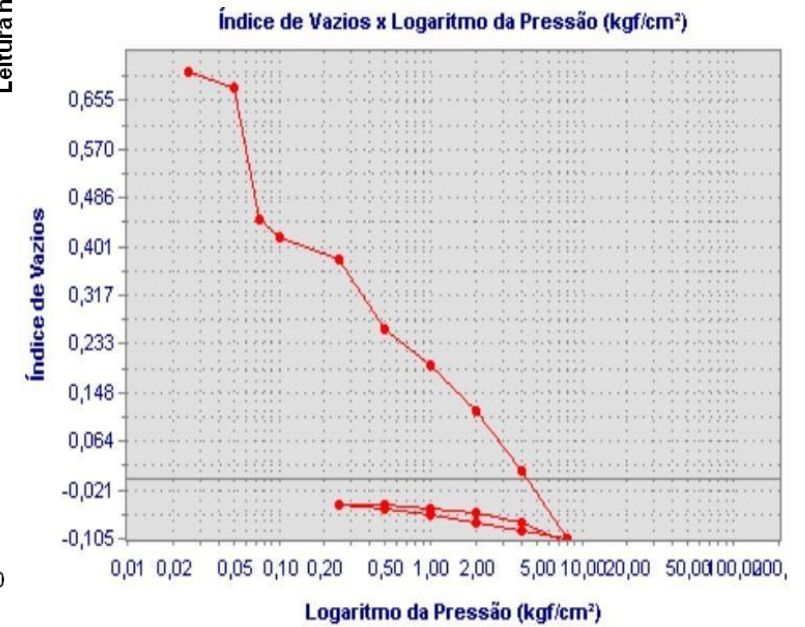
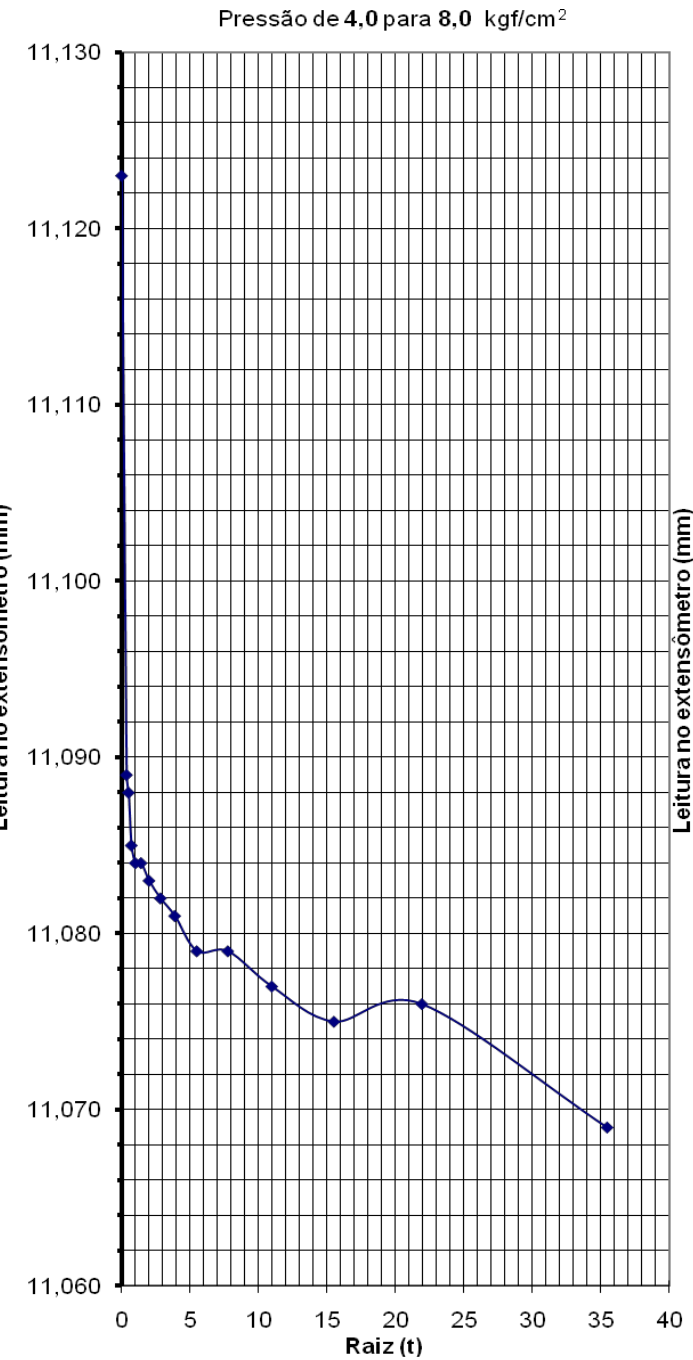
