



**COPPE/UFRJ**

ESTUDO ATRAVÉS DE MODELO FÍSICO DA REMEDIAÇÃO DE AREIAS  
CONTAMINADAS POR COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS ATRAVÉS DE  
INJEÇÃO CONJUNTA DE VAPOR E AR.

Petrônio Rodrigo Mello Montezuma

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador : Maurício Ehrlich

Rio de Janeiro  
Janeiro de 2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

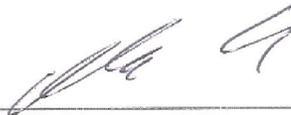
Milhares de livros grátis para download.

ESTUDO ATRAVÉS DE MODELO FÍSICO DA REMEDIAÇÃO DE AREIAS  
CONTAMINADAS POR COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS ATRAVÉS DE  
INJEÇÃO CONJUNTA DE VAPOR E AR.

Petrônio Rodrigo Mello Montezuma

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA CIVIL.

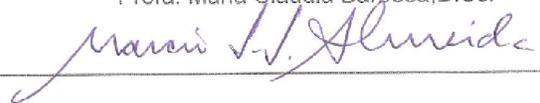
Examinada por:



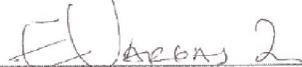
Prof. Mauricio Ehrlich, D.Sc.



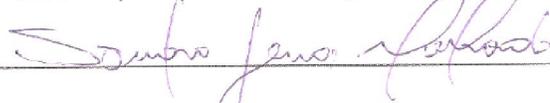
Profa. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.



Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, PhD.



Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Júnior, PhD.



Prof. Sandro Lemos Machado, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JANEIRO DE 2010

Montezuma, Petrônio Rodrigo Mello

Estudo através de modelo físico da remediação de areias contaminadas por Compostos Orgânicos Voláteis através de injeção conjunta de vapor e ar/ Petrônio Rodrigo Mello Montezuma. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XX, 203 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Maurício Ehrlich

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 136-141.

1. Remediação de solo contaminado. 2. COVs. 3. EVS. 4. Air Sparging. I. Ehrlich, Maurício. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

A persistência é o caminho do êxito

O ato de persistir é uma das condições da vitória. Muitas vezes, a vida mede a nossa fé opondo-nos a resistência. Os obstáculos fazem parte da nossa caminhada e render-se a eles demonstra fraqueza.

Não há na história da humanidade, um grande homem sequer que não tenha tido uma fé inquebrantável. Somente por meio da persistência e do bom ânimo conseguimos tornar realidade nossos mais ousados sonhos.

Quando se tem certeza interior de que estamos no caminho certo, nada, nem ninguém, pode ser mais forte que nós mesmos. Possuímos uma força poderosa, capaz de perseverar e conseguir tudo, bastando acreditar firmemente que, mesmo difícil, jamais será impossível. Alias, “o impossível é o possível que nunca foi tentado”.

Chega quem caminha. Então caminhe com determinação, jamais duvidando da sua capacidade de vencer. Você pode se acreditar que pode. Todos nós, quando bem intencionados, somos merecedores de uma vida nova. E, para tanto, necessário se faz uma ação contínua e persistente no sentido de tornar nossa vida mais próspera e feliz.

Sem esforço não existe vitória.

Persista hoje e sempre.

Persista mais e muito.

E lembre-se. “Um mundo melhor começa em você”.

Charles Chaplin

Dedico este trabalho aos meus pais, minha avó e à minha esposa.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que nunca me faltou e sempre me amparou.

Aos meus pais que me ensinaram o valor da família, do amor e dos estudos na vida de uma pessoa.

À minha esposa, que soube suportar com amor e paciência o longo tempo de ausência durante meus estudos.

Ao professor Maurício Ehrlich pela compreensão, apoio e entusiasmo com o tema da pesquisa.

À minha amiga-irmã-do-coração Rita de Cássia Oliveira dos Santos pela amizade verdadeira.

Aos amigos de Ouro Preto: Eufrásia, Juliane, Marta, Rodrigo e Joyce.

Aos amigos José Antônio Calle, Kally, Fernando Affonso, Ronaldo Izzo e Marcela Monteiro agradeço pela paciência, companheirismo e amizade.

Aos meus eternos amigos Luciano Soares, Eros Nascimento e Maria Mazzarelo. Um dia, a gente se encontrará novamente.

Aos amigos Antônio Sérgio e Joselia, que me estenderam a mão em um momento muito difícil na minha vida.

Agradeço ao prof. Fernando Danziger pelo apoio e palavras de otimismo.

Ao Cristóvão, que superou todas as dificuldades para me ajudar a terminar o trabalho e ao engenheiro Douglas pelo grande apoio.

Ao sr. André, da MIGMAG, pela amizade e prestatividade.

Ao engenheiro Sílvio Tavares e ao técnico Júlio da EMBRAPA SOLOS/RJ pela ajuda na realização da curva característica do solo pesquisado.

Ao pessoal da “república”, Luciano Franco, Francisco Duque, Eduardo Macedo, Fernando, Rafael Maia, Peterson, Paulo Aguiar e ao sr. Roberto.

Aos novos amigos Harley, Beatriz Triane, Danielle e Mário Nacinovic e em especial ao Rafael, que me auxiliou com as curvas de isotemperatura.

Aos companheiros de pós-graduação pelo convívio ao longo destes anos: Beatriz Fajardo, Cinconegui, Adriana, Anderson, Tatiana, Vivianne, Abdoul, Maurício Rezende, Helena Motta, Graziella Jannuzzi, Jefferson Maia, Deize Curcio, Juliana Rose, Ana Júlia, Maria do Socorro, Jaqueline e Roberto Ferraz,

Ao pessoal técnico do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ: Eduardo Paiva, André Salviano, Álvaro, Luiz Mário, Carlinhos, Glória, Mauro, Serginho, Ricardo Gil, Álvaro e um agradecimento muito especial ao Hécio, pelo companheirismo e amizade demonstrados.

Um agradecimento especial ao Jairo e à Beth, da Secretaria Acadêmica, que sempre me atenderam muito bem.

Ao pessoal da portaria do Laboratório de Geotecnia, em especial ao Alfena, Evandro e Fredson.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO ATRAVÉS DE MODELO FÍSICO DA REMEDIAÇÃO DE AREIAS  
CONTAMINADAS POR COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS ATRAVÉS DE  
INJEÇÃO CONJUNTA DE VAPOR E AR.

Petrônio Rodrigo Mello Montezuma

Janeiro/2010

Orientador: Maurício Ehrlich

Programa: Engenharia Civil

O presente trabalho visa contribuir para o entendimento do mecanismo de descontaminação de solos através da técnica de injeção conjunta de ar e vapor para remoção de compostos orgânicos voláteis com o uso de modelo físico. A técnica de injeção de vapor no solo pode induzir à precipitação de fases separadas do contaminante durante sua aplicação. Neste contexto, a utilização de injeção mista de ar/vapor no solo surge como uma opção para superar esta restrição.

Para simular o processo de remediação de um solo contaminado por LNAPL (no caso, por Tolueno), foi construído um modelo físico composto de uma caixa de aço inox preenchida com solo, uma central de gases e um sistema coletor de efluentes. O modelo físico inovou com o uso de banho térmico e sistema à vácuo para diminuição da pressão externa sobre o contaminante e facilitar a volatilização do mesmo.

Este é o primeiro estudo da técnica de injeção ar e vapor no solo para remediação de solo contaminado com o tolueno. O Tolueno foi escolhido por ser um dos constituintes do BTEX e ter a menor pressão de vapor dentre estes. Assim, a remoção de tolueno pode ser considerada como um limite inferior dos demais componentes.

Foram realizados ensaios com variação de pressões de injeção de ar e/ou vapor. Os resultados experimentais apontam que a utilização da técnica de injeção conjunta de ar/vapor mostra-se eficaz e oferece eficiência superior aos procedimentos onde são injetados apenas ar ou apenas vapor.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

PHYSICAL MODEL STUDIES OF REMEDIATION OF SAND CONTAMINATED BY  
VOLATILE ORGANIC COMPOSITES THROUGH OF VAPOR AND AIR JOINT  
INJECTION.

Petrônio Rodrigo Mello Montezuma

January/2010

Advisor: Maurício Ehrlich

Department: Civil Engineering

The present work aims to contribute for understanding about the mechanisms for soil cleaning by using mixed injection of air and vapor for volatile organic compounds removal using a physical model. The technique of vapor injection in the ground may induce to the precipitation of separate phases of the pollutant during its application. In this context, the use of mixing injection of ar/vapor in the ground appears as an option to surpass this restriction.

To simulate the process of remediation of a soil contaminated by LNAPL (in the case, by Toluene), a physical model composed of a steel box inox filled with soil was, a central office of gases and a collecting system of effluent was constructed. The physical model innovated with the use of thermal bath and vacuum system for reduction of the external pressure over the contaminant and to facilitate the volatilization of the same.

This is the first study of the injection technique of air and vapor in the ground for ground remediation contaminated with the toluene. The Toluene was chosen because it's one of the components of the BTEX and it has the lower vapor pressure among these. Thus, the removal of toluene can be considered as an inferior limit of the other components

Essays with variation of pressures of injection of air and/or vapor had been carried through. The experimental results point that the use of the technique of joint injection of ar/vapor reveals efficient and offers superior efficiency to the procedures where they are injected only air or only vapor.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO .....	1
1.2 OBJETIVOS .....	2
1.2.1 <i>Objetivo principal</i> .....	2
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	2
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	2
<b>CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
2.1) PROPRIEDADES DOS LÍQUIDOS IMÍSCÍVEIS.....	4
2.2) FASES DE CONTAMINAÇÃO .....	7
2.3 PARÂMETROS BÁSICOS PARA O ESTUDO DO TRANSPORTE DE LNAPLs .....	9
2.3.1 <i>TENSÃO interfacial</i> .....	9
2.3.2 <i>Molhabilidade</i> .....	10
2.3.3 <i>Pressão capilar</i> .....	11
2.3.4 <i>Saturação</i> .....	13
2.3.5 <i>Permeabilidade</i> .....	14
2.3.6 <i>Permeabilidade Relativa</i> .....	14
2.4 VOCs (COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS) .....	16
2.4.1 <i>Principais Compostos orgânicos voláteis</i> .....	17
2.5 SOLOS NÃO SATURADOS .....	18
2.5.1 <i>Teor de água do solo</i> .....	18
2.5.2 <i>potencial de energia da água no solo</i> .....	20
2.5.3 <i>PERMEABILIDADE</i> .....	21
2.5.4) CURVA CARACTERÍSTICA DA ÁGUA NO SOLO .....	23
2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS .....	28
2.6.1 <i>Condutividade Térmica</i> .....	28
2.6.2 <i>Resistividade Térmica</i> .....	32
2.6.3 <i>Calor Específico e Capacidade de Aquecimento Volumétrico</i> .....	32
2.6.4 <i>Difusividade térmica</i> .....	34
2.8 COMPORTAMENTO DOS GASES.....	34
2.8.1 <i>Evaporação</i> .....	34
2.8.2) <i>Pressão de Vapor</i> .....	37

2.8.3) Lei de Dalton.....	40
2.8.4) Lei de Amagat.....	41
<b>CAPÍTULO 3 PROCESSOS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS .....</b>	<b>43</b>
3.1 VALORES ORIENTADORES.....	43
3.2 INJEÇÃO DE OXIGÊNIO NO SOLO (AIR SPARGING ).....	45
3.2.1 uso da técnica de air sparging com Poços Verticais.....	47
3.2.2.) uso da técnica de air sparging com Poços HORIZONTAIS.....	48
3.3 EXTRAÇÃO DE VAPOR DO SOLO (EVS) .....	50
3.3.1 Descrição do processo/aplicações.....	51
3.4) BIOVENTING .....	53
3.5 BIOSPARGING.....	53
3.6 SISTEMA AIR SPARGING/EVS ENRIQUECIDO COM VAPOR D ÁGUA.....	54
3.6.1) Materiais do experimento e métodos.....	57
3.6.2 MODELO TEÓRICO CONCEITUAL.....	58
<b>CAPÍTULO 4 MODELO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>66</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	66
4.2 EXIGÊNCIAS DO SISTEMA .....	66
4.3 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS E UTILIZADOS.....	67
4.3.1 CAIXA DE AÇO INOX PARA ENSAIO DE INJEÇÃO CONJUNTA DE AR/VAPOR.....	69
4.3.2 Mecanismo gerador de vapor.....	74
4.3.3 mecanismo de Pluviação de areia.....	77
4.3.4 Sistema para aquisição de dados de temperatura EM TEMPO REAL ....	80
4.3.5 SISTEMA DE COLETA DE EFLUENTES.....	81
<b>CAPÍTULO 5 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>85</b>
5.1 MATERIAIS .....	85
5.1.1 AREIA .....	85
5.1.2 Tolueno.....	89
5.2 MÉTODOS .....	90
5.2.1 Preparo da amostra.....	90
5.2.2 Ensaio.....	91
5.2.3 Coleta e tratamento de dados.....	92
5.2.4 Coleta de efluentes.....	92
5.2.5 pluviação da areia.....	93
<b>CAPÍTULO 6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>95</b>

6.1	ENSAIOS PRELIMINARES .....	95
6.1.1	ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (2:1).....	96
6.1.2	ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (1:1).....	98
6.1.3	ENSAIO COM INJEÇÃO DE AR .....	101
6.1.4	ENSAIO COM INJEÇÃO APENAS DE VAPOR.....	102
6.1.5	conclusões sobre os ensaios preliminares. ....	105
6.2	SEGUNDO LOTE DE ENSAIOS .....	106
6.2.1	ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (2:1). ....	107
6.2.2	ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (1:1). ....	109
6.2.3	ENSAIO COM INJEÇÃO DE AR.....	112
6.2.4	ENSAIO COM INJEÇÃO DE VAPOR.....	113
6.2.5	conclusões sobre os ensaios do segundo lote. ....	115
6.3	TERCEIRO LOTE DE ENSAIOS .....	117
6.3.1	ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (2:1). ....	117
6.3.2	ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (1:1).....	120
6.3.3	ENSAIO COM INJEÇÃO DE AR .....	123
6.4.4	ENSAIO COM INJEÇÃO DE VAPOR.....	124
6.4.5	conclusões sobre os ensaios do terceiro lote. ....	127
6.4	ENSAIO COMPLEMENTAR .....	128
6.5	VISÃO GERAL DOS ENSAIS REALIZADOS.....	130
<b>CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>		<b>132</b>
7.1	CONCLUSÕES.....	132
7.1.1	EQUIPAMENTOS.....	132
7.1.2	Ensaio.....	132
7.1.3	MODELOS MATEMÁTICOS.....	133
7.2.1	EQUIPAMENTOS.....	134
7.2.2	Ensaio.....	135
7.2.3	MODELOS MATEMÁTICOS.....	135
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>136</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Infiltração de LNAPL (modificado de Pinder e Abriola, 1986).....	5
Figura 2.2 Contaminante na zona não saturada pode estar presente em quatro fases: gás, sorvido ao solo, dissolvido na água ou como líquido imiscível, formando a.....	6
fase livre (Newell et al, 2000).....	6
Figura 2.3 Partição de LNAPL entre as quatro fases potencialmente encontradas na zona não saturada.(Newell et al, 1995.....	6
Figura 2.5 Representação Esquemática da Tensão Interfacial. (Delgado, 2000).....	9
Figura 2.6 Situações de molhagem (Delgado,2000). ....	10
Figura 2.7 Conceito de Pressão Capilar (CHATZIS, 1983). ....	12
Figura 2.8 Relação Pressão capilar – Saturação (Fetter, 1992).....	13
Figura 2.10 Curvas de permeabilidade relativa hipotéticas para água e LNAPL em um meio poroso ( Depois de Williams e Wilder,1971).....	15
Figura 2.11 Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993). ....	18
Figura 2.14 Esquema do fluxo de calor através de um elemento prismático de solo. (Pessoa, 2006).....	29
Figura 2.15 – Comparações entre relações de condutividade térmica x grau de saturação (Duarte, 2004). ....	29
Figura 3.1 Poços verticais para Air Sparging (apud USEPA, 1997a). ....	47
Figura 3.2 Poços horizontais para Air Sparging (apud USEPA, 1997a). ....	48
Figura 3.3 Apresentação esquemática de um sistema de extração de vapor do solo ( USEPA, 1997b). ....	51
Figura 3.5 Montagem esquemática do experimento apud Schmidt et al (2002). ....	57
Figura 3.6 Energia por massa de vapor.....	59
Figura 3.7 Massa de vapor por $V_{pc}$ x temperaturas.....	60
Figura 3.8 $V_{mspc}$ x temperatura.....	61
Figura 3.9 $V_{fcm spc}$ x temperatura.....	62
Figura 3.10 $v_{evap}$ x temperatura.....	64
Figura 4.1 Esquema de montagem e conexão dos equipamentos usado para a realização dos lotes de Ensaios 01 e 02. ....	68
Figura 4.3 (A) Fase inicial- Instalação dos termopares.....	69
Figura 4.3(B) Vista de fundo da caixa com instalação dos termopares e Data Logger. ....	70

Figura 4.4 Tampa superior de alumínio com garras metálicas para fixação onde se visualiza o furo central (inserção de contaminante) e os furos da borda direita (poços de extração de efluentes).....	70
Figura 4.5 (A) Vista superior da caixa de inox, (B) Vista do fundo da caixa.....	71
Figura 4.6 Placa aquecedora instalada sobre a face de vidro da primeira caixa de inox.....	72
Figura 4.7 Primeira caixa após a retirada dos eletros, vidro frontal e tampa superior.....	73
Figura 4.8. Vidro laminado em pedaços após realização do primeiro teste de estanqueidade.....	74
Figura 4.9 Primeiro mecanismo gerador de vapor adotado. A) Painel de pressão de 6 litros adaptada, B) Placa aquecedora elétrica.....	75
Figura 4.10 Gerador de vapor de segunda geração: A) Painel de pressão industrial de 30 litros, B) Resistência elétrica de 3000 W instalada no fundo da panela.....	76
Figura 4.11 Partes do sistema de Pluviação de areia inicialmente adotado.....	77
A) Conjunto de peneiras. B) Corrente transportadora.....	77
Figura 4.12 A) Calha usada para auxiliar na pluviação de areia, B) Pórtico para uso no sistema de pluviação com uso de bombonas de areia inicialmente adotado.....	79
Figura 4.13 A) Calha para coleta de areia, B) Caixa sobre trilhos, C) Pórtico para uso no sistema de pluviação de areia definitivo.....	80
Figura 4.14. Sistema de aquisição de dados: A) Data Logger.B) Computador com software para leitura em tempo real.	81
Figura 4.15 Sistema Coletor de efluentes: A) Frasco coletor de efluentes, B) Separador de fases, C) Condensador, D) Carvão ativado.....	82
Figura 4.16 Condensador conectado a um kitasato.....	83
Figura 4.17 Banho térmico usado para refrigeração do condensador.....	84
Figura 4.18 Bomba à vácuo usada no terceiro lote de ensaios.....	84
Figura 5.1 Curva granulométrica da areia pesquisada.....	86
Figura 5.2 Câmara de pressão de Richards.....	86
Figura 5.3 Curva característica da areia pesquisada.....	88
Figura 5.2 Verificação da influência da altura de pluviação no índice de vazios.....	93
Figura 5.3 Ensaio preliminar onde se vê uma fase livre de tolueno sobre o NA.....	94
Figura 6.1 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, Primeiro lote).....	96
Figura 6.2 Curvas de isotemperatura no instante 30 min.....	97
Figura 6.3 Curvas de isotemperatura no instante 120 min.....	97
Figura 6.4 Curvas de isotemperatura no instante 210 min.....	98
Figura 6.5 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 02, Primeiro lote).....	99
Figura 6.6 Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos.....	99
Figura 6.7 Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos.....	100

Figura 6.8	Curvas de isotemperatura no instante 270 minutos. ....	100
Figura 6.10	Curvas de isotemperatura no instante 30.....	101
Figura 6.10	Curvas de isotemperatura no instante 180.....	102
Como neste ensaio não foi injetado o vapor, não se observou a ocorrência do aquecimento localizado da região saturada do solo.....		102
Figura 6.11	Volume retirado ao longo do tempo ( Ensaio 04, primeiro lote).....	103
Figura 6.12	Curvas de isotemperatura no instante 30.....	103
Figura 6.13	Curvas de isotemperatura no instante 150 min.....	104
Figura 6.14	Curvas de isotemperatura no instante 240 min.....	104
Mais uma vez, observa-se a existência da zona de aquecimento no canto esquerdo inferior do modelo físico que se expandiu pela zona saturada do solo.....		104
Figura 6.15	Tempos de início de retirada de efluente, duração e volume retirado nos ensaios.....	105
Figura 6.16	Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, Segundo lote).....	107
Figura 6.17	Curvas de isotemperatura no instante 30 min.....	108
Figura 6.18	Curvas de isotemperatura no instante 120 min.....	108
Figura 6.19	Curvas de isotemperatura no instante 180 min.....	109
Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 70,04 ml e o valor obtido foi de 61,0. ml. ....		109
Figura 6.20	Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 02, Segundo lote).....	110
Figura 6.21	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	110
Figura 6.22	Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos. ....	111
Figura 6.23	Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos. ....	111
Figura 6.24	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	112
Figura 6.25	Curvas de isotemperatura no instante 270 minutos. ....	112
Figura 6.26	Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 04, Segundo lote).....	113
Figura 6.27	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	114
Figura 6.28	Curvas de isotemperatura no instante 90 minutos. ....	114
Figura 6.29	Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos. ....	115
Figura 6.30	Tempos de início de retirada de efluente, duração e volume retirado nos ensaios.....	116
Figura 6.31	Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, terceiro lote).....	118
Figura 6.32	Curvas de isotemperatura no instante 30 min.....	118
Figura 6.33	Curvas de isotemperatura no instante 120 min.....	119
Figura 6.34	Curvas de isotemperatura no instante 180 min.....	119
Figura 6.37	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	121
Figura 6.38	Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos. ....	122

Figura 6.39	Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos. ....	122
	O comportamento mencionado de maior aquecimento da zona saturada se apresenta durante todo o período de ensaio. ....	122
Figura 6.41	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	124
Figura 6.42	Curvas de isotemperatura no instante 270 minutos. ....	124
Figura 6.43	Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 04, terceiro lote). ....	125
Figura 6.44	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	126
Figura 6.45	Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos. ....	126
Figura 6.46	Tempos de início de retirada de efluente, duração e volume retirado nos ensaios. 127	
Figura 6.47	Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, lote complementar). ....	128
Figura 6.48	Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos. ....	129
Figura 6.49	Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos. ....	129
Figura 6.50	Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos. ....	130

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Frações molares dos compostos BTEX na gasolina (Corseuil et al.(2004).	17
Tabela 2.3	–Propriedades Térmicas do Solo (Mitchell, 1993)	30
TABELA 3.1	Valores orientados para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2006)	45
Tabela 5.1	Valores de sucção mátrica x umidade volumétrica	87
Tabela 5.2	Umidade volumétrica ( $\theta_s$ ) no ponto de saturação	87
Tabela 5.3	Índices físicos	87
Tabela 5.4	Parâmetros de ajuste para curva característica por van Genuchten	88
Tabela 5.5	Propriedades físico-químicas e ambientais do Tolueno (CETESB, 2009)	90
Tabela 6.1	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	96
Tabela 6.2	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	99
Tabela 6.3	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	102
Tabela 6.4	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	107
Tabela 6.5	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	109
Tabela 6.6	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	113
Tabela 6.7	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	117
Tabela 6.8	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	120
Tabela 6.9	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	123
Tabela 6.10	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	125
Tabela 6.11	Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio	128
Tabela 6.12	Valores previstos de retirada de efluentes (ml)	130
Tabela 6.13	Valores de retirada de efluentes obtidos (ml)	131

## LISTA DE SÍMBOLOS

$K_{ow}$	Coeficiente de partição octanol/água
$K_{oc}$	Coeficiente de partição carbono orgânico/água
$A_t$	Tensão de adesão
$\sigma_{so}$	Tensão interfacial entre o sólido e a fase menos densa
$\sigma_{ow}$	Tensão interfacial entre o sólido e a fase mais densa
$\sigma_{w0}$	Tensão interfacial entre os fluidos
$\Theta$	Ângulo de contato
$P_c$	Pressão capilar (atm)
$P_{nw}$	Pressão na fase não molhante
$P_w$	Pressão na fase molhante
$R$	Raio de curvatura do menisco
$S_m$	Saturação residual de fluido molhante (%)
$S_{nm}$	Saturação residual de fluido não molhante (%)
$K_r$	Permeabilidade relativa (%)
$\lambda^*$	Condutividade térmica ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$q$	fluxo de calor ( $W = J/s$ )
$A$	Área da seção transversal ( $m^2$ )
$\Delta t$	Gradiente de temperatura (K ou $^{\circ}C$ )
$L$	Distância percorrida (m)
$\lambda^{* sat}$	Condutividade térmica do solo saturado
$\lambda^{* seco}$	Condutividade térmica do solo seco
$\lambda_e^*$	Número de Kersten
$\lambda_s^*$	Condutividade térmica do solo
$\lambda_w^*$	Condutividade térmica da água
$n$	Porosidade
$S_r$	Grau de saturação do solo

$\gamma_d$	Peso específico do solo seco
$\lambda^* q^q$	Condutividade térmica do quartzo
$\lambda^*_o$	Condutividade térmica de outros minerais
$*q$	Relação da quantidade de quartzo com a fração total dos sólidos
R	Resistividade térmica ( $1/\lambda^*$ )
c	Calor específico (Cal/g°C)
C	Capacidade de aquecimento volumétrico (Cal/cm <sup>3</sup> °C)
$\rho$	Massa específica do solo (g/cm <sup>3</sup> )
$X_s$	Fração de volume dos componentes dos sólidos
$X_w$	Fração de volume dos componentes da água
$X_a$	Fração de volume dos componentes do ar
$C_s$	Capacidade de aquecimento volumétrico do sólido
$C_w$	Capacidade de aquecimento volumétrico da água
$C_a$	Capacidade de aquecimento volumétrico do ar
$\gamma_w$	Peso específico da água
w	Umidade gravimétrica (%)
$\rho_d$	Massa específica seca do solo (g/cm <sup>3</sup> )
D t	Difusividade térmica
$\Delta V_w \Delta t$	Varição de volume da água devido à temperatura
$\alpha_w$	Coefficiente térmico de expansão da água do solo
$V_w$	Volume de água do solo
$\Delta t$	Varição de temperatura
$\Delta V_s \Delta t$	Varição de volume do mineral sólido
$\alpha_s$	Coefficiente térmico de expansão do mineral sólido
$V_s$	Volume dos minerais sólidos
$\Delta V_{DR} \Delta t$	Volume de água drenado devido à variação de temperatura
$\Delta V_m \Delta t$	Varição de volume do corpo de prova devido a variações de temperatura

$\Delta V_{ST}\Delta t$  Variação de volume do corpo de prova devido a variações de temperatura provocado por mudanças nas forças entre partículas

$\alpha_{st}$  Coeficiente físico químico estrutural de variação de volume devido à temperatura

$V_m$  Volume do corpo de prova

## **CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 RELEVÂNCIA DO ESTUDO**

A remediação de solos contaminados por NAPLs é um grande problema ambiental. Apesar da sua baixa solubilidade na água, eles representam uma fonte potencial de contaminação a longo prazo devido à sua elevada toxicidade. Algumas técnicas convencionais como pump and treat (bombear e tratar) e SVE (Soil Vapor Extraction – Extração de vapor do solo) têm se mostrado limitadas em muitos casos, e em particular, para condições muito heterogêneas freqüentemente não alcançam o nível de descontaminação desejado (Ho and Udell, 1992).

A injeção de vapor vem se mostrando uma técnica bastante promissora para remediação de solos contaminados por NAPLs. Várias pesquisas (Hunt et al., 1988a; Betz et al., 1997; Udell and McCarter, 1998) demonstram que é possível a remoção de componentes voláteis e semivoláteis por injeção de vapor em meios porosos saturados ou não.

Esta metodologia consiste em aquecer o solo, por um período de tempo determinado, até uma temperatura suficiente para provocar a volatilização dos contaminantes que são capturados através de poços de extração e encaminhados para sistemas separadores de fases.

No sistema de injeção de vapor pode ocorrer a migração descendente do contaminante. Para superar isto, uma nova tecnologia de injeção conjunta de vapor e ar apresenta-se como uma alternativa interessante. Alguns autores relataram ensaios onde os problemas de migração descendente não ocorreram utilizando-se este novo procedimento (Schmidt et al, 2000, Gudbjerg et al, 2004; Kaslusky e Udell, 2005). Estes autores trabalharam com os contaminantes TCE (tricloroetileno) e PCE (percloroetileno), mesitileno (1,3,5 trimetilbenzeno) e DCB (1,2 diclorobenzeno).

A injeção conjunta de ar-vapor tem como objetivo principal procurar eliminar o fenômeno da migração descendente de contaminante que ocorre quando há injeção apenas de vapor

A escolha deste tema para pesquisa levou em consideração o fato de ser uma tecnologia nova e totalmente limpa, uma vez que tal mecanismo de tratamento do solo usa ar e vapor.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo físico para estudos experimentais da técnica de injeção de mistura ar-vapor para remediação de solos contaminados por VOCs(Compostos orgânicos voláteis). Neste caso, o VOC em estudo foi o tolueno.

Foram feitos ensaios com injeção de ar, vapor e mistura ar-vapor no modelo físico com o objetivo de se estudar as diferenças entre os métodos.

O Tolueno é um dos constituintes do BTEX, principais componentes da gasolina, e tem a menor pressão de vapor dentre estes. Desta forma, a remoção de tolueno pode ser considerada como um limite inferior dos demais componentes.

Na literatura, não há nenhum relato de estudos da técnica de injeção ar e vapor no solo para remediação de solo contaminado com compostos orgânicos voláteis (no caso, o tolueno). O modelo físico desenvolvido inovou com o uso de banho térmico, que melhora, em muito, a condensação dos efluentes gasosos. Uma outra inovação foi a utilização de um sistema à vácuo para diminuição da pressão externa sobre o contaminante e facilitar a volatilização do mesmo.

No Brasil, este é o primeiro modelo físico montado com a finalidade de estudos sobre a técnica de injeção conjunta de ar e vapor para remediação de solos contaminados por VOCs e, mais especificamente, o tolueno.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

O objetivo principal deste trabalho foi compreender o mecanismo de descontaminação de solo através do uso da técnica de injeção mista de vapor e ar no solo para remediação de areias contaminadas por compostos orgânicos voláteis, com o uso de modelo físico.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Montar modelo físico
- Realizar ensaios com o modelo físico usando a técnica de injeção conjunta de ar/vapor.
- Comparar resultados obtidos nos ensaios com valores previstos por modelos teóricos.

## **1.3 ESTRUTURA DA TESE**

Este trabalho está dividido em 7 capítulos, além das referências bibliográficas.

O capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa mostrando a importância do tema, os objetivos dos estudos e sua estruturação.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre compostos orgânicos voláteis, suas principais características e seu comportamento no solo.

O capítulo 3 aborda as principais técnicas de remediação de solos relacionadas com o tema desta pesquisa.

O capítulo 4 aborda o desenvolvimento do modelo físico experimental usado para simular um processo de descontaminação de areias por VOCs (compostos orgânicos voláteis) com injeção conjunta de ar e vapor.

O capítulo 5 trata do programa experimental abordando as propriedades e características do solo e do contaminante utilizado, além dos procedimentos dos ensaios.

O capítulo 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados com o modelo físico, e discussões sobre os resultados estudados.

No capítulo 7, têm-se as conclusões finais do trabalho e recomendações para pesquisas futuras.

## **CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente trabalho aborda o processo de remediação de solos contaminados por NAPLs (light non-aqueous phase liquid ou fase líquida não aquosa leve) através da técnica de injeção conjunta de ar e vapor na massa de solo.

Os tópicos apresentados, a seguir, referem-se às propriedades dos contaminantes e dos solos e ao comportamento destes em relação aos efeitos provocados pelo aumento de temperatura.

### **2.1) PROPRIEDADES DOS LÍQUIDOS IMÍSCÍVEIS**

O fluxo de hidrocarbonetos em meio saturado sempre é bifásico devido ao fato de serem compostos orgânicos que apresentam baixa miscibilidade em água. A fase composta pelos hidrocarbonetos recebe a denominação de NAPL (non-aqueous phase liquid) ou fase líquida não aquosa. De acordo com a densidade do hidrocarboneto existem dois tipos de NAPLs (GUIGUER, 2000):

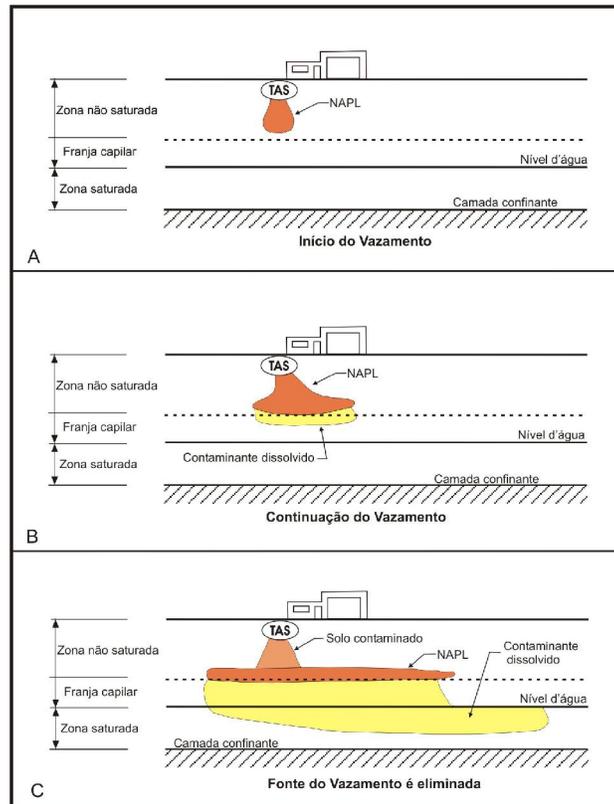
-LNAPL (light non-aqueous phase liquid ou fase líquida não aquosa leve) caracterizada por possuir densidade menor do que a da água. Os hidrocarbonetos com essa característica estão comumente associados com a produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, por exemplo, a gasolina, o óleo diesel e o querosene.

-DNAPL (dense non-aqueous phase liquid ou fase líquida não aquosa densa) caracterizada por possuir densidade maior do que a da água. Os hidrocarbonetos com essa característica estão relacionados principalmente às atividades industriais, onde são utilizados, por exemplo, hidrocarbonetos clorados, PCBs (bifenilas poli-cloradas), antraceno, pireno, e fenol.

Os grandes derrames de hidrocarbonetos geram um fornecimento contínuo de material para a zona não saturada, favorecendo uma contaminação progressiva e contínua e formando uma depressão de interface zona saturada – LNAPL, onde os hidrocarbonetos se acumulam.

No caso de remoção ou esgotamento da fonte de contaminação, os hidrocarbonetos presentes na zona não saturada continuam a migrar para níveis mais profundos,recarregando a depressão localizada sobre o nível da água subsuperficial,

produzindo um espalhamento lateral maior sobre a franja capilar. A Figura 2.1 mostra o caminho percorrido pelo combustível liberado de um tanque subterrâneo até atingir a franja capilar e a formação de uma pluma de contaminação.



TAS = Tanque de armazenamento subterrâneo

Figura 2.1 Infiltração de LNAPL (modificado de Pinder e Abriola, 1986).

Na zona não saturada, os contaminantes podem existir em quatro fases (gás, sorvido ao solo, dissolvido na água ou como líquido imiscível, formando a fase livre), como mostrado na Figura 2.2.

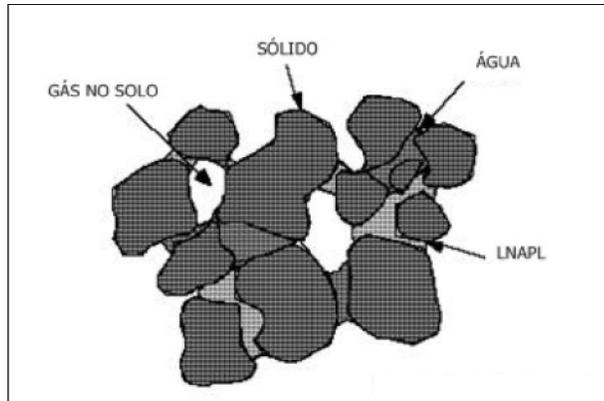


Figura 2.2 Contaminante na zona não saturada pode estar presente em quatro fases: gás, sorvido ao solo, dissolvido na água ou como líquido imiscível, formando a fase livre (Newell et al, 2000).

Os componentes NAPL podem particionar ou se mover de uma fase para outra, dependendo das condições ambientais, como mostrado na Figura 2.3. Por exemplo, componentes solúveis podem se dissolver a partir do NAPL e migrarem para a água subterrânea. A tendência de um contaminante particionar de uma fase para outra pode ser descrita por coeficientes de partição tais como a constante da Lei de Henry para particionamento entre água e gás no solo. Estes coeficientes dependem das propriedades dos materiais de subsuperfície e do NAPL (Newell et al, 1995).

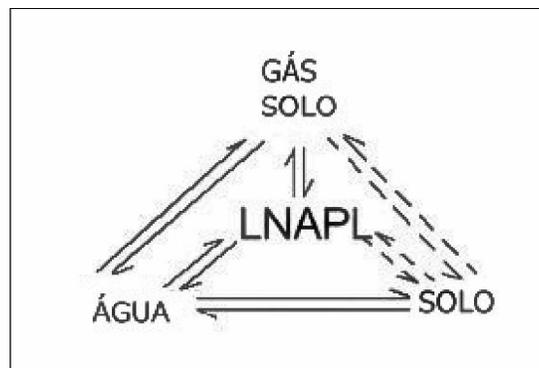
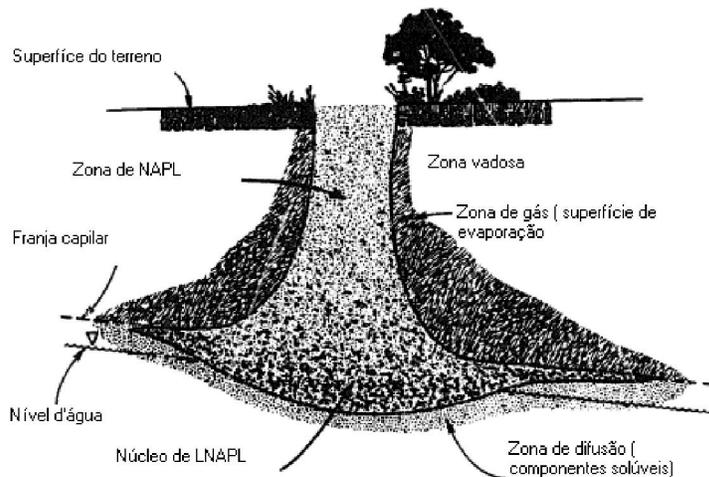


Figura 2.3 Partição de LNAPL entre as quatro fases potencialmente encontradas na zona não saturada.(Newell et al, 1995).

## 2.2) FASES DE CONTAMINAÇÃO

Os hidrocarbonetos, na maior parte de seus componentes, consistem de uma fase pouco solúvel em água. Assim, caso venha a ocorrer um vazamento de combustível em um reservatório de abastecimento, serão observadas diferentes fases de contaminação, de acordo com Mercer e Cohen (1990). Usualmente são definidas quatro fases de contaminação, como mostrado na Figura 2.4.



**Figura 2.4** Infiltração de LNAPL ( Mercer e Cohen, 1990).

As fases consideradas podem ser assim descritas:

### **A) Fase livre**

Em um derramamento de hidrocarbonetos leves no solo, quando o produto atinge a zona saturada, passa a flutuar sobre o lençol freático ou franja capilar. Por possuir densidade menor do que a da água e por ser imiscível, esta fase é chamada de fase livre (Penner,2000)

Dependendo da quantidade de produto que atinge a zona saturada e das características do lençol freático, o peso exercido pelo produto sobre o lençol freático pode deprimir o mesmo reduzindo a sua espessura localmente.

A variação do nível do lençol freático interfere na presença de produto livre e na distribuição do produto residual nas camadas saturada e não saturada. A oscilação do

nível d água resulta em aprisionamento de hidrocarbonetos residuais no solo na zona saturada e um aparente desaparecimento de parte do produto livre, no mesmo instante em que uma nova fase residual é desenvolvida.

#### **B) Fase adsorvida**

Quando combustíveis líquidos são liberados no solo, hidrocarbonetos em fase líquida migrarão descendentemente graças à ação da gravidade e às forças capilares e de adsorção. Devido a forças capilares e diferenças de condutividade hidráulica de cada camada, poderá ocorrer algum tipo de espalhamento horizontal durante o fluxo descendente destes hidrocarbonetos. A presença de camadas de permeabilidade baixa induz a um espalhamento horizontal dos contaminantes em fase líquida nas camadas subjacentes com condutividade hidráulica maior. O material que fica retido no solo, após o fim do movimento descendente de contaminante, é chamado de fase residual (Guiger, 1994).

#### **c) Fase dissolvida**

É formada através do contato entre a água da sub-superfície e os contaminantes líquidos. Os hidrocarbonetos residuais presentes na zona não saturada podem se infiltrar na zona saturada resultando na formação da fase dissolvida. Este fenômeno poderá ocorrer devido as variações no lençol freático.(Penner, 2000):

#### **d) Fase vapor**

A fase vapor resulta da volatilização dos hidrocarbonetos em fase adsorvida presentes na zona não saturada. Estes hidrocarbonetos podem também se volatilizar, em uma escala menor, a partir de hidrocarbonetos em fase livre e/ou fase dissolvida.

Uma parcela de hidrocarbonetos em fase de vapor pode aderir ao solo ou ser adsorvida. Nota-se que a água gera uma redução drástica na capacidade de adsorção do solo para hidrocarbonetos em fase de vapor. Em um solo seco ou com baixa umidade, a quantidade adsorvida está diretamente relacionada à área da superfície específica do solo e à quantidade de matéria orgânica (Penner,2000).

## 2.3 PARÂMETROS BÁSICOS PARA O ESTUDO DO TRANSPORTE DE LNAPLS

### 2.3.1 TENSÃO INTERFACIAL

No interior dos líquidos, a partir de uma dada profundidade, todas as moléculas são atraídas mutuamente umas pelas outras, conforme visto na Figura 2.5. Ao se trabalhar com sistemas multifásicos, é necessário considerar o efeito das forças que atuam na interface formada pelo contato de dois fluidos imiscíveis. As moléculas que se encontram nesta interface estão sujeitas às forças de atração das moléculas localizadas acima e abaixo da interface. A resultante das forças que atuam sobre a molécula é a chamada tensão interfacial (Delgado, 2000).

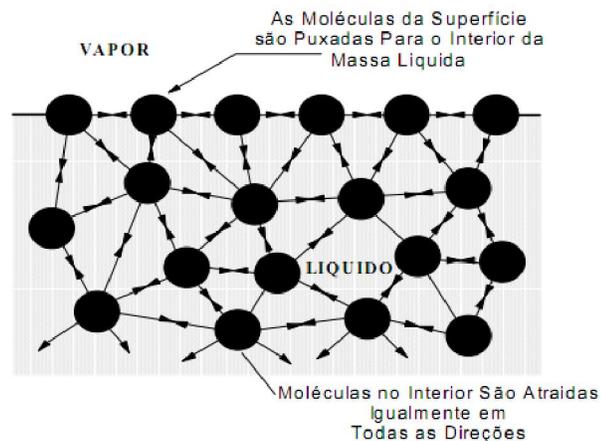


Figura 2.5 Representação Esquemática da Tensão Interfacial. (Delgado, 2000).

No caso do contato de um fluido com o seu vapor saturante, a tensão interfacial é denominada de tensão superficial. A tensão superficial é uma característica do fluido a uma determinada temperatura, enquanto que a tensão interfacial depende também da substância com a qual o fluido entra em contato (Delgado, 2001).

A tensão interfacial controla a molhabilidade pois está diretamente relacionada com o processo capilar através da interface entre fluidos imiscíveis.

### 2.3.2 MOLHABILIDADE

A molhabilidade consiste no espalhamento de um fluido sobre superfícies sólidas em um sistema de dois fluidos. Enquanto o fluido molhante tende a cobrir a superfície dos grãos e ocupa os menores poros no meio poroso, o fluido não molhante tenderá a preencher os poros com maiores aberturas. A tendência de um fluido deslocar um outro numa superfície sólida determina a molhabilidade relativa dos fluidos em relação à superfície sólida. É função da tensão interfacial, sendo dependente do ângulo de contato entre os meios.

Para sistemas que envolvam a presença de fluidos imiscíveis, é necessário considerar não só a interface entre um gás e um líquido, mas também as forças que estão atuando na interface de duas fases líquidas imiscíveis, e entre os líquidos e a superfície sólida. A combinação de todas estas forças determina tanto a molhabilidade como a tensão interfacial do meio poroso entre as fases.

A tensão de adesão, que é função da tensão interfacial, determina qual fluido molhará de forma preferencial a superfície sólida. Na Figura 2.6A é mostrado um diagrama onde dois líquidos, óleo e água, estão em contato com uma superfície sólida.

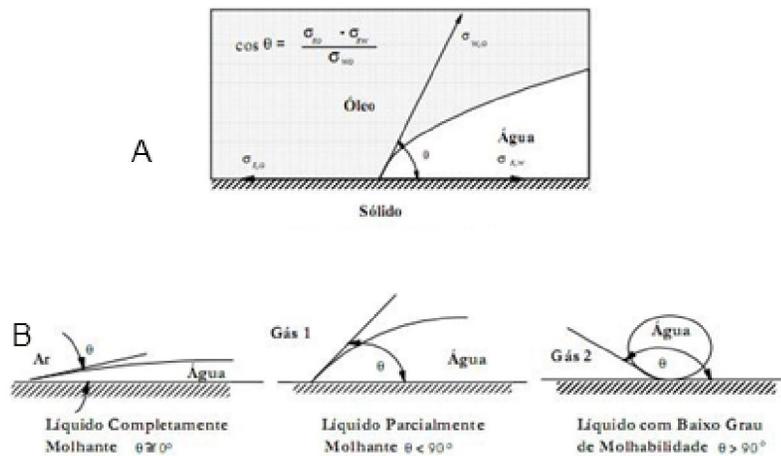


Figura 2.6 Situações de molhagem (Delgado,2000).

Na Figura 2.6B são apresentadas algumas situações de molhagem considerando-se a água, o ar e dois gases quaisquer em contato com um dado sólido.

Por convenção o ângulo de contato  $\theta$  é medido através da fase líquida mais densa, e pode variar entre 0 e 180°. Baseada nesta convenção, a tensão de adesão é definida como:

$$A_t = \sigma_{so} - \sigma_{os} = \sigma_{wo} \quad 2.1$$

Onde:

$A_t$  tensão de adesão;

$\sigma_{so}$  tensão interfacial entre o sólido e a fase menos densa (óleo);

$\sigma_{os}$  tensão interfacial entre o sólido e a fase mais densa (água);

$\sigma_{wo}$  tensão interfacial entre os fluidos.

Uma tensão de adesão positiva indica que a fase mais densa molhará de forma preferencial a superfície sólida. Uma tensão de adesão zero indica que ambas as fases possuem igual afinidade pela superfície sólida. Desta forma, a magnitude da tensão de adesão determina a capacidade que a fase molhante tem de se espalhar sobre uma superfície sólida. No caso de o valor da tensão de adesão ser elevada ou o ângulo de contato pequeno, a fase mais densa irá se espalhar tendendo a cobrir a superfície. Por outro lado, se o ângulo de contato é elevado ( $\theta > 90^\circ$ ), uma fonte de energia externa será necessária para que a fase mais densa se espalhe sobre a superfície sólida.

### 2.3.3 PRESSÃO CAPILAR

A pressão capilar é definida como a diferença entre a pressão do fluido não molhante e a pressão do fluido molhante e está relacionada com a tensão interfacial, ângulo de contato e tamanho do poro (Bear, 1979), através das seguintes equações:

$$P_c = P_{nw} - P_w \quad 2.2$$

$$P_c = \frac{2\sigma}{r} \cos\theta \quad 2.3$$

Onde:

$P_c$  pressão capilar

- $P_{nw}$  pressão na fase não molhante;
- $P_w$  pressão na fase molhante;
- $\sigma$  tensão superficial entre as fases;
- $\theta$  ângulo de contato;
- $r$  raio de curvatura do menisco.

A pressão necessária para a fase não molhante penetrar em um meio poroso saturado com uma fase molhante, é chamada de pressão de entrada. Para os solos saturados com água, esta pressão é denominada de pressão de borbulhamento. Quando a fase não molhante desloca a fase molhante ocorre o processo de drenagem. Quando ocorre o inverso, tem-se o processo de embebição, como mostrado na Figura 2.7.

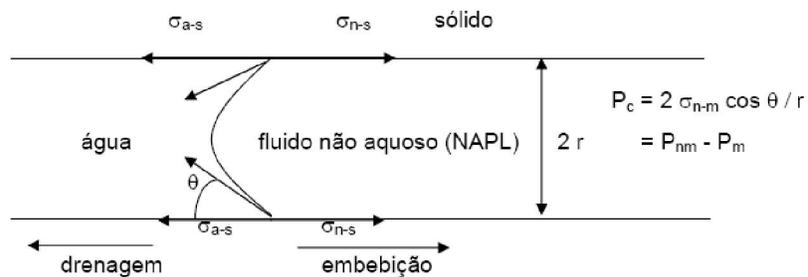


Figura 2.7 Conceito de Pressão Capilar (CHATZIS, 1983).

A pressão capilar pode ser apresentada em função da saturação, como mostrado na Figura 2.8. A relação entre pressão capilar e saturação apresenta um caráter histerético podendo ter diferentes valores se o equilíbrio se dá por avanço ou por retrocesso do fluido molhante sobre a superfície.

Para um determinado valor de  $P_c$  (em um mesmo valor de potencial mátrico) existirão dois valores limites de saturação: o maior valor corresponde ao processo de drenagem e o menor ao processo de embebição.

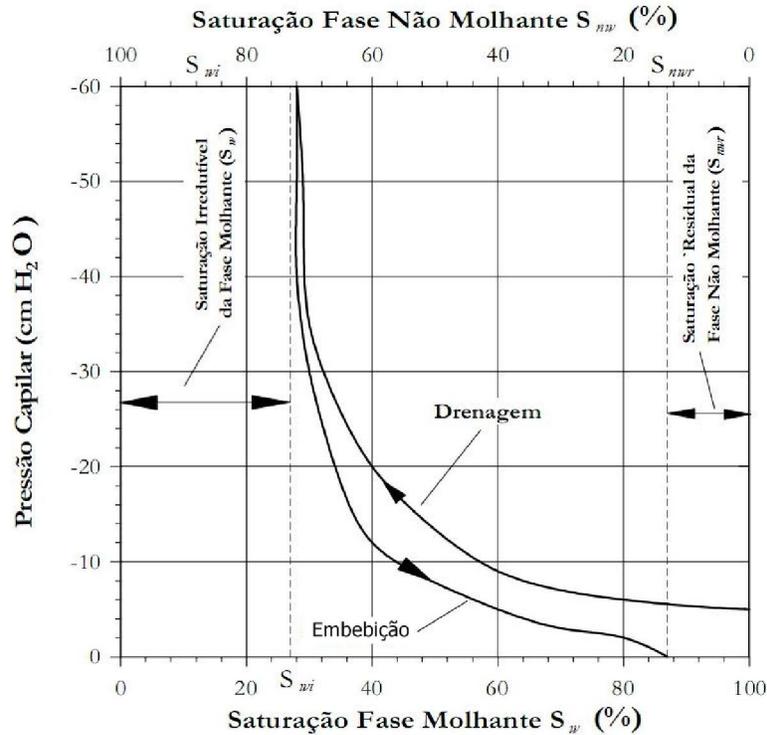


Figura 2.8 Relação Pressão capilar – Saturação (Fetter, 1992).