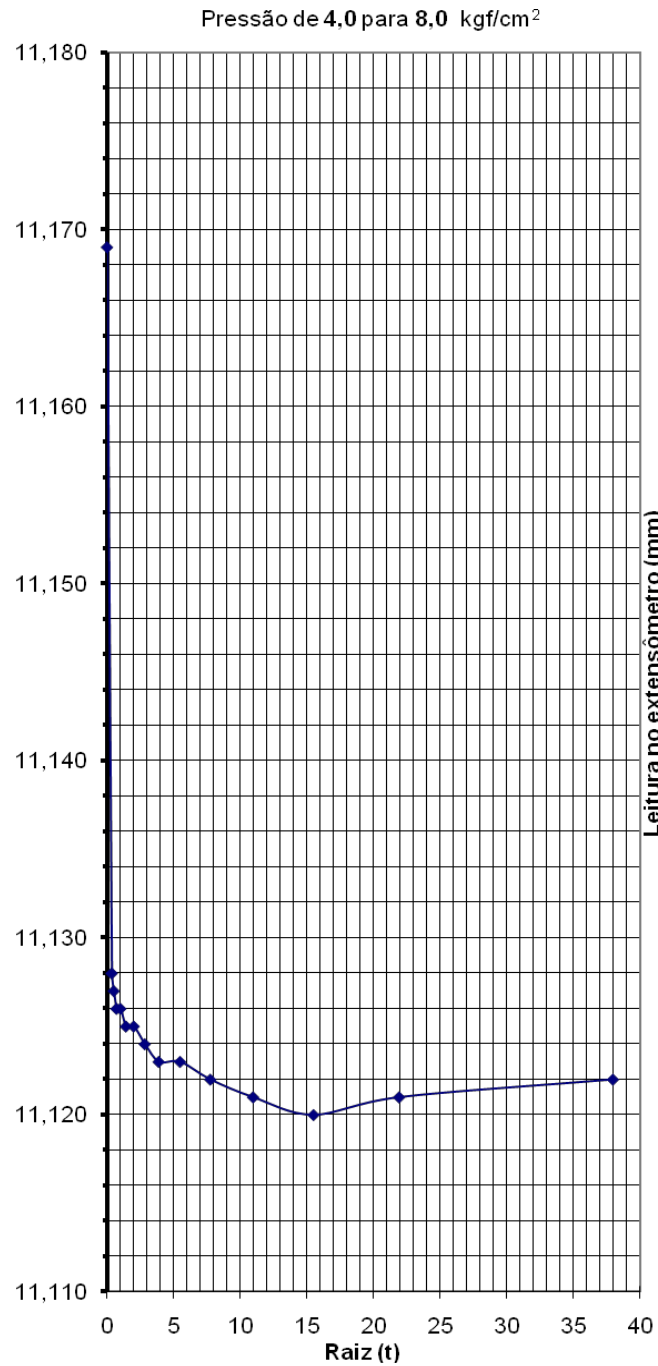
Solo + KR#2,0 7,5% + Cimento 2,5%











Solo + KR#2,0 8,5% + Cimento 1,5%