Durante o processo de drenagem, os poros maiores drenam mais rapidamente enquanto os poros menores oferecem maior resistência. Esta retenção capilar é uma das razões que pode explicar porque, para o mesmo grau de saturação, a pressão capilar é maior no processo de drenagem (Mercer & Cohen, 1990).

Mesmo para altos valores da pressão capilar, existe uma saturação residual do fluido molhante,  $S_{wr}$ , que permanece, conforme mostrado na Figura 2.8.

Desta forma, pode-se afirmar que a saturação depende não somente da pressão capilar, mas também da história de saturação do meio poroso considerado.

### 2.3.4 SATURAÇÃO

A saturação de um fluido é a fração do volumetotal de poros total ocupado por ele. A parte da fase molhante que fica retida no meio, mesmo sob altos valores de pressão capilar denomina-se saturação irreduzível ( $S_{wi}$ ) ou residual. O tamanho das partículas que compõem o meio poroso afeta o grau de saturação irreduzível da fase molhante: quanto menor o tamanho das partículas, maior será  $S_{wi}$  (Delgado, 2000).

A curva pressão capilar × saturação (figura 2.8) apresenta um valor mínimo de saturação da fase molhante no processo de drenagem denominado saturação residual ( $S_{rw}$ ) ou saturação irreduzível ( $S_{iw}$ ) da fase molhante, e um valor mínimo para a fase não molhante no processo de embebição denominada Saturação residual ( $S_{rnw}$ ). Esta saturação residual é resultante da ação das forças capilares, e sua magnitude é dependente de diversos fatores, entre os quais se podem citar distribuição granulométrica do meio poroso, mineralogia, molhabilidade, relações de viscosidade e densidade entre as fases, e gradientes hidráulicos. (Delgado, 2000).

### 2.3.5 PERMEABILIDADE

Para solos saturados, Taylor (1948) sugere a seguinte equação para calcular a permeabilidade em função da viscosidade e do peso específico do fluido que irá percolar o solo:

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad 2.4$$

Onde:

KL	permeabilidade geométrica
k	permeabilidade Darcy
$\gamma$	Peso específico
$\mu$	Viscosidade

Desta forma, pode-se obter o valor de K em função de  $\gamma$  e  $\mu$ . Para calcular a permeabilidade de um outro fluido, pode-se utilizar o valor obtido de K obtido e usar os parâmetros de peso específico e viscosidade do fluido em questão.

Assim, tem-se:

$$k_f = K \frac{\mu_f}{\gamma_f} \quad 2.5$$

### 2.3.6 PERMEABILIDADE RELATIVA

A permeabilidade relativa é a relação entre a permeabilidade efetiva do meio em relação a um fluido em uma saturação específica e a permeabilidade do meio em

relação ao fluido em uma saturação de 100 %. Os valores de permeabilidade relativa variam entre 0 e 1. Um diagrama simplificado de permeabilidade relativa para um hipotético sistema LNAPL/água, apresentado na Figura 2.10, mostra como se dá a variação de permeabilidade relativa com saturação de cada fase.

As curvas mostram que uma saturação mínima deve existir antes da permeabilidade a um fluido ser considerada não-zero (Schwille,1984). A saturação mínima para o fluido molhante é chamada de saturação irreduzível ( $S_{iw}$ ) e para o fluido não-molhante, geralmente o NAPL, tem sido chamada de saturação residual.

As curvas de permeabilidade relativa (Figura 2.10) podem ser usadas para descrever diferentes tipos de regimes de fluxo multifásicos que podem existir em um sítio particular (Williams and Wilder, 1971):

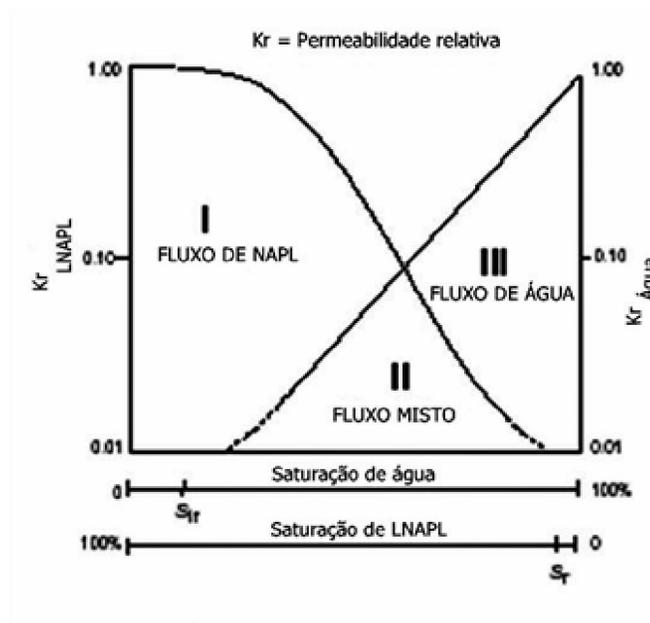


Figura 2.10 Curvas de permeabilidade relativa hipotéticas para água e LNAPL em um meio poroso ( Depois de Williams e Wilder,1971).

Zona I:LNAPL ocorre em uma fase contínua, potencialmente móvel e a saturação é alta. Água está restrita a pequenos poros. A permeabilidade relativa da água é baixa. Estas condições podem ser observadas em grandes acumulações de NAPL móveis.

Zona II: Ambos o LNAPL e a água ocorrem com uma fase contínua. A permeabilidade relativa de cada fluido é muito reduzida pela saturação do outro fluido.

Estas condições podem ser representativas de zonas de acumulações de produtos menos molháveis no lençol de água.

Zona III: LNAPL é descontínuo e aprisionado como residual em poros isolados. O fluxo é quase que exclusivamente do movimento da água, não do LNAPL. Exemplos de tais condições podem ser encontradas no interior de zonas de LNAPL residual retidas abaixo do lençol d água.

## **2.4 VOCS (COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS)**

Em 1989, a Organização Mundial de Saúde definiu compostos orgânicos voláteis (VOCs) como sendo todos os compostos orgânicos com ponto de ebulição na faixa entre 50 e 260 °C, excluindo pesticidas e incluindo diclorometano (p. e. = 41 °C)

As propriedades físico-químicas que mais exercem influência sobre a mobilidade dos hidrocarbonetos são a massa molecular, a solubilidade em água, a pressão de vapor e os coeficientes de partição entre os meios, como a constante da Lei de Henry e os coeficientes de partição octanol/água e carbono orgânico/água (Schwarzenbach et al.,1993).

A massa molecular se relaciona à densidade e à solubilidade dos compostos orgânicos em água da seguinte forma: quanto maior a massa molecular, maior será a densidade relativa do composto. Os compostos mono aromáticos, geralmente, possuem densidades relativas menores que a densidade da água e, assim, tendem a flutuar no topo do lençol freático.

A solubilidade representa a máxima concentração de um composto dissolvido na água, a uma dada temperatura, sendo considerada um parâmetro importante, pois influencia a distribuição do contaminante na subsuperfície: moléculas altamente solúveis são rapidamente distribuídas na água subterrânea e tendem a ser menos volatilizadas. A solubilidade de um composto orgânico na água, geralmente, diminui com o aumento do comprimento das cadeias de carbono (Wiedemeir et al,1999).

A pressão de vapor e a constante da Lei de Henry são duas medidas da tendência de um sólido ou líquido se volatilizarem e são importantes para estimar a liberação do composto para a fase de vapor (Schwarzenbach et al.,1993).

O coeficiente de partição octanol/água ( $K_{ow}$ ) é definido como a razão da concentração de um composto orgânico dissolvido entre o octanol e a água, em equilíbrio.

O  $K_{oc}$  (coeficiente de partição carbono orgânico/água) mede o potencial de sorção, ou seja, o potencial de um contaminante orgânico se adsorver à matéria orgânica presente no solo. Ele é importante no conhecimento da mobilidade de um composto orgânico na matriz sólida de um aquífero. Quanto menor seu valor, maior o potencial de lixiviação do contaminante do solo para a água (Bedient et al., 1994).

#### 2.4.1 PRINCIPAIS COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

Dentre os VOCs, os de maior interesse são os compostos de benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno, conhecidos como BTEX, por apresentarem altos índices de toxicidade.

Os compostos chamados BTEX (Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno(orto, meta e para)) são os constituintes da gasolina que têm maior solubilidade em água. Em contato com a água subterrânea, a gasolina se dissolve parcialmente, liberando estes contaminantes que serão os primeiros a atingir o lençol freático (Corseuil e Martins, 1997). Tais contaminantes são considerados substâncias perigosas por serem depressoras do sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas.

Em geral, os compostos BTEX fazem parte da constituição da gasolina brasileira nas proporções apresentadas na Tabela 2.1.

**TABELA 2.1 Frações molares dos compostos BTEX na gasolina (Corseuil et al. (2004)).**

<b>Hidrocarboneto</b>	<b>Fração molar</b>
Benzeno	7,80
Tolueno	4,20
Etilbenzeno	1,70
Orto-xileno	1,11

## 2.5 SOLOS NÃO SATURADOS

O solo não saturado é definido como sendo composto por um sistema trifásico (Lambe e Whitman, 1969), sendo uma fase sólida (minerais), uma fase líquida (geralmente, a água) e a fase gasosa (ar). Fredlund e Morgenstern, em 1977, introduzem o conceito da quarta fase independente, relacionada à interface ar-água, chamada de membrana contráctil. A seguir, é apresentado um elemento de solo não saturado idealizado.

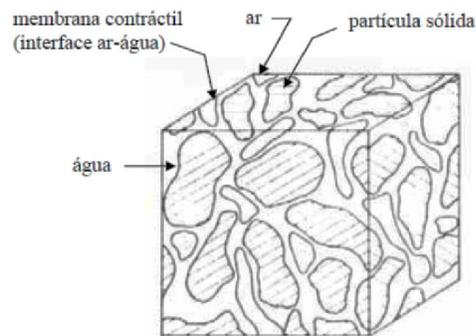


Figura 2.11 Elemento de solo não saturado com fase contínua de ar (adaptado de Fredlund e Rahardjo, 1993).

A interface ar-água possui a propriedade da tensão superficial que faz com que a membrana contráctil se comporte como uma membrana elástica. Quando a fase de ar é contínua, a membrana contráctil interage com as partículas de solo, influenciando o comportamento mecânico do solo.

### 2.5.1 TEOR DE ÁGUA DO SOLO

A fase líquida (água) pode ocupar, parcialmente ou totalmente, os poros do solo. Quando o espaço poroso está totalmente ocupado de água, o solo é dito solo saturado (LIBARDI, 1999). O solo não saturado é aquele cujo espaço é parcialmente ocupado com água e parcialmente cheio com ar. De modo geral, os solos se encontram não saturados de água.

A umidade do solo é o índice mais básico para quantificar a água em uma amostra de solo. A umidade do solo pode ser expressa de duas maneiras: gravimétrica ou ( $\mu$ ), ou volumétrica ( $\theta$ ) (LIBARDI, 1999).

A umidade gravimétrica é obtida pela equação:

$$\mu = \frac{m_u - m_s}{m_s} \quad 2.6$$

$m_s$  massa de solo seco (g)

$m_u$  massa de solo úmido (g)

A umidade volumétrica será dada pela equação:

$$\theta = \left( \frac{m_u - m_s}{V} \right) / d_w \quad 2.7$$

Onde:

$m_u$  massa de solo úmido(g)

$m_s$  massa de solo seco (g)

$V$  Volume de solo (  $\text{cm}^3$ )

$d_w$  densidade da água (  $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Para cálculos que envolvam água no solo,  $\theta$  é mais usada do que  $\mu$ . De (2.6) e (2.7) pode-se escrever:

$$\theta = \mu \frac{m_s}{V} \quad 2.8$$

Como  $\frac{m_s}{V}$  é a densidade do solo, para obter o valor da umidade volumétrica  $\theta$ , a partir de  $\mu$ , basta multiplicar o valor de  $\mu$  pela densidade do solo  $d_s$ .

$$\theta = \mu d_s \quad 2.9$$

O teor de água do solo possui valores extremos, teor de água residual ( $\theta_r$ ) e teor de água saturado ( $\theta_s$ ) onde ( $\theta_r$ ) é a umidade residual na qual a presença de água é praticamente nula e  $\theta_s$  é a umidade de saturação do solo.

De acordo com Slatier (1967), existem dois mecanismos principais pelos quais a água é retirada no solo, que são provenientes das interfaces ar - líquido e sólido - líquido. A tensão superficial é a principal força atuante na interface ar - água e desenvolve interfaces curvas nas proximidades das partículas.

Através do fenômeno de capilaridade e absorção, a água é retirada do solo pelos seus poros (Reichardt, 1990). A capilaridade está ligada à afinidade entre as partículas sólidas do solo e a água, havendo, porém, a necessidade de interfaces

água – ar, denominados meniscos, que apresentam uma curvatura que é tanto maior quanto menor o poro. A capilaridade tem sua retenção de água nos solos quando os poros se apresentam razoavelmente cheios de água. Quando um solo se seca, os poros vão se esvaziando e filmes de água recobrem as partículas sólidas.

## 2.5.2 POTENCIAL DE ENERGIA DA ÁGUA NO SOLO

A água no estado líquido move-se quando ocorrem diferenças de energia potencial entre as posições de um sistema, sendo o movimento no sentido do decréscimo do potencial. No solo e na planta, a velocidade da água é relativamente pequena e, por isso, sua energia cinética é geralmente desprezada. A energia da água pode ser também gravitacional, isto é, a energia relacionada com a posição do corpo em função de campos de força como o campo gravitacional, também conhecida como a energia potencial gravitacional (Libardi, 1999).

O estado de energia dentro do solo considera outros campos de força, além do gravitacional, responsáveis pelos fenômenos de tensão superficial, capilaridade, adsorção, etc.

Esses fenômenos são os resultados da interação entre as partículas sólidas do solo, que são organizadas na matriz do solo e a água. Como é difícil separar todos estes fenômenos intrínsecos, eles são considerados em conjunto e de sua atuação resulta a energia potencial, chamada matricial. A energia potencial total da água é a soma das citadas. É chamada potencial total da água ( $\psi$ ) e cada uma de suas partes é uma componente. Assim: .

$$\Psi = \Psi_g + \Psi_p + \Psi_m + \Psi_0 + \dots \quad 2.10$$

Onde:

$\Psi_g$  Potencial gravitacional (cm H<sub>2</sub>O)

$\Psi_p$  Potencial de pressão (cm H<sub>2</sub>O)

$\Psi_m$  Potencial matricial (cm H<sub>2</sub>O)

$\Psi_0$  Potencial osmótico (cm H<sub>2</sub>O)

O potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) é resultado da ação da força da gravidade. Adota-se um plano como referência (a superfície do solo), onde a energia é nula, positiva

acima e negativa abaixo deste referencial. A energia potencial gravitacional é dada por:

$$\Psi_g = d_w \cdot g \cdot z \quad 2.11$$

$d_w$  Densidade da água (g/cm<sup>3</sup>)

$g$  força da gravidade ( m/s<sup>2</sup>)

$z$  altura (cm)

O potencial de pressão ( $\Psi_p$ ) é a pressão a que água está submetida e é energia por volume. A pressão em um ponto situado a uma profundidade é dada por:

$$\Psi_p = d_s \cdot g \cdot h \quad 2.12$$

Onde:

$d_s$  Densidade do solo (g/cm<sup>3</sup>)

$g$  força da gravidade ( m/s<sup>2</sup>)

$h$  profundidade (cm)

Em um solo saturado a adsorção é nula e, nesse caso, o componente matricial  $\Psi_m = 0$ . Contudo, quando o solo vai se tornando não saturado o potencial matricial fica cada vez mais negativo.

O potencial osmótico ( $\Psi_o$ ) está relacionado à presença de membranas semipermeáveis das plantas. No solo não existem membranas semipermeáveis e a componente do potencial osmótico não é considerada para o movimento de água.

### 2.5.3 PERMEABILIDADE

Permeabilidade ou condutividade hidráulica têm significados idênticos porque refletem a capacidade de um solo se deixar atravessar pela água. A condutividade hidráulica é função do teor de água no solo e é máxima em condição de saturação. Na medida em que a umidade diminui, a condutividade hidráulica decresce normalmente na forma exponencial (Libardi, 1995).

A condutividade hidráulica depende das propriedades que têm reflexo na geometria da porosidade disponível para o fluxo, tais como a distribuição do tamanho e forma de partículas, a tortuosidade do sistema, a superfície específica, a umidade,

entre outras. Quanto ao fluído, a sua viscosidade é o fator mais importante (Jury et al.,1991; Libardi, 1995).

A condutividade hidráulica é também altamente dependente do teor de água volumétrico (Libardi e Melo Filho,2006) ou do potencial matricial da água no solo.

Segundo Hurtado et al.(2005), a condutividade hidráulica tem seu valor máximo no solo saturado e é altamente dependente da umidade. À medida que o teor de água diminui e o potencial matricial se torna mais negativo, esta condutividade decresce rapidamente.

Para estabelecer uma correlação entre  $\theta$ ,  $\psi_m$  e  $k$ , Van Genuchten (1980) propôs a seguinte equação que relaciona o teor de água com o potencial matricial da água no solo.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + |\alpha \psi_m|^n]^m} \quad 2.13$$

Onde:

$\theta_s$  Teor de água volumétrico saturado ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )

$\theta_r$  Teor de água volumétrico residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )

$a, m, n$  parâmetros reais.

O teor de água adimensional ( $\Theta$ ) é expresso por:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad 2.14$$

Substituindo 2.12 em 2.11, tem-se:

$$\Theta = \frac{1}{[1 + |\alpha \psi_m|^n]^m} \quad 2.15$$

Assim, o potencial matricial será expresso por:

$$\psi_m = \frac{1}{\alpha} \sqrt[n]{\Theta^{-1/m} - 1} \quad 2.16$$

A equação 2.16 é conhecida como Curva característica, Equação de Van Genuchten ou curva de retenção de água.

Para a estimativa de  $\kappa(\theta)$ , considerando-se o modelo de Mualem (1976), onde os parâmetros  $m$  e  $n$  são dependentes, com  $m = 1 - 1/n$ , Van Genuchten (1980)

demonstrou que a condutividade hidráulica pode ser expressa como uma função do teor de água volumétrico. Assim, tem-se:

$$k(\theta) = k_0 \theta^l \left[ 1 - \left( 1 - \theta^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad 2.17$$

Onde:

$k$	Condutividade hidráulica do solo não saturado ( cm.h-1)
$k_0$	Condutividade hidráulica do solo saturado (cm.h-1)
$m$	parâmetro real
$l$	parâmetro empírico

$l$  é um parâmetro empírico proposto por Mualem (1976) e dependente de propriedades específicas do solo-fluido e pode variar consideravelmente para diferentes tipos de solo. Utilizando dados de permeabilidade relativa de 45 solos, este autor encontrou um valor ótimo como sendo igual a 0,5, o qual minimiza as discrepâncias entre os valores medidos e estimados.

#### 2.5.4) CURVA CARACTERÍSTICA DA ÁGUA NO SOLO

A curva característica de retenção de água é uma propriedade ou característica físico hídrica do solo que relaciona o conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) e o potencial matricial do solo ( $\psi_m$ ). Essa curva é típica para cada solo, variando de acordo com a classe de textura do solo, o conteúdo de matéria orgânica, o grau de compactação, a classe de solo, a geometria dos poros e outras propriedades físicas do solo.

A curva característica pode ser utilizada para fornecer parâmetros importantes para a descrição do comportamento do solo não saturado, tais como o coeficiente de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, variação do volume, transporte de contaminantes na zona não saturada. Em geral a relação entre estes parâmetros e a sucção é feita em termos de sucção mátrica.

Segundo Freire (1975), as curvas características de retenção de água são específicas para cada solo, a retenção é uma expressão da capacidade do solo para armazenar água. De acordo com Freire (1975), vários atributos do solo podem influenciar na retenção de água com maior ou menor intensidade, sendo mais importante as seguintes: a umidade, a textura, o tamanho e distribuição de poros, o conteúdo de matéria orgânica e de óxidos de ferro livre.

Muitos fatores interferem na capacidade de retenção de água de um solo. Reichardt (1990) considera como o principal deles o tipo de solo, pois este define a área de contato entre as partículas sólidas e a água e determina as proporções de poros de diferentes tamanhos. Outros fatores são a estrutura e composição mineralógica do solo.

Pode-se considerar dois processos básicos que explicam a retenção de água pelo solo:

**Capilaridade:** ocorre nos microporos, sendo mais importante na faixa mais úmida do solo e é mais influenciada pela estrutura do solo;

**Adsorção:** ocorre nas superfícies dos sólidos como filmes presos a elas, sendo mais importante na faixa mais seca do solo e é mais influenciada pela textura e pela superfície específica do solo (Reichardt, 1990; Libardi, 1999).

Para baixos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo depende, principalmente, dos efeitos de capilaridade, que estão diretamente ligados com a distribuição granulométrica e estrutura do solo. Para altos valores de sucção, a quantidade de água retida no solo dependerá dos mecanismos de adsorção, que são influenciados pela composição mineralógica e pela superfície específica das partículas (Fredlund e Xing, 1994).

Os solos arenosos apresentam pequena variação nos diâmetros dos poros, dessaturando rapidamente após o valor da entrada de ar. Os solos argilosos dessaturam de forma mais lenta, apresentando uma inclinação da curva mais suave e uma distribuição nos vazios dos solos não-uniforme. A Figura 2.12 apresenta curvas de retenção para três solos típicos: areia, silte e argila.

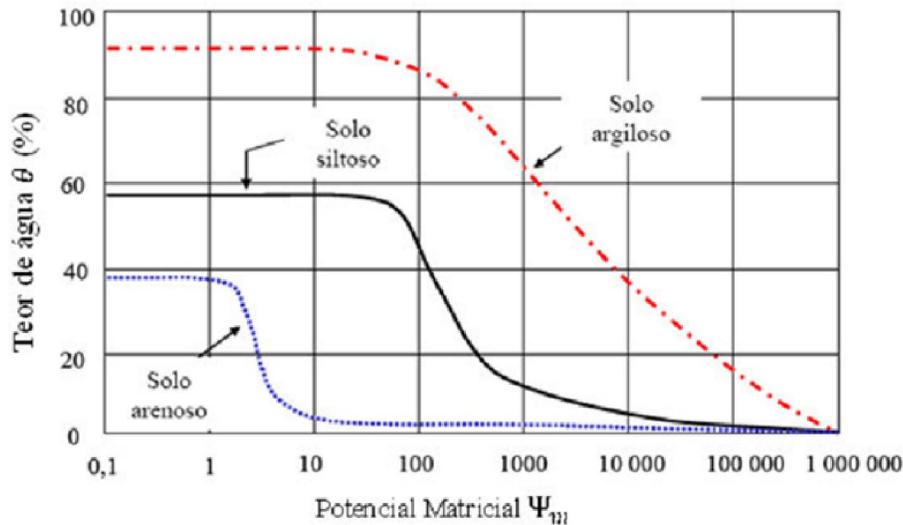


Figura 2.12: Curvas de retenção típicas para diferentes solos (Fredlund e Xing, 1994).

A posição relativa da Curva de Retenção obedece geralmente à ordem da plasticidade do solo.

Um dos modelos matemáticos mais utilizados é o modelo descrito pela Equação (2.15), conhecido como modelo de Mualem-Van Genuchten, que relaciona a umidade à base de volume ao valor absoluto do potencial matricial

A retenção de água no solo, assim como outras propriedades hidráulicas, apresenta variabilidade elevada. Ao se confeccionar a curva de retenção de um solo podem ocorrer erros consideráveis se poucas amostras forem utilizadas, ou se elas forem mal coletadas ou mal trabalhadas. A variância das leituras e a variabilidade espacial devem sempre ser observadas em trabalhos com a curva de retenção. A rotina de laboratório para determinação dos pontos para compor a curva de retenção também deve ser executada com cuidado. Um mau contato das amostras com as placas porosas e falhas na determinação do volume ou da umidade correspondente a certo potencial podem alterar sensivelmente o padrão final da curva obtida ou aumentar a dispersão dos pontos, e em consequência a variância ou a incerteza da (Libardi, 1999).

### 2.5.4.1 EQUAÇÕES PARA A CURVA CARACTERÍSTICA DE SUÇÃO

Várias fórmulas empíricas têm sido propostas para simular a curva característica de sucção de um solo. Brooks e Corey (1964) foram os primeiros pesquisadores a propor uma equação para definir a forma da curva característica

$$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda \quad 2.18$$

Com

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad 2.19$$

Onde

$\theta_s$	Umidade volumétrica
$\theta_r$	Umidade residual
$\psi$	Sucção
$\psi_b$	Valor de entrada de ar
$\lambda$	Índice relacionado com tamanho de partículas.

Outros pesquisadores propuseram equações para simular a forma da curva característica de sucção, como William et al (1983), McKee e Bumb (1984,1987), VanGenuchten (1980), Gardner(1958) e Fredlund e Xing (1994). Algumas destas propostas estão resumidas na tabela 2.2.

Tabela 2.2 Algumas equações propostas para a curva característica de sucção

Autor(es)	Equação	Parâmetros do solo
Burdine, 1953	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_b}\right)^{n_b}\right]^{m_b}}$	$a_b, n_b, m_b = 2/(1 - n_m)$
Gardner, 1958	$w = \frac{w_s}{1 + \left(\frac{\psi}{a_g}\right)^{n_g}}$	$a_g, n_g$
Maulem, 1976	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_m}\right)^{n_m}\right]^{m_m}}$	$a_m, n_m, m_m = 1/(1 - n_m)$
Van Genutchen, 1980	$w = \frac{w_s}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a_{vg}}\right)^{n_{vg}}\right]^{m_{vg}}}$	$a_{vg}, n_{vg}, m_{vg}$
Fredlund e Xing, 1994	$w = C(\psi) \frac{w_s}{\left[\ln\left(1 + \left(\frac{\psi}{a_f}\right)^{n_f}\right)\right]^{m_f}}$	$a_f, n_f, m_f, C(\psi)$

Os parâmetros  $a$ ,  $n$  e  $m$  são parâmetros de ajuste que dependem do tipo de solo e,  $w_s$  é o conteúdo de umidade correspondente com um grau de saturação de 100 %.

Fredlund & Xing (1994) partem da distribuição granulométrica do solo para obter uma equação que descreva a variação da sucção com o conteúdo de umidade volumétrica. Com este modelo, e considerando que o valor de sucção correspondente a um teor de umidade zero é igual a 106 KPa, eles acham uma equação que descreve esta relação.

A equação obtida por Fredlund & Xing (1994) é a seguinte:

$$\theta(\psi, a, m, n) = C(\psi) \frac{\theta_s}{\{\ln[e+(\psi/a)^n]\}} \quad 2.20$$

$$C(\psi) = \frac{-\ln(1+\frac{\psi}{\psi_r})}{\ln[1+(1.000.000/\psi_r)]} + 1 \quad 2.21$$

Onde:

$\theta_s$  Umidade volumétrica correspondente ao grau de saturação de 100%

$C(\psi)$  Função de correção para limite superior de sucção

$\psi_r$  Sucção correspondente ao conteúdo de umidade volumétrica residual

Os parâmetros  $n$ ,  $m$  e  $a$  são parâmetros de ajuste, e podem ser obtidos com o auxílio de procedimentos gráficos, como está mostrado na figura 2.13.

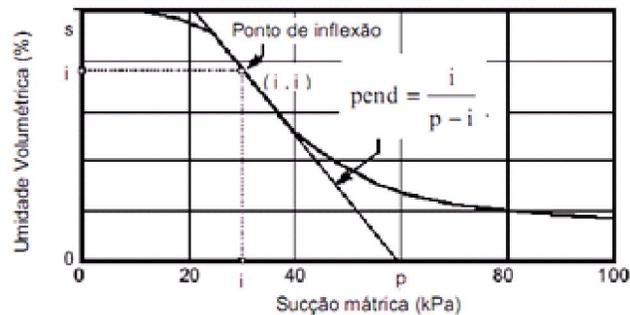


Figura 2.13 Procedimentos gráficos para obter os parâmetros  $a, n, m$  e  $\psi_r$  (adaptado de Fredlund e Xing, 1994).

A partir dos valores obtidos da curva, os parâmetros  $a, n, m$  e  $\psi_r$ , podem ser obtidos como:

$$a = \psi_i \quad 2.22$$

$$m = 3,6711 \ln \left[ \frac{\theta_s C(\psi_i)}{\theta_i} \right] \quad 2.23$$

$$n = \frac{1,31^{m+1}}{mC(\psi_i)} 3,72s^* \quad 2.24$$

$$s^* = \frac{s}{\theta_s} - \frac{\psi_i}{1,31^m (\psi_i + \psi_r) \ln[1 + (1.000.000/\psi_r)]} \quad 2.25$$

$$s = \frac{\theta_i}{\ln\left(\frac{\psi_p}{\psi_i}\right)} \quad 2.26$$

## 2.6 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS SOLOS

A aplicação de técnicas de remediação térmicas em áreas contaminadas exige conhecimentos detalhados sobre as propriedades térmicas dos solos. Estudos sobre as propriedades físico-químicas, hidráulicas e térmicas de solos submetidos a altos gradientes de temperatura devem ser considerados (Duarte ,2004).

### 2.6.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A condutividade térmica ( $\lambda^*$ ) de um solo é a quantidade de calor que passa numa unidade de tempo através de uma seção transversal unitária, devido a um gradiente de temperatura imposto na direção do fluxo, como mostrado na equação 2.27 (Pessoa,2006).

$$\lambda^* = \frac{q}{A \times (\Delta T / l)} \quad 2.27$$

Onde:

$\lambda^*$  Condutividade térmica ( $W.m^{-1}.K^{-1}$ )

q Fluxo de calor (W)

A Área da seção transversal ( $m^2$ )

$\Delta T$  Gradiente de temperatura (K )

l Distância percorrida (m)

A determinação da condutividade térmica supõe uma condição de fluxo permanente de calor, na qual a temperatura em um dado ponto do solo não varia em função do tempo.

A Figura 2.14 mostra um esquema de fluxo de calor através de um elemento de corpo sólido

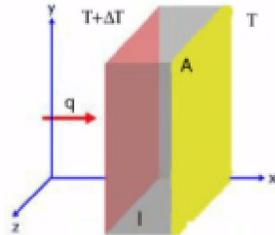


Figura 2.14 Esquema do fluxo de calor através de um elemento prismático de solo. (Pessoa, 2006)

Duarte (2004) estudou a influência de fatores como teor de umidade e grau de saturação, densidade seca, concentração de sais e temperatura na condutividade térmica dos solos. A Figura 2.15 apresenta resultados de condutividade térmica encontrados por vários autores.

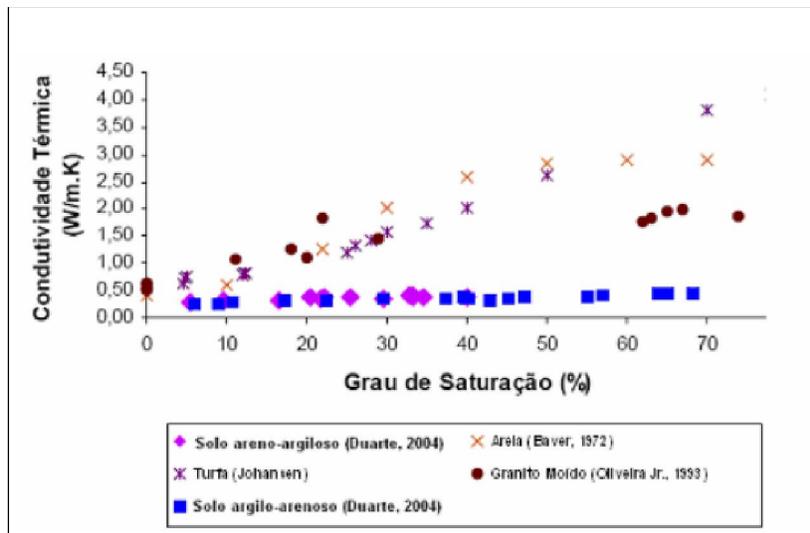


Figura 2.15 – Comparações entre relações de condutividade térmica x grau de saturação (Duarte, 2004).

A condutividade térmica dos solos será função dos seguintes fatores (Pessoa, 2006):

**- Mineralogia dos solos:**

Areias têm maiores condutividade devido a serem constituídas, principalmente, por feldspato e quartzo, minerais bons condutores de calor.

**- Peso específico seco:**

Quanto maior o peso específico seco, maior o contato entre os grãos e, menor a sua resistência ao fluxo.

**- Distribuição granulométrica:**

Solos bem graduados são melhores condutores que solos uniformes, pois possuem menor índice de vazios, aumentando os contatos entre os grãos e aumentando a sua condutividade.

**- Temperatura:**

Os minerais cristalinos estudados em solos apresentam diminuição da condutividade térmica com o aumento da temperatura, à exceção do feldspato. A água e os poros de um solo saturado com ar sofrem aumento da condutividade térmica com o aquecimento. Assim, a influência da temperatura na resistividade dos solos dependerá das proporções dos seus componentes.

A Tabela 2.3 apresenta alguns valores de típicos de  $\lambda^*$  (condutividade térmica):

**Tabela 2.3 –Propriedades Térmicas doSolo (Mitchell, 1993)**

Material	Condutividade Térmica ( $\lambda^*$ ) [w.m-1.k-1]
Ar	0,024
Água	0,60
Gelo	2,25
Folhelho	1,56
Granito	2,76
Cobre	389
Solo	1,70

Jonhansen (1975) sugere a correlação apresentada na equação 2.25 para determinar o coeficiente de condutividade térmica em solos não-saturados:

$$\lambda = (\lambda^{sat} - \lambda^{scc o}) \lambda_e + \lambda^{scc o} \quad 2.28$$

Onde:

$$\lambda_{scc o} = \frac{0,135\gamma_d + 647}{2.700 - 0,947\gamma_d} \pm 20\% \quad 2.29$$

$\lambda_e$  = Número de Kersten (condutividade térmica normalizada) (1949)

$$\lambda_e \approx \text{Log}S + 1 \quad \text{Solos finos} \quad 2.30$$

$$\lambda_e \approx 0,7\text{Log}S + 10 \quad \text{Solos grossos} \quad 2.31$$

Onde:

S = grau de saturação do solo

Este autor observou que variações na microestrutura apresentavam um efeito na condutividade térmica. A condutividade térmica saturada pode ser obtida a partir das condutividades térmicas e volumes relativos de seus constituintes.

Assim:

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \quad 2.32$$

$\lambda_s$  Condutividade térmica do solo;

$\lambda_w$  Condutividade térmica da água;

n Porosidade.

Desta forma, a condutividade térmica do solo será estimada por :

$$\lambda_s = \lambda_q^q \cdot \lambda_0(1-q) \quad 2.33$$

Onde:

$\lambda_q$  Condutividade térmica do quartzo (7,0 W/mK);

$\lambda_0$  Condutividade térmica dos outros minerais (2,0W/m.K ou 3,0 W/m.K se houver menos de 20% de quartzo);

q Relação da quantidade de quartzo com a fração total dos sólidos.

### 2.6.2 RESISTIVIDADE TÉRMICA

A resistividade térmica ( $R_0$ ) é a resistência apresentada pelo solo ao fluxo de calor. Ela é o parâmetro inverso à condutividade térmica.

### 2.6.3 CALOR ESPECÍFICO E CAPACIDADE DE AQUECIMENTO VOLUMÉTRICO

O calor específico (c) é a energia necessária para aumentar de 1°C a temperatura de 1g de solo. A unidade no SI (Sistema Internacional de Unidades) é cal/g°C.

A capacidade de aquecimento volumétrico (C) é a quantidade de energia necessária para se aumentar de 1°C a temperatura de 1cm<sup>3</sup> de solo. A unidade SI é cal/cm<sup>3</sup>°C.

A relação matemática entre calor específico e capacidade de aquecimento volumétrico é dada por:

$$C = \rho c \quad 2.34$$

Onde:

$\rho$  – massa específica do solo (g/cm<sup>3</sup>)

c – calor específico do solo (cal/g°C)

C – capacidade de aquecimento volumétrico (cal/cm<sup>3</sup>°C)

Considerando as fases de um solo (sólido, água e ar), Farouki,1986 sugere uma equação que relacione a capacidade de aquecimento volumétrico do solo em função das frações volumétricas de seus componentes e respectivas capacidades de aquecimento volumétrico. Considerando-se um elemento de volume unitário, tem-se;

$$C = V_s C_s + V_w C_w + V_a C_a \quad 2.35$$

Onde:

$V_s$  Volume dos componentes sólidos;

$V_w$  Volume dos componentes água;

$V_a$  Volume dos componentes ar;

$C_s$  Capacidade de aquecimento volumétrico do sólido;

$C_w$  Capacidade de aquecimento volumétrico da água;

$C_a$  Capacidade de aquecimento volumétrico do ar.

O mesmo autor sugere outra expressão onde a capacidade de aquecimento volumétrico dos solos é estimada em função dos pesos específicos dos componentes do solo, da umidade gravimétrica e da capacidade de aquecimento volumétrico da água.

$$C = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \left( 0,18 + 1,0 \cdot \frac{w}{100} \right) C_w \quad 2.36$$

Onde:

$\gamma_d$  Peso específico seco do solo;

$\gamma_w$  Peso específico da água;

$w$  Umidade gravimétrica em percentagem.

Considerando-se que a capacidade de aquecimento volumétrico da água é igual a  $1,0 \text{ cal/cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$  e que a massa específica da água é  $1,0 \text{ g/cm}^3$ , obtem-se:

$$c = \frac{\rho_d}{\rho} (0,18 + w) \quad 2.37$$

Onde:

$\rho_d$  = massa específica seca do solo

$\rho$  = massa específica do solo

## 2.6.4 DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade térmica ( $D_t$ ) é a propriedade física definida pela relação entre a condutividade térmica e a calor específico volumétrico. Esta grandeza expressa a rapidez de mudança da temperatura do material, quando submetido à variações de temperatura externa. Quanto maior o valor da difusividade térmica, mais rapidamente a energia térmica irá se difundir através do material.

A uma difusividade baixa, por exemplo, podem-se associar uma temperatura máxima alta na superfície e pequena profundidade de penetração do calor.

A difusividade térmica controla a velocidade com que as ondas de temperatura se movem. Os valores de difusividade são também afetados pelas propriedades do solo que influenciam a condutividade térmica e o calor específico e a umidade do solo

Ela depende fundamentalmente da constituição granulometria, densidade e estrutura do solo (propriedades que não variam com o tempo, mas podem variar com a profundidade) e da umidade volumétrica do solo que varia rapidamente com o tempo, sobretudo nas camadas superficiais (Reid e Sherwood, 1977).

$$D_t = \frac{\lambda_t}{c \cdot \rho} \quad 2.38$$

A  $D_t$  do solo é uma grandeza muito utilizada em expressões de fluxo de calor, podendo inclusive ser relacionada com propriedades físicas do solo como a umidade e a sucção.

## 2.8 COMPORTAMENTO DOS GASES

### 2.8.1 EVAPORAÇÃO

O aumento da temperatura em certas regiões de solos não saturados provoca a evaporação da água e conseqüente aumento da pressão de vapor local. O vapor d'água irá se transportar para regiões de menor pressão de vapor por difusão e condensar-se nestas regiões. A diminuição da massa específica seca dos solos aumenta a influência da difusão do vapor d'água, devido ao aumento do número de vazios necessários nesse processo de transferência de calor (Duarte, 2004).

Para a maioria dos casos práticos, a transmissão de calor acontece com a ação simultânea dos mecanismos mencionados. Para os solos, sob condições normais, a transferência de calor ocorre preferencialmente por condução (Pessoa, 2006).

A evaporação é a passagem da água do estado líquido para o gasoso. É um fenômeno complexo que depende das condições atmosféricas da disponibilidade hídrica local e das características da superfície evaporante.

O processo físico da evaporação acontece da seguinte forma: as moléculas de água são compostas de um átomo de oxigênio e dois de hidrogênio. Quando a temperatura aumenta, implicam num aumento da força molecular, moléculas perdem força de ligação (força de ligação do hidrogênio e escapam da superfície da água). Pode também haver alguma condensação de volta; também é necessário um suprimento de energia (calor) para manter o processo de evaporação.

A evaporação envolve transporte simultâneo de massa e energia. Seu cálculo pode ser realizado a partir de dois procedimentos amplamente conhecido se têm como princípio a estimativa da evaporação a partir de dados climatológicos

. O primeiro é conhecido como método de transferência de massa, que determina a relação do fenômeno estudado com pressão de vapor. O segundo é o método do balanço de energia, que considera as entradas de energia solar e térmica e as saídas de fluxo de calor por condução, por evaporação e radiação (Reid e Sherwood, 1977).

A taxa de evaporação será determinada pela diferença entre a pressão de vapor do corpo de água e a pressão do ar acima da superfície de água. Sob dadas condições, a evaporação é proporcional ao déficit de pressão de vapor, que é a diferença entre a pressão de saturação do vapor à temperatura da água e a pressão de vapor do ar.

$$E = C. (e_w - e_a) \quad 2.39$$

Onde:

$E$	Taxa de evaporação
$C$	Coefficiente de ajuste
$e_w$	pressão de saturação de vapor de água no ar atmosférico
$e_a$	pressão atual de vapor de água no ar atmosférico

No método de Penman (1948) foi dado o primeiro tratamento físico adequado na tentativa de estimar a evaporação em superfície natural, utilizando dados de lagos e tanque de evaporação na Inglaterra, aplicado a pequenos tanques. Essa abordagem pertence às categorias dos chamados métodos combinados que envolvem considerações teóricas decorrentes dos métodos de transferência de massa e do balanço de energia radiante, levando a um sistema de duas equações com a evaporação e a temperatura como incógnitas (DIAS, 1986).

Priestley e Taylor, em 1972, excluíram o termo aerodinâmico do método de Penman, com a vantagem de dispensar medidas de pressão de vapor sobre superfície evaporante, de modo que a evaporação passa a ser estimada exclusivamente com o conhecimento da radiação líquida e a temperatura da superfície (DIAS, 1986).

Enquanto a ebulição só ocorre a temperaturas bem determinadas para uma certa pressão, a evaporação, que é a vaporização lenta sem formação de bolhas, pode ocorrer a qualquer temperatura.

Os processos de vaporização, lentos ou não, estão relacionados com um aumento da energia interna de uma substância, enquanto a condensação envolve uma diminuição da energia interna. Dessa forma, tanto a vaporização como a condensação são processos que ocorrem através de trocas de energia entre a substância e o meio no qual ela se encontra.

Na superfície de um líquido existem moléculas que possuem energia cinética suficientemente elevada para conseguirem escapar da camada superficial. Essa moléculas, após abandonarem o líquido, formam sobre suas superfícies uma camada de vapor (DIAS, 1986).

Uma vez que do líquido escapam aquelas moléculas cuja energia cinética é maior, suficiente para romper a interação, o líquido sofre um resfriamento durante o processo de evaporação.

Algumas moléculas do vapor, devido ao seu movimento desordenado, acabam por se chocar com a superfície do líquido e retornam a ele, pois interagem novamente com o potencial atrativo das demais moléculas. Assim, juntamente com o processo de evaporação do líquido está ocorrendo o processo inverso, o de condensação de seus vapores.

Quando a densidade das moléculas do vapor aumenta sobre a superfície líquida da substância, a condensação aumenta enquanto a evaporação diminui.

Assim, quanto menor a densidade do vapor da substância sobre sua superfície, tanto maior será a evaporação. Isso significa que, ao soprarmos sobre a superfície de um líquido, estamos retirando o vapor ali formado, privilegiando a evaporação (ou

evitando a condensação) e, portanto, provocando o resfriamento, ou seja, uma diminuição da energia interna da substância (DIAS, 1986).

A evaporação ocorre a qualquer temperatura, mas a velocidade de evaporação do líquido aumenta com a elevação da temperatura. Isso é explicado pelo fato de a elevação da temperatura aumentar a energia cinética média das moléculas do líquido, propiciando a um maior número de moléculas energia suficiente para romper a interação entre elas.

Entretanto, se o líquido estiver num recipiente fechado, a dispersão dos vapores é impedida, e após um certo tempo será estabelecido um equilíbrio entre as moléculas que passam para o estado de vapor e as que retornam ao estado líquido.

Nessa situação, a pressão exercida pelo vapor sobre o líquido é denominada pressão máxima de vapor.

### **2.8.2) PRESSÃO DE VAPOR**

Ao se reduzir a pressão sobre um líquido, este entrará em ebulição, quando uma determinada pressão for alcançada. Analogamente, um dado vapor será condensado quando aumentarmos a pressão sobre o vapor. Tanto a vaporização do líquido quanto a condensação do vapor, realizadas à pressão e temperatura constantes, são processos em equilíbrio e a pressão de equilíbrio é chamada de pressão de vapor saturante ou simplesmente pressão de vapor do líquido (Ambrose, 1980).

Na fase gasosa, as moléculas movem-se a grandes velocidades, com um movimento randômico e independente umas das outras. A força com que essas moléculas colidem com uma unidade de área do reservatório que as contém é responsável pela pressão exercida pelo gás. A força de atração entre as moléculas individuais, que é uma função da distância entre elas, praticamente não existe. Na fase líquida entretanto, em que a distância entre as moléculas individuais é um pouco mais que um diâmetro molecular, as forças atrativas intermoleculares são consideráveis e responsáveis pelas principais propriedades desta fase da matéria. Uma molécula qualquer no interior da massa líquida está cercada em todas as direções por moléculas da mesma substância, gerando uma força resultante nula. As moléculas na superfície do líquido estão em uma situação diferente, pois há um desequilíbrio de forças na superfície, uma vez que a força atuante sobre a superfície do líquido pelas moléculas de  $N_2$  e  $O_2$  presentes no ar atmosférico são diferentes das forças atrativas do seio do líquido. Como consequência, algumas moléculas da superfície se desgarram da massa líquida e se evaporam. Quanto maior a superfície

ocupada pela substância, menor será o tempo necessário para a evaporação de todo o líquido. Dependendo das forças intermoleculares existentes em cada líquido, alguns demorarão um menor tempo para evaporação total que outros. Quando isso ocorre, dizemos que um líquido é mais volátil que o outro.

### 2.8.2.1 ESTIMATIVAS DA PRESSÃO DE VAPOR

É possível estimar a pressão de vapor utilizando-se equação empírica. Uma das propostas para se prever a pressão de vapor em função da temperatura é a forma derivada de equação de Clausius-Clapeyron, representada por:

$$\ln(P) = \frac{A}{T} + B \quad 2.40$$

A partir dos dados experimentais, vários tipos de gráficos e equações foram propostos para representar a curva de pressão de vapor das substâncias puras. A equação de Antoine é uma correlação empírica muito usual para esta finalidade:

$$\ln(P) = A - \frac{B}{C+T} \quad 2.41$$

A, B, C constantes específicas para cada substância e são tabeladas.

T temperatura (em Kelvin)

P pressão de saturação, em mmHg.

A tabela a seguir apresenta alguns valores das constantes A, B, C para alguns gases. A pressão de vapor em mmHg e temperatura em K..

Tabela 2.2 Alguns valores das constantes A, B, C para gases.( N.I,Brasil, 1999).

SUBSTÂNCIA	A	B	C
benzeno	15,9008	2788,51	-52,36
Água	18,3036	3816,44	-46,13
Acetato de etila	16,1516	2790,50	-57,15
Ácido acético	16,8080	3405,57	-56,34
Etanol			
Amônia	16,9481	2132,50	-32,98
Acetona	16,6513	2940,46	-35,93
metanol	18,587	3626,55	-34,29
CF <sub>4</sub>	9,4341	1244,55	-13,06
etileno glicol (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )	13,6299	6022,18	-28,25
Tolueno	16,0137	3096,52	-53,67
CCl <sub>4</sub>	15,8742	2808,19	-45,99

Para o caso específico do tolueno, pode-se adotar a equação sugerida por Lange, 1998. A equação da pressão de vapor do tolueno em função da temperatura será dada por:

$$\text{Log } 10 \text{ Pmm Hg} = 6,95464 - 1344,8/(T+219,482) \quad 2.42$$

Onde:

- P      Pressão de vapor em mm Hg  
T      Temperatura em graus Kelvin

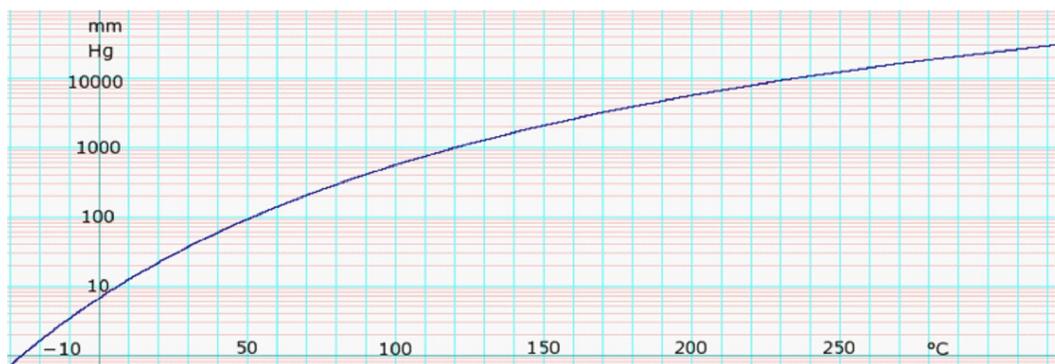


Figura 2.16 Equação da Pressão de vapor do Tolueno em função da temperatura (Lange, 1998).

### 2.8.3) LEI DE DALTON

Na mistura de diferentes gases, as moléculas de cada componente gasoso são distribuídas em todo o volume do recipiente que contém a mistura e as moléculas de cada gás componente contribuem pelos seus impactos para a pressão total exercida pela mistura total (Reid e Sherwood, 1977).

A lei de Dalton estabelece que: “A pressão total exercida por uma mistura gasosa é igual à somatória das pressões parciais dos gases que compõe a mistura”, ou seja:

$$P = P_A + P_B + P_C + \dots \quad 2.43$$

Onde P é a pressão total do sistema;  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$ , são as pressões parciais dos componentes gasosos da mistura A, B, C da mistura.

“A pressão parcial de cada componente gasoso puro em uma mistura é a pressão que o mesmo exerceria se estivesse presente sozinho no mesmo volume e na mesma temperatura da mistura”. A lei dos gases ideais é aplicável, para o componente A, têm-se:

$$P_A = n_A R T / V \quad 2.44$$

Onde:

$P_A$       pressão parcial do componente A na mistura;

$n_A$       número de mols do componente A na mistura.

Equações similares representam as pressões parciais dos componentes B, C, etc. Combinando essas equações com a Lei de Dalton (equação 2.42), obtém-se:

$$P = (n_A + n_B + n_C) R T / V \quad 2.45$$

A equação 2.43 relaciona a pressão, volume e quantidade molar de qualquer mistura gasosa sob tais condições de maneira que a mistura e cada um dos componentes segue as leis dos gases ideais e lei de Dalton.

## 2.8.4) LEI DE AMAGAT

A lei de Amagat estabelece que: “O volume total de uma mistura gasosa é igual à soma dos volumes dos componentes puros”, ou seja:

$$V = V_A + V_B + V_C + \dots \quad 2.46$$

onde

- V volume total da mistura,
- $V_A$  volume do componente gasoso A puro
- $V_B$  volume do componente gasoso B puro
- $V_C$  volume do componente gasoso C puro

“O volume de um componente gasoso puro que está presente em uma mistura é o volume que o mesmo ocuparia se ele estivesse presente sozinho na mesma pressão e na mesma temperatura da mistura” (Reid e Sherwood, 1977).

Onde as condições são tais que a lei dos gases ideais é aplicável, têm-se:

$$PV_A = n_A RT, \quad 2.47$$

O mesmo é válido para os outros gases da mistura. Adicionando-se as equações, têm-se:

$$P(V_A + V_B + V_C + \dots) = (n_A + n_B + \dots)RT \quad 2.48$$

Combinando as equações (2.47) e (2.48) com a lei de Amagat (2.46), têm-se:

$$\frac{V_A}{V} = \frac{n_A}{(n_A + n_B + n_C + \dots)} \quad 2.49$$

$$V_A = y_A V \quad 2.50$$

Onde  $y_A$  é a fração molar do componente A na mistura.

A equação 2.50 mostra que “onde a lei dos gases ideais pode ser aplicada, o volume do componente puro em uma mistura gasosa é igual ao produto do volume total e a fração molar do componente considerado”

## CAPÍTULO 3 PROCESSOS DE REMEDIAÇÃO DE SOLOS

### 3.1 VALORES ORIENTADORES

Conforme descrito em CETESB (2001), “Uma área contaminada pode ser definida como uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação, causada pela introdução de quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural. Nessa área, os poluentes ou contaminantes podem concentrar-se em subsuperfície nos diferentes compartimentos do ambiente, por exemplo, no solo, nos sedimentos, nas rochas, nos materiais utilizados para aterrar os terrenos, nas águas subterrâneas ou, de uma forma geral, nas zonas não saturada e saturada, além de poderem concentrar-se nas paredes, nos pisos e nas estruturas de construções. Os poluentes ou contaminantes podem ser transportados a partir desses meios, propagando-se por diferentes vias, como, por exemplo, o ar, o próprio solo, as águas subterrâneas e superficiais, alterando suas características naturais ou qualidades e determinando impactos negativos e/ou riscos sobre os bens a proteger, localizados na própria área ou em seus arredores”.

O processo de remediação envolve a caracterização geomorfológica e hidrológica da área de interesse; o mapeamento da pluma de contaminação a fim de delimitar sua área de abrangência; a definição das técnicas de remoção de fase livre e posteriormente das fases dissolvida e adsorvida considerando as peculiaridades do local de trabalho e do volume de produto a ser removido; um estudo da técnica ou técnicas mais apropriadas e um programa de análises físicas e químicas do solo e aquífero até o saneamento da área impactada. As técnicas de remediação devem atender não somente às características físico-químicas dos contaminantes envolvidos como também à aplicabilidade dos mesmos nas condições hidrogeológicas específicas do sítio impactado (Nobre et al. 2003).

A CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo) publicou uma lista de valores orientadores para proteção da qualidade de solos e das águas subterrâneas (CETESB,2006).Os valores orientadores são:

**Valor de Referência de Qualidade - VRQ** é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea, que define um solo como limpo ou a

qualidade natural da água ou solo, e é determinado com base em interpretação estatística de análises físico-químicas de amostras de diversos tipos de solos e amostras de águas subterrâneas de diversos aquíferos do Estado de São Paulo. Deve ser utilizado como referência nas ações de prevenção da poluição do solo e das águas subterrâneas e de controle de áreas contaminadas.

**Valor de Prevenção - VP** é a concentração de determinada substância, acima da qual podem ocorrer alterações prejudiciais à qualidade do solo e da água subterrânea. Este valor indica a qualidade de um solo capaz de sustentar as suas funções primárias, protegendo-se os receptores ecológicos e a qualidade das águas subterrâneas. Foi determinado para o solo com base em ensaios com receptores ecológicos. Deve ser utilizado para disciplinar a introdução de substâncias no solo e, quando ultrapassado, a continuidade da atividade será submetida a nova avaliação, devendo os responsáveis legais pela introdução das cargas poluentes proceder o monitoramento dos impactos decorrentes.

**Valor de Intervenção - VI** é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerado um cenário de exposição genérico. Para o solo, foi calculado utilizando-se procedimento de avaliação de risco à saúde humana para cenários de exposição Agrícola-Área de Proteção Máxima – APM<sub>ax</sub>, Residencial e Industrial. Para a água subterrânea, consideraram-se como valores de intervenção as concentrações que causam risco à saúde humana listadas na Portaria 518, de 26 de março de 2004, do Ministério da Saúde - MS, complementada com os padrões de potabilidade do Guia da Organização Mundial de Saúde - OMS de 2004, ou calculados segundo adaptação da metodologia da OMS utilizada na derivação destes padrões.

Em caso de alteração dos padrões da Portaria 518 do MS, os valores de intervenção para águas subterrâneas serão conseqüentemente alterados. A área será classificada como Área Contaminada sob Investigação quando houver constatação da presença de contaminantes no solo ou na água subterrânea em concentrações acima dos Valores de Intervenção, indicando a necessidade de ações para resguardar os receptores de risco.

TABELA 3.1 Valores orientados para solos e águas subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2006).

SUBSTÂNCIA	SOLOS (mg.Kg <sup>-1</sup> ) PESO SECO					ÁGUA SUBTERRÂNEA (µg.L <sup>-1</sup> )
	VRQ	VP	Intervenção Agrícola	Intervenção Industrial	Intervenção Residencial	Intervenção
Benzeno	na	0,03	0,06	0,15	0,08	5
Tolueno	na	0,14	30	75	30	700
Etilbenzeno	na	6,2	35	95	40	300
Xilenos totais	na	0,13	25	70	30	500

NOTA: na = não se aplica para substâncias orgânicas.  
 FONTE: (CETESB, 2006).

A seguir, são mencionadas técnicas para remediação de solos que utilizam injeção de ar, vapor ou sistema misto de injeção ar/vapor.

### 3.2 INJEÇÃO DE OXIGÊNIO NO SOLO (AIR SPARGING)

A técnica de Air sparging envolve a injeção de ar para dentro da zona saturada abaixo da zona contaminada. O ar segue através da zona saturada e carrega os contaminantes volatilizados na direção do solo não saturado, onde os contaminantes são subsequentemente removidos com SVE (Extração de vapor do solo). O Air Sparging também promove o aumento do nível de oxigênio dissolvido no subsolo, melhorando assim a biodegradação de subsuperfície dos contaminantes que são degradáveis aerobicamente. É uma tecnologia que pode ser usada junto com SVE para tratar contaminação por VOCs, tais como gasolina, solventes, e outros contaminantes voláteis, presentes na zona saturada.

Air sparging foi usada na Alemanha em meados de 1980. Logo depois, a tecnologia se espalhou para outras partes da Europa e chegou aos EUA no final dos anos 80. A técnica se tornou popular nos últimos anos e é correntemente empregada em vários sítios nos EUA (USEPA, 1997a).

O SVE é geralmente usado em conjunto com air sparging para capturar os voláteis que o sparging carrega do solo e das águas subterrâneas. Os contaminantes voláteis são transportados na fase vapor para a zona vadosa ou não saturada, de

onde eles são extraídos pelos poços de extração e tratados usando-se um sistema de tratamento padrão externo.

Um sistema de air sparging é composto dos seguintes componentes:

- Poços de air sparging ou de investigação para injetar o ar para dentro da zona saturada;
- Tubulação, válvulas, e instrumentação para transportar e controlar o fluxo de ar;
- Um compressor de ar ou soprador para empurrar o ar para dentro da zona saturada através dos poços de air sparging ou de investigação;
- Um sistema SVE projetado especialmente para capturar os vapores contaminados na zona vadosa.

A seguir, apresentam-se algumas modificações que podem ser feitas no sistema de injeção de ar e suas influências sobre o processo (USACE,1995)

- Injeção suplementar de nutrientes para enriquecer a biodegradação;
- Injeção suplementar de metano como um co-metabolizador para solventes clorados;
- Injeção suplementar de tolueno como um co-metabolizador para tricloroetano (TCE).

Geralmente são feitos testes piloto no site para determinar os parâmetros de projeto do sistema tais como pressão para entrada de ar, exigências relacionadas ao vácuo, taxas de fluxo de ar, as zonas de influência para o sparging e extração de componentes.

A colocação de poços sparging ou sondagens no sítio dependerá primordialmente da delimitação da área da remediação e da zona de influência do solo. Esta zona de influência é freqüentemente estimada durante testes piloto através da medida de parâmetros tais como concentração de oxigênio dissolvido ou de contaminante nos poços de monitoramento.

A seguir, são apresentadas algumas considerações sobre os poços verticais e horizontais, zonas de influência e profundidade de sparging dos mesmos.

### 3.2.1 USO DA TÉCNICA DE AIR SPARGING COM POÇOS VERTICAIS

Os poços verticais são os mais comuns. O diâmetro do poço tem 5 cm ou mais para permitir o uso dos equipamentos. O ar é injetado para dentro dos poços através de tubos de revestimento.

Estes poços têm sido usados em aquíferos de até 45 m de profundidade. Até o momento, não foi mencionada nenhuma limitação para a profundidade dos poços. (USEPA, 1997 a). A Figura 3.1 apresenta um esquema de funcionamento destes poços.

A colocação de poços verticais é determinada fortemente pela zona de influência da injeção no sítio (estimada ou calculada). Zonas de influência de 1,5 m a 9 m (medidos radialmente) têm sido observados em solos grossos e de 18 m ou mais em solos estratificados (Marley, 1995 in USEPA, 1997 a).

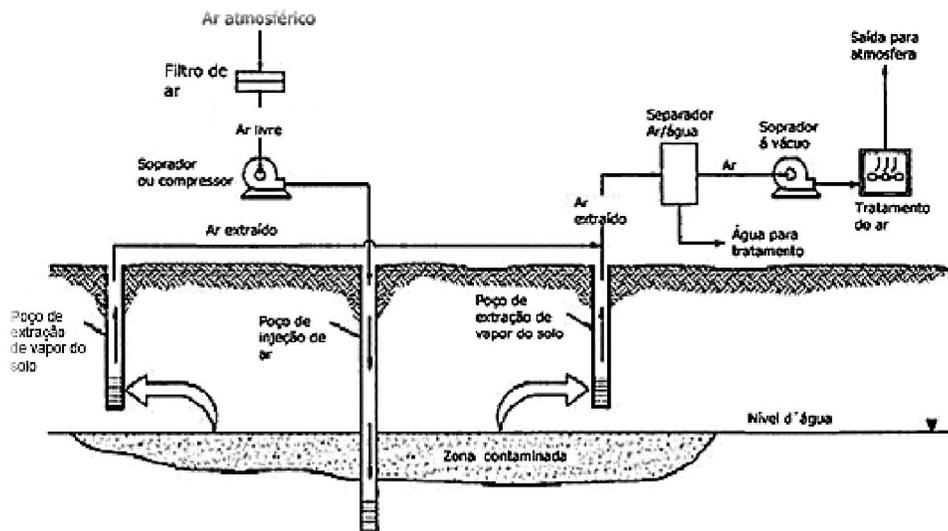


Figura 3.1 Poços verticais para Air Sparging (apud USEPA, 1997a).

### 3.2.2.) USO DA TÉCNICA DE AIR SPARGING COM POÇOS HORIZONTAIS

Os poços horizontais são instalados usando-se técnicas de escavação ou perfuração. Podem ser usados para remediar contaminações sob edificações e em outras áreas de difícil alcance, como pode ser visto na Figura 3.2. São particularmente eficientes em sítios que apresentam aquíferos rasos e extensos, plumas de contaminantes finas, assim como aquelas causadas por gotejamentos de oleodutos.

Os poços horizontais são geralmente instalados perpendiculares à direção de fluxo da água subterrânea de forma que a água subterrânea flua em direção aos poços. Caso se trabalhe com longas extensões de seção horizontal, poderão ser necessárias altas taxas de fluxo.

A utilização de sparging horizontal no interior de um aquífero aumenta a área superficial exposta ao ar injetado, fornecendo assim, uma zona de influência maior do que a proporcionada pelos poços verticais.

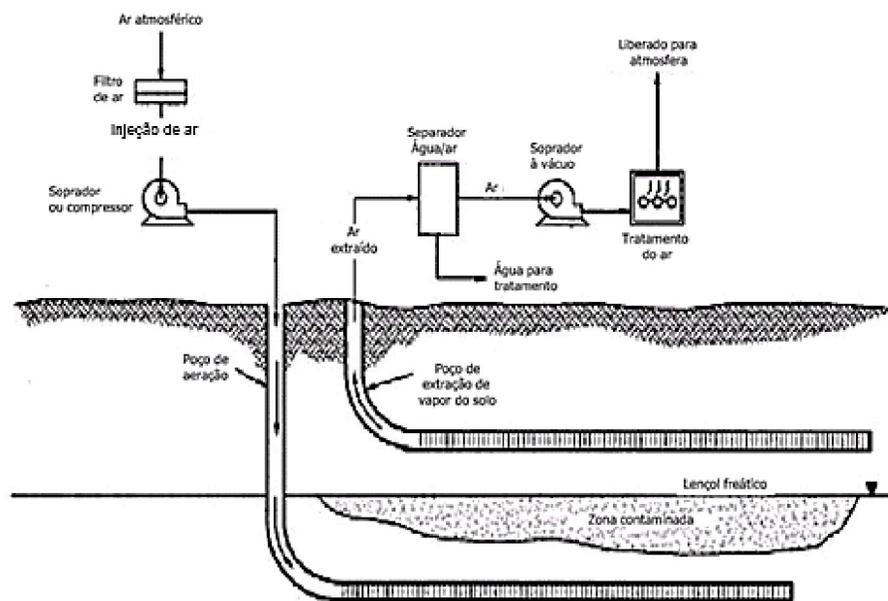


Figura 3.2 Poços horizontais para Air Sparging (apud USEPA, 1997a).

#### A) VANTAGENS

Air sparging é uma tecnologia que oferece todas as vantagens de uma tecnologia in situ:

- Tempo de implantação dessa tecnologia é relativamente pequeno e requer pouca manutenção;
- Pode ser aplicada próximo a áreas residenciais - postos de serviços;
- Processo de remediação pode estimular a bioremediação in situ graças ao aumento da oxigenação;
- Os componentes dos sistemas estão facilmente disponíveis, com preços relativamente baixos, e a tecnologia é relativamente simples, embora alguns conhecimentos sejam requeridos na hora da localização dos poços de injeção e extração;
- Pode promover uma efetiva remoção dos VOC's da água subterrânea;
- Aumenta a capacidade de remediação do SVE para a zona saturada;
- No air sparging a volatilização e a biodegradação contribuem para a remediação de VOCs;
- Elimina a necessidade de remoção e tratamento de grandes quantidades de água subterrânea usando métodos de Pump and treat (Bombear e tratar).

## **B) DESVANTAGENS**

- Essa tecnologia não é eficiente em áreas com litologias argilosas e siltosas por causa da baixa permeabilidade. Valores de condutividade hidráulica menor do que  $10^{-5}$  cm/s. não são favoráveis à utilização de Air Sparging (AS).
- Não é favorável também para sítios nos quais os contaminantes estejam na fase livre. Para esses casos, em primeiro lugar é indicada a remoção da fase livre por meio de sistemas com bombeamento duplo.
- Aquíferos com altas concentrações de ferro (>3,0 mg/l) podem formar precipitados desse metal e acúmulo de bactérias o que resultaria na redução da permeabilidade. Um sistema de extração de vapor é requerido para coletar e tratar a corrente de gás externa gerada.
- Pode requerer a retirada e tratamento de grandes volumes de ar para assegurar o volume de ar injetado.

- Fatores adicionais, tais como temperatura de injeção do ar e permeabilidade do aquífero, afetam a performance dessa técnica. Profundidade da contaminação e características geológicas específicas - permeabilidade, geometria das heterogeneidades litológicas, profundidade da zona saturada - devem ser consideradas.
- Para prevenir desvio na extração de compostos orgânicos voláteis em aquíferos com pouca profundidade, recomenda-se capeamento da superfície.
- Rotas preferenciais para o fluxo de ar podem ocorrer e reduzir a eficiência do método.
- O uso do AS sem o EVS poderá criar pressão positiva total em subsuperfície que pode induzir a migração além da zona contaminada.

### **3.3 EXTRAÇÃO DE VAPOR DO SOLO (EVS)**

O sistema de extração de vapor do solo (EVS), também chamado de stripping ou extração a vácuo do solo, soil venting ou soil vacuuming, é usado para remover compostos orgânicos voláteis (VOC's) e compostos orgânicos semivoláteis (SVOC's) da zona não saturada (vadosa) - do solo.

Um sistema de EVS consiste de poços de extração, poços de injeção, bombas de vácuo, compressores de ar, medidores de vazão, amostradores, separador ar/água, um sistema de controle de VOC's e lacres impermeáveis. Os poços são geralmente penetrantes na zona contaminada.

Na seção filtrante, são colocados filtros com aberturas que facilitam a saída de gases (USEPA, 1997 b). A Figura 3.3 apresenta esquematicamente um sistema de extração de vapor do solo.

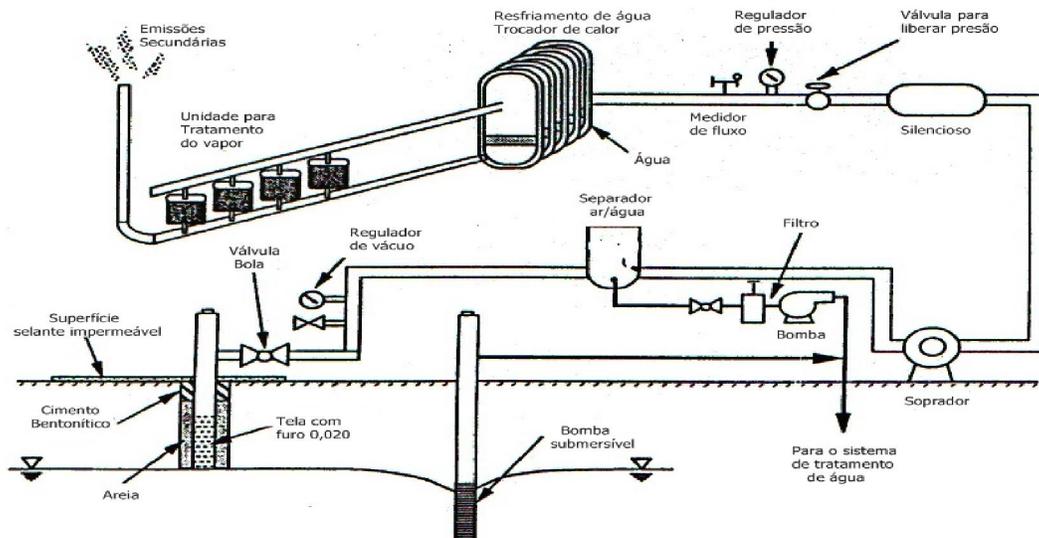


Figura 3.3 Apresentação esquemática de um sistema de extração de vapor do solo ( USEPA, 1997b).

Um poço é perfurado na zona contaminada e uma bomba a vácuo é usada para retirar o ar da região contaminada, para dentro do poço, em um fluxo ascendente em direção a um desumidificador para remover o excesso de água.

Camadas com carvão ativado ou unidades de combustão catalítica são usadas para remover VOC's depois que o gás é removido através dos exaustores, para a atmosfera.

### 3.3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO/APLICAÇÕES

A aplicabilidade do EVS está definida por algumas restrições (USEPA, 1997a).

Os elementos químicos a serem removidos devem ser voláteis ou pelo menos semivoláteis. Desta forma, o método não é adequado para remoção de metais, a maioria dos pesticidas, e PCBs devido ao fato da pressão de vapor destes elementos ser muito baixa.

Os elementos químicos a serem removidos devem ser relativamente pouco solúveis em água ou então a umidade do solo deve ser baixa.

Os contaminantes devem estar acima do nível d' água.

A permeabilidade do solo deve ser o suficiente para garantir que o vapor consiga extrair os contaminantes em um nível de produção adequado.

Além disto, vale ressaltar que atualmente existem poucos padrões de projetos e critérios de operação aplicados ao EVS. Isto é decorrente, principalmente, das limitações impostas por fatores específicos dos sítios, a saber, (USEPA, 1997 a):

- Características dos contaminantes inclusive o grau de molhabilidade.
- Extensão vertical e horizontal da pluma de contaminação;
- Características do solo, particularmente permeabilidade e heterogeneidade;
- Profundidade do nível da água da zona saturada;
- Exigências do controle de emissão dos VOC's pelo órgão ambiental;
- Critério para a descontaminação condicionado também pelo órgão ambiental.

A forma e distribuição dos contaminantes no solo, vertical ou horizontal, é uma importante consideração na decisão se o EVS é mais indicado do que outras metodologias de remediação.

## **A) VANTAGENS**

A seguir, algumas vantagens do EVS:

- Impacto ambiental é baixo;
- Os custos são inferiores;
- Pode ser combinado com outras tecnologias;
- Grandes volumes de solos podem ser tratados;
- Tempo de descontaminação é geralmente curto;
- Se o contaminante é biodegradável, o EVS pode acelerar a atividade bacteriana (bioremediação);
- Separadores ar/ água são simples para construir e provavelmente devem ser instalados em muitos sistemas;

- Os compostos a serem removidos podem ser voláteis e semivoláteis (pressão de vapor de 0.06 KPa ou maior).

## **B) DESVANTAGENS**

- Não é viável para remover metais, muitos pesticidas, óleos e graxas e PCB's (pressões de vapor são muito baixas);
- Geralmente não é viável para compostos como acetona e alcoóis porque suas pressões de vapor em solos úmidos são também baixas;
- Os contaminantes a serem removidos precisam estar acima da camada saturada. Em alguns casos é possível rebaixar o nível da água por bombeamento e assim poder usar o EVS;
- Solo precisa ser suficientemente permeável para permitir que os poços de extração de vapor consigam extrair os contaminantes a uma boa taxa.

### **3.4) BIOVENTING**

*Bioventing* é uma tecnologia que estimula a biodegradação natural *in-situ* dos hidrocarbonetos de petróleo no solo, através do fornecimento de oxigênio para os microorganismos existentes no mesmo.

Utiliza baixas taxas de fluxo para manter a atividade biológica. O ar deverá passar através do solo em quantidade suficiente para manter as condições aeróbicas para realizar a biodegradação.

O tamanho dos grãos e a umidade do solo são os itens que têm maior influência na permeabilidade gasosa do solo. A técnica do Bioventing tem sido utilizada com sucesso para remediar solos contaminados por hidrocarbonetos de petróleo, solventes clorados, alguns pesticidas, preservativos de madeira e outros orgânicos químicos.

Aplicável a sítios onde os contaminantes são pouco ou não voláteis como o diesel; limitado a sítios com média a elevada permeabilidade (Furtado,2005).

### **3.5 BIOSPARGING**

É uma técnica de remediação na qual ocorre injeção de ar na zona saturada a fim de levar oxigenação à biota. O volume de fluxo de ar utilizado neste sistema não é o mesmo necessário para se produzir a volatilização do contaminante. Portanto, o controle da formação de canais de ar, a captura e a distribuição são menos significativas sob baixas pressões (Furtado, 2005).

O processo de *Biosparging* ocorre através da injeção de ar necessária para o aumento da taxa de biodegradação na zona saturada. Entretanto tem-se notado que o tempo necessário para aumentar o nível de oxigênio dissolvido depende da difusão de oxigênio nos arredores dos canais de ar. Concentrações típicas de OD (Oxigênio dissolvido) em águas subterrâneas não contaminadas são inferiores a  $4,0\text{mgL}^{-1}$  e em condições de aplicação do *Biosparging* a taxa de OD (oxigênio dissolvido) eleva-se a  $6,0$  a  $10,0\text{mgL}^{-1}$  sob condições de equilíbrio. Este incremento nos níveis de OD contribui para o aumento da taxa de biodegradabilidade aeróbica na zona saturada (Nobre et al., 2003).

O desempenho do sistema *Biosparging* está diretamente relacionado à distribuição do ar (zona de influência), profundidade de injeção de ar, pressão da injeção de ar e a taxa de fluxo, modo de injeção (pulso ou contínuo), construção dos poços de injeção e tipo de contaminante e distribuição. O sucesso da implantação do sistema *Biosparging* depende da seleção apropriada dos equipamentos no processo. Os componentes do sistema *Biosparging* são: compressor de ar ou ventilador; tubulações para conectar o compressor; filtros de ar; instrumentação e controle (Nobre et al., 2003; Furtado, 2005).

### **3.6 SISTEMA AIR SPARGING/EVS ENRIQUECIDO COM VAPOR D ÁGUA**

A injeção de vapor é uma técnica promissora para remediação de solos contaminados por hidrocarbonetos. Vários experimentos uni-dimensionais têm mostrado que o vapor pode eficientemente promover a remoção de contaminantes voláteis ou semi-voláteis em qualquer concentração a partir de meios saturados ou não saturados (Hunt et al, 1998 b, Hadim et al, 1993, Betz et al, 1997, Udel e McCarter, 1998).

A utilização de vapor para remediação de meios porosos contaminados por NAPLs tem se mostrado como uma técnica bastante eficiente. Há, no entanto, que se

ressaltar que a técnica pode levar à precipitação de fases separadas do contaminante. ( Schmidt et al, 2002). Assim, os autores anteriormente mencionados sugerem uma adaptação a ser implementada à esta técnica: injeção de uma mistura de vapor e ar.

Durante a aplicação da injeção de vapor, ocorre uma migração na frente de calor devida à forma como o contaminante é removido. Quando o vapor é injetado para a subsuperfície, ele aquece o meio poroso e cria uma zona de vapor ao redor do ponto de injeção. Com o tempo, à medida que mais vapor é injetado, a zona de vapor se expande e a frente, separando a zona de vapor da região vizinha ( com temperatura ambiente), distancia-se do ponto de injeção. O contaminante presente na zona de vapor volatiliza e condensa novamente na frente de calor, onde uma piscina da fase separada do contaminante se acumula ( Hunt et al, 1988 b). À medida que a zona de vapor avança através da área contaminada, mais e mais contaminante se acumula e a saturação na piscina pode exceder a saturação residual. Quando isto ocorre, o contaminante torna-se móvel e pode migrar verticalmente devido às forças de gravidade.

A seguir, são apresentados os principais mecanismos que resultam na redução da migração descendente de NAPL. ( Kaslusky e Udell, 2005).

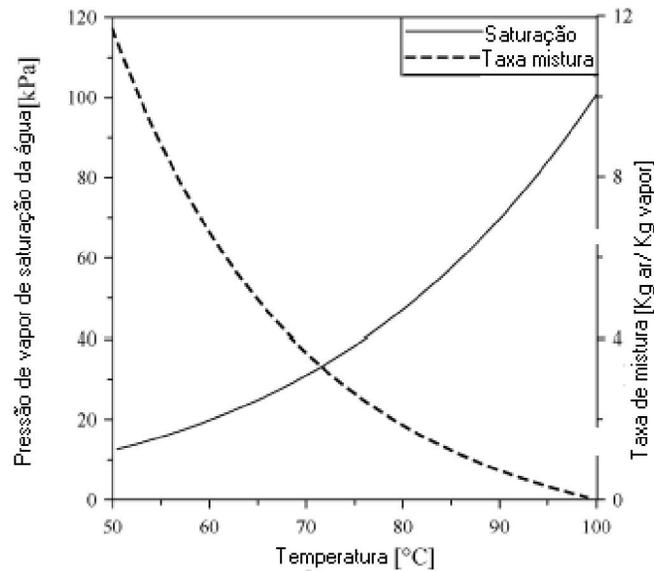
- 1) A redução da massa condensada junto da frente de condensação.
- 2) O aumento de volume na região onde ocorre a condensação de contaminante.

Quando o ar é injetado junto com o vapor, alguma quantidade de NAPL que é vaporizada da zona de expansão de vapor é removido em equilíbrio com o ar injetado à medida que ele deixa a região aquecida. Como resultado, a taxa na qual o NAPL se condensa e acumula junto à frente de avanço da condensação é reduzida. Esta redução é considerada como o método mais eficaz para minimizar o potencial de migração descendente do NAPL.

Quando um vapor é injetado para o interior de um solo contendo um NAPL, este NAPL no interior da região aquecida se condensa e acumula junto à frente de condensação de vapor. Se suficiente NAPL se acumula, as forças gravitacionais podem deslocar o material residual permitindo que o líquido contaminado flua para baixo. Através da injeção de ar com vapor, uma porção do vapor de NAPL permanece suspenso em equilíbrio com o ar, diminuindo a acumulação de contaminante líquido junto à frente de condensação de vapor, e assim reduzindo a possibilidade de migração descendente

Assim, o principal objetivo do uso da técnica conjunta é o de eliminar a condensação e acumulação de contaminante junto à frente de condensação de vapor.

Um outro fator importante a ser analisado é o da relação entre a pressão de vapor saturada de água e a temperatura. A Figura 3.4 mostra esta relação. Se a temperatura cresce, o ar pode conter mais vapor d'água até que o ponto de ebulição da água seja alcançado. Nesta situação, a pressão de vapor da água corresponde à pressão vizinha e o vapor de água puro ou vapor pode existir como um componente simples na fase gasosa. Para o caso de uma mistura de vapor e ar na temperatura ambiente, o vapor irá condensar e aquecer o ar até uma temperatura onde todo o vapor de água possa estar contido na fase gasosa.



**Figura 3.4** Pressão de vapor da água versus temperatura e temperatura da mistura ar-vapor a pressão atmosférica vs. Razão de mistura apud Schmidt et al( 2002)

Considerando que a entalpia de vaporização da água é muito alta comparada com a capacidade de aquecimento do ar, apenas uma pequena fração de vapor condensará e não haverá mudanças significativas na taxa de mistura entre o ar e o vapor. Observa-se que a temperatura decresce quando mais ar é misturado com o vapor. Assim, pode-se iniciar o processo de deslocamento dos componentes voláteis com um temperatura mais baixa. A redução da taxa ar/vapor com o tempo implica em maior acúmulo de vapor na zona de volatilização, aumento da temperatura, do grau de saturação de pressão de vapor d'água e, conseqüente aumento da possibilidade de condensação do material volatilizado.

Os contaminantes usados neste trabalho foram o mesitileno (1,3,5 trimetilbenzeno) e DCB (1,2 diclorobenzeno).

### 3.6.1) MATERIAIS DO EXPERIMENTO E MÉTODOS

Para este ensaio, Schmidt et al (2002), construíram uma caixa de areia bidimensional (110 X 74 X 8.5 cm), conforme mostra a Figura 3.5. A caixa era constituída de aço inoxidável e possuía um painel frontal de vidro para acesso visual à areia. Tubos selantes de teflon e viton foram usados para minimizar a perda de contaminante durante o processo de embebição e drenagem da areia contida na caixa. A entrada e saída de água estava localizada no fundo esquerdo e no fundo direito da caixa, respectivamente.

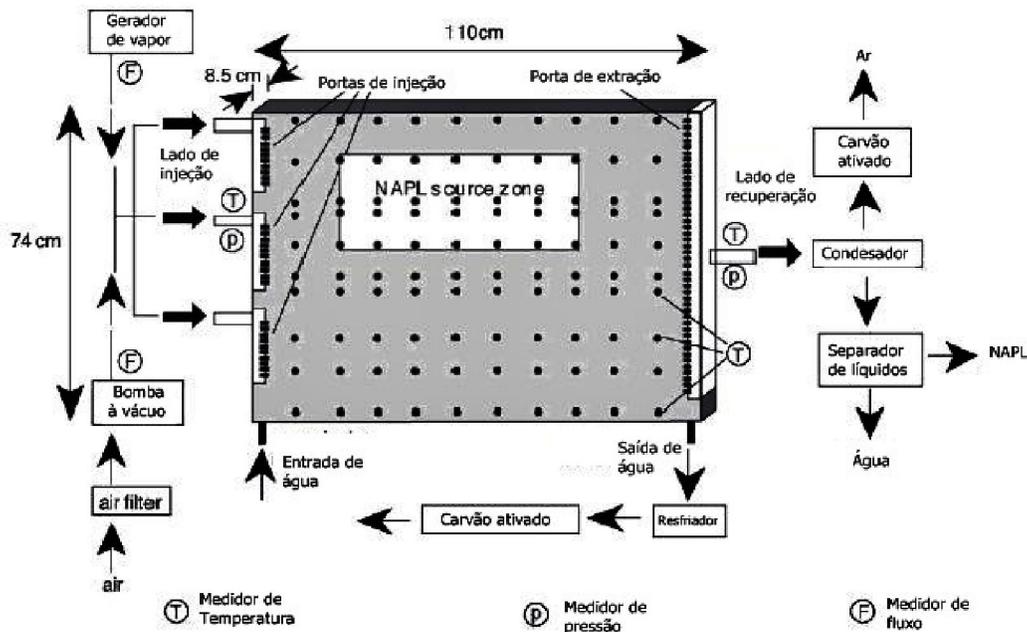


Figura 3.5 Montagem esquemática do experimento apud Schmidt et al (2002).

Para a geração de vapor, foi utilizado um vaporizador de 2 Kw. O vapor foi injetado na caixa através de três portas de injeção. A tubulação que saía do gerador de vapor até a caixa de areia foi eletricamente aquecida o que garantiu que o vapor injetado tinha uma qualidade de aproximadamente 100 %. O gás efluente deixou a caixa de areia através da porta de extração e passou por um condensador. O condensador estava ligado a um separador líquido de dois estágios, onde o contaminante foi separado da água. Gases não condensados foram encaminhados para um filtro de carvão ativado.

Para minimizar a perda de calor, a caixa de areia foi irradiada durante os experimentos. A irradiação da frente podia ser facilmente removida para inspeção visual para tomada de fotografias.

### 3.6.2 MODELO TEÓRICO CONCEITUAL

A seguir, são apresentados modelos numéricos usados para prever alguns resultados relacionados aos ensaios onde se utiliza a técnica de injeção mista de ar e vapor para remediação de solos contaminados por VOCs.

#### 3.6.2.1 MODELO ADAPTADO DE SCHMIDT ET AL (2002)

A seguir, são apresentadas formulações de Schmidt et al,2002 relacionadas ao cálculo de parâmetros importantes em ensaios onde se utiliza a técnica de injeção conjunta ar/vapor.

Para facilitar a aplicação destas equações, foram desenvolvidas equações paramétricas que serviram de subsídio para elaboração de gráficos que indicam o comportamento das variáveis envolvidas durante os ensaios.

A primeira equação calcula a energia (E) necessária para aquecer um volume (V) de solo até uma temperatura (T):

$$E = V(T - T_i)(c_r\rho_r(1 - \phi) + \rho_w c_w S_w \phi) = V(T - T_i)\bar{\rho c} \quad 3.1$$

Onde:

$T_i$	Temperatura inicial
$c_r$	Capacidade de aquecimento dos grãos de solo
$\rho_r$	densidade dos grãos de solo
$c_w$	Capacidade de aquecimento da água
$\rho_w$	densidade da água de solo
$\phi$	porosidade
$S_w$	Saturação de água na zona aquecida
$\bar{\rho c}$	Capacidade de aquecimento global

Nesta equação, a capacidade de aquecimento do ar ou NAPL é desconsiderada. Assim, a energia liberada quando ocorre injeção de vapor em um meio poroso com temperatura  $T_i$ , pode ser calculada pela equação;

$$E = m_s(H + (T - T_i)c_w) \quad 3.2$$

Onde:

$m_s$       massa de vapor  
 $H$         Entalpia de vaporização da água  
 $T$         Temperatura do vapor

Para desenvolver a equação parametrizada, considera-se que a entalpia média (H) da água para variação de temperaturas entre zero e cem graus seja 620 Kcal/Kg. Além disto, tendo-se:

$C_w$       1 Kcal/Kg C;  
 1 Kcal    4,19 KJ.

Com estas informações, pode-se trabalhar com a equação 3.2 e obter-se a energia liberada por Kg de vapor injetado (E/Kg) em função de (T-  $T_i$ ), como mostrado na figura abaixo:

Assim, tem-se a nova equação:

$$\frac{E}{m_s} = (H + (T - T_i)c_w) \quad 3.3$$

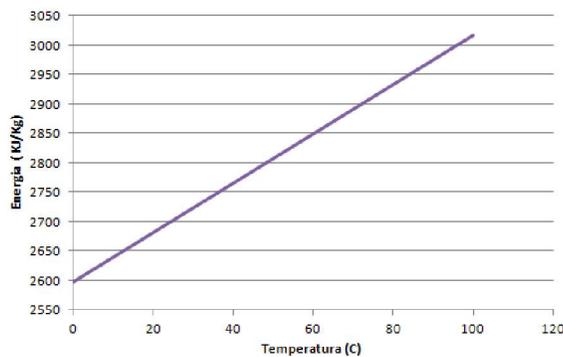


Figura 3.6 Energia por massa de vapor

Esta nova equação permite uma rápida visualização da quantidade de energia necessária para aquecer uma certa massa de solo em função da massa de vapor injetada. Pode-se, também, em caminho inverso, através da diferença temperatura que se deseja alcançar, obter-se a energia necessária para aquecer esta massa de solo em função da massa de vapor injetado.

Quando a mistura ar e vapor é injetada, a temperatura da mistura ( $T_a$ ) que é função da taxa de mistura ( $a = m_a/m_s$ ), deverá ser colocada ao invés da temperatura ( $T$ ).

Onde:

$m_a$       massa de ar

A massa de vapor necessária para aquecer um volume de meio poroso a uma temperatura ( $T_a$ ) pode ser calculada inserindo a primeira equação na segunda. Assim,

$$m_s = \frac{m_a}{a} = \frac{V(T_a - T_i)\bar{\rho}\bar{c}}{H + (T_a - T_i)c_w} \quad 3.4$$

Novamente, a equação acima pode ser retrabalhada e obter-se o valor de  $m_s$  por volume de solo a ser aquecido em função de  $\bar{\rho}\bar{c}$ . Assim, tem-se:

$$\frac{m_s}{V\bar{\rho}\bar{c}} = \frac{(T_a - T_i)}{H + (T_a - T_i)c_w} \quad 3.5$$

A partir da equação 3.5, pode-se desenvolver o seguinte gráfico:

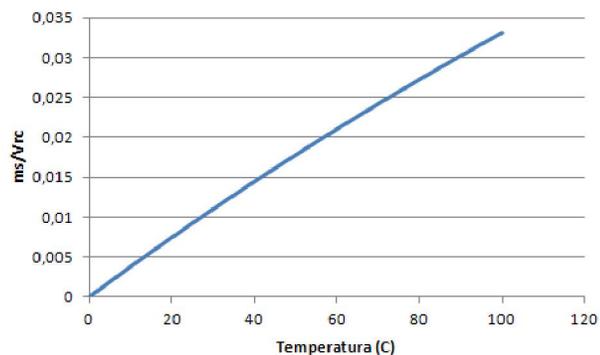


Figura 3.7      Massa de vapor por  $V\bar{\rho}\bar{c}$  x temperaturas

Com isto, têm-se uma rápida visualização do comportamento da massa de vapor a ser aquecida por um certo diferencial de temperatura em função do volume e da capacidade de aquecimento global (caixa mais solo).

### VELOCIDADE DA FRENTE DE CALOR

Combinando-se as duas primeiras equações, o volume de solo aquecido pode ser calculado:

$$V = \frac{m_t}{a+1} \frac{H+(T_a-T_i)c_w}{(T_a-T_i)\bar{\rho}\bar{c}} \quad 3.6$$

Onde:

$$m_t = m_a + m_s = m_s(a + 1) \quad 3.7$$

Pode-se retrabalhar a equação 3.6, obtendo-se o volume em função de  $m_s$  e  $\bar{\rho}\bar{c}$ .

Assim, tem-se:

$$\frac{V}{m_s} \bar{\rho}\bar{c} = \frac{H+(T_a-T_i)c_w}{(T_a-T_i)} \quad 3.8$$

A figura 3.8 apresenta o comportamento equação 3.8, onde é possível correlacionar o diferencial de temperatura desejado com o volume de solo a ser aquecido em função da capacidade de aquecimento global e da massa de vapor a ser injetada.

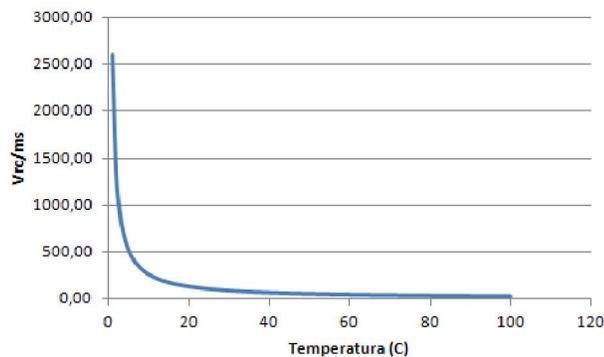


Figura 3.8  $\frac{V}{m_s} \bar{\rho}\bar{c}$  x temperatura

Considerando-se  $\dot{m}_t$  como o total de massa dividido pela área da seção transversal, a equação acima será usada para definir a velocidade da frente de aquecimento:

$$v_{fc} = \frac{\dot{m}_t}{a+1} \frac{H+(T_a-T_i)c_w}{(T_a-T_i)\bar{\rho}\bar{c}} \quad 3.9$$

$v_{fc}$       velocidade da frente de calor ( m s<sup>-1</sup>)

Novamente, pode-se apresentar a velocidade da frente de calor como função de  $\bar{\rho}\bar{c}$ ,  $m_s$  e da área da seção transversal. Então, a equação 3.9 poderá ser reescrita como:

$$v_{fc} \cdot \frac{\bar{\rho}\bar{c}m_s}{A} = \frac{H+(T_a-T_i)c_w}{(T_a-T_i)} \quad 3.10$$

A figura 3.9 apresenta o comportamento equação 3.10, onde é possível correlacionar o diferencial de temperatura desejado com a velocidade da frente de calor em função da capacidade de aquecimento global, da massa de vapor a ser injetada e da área da seção transversal. Observa-se que, à medida que o diferencial de temperatura aumenta, a velocidade da frente de calor diminui radicalmente, caso as outras variáveis sejam mantidas constantes.

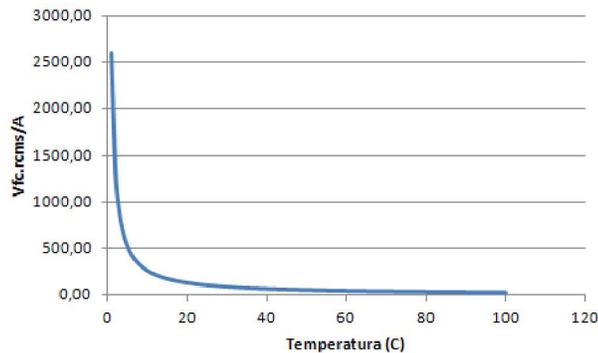


Figura 3.9  $\frac{v_{fc}}{m_s} \bar{\rho}\bar{c}$  x temperatura

## VELOCIDADE DA FRENTE DE EVAPORAÇÃO

A velocidade da frente de evaporação do NAPL ( $v_{evap}$ ) é função da pressão de vapor do NAPL, do fluxo e da saturação de NAPL (Schmidt et al, 2002). Quando se atinge o equilíbrio local, ela pode ser calculada como:

$$v_{evap} = \frac{\dot{m}_t}{\rho_{s-a}(a)} \frac{P_{vap}(a)M_n}{RT(a)\phi S_n \rho_n} \quad 3.11$$

Onde:

$\rho_{s-a}$	densidade da mistura ar-vapor
$P_{vap}$	Pressão de vapor
$M_n$	Peso molecular
$S_n$	Saturação do NAPL
$\rho_n$	Densidade do NAPL
$R$	Constante universal dos gases.

Considerando-se os valores constantes ( $\rho_{s-a}, M_n, S_n, \rho_n, R, \dot{m}_t$  e  $\phi$ ) e variáveis ( $P_{vap}(a), T$ ) da equação 3.11, pode-se reescrevê-la para obter o formato da curva de velocidade de evaporação em função da pressão de vapor e da temperatura.

Assim, tem-se:

$$v_{evap} \cdot \frac{RT(a)\phi S_n \rho_n \rho_{(s-a)}(a)}{\dot{m}_t M_n} = \frac{P_{vap}(a)}{T} \quad 3.12$$

A figura 3.10 apresenta o comportamento da equação 3.12, onde é possível correlacionar a velocidade da frente de evaporação do contaminante com a variação da temperatura e a correspondente variação da pressão de vapor do contaminante. Nesta equação, utilizou-se a equação 2.41 que correlaciona a pressão de vapor do tolueno à variação de temperatura.

Assim, para uma determinada temperatura desejada, pode-se obter rapidamente o valor da pressão de vapor correspondente e a velocidade de evaporação.

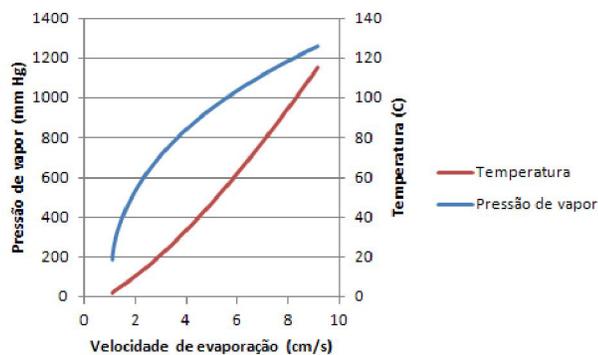


Figura 3.10  $v_{evap}$  x temperatura

### 3.6.2.2 MODELO SIMPLIFICADO PROPOSTO

Um outro modelo simplificado, foi elaborado pelo autor, para previsão de volume de tolueno que poderá evaporar e ser retirado como efluente do processo.

À partir da equação geral dos gases ideais, pode-se obter alguns resultados que podem auxiliar na previsão de volumes de efluentes a serem extraídos com o uso da técnica de injeção conjunta ar e vapor.

Cabe mencionar a simplicidade deste modelo sugerido. Não é levado em conta a porosidade do solo, uma vez que se considera que o contaminante esteja sobre uma superfície aberta ao meio externo e o processo de evaporação ocorra naturalmente à temperatura que se quer estudar, com a correspondente variação da pressão de vapor.

Este modelo foi sugerido para que se pudesse ter uma idéia, mesmo que simplificada, dos quantitativos que poderia ser obtidos nos ensaios.

Considerando-se a equação da pressão de vapor em função de temperatura para o tolueno e, isolando-se o número de mols, tem-se:

$$N = PV/RT \quad 3.13$$

Onde:

- n número de mols;
- P Pressão de vapor em mm Hg;
- V Volume a ser ocupado pelo gás = volume da caixa inox;
- R Constante universal dos gases;
- T Temperatura em graus Kelvin;

A massa de tolueno disponível, à temperatura considerada será dada por:

$$M = n \cdot P_m$$

Onde:

n        número de mols;

PM      peso molecular.

Com o valor da massa de tolueno é possível obter-se o valor do volume correspondente, em função da densidade.

Então:

$$V_{\text{evap}} = M/d \qquad \qquad \qquad 3.14$$

Onde:

V<sub>evap</sub>    volume evaporado;

M        massa;

d        densidade do tolueno.

## **CAPÍTULO 4 MODELO EXPERIMENTAL**

### **4.1 INTRODUÇÃO**

O modelo físico desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ teve o propósito de servir de base para estudos sobre a eficácia da utilização de sistemas de injeção misto de ar/vapor no interior do solo para remediação de solos contaminados por produtos orgânicos, no caso o tolueno.

Foram dezenas de procedimentos, que resultaram no desenvolvimento de vários equipamentos acessórios ao modelo físico, onde o solo foi depositado.

No item equipamentos desenvolvidos, são comentadas as etapas construtivas e dificuldades e soluções propostas para cada equipamento desenvolvido.

O modelo físico desenvolvido baseou-se no trabalho de Schmidt et al (2002) tendo as mesmas dimensões do equipamento usado por estes autores. Alguns equipamentos adicionais foram desenvolvidos e/ou utilizados nesta pesquisa.

### **4.2 EXIGÊNCIAS DO SISTEMA**

Foram definidas algumas exigências indispensáveis que o equipamento desenvolvido deveria cumprir, a saber:

- 1) Possibilitar o monitoramento do deslocamento do contaminante durante o processo de injeção de ar/vapor;
- 2) Garantir a homogeneidade do índice de vazios do solo a ser ensaiado;
- 3) Possibilitar a aplicação e controle independente das pressões de entrada de ar e vapor a serem injetados na caixa de ensaio;
- 4) Possibilitar a quantificação acurada das vazões;
- 5) Minimizar, ou mesmo eliminar, perdas de fluidos decorrentes de vazamentos;
- 6) Possibilitar a coleta de dados, durante o ensaio, do comportamento da temperatura da frente de calor;

Tinha-se a intenção de acompanhar todas as fases dos ensaios com

documentação fotográfica. Devido a problemas operacionais, esta alternativa teve que ser abandonada e a versão final da caixa de inox trabalhou com um tampo de aço em lugar da placa de vidro inicialmente pretendida. Assim, tem-se apenas duas fotos do contaminante no interior da caixa, ainda na etapa inicial, quando se estava utilizando a placa de vidro.

Com o uso de registros de pressão isolados, um para o ar e outro para o vapor foi possível controlar cada pressão variável isoladamente.

Com o uso de 60 termopares ligados a um Data Logger, foi possível monitoramento em tempo real da variação das temperaturas do solo no interior da caixa, durante a realização dos ensaios.

Foram utilizados um banho térmico e uma bomba à vácuo para melhorarem a eficiência dos ensaios.

Através da medição dos volumes de contaminante injetado no solo e de contaminante recolhido durante o ensaio, foi possível quantificar a eficiência do sistema.

#### **4.3 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DESENVOLVIDOS E UTILIZADOS**

O modelo físico experimental desenvolvido é composto de uma caixa de inox e sistemas acessórios. A seguir, são listados todos os componentes desenvolvidos e/ou utilizados neste equipamento:

- Caixa de inox para inserção de solo;
- Mecanismo gerador de vapor;
- Tubulação para levar o ar e vapor das fontes até a caixa de inox;
- Sistema de isolamento térmico da tubulação;
- Mecanismo de pluviação de areia;
- Sistema para aquisição de dados de temperatura em tempo real;
- Sistema coletor de efluentes
- Banho térmico ( usado somente no terceiro lote de ensaios)
- Bomba à vácuo ( usada somente no terceiro lote de ensaios).

Nesta pesquisa, foram realizados 3 lotes de ensaios. No primeiro e segundo lotes, foi usado o esquema de montagem e conexão de equipamentos mostrado na figura 4.1.

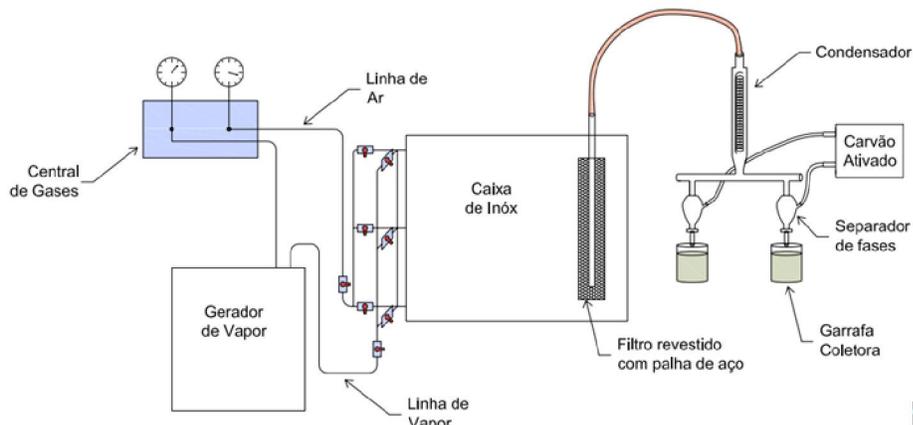


Figura 4.1 Esquema de montagem e conexão dos equipamentos usado para a realização dos lotes de Ensaios 01 e 02.

Para o terceiro lote, foi realizada uma pequena mudança no sistema de tratamento de efluentes, trocando-se o sistema que continha carvão ativado por um banho térmico no condensador e um sistema de vácuo para diminuição da pressão externa sobre o contaminante no interior da caixa de inox.

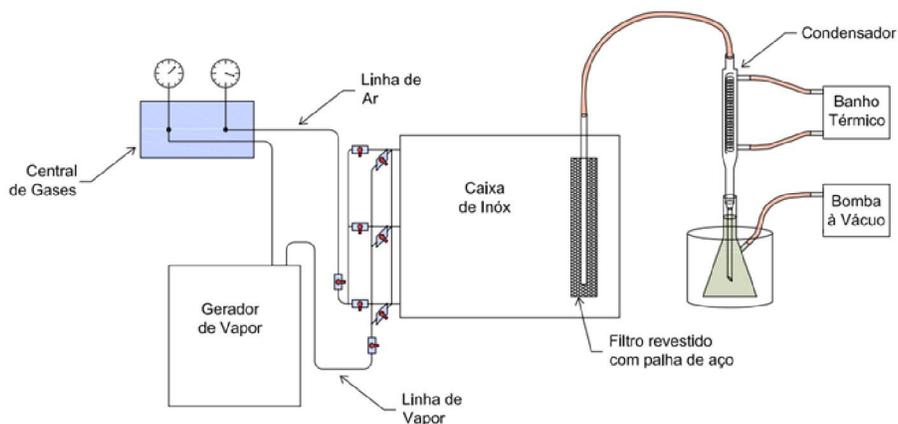


Figura 4.2 Esquema de montagem e conexão dos equipamentos usado para a realização do lote de Ensaios 03.

#### 4.3.1 CAIXA DE AÇO INOX PARA ENSAIO DE INJEÇÃO CONJUNTA DE AR/VAPOR

Durante esta pesquisa, foram construídas duas caixas de inox para a realização dos ensaios. A primeira caixa, após vários testes preliminares, apresentou deformações estruturais que comprometiam a estanqueidade do sistema, uma vez que não foi possível obter vedação adequada para a tampa que garantisse um lacramento perfeito da caixa. Em função deste problema, optou-se pela confecção de uma segunda caixa de inox com elementos estruturais com maior rigidez estrutural.

A seguir, apresentam-se as etapas de construção da primeira caixa de inox e as dificuldades encontradas.

A primeira caixa em aço inox possuía dimensões de 110 x 74 x 8.5 cm, de acordo com Figura 4.3.

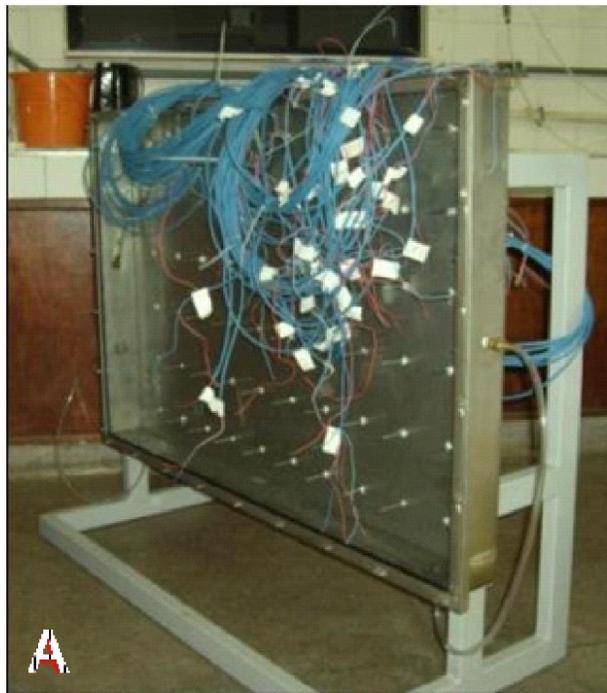


Figura 4.3 (A) Fase inicial- Instalação dos termopares



Figura 4.3(B) Vista de fundo da caixa com instalação dos termopares e Data Logger.

A caixa de aço tinha um painel frontal de vidro para acesso visual à areia. A entrada e saída de água estavam localizadas no fundo, nas extremidades esquerda e direita da caixa, respectivamente.

A tampa, feita de teflon foi trocada por outra de alumínio e, posteriormente, por uma de aço, pois o teflon apresentava deformações acentuadas que comprometiam a estanqueidade da caixa, como mostrado na figura 4.4.



Figura 4.4 Tampa superior de alumínio com garras metálicas para fixação onde se visualiza o furo central (inserção de contaminante) e os furos da borda direita (poços de extração de efluentes).

Foi criado um suporte fixo para a caixa, uma vez que, devido às características de peso e geometria, a sua fixação na parede não seria a mais adequada, uma vez

que poderia ocorrer comprometimento estrutural da parede e dificuldades para acesso à parte traseira para manutenção.

Posteriormente, para facilitar o deslocamento da caixa, foram instaladas rodas sob o suporte fixo.

Além disto, foi feito um furo na parte inferior da caixa, que não era mencionado no projeto básico. Este procedimento foi realizado para facilitar a extração do material (solo e contaminante) após a realização dos ensaios.

Um outro furo na parte superior para a injeção do contaminante (tolueno) também foi adaptado para este projeto. Isto foi feito para que, através de um tubo bem fino, fosse inserido o tolueno e se tivesse uma perturbação mínima no índice de vazios do solo. Este furo está localizado, de forma centralizada na tampa superior. Foram feitos outros dois furos, No canto direito superior, para servirem como poços de acesso para a tubulação de extração de efluentes.



Figura 4.5 (A) Vista superior da caixa de inox, (B) Vista do fundo da caixa.

A estanqueidade da tampa da caixa de inox foi um problema de difícil solução que demandou muito tempo a ser solucionado. Primeiramente, foi usada uma tampa de teflon para a cobertura da caixa. Esta tampa se deformava com muita facilidade e foi descartada por não oferecer a vedação necessária.

A tampa de teflon foi, em seguida, trocada por uma tampa de alumínio. O sistema de travamento desta tampa feito com parafusos, foi trocado para um sistema de garras que não foi muito eficaz. Por último, adotou-se o parafusamento da tampa sobre o topo da caixa.

Durante os testes preliminares, observou-se que ocorria um resfriamento da face de vidro devido ao seu contato direto com o meio externo. Este problema provocou o atraso no aquecimento da caixa de inox, com conseqüente perda de calor e de eficiência dos sistemas.

Para minimizar a perda de calor e superar esta dificuldade, a face de vidro temperado foi coberta por uma placa aquecedora térmica durante os experimentos. Esta placa podia ser facilmente removida para inspeção visual para tomada de Fotografias, como mostrado na Figura 4.6.



Figura 4.6 Placa aquecedora instalada sobre a face de vidro da primeira caixa de inox.

Esta placa conseguiu manter aquecida a face de vidro porém, por questões de segurança e economia de energia e tempo, optou-se por instalar uma manta térmica sobre a placa aquecedora para minimizar os efeitos de perda de energia por radiação para o meio externo. O uso da manta mostrou-se bastante eficiente e conseguiu

manter a face aquecida, sem perda significativa de calor para o meio externo, durante os ensaios.

Os contatos das laterais da face de vidro temperado (10 mm) não estavam perfeitamente estanques. Desta forma, foi utilizado um sistema de vedação completo, com a aplicação de um selador polimérico, através de bisnagas, para o isolamento da face de vidro. Após a realização dos testes preliminares, verificou-se que a vedação dessa caixa ainda não se apresentou perfeitamente adequada.

Por último, concluiu-se que esta primeira caixa estava inviabilizada para ser usada nos ensaios (Figura 4.7) e, desta forma, optou-se pela construção de uma segunda caixa. O período para confecção da caixa foi de aproximadamente 2 meses, ocasionando atrasos no prazo para conclusão da pesquisa.



Figura 4.7 Primeira caixa após a retirada dos eletros, vidro frontal e tampa superior.

Logo após o primeiro teste de estanqueidade, esta segunda caixa apresentou um problema muito sério. O vidro laminado se rompeu em pequenos pedaços (Figura 4.8).



Figura 4.8. Vidro laminado em pedaços após realização do primeiro teste de estanqueidade.

Após análise da parte superior da caixa e das deformações apresentadas nesta seção, concluiu-se que a ruptura do vidro deveu-se à ocorrência de tensões de tração diferenciais provocadas pelos parafusos que prendiam a tampa da caixa à parte superior em posições desalinhadas. Além deste problema de quebra do vidro, estas irregularidades resultaram em sérios problemas de vazamentos que só foram resolvidos com utilização de solda a frio e resinas epóxi. Como solução final, adotou-se, em lugar do vidro, uma chapa de aço.

Todos os elementos acessórios, descritos anteriormente, usados na primeira caixa foram utilizados nesta segunda versão.

#### **4.3.2 MECANISMO GERADOR DE VAPOR**

O primeiro mecanismo de injeção de vapor utilizado foi montado a partir de uma panela-de-pressão doméstica de 06 litros adaptada e uma placa aquecedora FISATON modelo 509, conforme mostrado na figura 4.9.

Foi utilizado o ar da linha de ar comprimido do laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ. O ar era encaminhado, através de tubos metálicos flexíveis, até uma central de gases. Na central de gases havia válvulas para monitoramento e controle das pressões a serem liberadas para o ar que ia ser encaminhado à caixa de inox.

A partir da central de gases, uma tubulação levava o ar comprimido até válvulas de registro instaladas sobre uma parede lateral da caixa. Havia 3 pontos de injeção e

duas válvulas de registro para cada ponto. Uma era usada para levar o ar comprimido da central de gases até a caixa e a outra era usada para trazer o vapor gerado até a caixa. O objetivo do uso de 3 pontos de injeção e das duas válvulas era o controle do fluxo do ar e do vapor e, com isto, poder simular a injeção conjunta aplicada em 3 pontos, 2 pontos ou apenas um ponto.



Figura 4.9 Primeiro mecanismo gerador de vapor adotado. A) Painel de pressão de 6 litros adaptada, B) Placa aquecedora elétrica.

Foi instalado um sistema de isolamento da tubulação para evitar que o vapor condensasse no seu interior antes de se misturar com o ar e para manter a mistura homogênea. Isto foi feito para manter padrões de repetibilidade e assegurar que não houvesse variações nas proporções ar/vapor, já que este é um dos principais fatores a serem considerados para o melhor desempenho da técnica em estudo.

Para o aquecimento do gerador de vapor havia a preocupação em se gerar energia suficiente para não colocar em risco o experimento. Assim, a opção de aquecimento a gás foi prontamente descartada. Desta forma, optou-se pela utilização de uma placa aquecedora elétrica, mostrada na Figura 4.9. Foram feitos ensaios para verificar a eficácia do aquecimento e verificou-se que esta alternativa apresentou-se ineficiente por não fornecer quantidade de vapor suficiente para aquecer a caixa de inox durante todo o ensaio.

Desta forma, optou-se por estudar uma alternativa para o sistema gerador de vapor. Foi adotada como solução definitiva, o uso de uma panela de pressão industrial de 30 litros e o sistema de aquecimento da panela adotado passou a ser uma resistência elétrica de 3000 W instalada no interior da panela, como mostrado na figura 4.10.

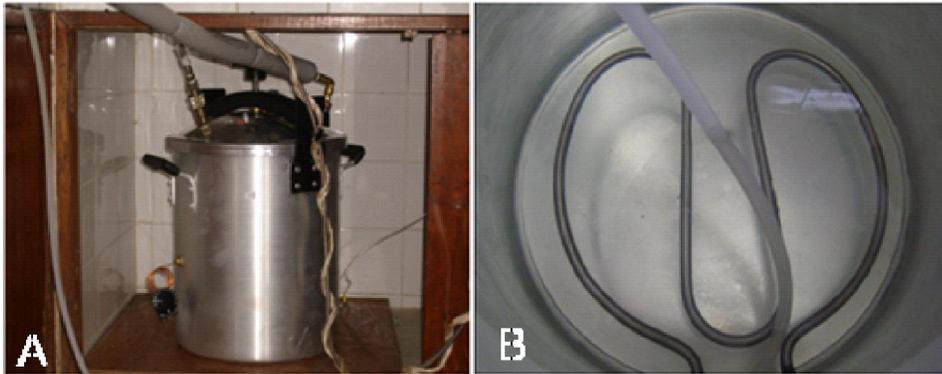


Figura 4.10 Gerador de vapor de segunda geração: A) Painel de pressão industrial de 30 litros, B) Resistência elétrica de 3000 W instalada no fundo da panela.

O gerador de vapor de segunda geração mostrou-se eficiente e capaz de gerar vapor por um período de até 4 horas. Este prazo foi suficiente para que se realizasse os ensaios.

Para garantir o valor constante da pressão de vapor no interior do gerador, foi construída uma tubulação para injeção de ar comprimido para dentro do gerador. Com um manômetro, instalado na central de gases, era possível regular a pressão de injeção de ar no gerador de vapor, que era a mesma que era injetada na caixa inox.

Foram necessários estudos para superar os problemas de condensação de vapor d'água dentro da tubulação que conduzia o vapor do gerador até à caixa de inox. O fato de ocorrer um resfriamento da tubulação em contato com o ambiente externo provocava a condensação de vapor d'água no interior desta tubulação. A melhor forma para superar este problema seria um aquecimento da tubulação até a entrada na caixa de inox. Assim, optou-se pelo uso de uma fita aquecedora, que se mostrou muito eficaz, eliminando este problema.

A fita aquecedora era composta uma resistência elétrica recoberta por um tecido de fibra de vidro. Esta fita, bem flexível, foi instalada em volta da tubulação que levava o vapor do gerador até a caixa inox. Ela era ligada cerca de 20 min. antes do começo de cada ensaio.

O vapor foi inserido na caixa através de três portas de injeção. A tubulação que sai do gerador de vapor até a caixa de areia foi recoberta pela fita aquecedora, o que garantiu que o vapor injetado tivesse uma qualidade muito boa, sem condensado, ou seja, que praticamente, nenhuma quantidade de vapor havia condensado na tubulação antes da injeção na caixa inox.

Durante os ensaios, o gás efluente deixou a caixa de areia através da porta de extração e passou por um condensador. Do condensador, o líquido recuperado foi encaminhado para um separador de fases, coletado e mensurado. Caso houvesse algum vapor residual, este seria coletado pelo carvão ativado.

#### 4.3.3 MECANISMO DE PLUVIAÇÃO DE AREIA.

Para deposição da areia na caixa foi adotado o método da pluviação. O método MSP garante a homogeneidade do índice de vazios da areia a ser depositada.

Considerando-se o volume a ser preenchido, foram desenvolvidos alguns acessórios para a pluviação da areia na caixa.

O primeiro mecanismo de pluviação desenvolvido era composto de um motor de passo e um reservatório para a areia. Semelhantemente ao processo tradicional, tem-se a mesma seqüência de peneiras para garantir a uniformidade do valor do índice de vazios a ser obtido. Através de um trilho e sistema de correntes, um “carrinho” percorre o topo da caixa fazendo a pluviação a uma velocidade constante em ciclos repetidos até que a caixa esteja completamente cheia, conforme mostrado na Figura 4.11.

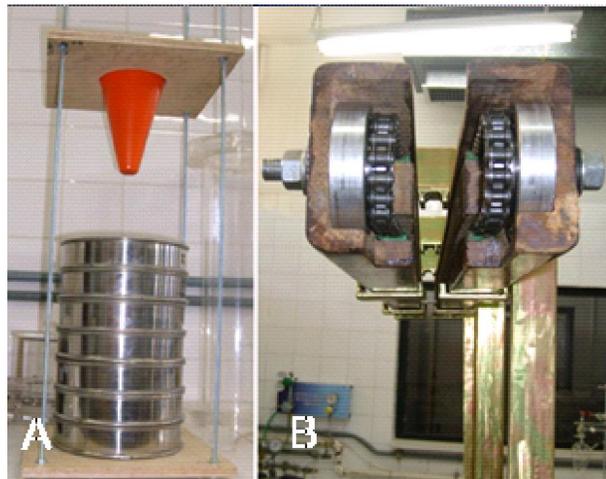


Figura 4.11 Partes do sistema de Pluviação de areia inicialmente adotado.

A) Conjunto de peneiras. B) Corrente transportadora.

Quando foi feito o primeiro ensaio com este equipamento, observou-se uma dificuldade para o motor de passo deslocar-se sobre o trecho de preenchimento da

caixa. Além disto, verificou-se que a distribuição da pluviação não ocorria de maneira uniforme, como esperado, uma vez que a movimentação do pluviador dificultava a constância da pluviação.

Este sistema era muito demorado, pois implicava na suspensão de bombonas de areia e deslocamento do pluviador sobre a caixa. Durante o deslocamento, a mangueira que saía da bombona até o pluviador, deformava-se muito e dificultava o ensaio.

Além destes problemas, outra preocupação era garantir a uniformidade da areia que se estava pluvindo. Para isto, nesta primeira tentativa foi usada uma calha de aço, conforme a figura 4.12. Este equipamento apresentou o inconveniente de, durante a sua utilização, promover um espalhamento de areia sobre toda a região vizinha à caixa de inox. Verificou-se que o volume de areia a ser espalhado, fora da caixa, durante o ensaio, utilizando-se esta calha, seria de tal monta que poderia comprometer os termostatos ligados à caixa de inox e iriam requer um tempo enorme para limpeza da região, sem contar o transtorno a ser causado. Então, optou-se por elaborar um novo sistema para a pluviação da areia sobre a caixa.



Figura 4.12 A) Calha usada para auxiliar na pluviação de areia, B) Pórtico para uso no sistema de pluviação com uso de bombonas de areia inicialmente adotado

Um dos componentes deste novo sistema de pluviação de areia sobre a caixa de inox era uma caixa coletora de areia pluviada, com seção maior do que a abertura da caixa de inox para coleta do material excedente a ser pluviado. Esta caixa coletora mostrou-se muito útil pois, eliminou a necessidade de posteriores e dificultosas limpezas após a realização dos ensaios, conforme a figura 4.13A.

Também foi definido que, para a melhor qualidade da pluviação, o pluviador não deveria se deslocar para não sofrer movimentações laterais que comprometessem a qualidade e repetibilidade do ensaio. Desta forma, ficou definido que a caixa de inox iria receber rodas e se deslocaria sobre trilhos durante o processo de enchimento de areia ( Figura 4.13B). Este processo, apesar de mais simples do que o anteriormente proposto atendeu as expectativas e foi adotado como versão definitiva.



Figura 4.13 A) Calha para coleta de areia, B) Caixa sobre trilhos, C) Pórtico para uso no sistema de pluviação de areia definitivo

Ao invés de se usar bombonas como depósito temporário para a areia a ser direcionada ao sistema de peneiras optou-se por utilizar cones como reservatórios pois, a tensão confinante da areia no interior destes cones varia com a altura dos mesmos, o que facilita o escoamento e descida da areia (Figura 4.13C). Com o uso das bombonas, havia o problema da tensão confinante horizontal interna ser praticamente constante, o que gerava dificuldade para escoamento da areia.

#### **4.3.4 SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA EM TEMPO REAL**

Foram instalados 60 termopares na caixa de inox para monitoramento do avanço da frente de calor a serem desenvolvida durante os ensaios. Um data logger, ao qual os termopares estão conectados possibilitou a aquisição simultânea de dados e

apresentação em tempo real de gráficos em um computador para interpretação e acompanhamento de resultados (Figura 4.14).

Após a instalação dos termopares na caixa de inox e ligação dos conectores ao sistema de aquisição de dados foram feitos testes para aferição. Verificou-se a concordância da temperatura ambiente com o valor medido. Os termostatos vieram com certificado de calibração e os testes comprovaram sua confiabilidade.



Figura 4.14. Sistema de aquisição de dados: A) Data Logger. B) Computador com software para leitura em tempo real.

Logo no início dos ensaios, o equipamento Data Logger apresentou problemas técnicos e teve que substituído. O segundo aparelho Data Logger também apresentou com problemas e, com isto, todo o processo de coleta de dados dos termopares foi adiado.

#### **4.3.5 SISTEMA DE COLETA DE EFLUENTES**

No sistema desenvolvido, os gases foram captados e direcionados para um sistema de tratamento físico-químico próprio para contaminantes orgânicos, contendo condensador, separador de líquido e filtro de carvão ativado, cada um exercendo a sua função específica, conforme mencionado abaixo:

Condensador: classificado como um “trocador de calor”, objetiva a redução da temperatura dos gases/líquidos provenientes do oxidador por meio de uma serpentina situada dentro de outra de maior diâmetro e que possui, internamente, um outro fluido/gás de menor temperatura;

Separador de líquidos: Como o próprio nome já diz, consiste em um aparelho que separa a fase líquida da fase gasosa do efluente proveniente do condensador.

Filtro de Carvão Ativado: aparelho utilizado para reter ou absorver as emissões gasosas, ainda restantes, produzidas durante todo o processo, impedindo que elas sejam lançadas na atmosfera.

A figura 4.15 apresentada os componentes mencionados acima.

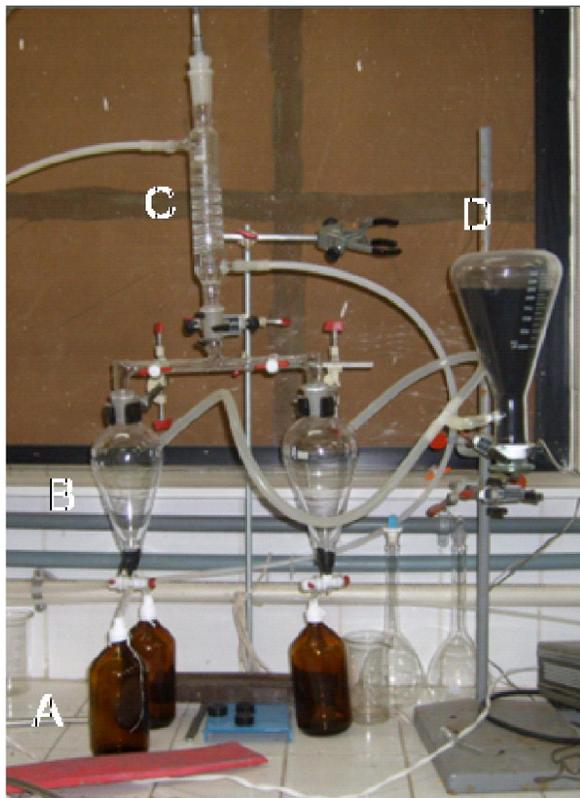


Figura 4.15 Sistema Coletor de efluentes: A) Frasco coletor de efluentes, B) Separador de fases, C) Condensador, D) Carvão ativado.

Para esta pesquisa, foi desenvolvido um sistema especial para a extração e coleta dos gases efluentes do processo. Este sistema coletor é composto por um condensador, dois separadores de líquidos que permitem a coleta e separação dos líquidos sem que se necessite a interrupção do ensaio e ainda, um filtro coletor de carvão ativado. A vidraria comercial disponível no país não contemplava um sistema com estas características.

O conjunto de equipamentos é montado de forma que o vapor efluente da caixa de inox seja encaminhado ao condensador, que então é ligado a um separador líquido de dois estágios, onde o contaminante é separado da água, extraído, medido e pesado. Os gases, porventura não condensados, são encaminhados para um filtro de carvão ativado. Este sistema acima mencionado foi usado para o primeiro e segundo lote de ensaios.

Para o terceiro lote de ensaios, foram feitas algumas modificações, com vistas a melhorias no processo de extração dos efluentes e adotado o esquema mostrado na Figura 4.2. Desta forma, o dispositivo de coleta de efluentes que antes era composto por dois separadores de fases, garrafas coletoras e carvão ativado foi substituído por um kitasato conectado a um condensador instalado em uma cuba com gelo e conectado a uma bomba à vácuo, mostrado na figura 4.16.

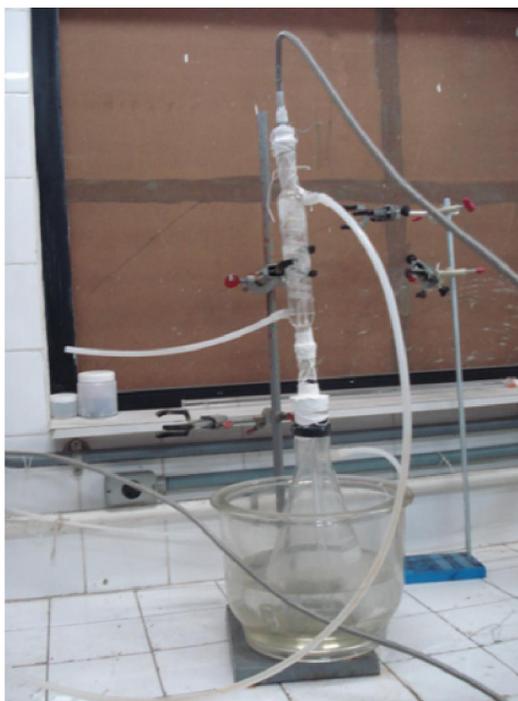


Figura 4.16 Condensador conectado a um kitasato.

O condensador foi refrigerado por um equipamento chamado Banho Térmico, que garantiu temperaturas muito baixas, próximas de zero grau. Esta medida foi tomada para assegurar que qualquer vapor efluente da caixa de inox iniciasse o processo de condensação logo que circulasse pelo condensador, mostrado na figura 4.17.



Figura 4.17 Banho térmico usado para refrigeração do condensador.

Para diminuir a pressão externa sobre o tolueno dentro da caixa de inox e, com isto, facilitar o processo de volatilização e extração do efluente, foi usada uma bomba à vácuo durante estes ensaios, mostrada na figura 4.18.



Figura 4.18 Bomba à vácuo usada no terceiro lote de ensaios.

Este novo esquema de montagem dos equipamentos conseguiu fornecer resultados superiores aos obtidos nos dois primeiros lotes, indicando a eficácia dos dispositivos usados.

## **CAPÍTULO 5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Com o objetivo de avaliar os equipamentos desenvolvidos neste trabalho e contribuir com o estudo da técnica escolhida para análise foi realizada uma campanha de ensaios para se obter a razão ideal de volumes de injeção ar/vapor que oferecesse a melhor taxa de retorno de recuperação do contaminante.

Esta parte do trabalho é destinada a apresentar os procedimentos adotados na execução dos ensaios realizados nos equipamentos descritos no capítulo anterior.

A seguir, são mencionadas as etapas envolvidas nos ensaios realizados nesta pesquisa.

### **5.1 MATERIAIS**

#### **5.1.1 AREIA**

Em princípio, pensou-se em usar uma areia da Barra da Tijuca, Cidade do Rio de Janeiro. Considerando-se as dificuldades para a extração desta areia, optou-se pelo uso de uma areia industrial comercializada para ser usada em filtros de piscinas.

##### **5.1.1.1 CURVA GRANULOMÉTRICA**

A seguir, é apresentada a curva granulométrica da areia utilizada no estudo. Trata-se de uma areia grossa, com uma pequena porcentagem de areia de granulação média. A análise granulométrica mostrou variação no tamanho dos grãos de 0,4 mm até 2 mm com  $d_{50} = 1,1$  mm. A permeabilidade da areia foi obtida através de ensaios de carga constante, sendo  $4,59 \times 10^{-2}$  cm/s. O valor da densidade real dos grãos é de 2,652. A curva granulométrica é apresentada na figura 5.1.

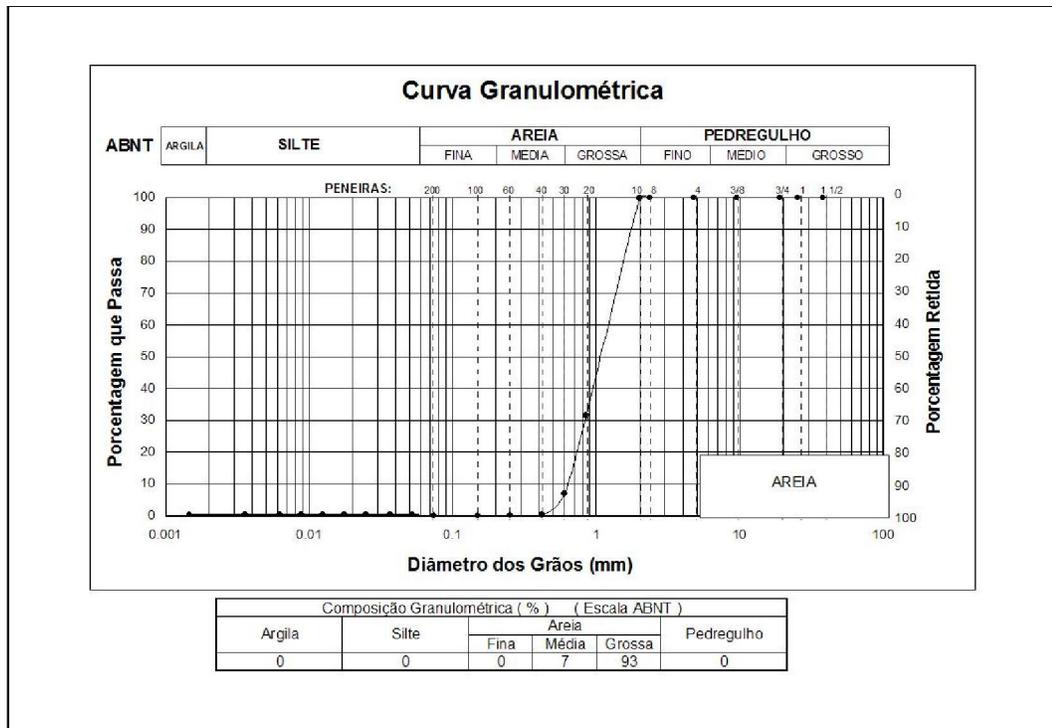


Figura 5.1 Curva granulométrica da areia pesquisada

### 5.1.1.2 CURVA CARACTERÍSTICA DA AREIA

Os ensaios para obtenção dos valores para o traçado da curva característica do solo em estudo foram feitos nos laboratórios da EMBRAPA SOLOS/RJ com o uso de uma câmara de pressão de Richards



Figura 5.2 Câmara de pressão de Richards

A seguir os valores de sucção usados nos ensaio são mostrados na tabela 5.1

**Tabela 5.1 Valores de sucção mátrica x umidade volumétrica**

Câmara de Pressão	
Sucção Mátrica (kPa)	$\theta$ (%)
6	2,73
10	1,99
33	1,00
100	0,99
500	1,00
1.500	1,03
1	46,75

Na sequência, apresentam-se os parâmetros usados para obtenção de  $\theta_s$  no ponto de saturação, na tabela 5.2

**Tabela 5.2 Umidade volumétrica ( $\theta_s$ ) no ponto de saturação**

Anel			
P.T.H. (g)	7395,91		
P.T.S. (g)	6994,80		
Tara (anel) g	5783,30		
P.S.->Ms (g)	<b>1211,50</b>		
w (%)	33,11	<b>46,75</b>	<b><math>\theta_s</math> (%)</b>
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	<b>14,12</b>		
$\gamma_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	<b>18,80</b>		

A tabela 5.3 mostra os índices físicos do solo pesquisado.

**Tabela 5.3 Índices físicos**

Anel n°		Aparelho Extrator de Richard				
Gs:		2,652				
$\emptyset$ interno (mm)	H (mm)	Vt (cm <sup>3</sup> )	Vs (cm <sup>3</sup> )	Vv (cm <sup>3</sup> )	Porosidade n (%)	Índice de vazios e
7,68	18,52	<b>857,93</b>	<b>456,83</b>	<b>401,11</b>	<b>46,75</b>	<b>0,88</b>
	18,52					
	18,52					
	18,52					

Por último, a tabela 5.4 apresenta os parâmetros usados para o ajuste da curva característica segundo o modelo de van Genuchten.

**Tabela 5.4 Parâmetros de ajuste para curva característica por van Genuchten**

$\theta_s$	$\Theta$	$\alpha$	$n$	$m$
0,4675	0,546	0,0010	5,8	0,83

A figura 5.3 mostra a curva característica do solo pesquisado.

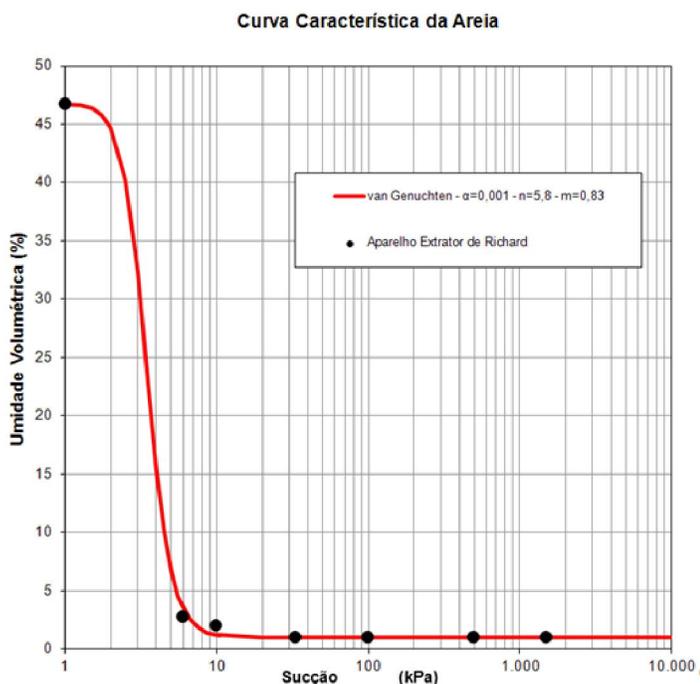


Figura 5.3 Curva característica da areia pesquisada

### 5.1.1.2 PERMEABILIDADE

A permeabilidade da areia à água foi obtida através de ensaio com carga constante. O valor para a areia em estudo é de  $4,59 \times 10^{-2}$  cm/s.

Usando-se a equação proposta por Taylor (1948) e os parâmetros da água, pode-se obter o valor de  $K = 4,59 \cdot 10^3 \text{ s}^{-2}$ .

Na sequência, utilizando-se o parâmetro K pode-se obter a permeabilidade desta areia ao tolueno agora, usando-se peso específico e viscosidade do contaminante.

Assim, chega-se a um valor de permeabilidade do solo ao tolueno ( $k_t$ ) igual a  $3,1 \times 10^{-2}$  cm/s.

Para o cálculo da permeabilidade não saturada do solo, utiliza-se a expressão 2.15.

Obtém-se o valor da permeabilidade não saturada do solo com o valor de  $k(\theta) = 0,165 \times 10^{-2}$  cm/s

Caso se queira calcular a permeabilidade do solo não saturada ao tolueno, poderá se usar a equação de Taylor, tendo-se como referência o valor obtido para a permeabilidade não saturada para a água.

Assim, obtém-se o valor de  $K = 0,165 \times 10^3$  s<sup>-2</sup>.

Novamente, trabalhando-se com os parâmetros do tolueno, obtém-se a permeabilidade da areia ao tolueno igual a  $0,11 \times 10^{-2}$  cm/s.

### 5.1.2 TOLUENO

O tolueno é um dos principais componentes da gasolina, sendo por isto escolhido para ser utilizado nesta pesquisa. O Tolueno, ou Toluol (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>) é um hidrocarboneto aromático líquido aquoso, sem coloração, de odor agradável, mais leve que a água. O tolueno a menor pressão de vapor dentre os componentes do grupo BTEX. Assim, para a técnica de injeção de vapor e ar, pode-se considerar a remoção do tolueno como um limite inferior deste grupo.

A seguir, as propriedades físico-químicas e ambientais do tolueno são apresentadas na tabela 5.5.

Tabela 5.5 Propriedades físico-químicas e ambientais do Tolueno (CETESB, 2009)

PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E AMBIENTAIS		
<b>Peso molecular</b> 92,14	<b>Ponto de ebulição (°C)</b> 110,6	<b>Ponto de fusão (°C)</b> -95
<b>Temperatura crítica (°C)</b> 318,6	<b>Pressão crítica (atm)</b> 40,55	<b>Densidade relativa do vapor</b> NÃO PERTINENTE
<b>Densidade relativa do líquido (ou sólido)</b> 0,867 A 20 °C (LÍQUIDO)	<b>Pressão de vapor</b> 40 mm Hg A 31,8 °C	<b>Calor latente de vaporização (cal/g)</b> 86,1
<b>Calor de combustão (cal/g)</b> -9,686	<b>Viscosidade (cP)</b> 0,58	
<b>Solubilidade na água</b> 0,05 g/100 mL DE ÁGUA A 20 °C	<b>pH</b> NÃO PERT.	
<b>Reatividade química com água</b> NÃO REAGE.		
<b>Reatividade química com materiais comuns</b> NÃO REAGE.		
<b>Polimerização</b> NÃO OCORRE.		
<b>Reatividade química com outros materiais</b> INCOMPATÍVEL COM OXIDANTES FORTES.		
<b>Degradabilidade</b> BIODEGRADÁVEL (100% DE REMOÇÃO APÓS 192 HORAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA NATURAL A 13°C).		
<b>Potencial de concentração na cadeia alimentar</b> NENHUM.		
<b>Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)</b> 0%5 DIAS;38%(TEOR),8DIAS.		
<b>Neutralização e disposição final</b> QUEIMAR EM UM INCINERADOR QUÍMICO EQUIPADO COM PÓS-QUEIMADOR E LAVADOR DE GASES. TOMAR OS DEVIDOS CUIDADOS NA IGNIÇÃO, POIS O PRODUTO É ALTAMENTE INFLAMÁVEL. RECOMENDA-SE O ACOMPANHAMENTO POR UM ESPECIALISTA DO ÓRGÃO AMBIENTAL.		

## 5.2 MÉTODOS

### 5.2.1 PREPARO DA AMOSTRA

A caixa de areia foi preenchida segundo o método da pluviação, que possibilita garantir a homogeneidade do índice de vazios (e) e com isto, assegurar a repetibilidade dos ensaios a serem realizados. O método de preparação a ser utilizado foi o MSP (pluviação por peneiramento múltiplo). Com este método é possível obter-se corpos de prova homogêneos, para o caso de material granular com coeficiente de uniformidade relativamente pequeno. É um método que independe da influência do operador e apresenta repetibilidade. Foi desenvolvido por Miuka e Toki(1982), apud Oliveira Filho (1987). Este método consiste basicamente de um funil, onde se deposita certa quantidade de areia, e que possui em seu vértice um orifício de abertura conhecida. Abaixo dele encontra-se um sistema de quatro peneiras (número 4 na designação ABNT, de abertura 4,8 mm) superpostas e com as malhas defasadas umas em relação às outras.

O enchimento total da caixa demorou cerca de 1 hora e meia. Após isto, foi possível verificar, visualmente, a homogeneidade da camada de areia depositada.

Após o carregamento da caixa de inox, foi colocado material selante sobre a tampa. Terminado o período de cura, a tampa foi instalada.

### **5.2.2 ENSAIOS**

Foram inseridos 300 ml de tolueno no interior da caixa de inox (110 x 74 x 8,5 cm) através de um furo central localizado na tampa da caixa. Para isto, foram feitas, com uso de bureta graduada de 50 ml, medições de volume do tolueno usado no ensaio. Um tubo com furos na sua base foi usado como agente condutor do tolueno até o interior da massa de solo, sendo depositado pouco abaixo do topo da caixa. O Tolueno foi depositado um pouco abaixo do topo da caixa por causa da preocupação da ocorrência de precipitação durante o processo de injeção apenas de vapor.

Como a caixa de inox foi recoberta por uma chapa de aço, infelizmente, o monitoramento visual não foi possível. Apesar disto, pôde-se acompanhar a linha do tempo das medições de temperaturas obtidas com o data logger (coletor de dados) através das leituras das temperaturas obtidas pelos termopares instalados na parte traseira da caixa. Uma queda brusca de temperatura, em qualquer parte da caixa pode indicar um instante de resfriamento da região em estudo monitorada e conseqüente precipitação de fluido tratado.

Os valores de pressão de injeção de ar e/ou vapor também foram monitorados com auxílio de manômetros instalados na central de gases.

O sistema de geração de vapor é ligado com antecedência de 60 min. para que seja iniciada a formação do vapor no interior do gerador.

Os fluidos (ar e vapor) são encaminhados através de tubulações distintas até registros que fazem a conexão desta tubulação com a caixa inox. Tais registros permitem a passagem de ar e/ou vapor isoladamente e também da mistura.

Os tempos de condensação da primeira e da última gotas de efluente no condensador são anotados para avaliações de volume e velocidade de percolação posteriores.

Os ensaios tiveram duração média de 5 horas (a contar do início da injeção dos fluidos no interior da caixa).

Para o caso específico dos ensaios onde se usou vácuo, considerou-se a pressão de vapor que seria gerado para o valor do vácuo aplicado, ao invés das temperaturas lidas nos termopares, uma vez que com a diminuição da pressão externa sobre o contaminante, a pressão de vapor do mesmo irá diminuir na mesma proporção que o vácuo aplicado. No caso, foi aplicado um vácuo de 1 atm e, assim, considerou-se a temperatura de 110 °C para os ensaios do terceiro lote.

### **5.2.3 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS**

A coleta e o tratamento dos dados foram realizados com os equipamentos descritos no item 4.3.4.

Foram documentados relatórios de temperatura de vários instantes dos ensaios onde foi possível a identificação de fenômenos que ocorreram durante os ensaios e também a confecção de curvas de isotermas para um maior detalhamento das variações de temperatura que ocorriam no interior da caixa de inox durante os ensaios.

Estes gráficos e curvas são comentados, mais adiante, na apresentação dos resultados de cada ensaio realizado.

### **5.2.4 COLETA DE EFLUENTES**

A coleta dos efluentes dos ensaios foi feita utilizando-se os equipamentos descritos em 3.3.5.

Para os ensaios dos lotes 01 e 02, realizou-se o seguinte procedimento: O material recolhido nas garrafas coletoras foi colocado em uma proveta graduada para medição de volumes e seus valores anotados.

O carvão ativado foi colocado em uma estufa para secagem e, após este procedimento, pesado para verificação de diferença de massas.

Para os ensaios do 3º lote, o material que foi condensado e recolhido no kitasato foi medido em uma proveta graduada para aferição do volume de efluente coletado.

### 5.2.5 PLUVIAÇÃO DA AREIA

Uma das preocupações iniciais foi estabelecer um procedimento para garantir a deposição uniforme da areia na caixa. Definida a utilização do método da pluviação, surgiu um questionamento sobre a influência da altura de queda no índice de vazios do material.

Desta forma, várias séries de ensaios foram executadas onde se variou a altura de queda, de poucos centímetros até a altura da caixa (figura 5.2).



Figura 5.2 Verificação da influência da altura de pluviação no índice de vazios.

Não se observou até a altura correspondente ao bordo da caixa variações no índice de vazios da areia depositada. Desta forma, constatou-se que a pluviação da areia poderia ser efetuada a partir do topo da caixa inox sem comprometimento de qualidade.

### 5.2.6 VERIFICAÇÃO DA ESTANQUEIDADE DA CAIXA

Devido a problemas de construção, a tampa superior desta caixa e também os suportes da placa de vidro apresentaram deformações quando da injeção de pressão (mesmos valores adotados nos ensaios) que comprometeram a estanqueidade da mesma, inviabilizando a sua operação.

Assim, os primeiros testes (Figura 5.3) tiveram que ser interrompidos por problemas de vazamento. Como este problema se tornou recorrente, após várias tentativas e estudos sobre possíveis soluções, chegou-se à conclusão que os problemas de vedação não seriam propriamente resolvidos sem se corrigirem as deformações que se verificavam na mesma, principalmente na vedação do encaixe da tampa.



Figura 5.3 Ensaio preliminar onde se vê uma fase livre de tolueno sobre o NA.

Desta forma, foi necessária a construção de nova caixa mais rígida conforme relato no item 3.3.1.

## CAPÍTULO 6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Apresentam-se e discutem-se nesse capítulo os resultados dos estudos efetuados. Dentre estes, apresentam-se estudos preliminares que permitiram verificar e corrigir falhas na sistemática de operação e na estrutura do modelo originalmente estabelecida.

Para todos os ensaios realizados, onde foi possível medir volume de extração de efluentes, observou-se que após um certo período de tempo, não havia mais saída de efluentes. Para confirmação destes eventos, os ensaios foram continuados por períodos de até uma hora após cessar a coleta de efluentes. Em um dos ensaios realizados, após o término do mesmo, o gerador de vapor foi recarregado e o ensaio retomado. Ainda assim, não se obteve mais efluentes, o que confirma que a cessão da saída de efluentes não estava dependente do volume de vapor gerado, uma vez que a parada ocorria antes de terminar a água do gerador de vapor.

### 6.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Realizaram-se 04 (quatro) ensaios preliminares para verificação da eficácia da técnica em estudo. Esta campanha teve como particularidade de contar com um sistema de coleta de efluentes deficiente. Esta condição foi sanada nos grupos de ensaios efetuados posteriormente. A seguir, são apresentados detalhes específicos sobre estes ensaios. Têm-se como fatores envolvidos:

VR = Volume de efluente coletado após o ensaio;

$\Delta S$  = Distância percorrida de ar e/ou vapor. Considera-se por simplificação  $\Delta S = 110$  mm (comprimento da caixa); Este valor é adotado para todos os ensaios;

Te = Tempo de duração do ensaio, adotado como sendo o instante inicial das leituras dos termopares e 1 hora após o cessar da retirada de efluentes;

Pi = Pressão atuante;

Ti = Tempo decorrido até a obtenção da primeira gota de efluente;

V = Velocidade média de saída do efluente ( $\Delta S/T_i$ );

TR = Te – Ti = Período em que foi realizada a extração de efluente;

Q = Vazão média do efluente = VR/TR.

### 6.1.1 ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (2:1)

O primeiro ensaio foi feito com a proporção de pressões de 2 unidades de ar para 1 unidade de vapor. Foram adotadas as pressões de ar de 50 kPa e de vapor de 25 kPa. Sob esta condição, a mistura apresenta-se com temperatura média inferior à que seria obtida unicamente com injeção de vapor. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados:

**Tabela 6.1 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio**

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
10,50	293	156	0,70	137	0,07

Somente a partir de 156 min após o início do ensaio, é que começou a saída de material para o sistema de coleta de efluentes, como pode ser visto na figura 6.1. onde se tem uma representação do montante de efluente retirado (10,50 ml) ao longo do tempo de ensaio. A retirada iniciou-se após 150 min., tendo-se finalizado o ensaio em 293 min. A eficiência da recuperação apresentou-se muito baixa visto que o total de tolueno injetado ao início do ensaio foi de 300 ml.

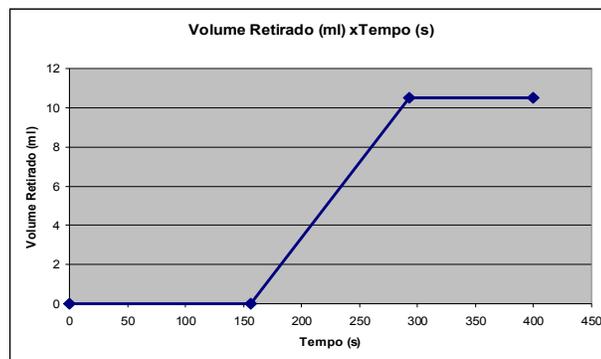


Figura 6.1 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, Primeiro lote).

Nos primeiros 30 minutos de ensaios (figura 6.2), observa-se uma zona de aquecimento junto à face esquerda inferior da caixa de inox. Com o desenvolver do

ensaio, esta zona ia aumentando porém, a temperatura interna média da caixa não ultrapassou os 50 °C até os 120 min.



Figura 6.2 Curvas de isoterma no instante 30 min.

Com base nas leituras dos termopares, observou-se que, nos instantes iniciais até os primeiros 120 min., há um contínuo aumento das temperaturas internas da caixa. Como seria de se esperar, existem alguns pontos onde ocorre uma perturbação térmica, caracterizada por um decréscimo de temperatura, durante um breve espaço de tempo, seguido por uma recuperação do valor da temperatura aos níveis de antes do acontecimento deste evento. Estes pequenos ciclos isolados sugerem um resfriamento da frente de calor nestes pontos e, também, a ocorrência do fenômeno de condensação do contaminante. Este efeito de condensação não é desejado pois, uma vez que o fluido seja resfriado, este poderá vir a sofrer um processo de migração descendente e atingir o nível do N.A. Nota-se que em regiões muito próximas, ocorrem diferenciais de temperatura da ordem de 5 °C.

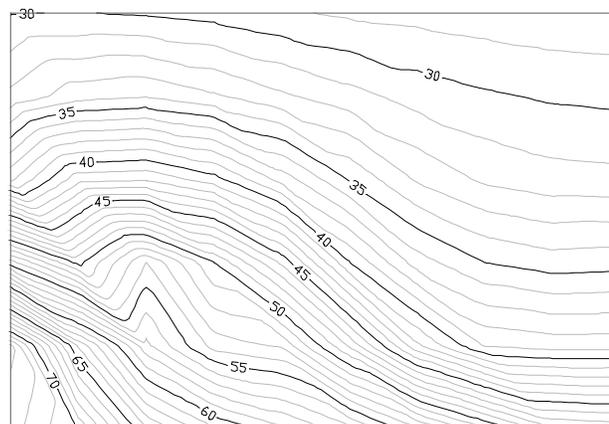


Figura 6.3 Curvas de isoterma no instante 120 min.

Na figura 6.4 observa-se que os diferenciais de temperatura estão ainda mais próximos, indicando uma perda muito rápida de energia entre os pontos estudados, ou seja, zonas de resfriamento, que favorecem a condensação do tolueno volatilizado.

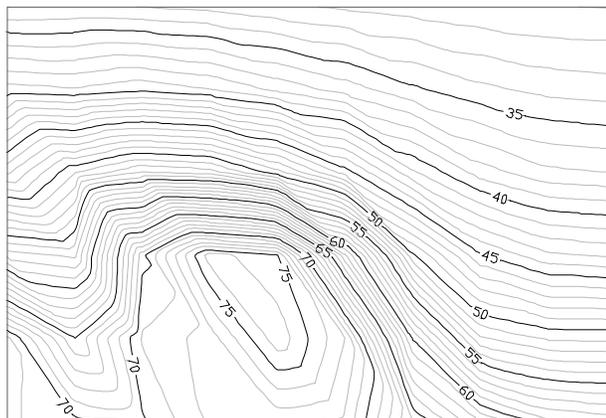


Figura 6.4 Curvas de isoterma no instante 210 min.

Com base nas equações 3.13, 3.14 e 3.15 calculou-se o valor teórico de efluente que poderia ser recuperado. Na anexo são apresentados os cálculos efetuados.

Percebe-se um gradiente de temperatura de até 40 °C entre as regiões mais e menos aquecidas.

A presença de uma zona de aquecimento no canto esquerdo inferior do modelo físico, abaixo do N.A, sugere que a presença de água tenha favorecido o aquecimento desta região, uma vez que a água é melhor condutor de calor do que o ar.

De acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 49,50 ml e o valor obtido foi de 10,50 ml.

### 6.1.2 ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (1:1).

Foram adotadas as pressões de ar de 50 kPa e de vapor de 50 kPa neste segundo ensaio. Esperava-se, neste ensaio, um resultado superior ao obtido anteriormente, visto que uma maior pressão de vapor levaria a uma mistura com uma temperatura média maior.

**Tabela 6.2 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio**

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
12,50	198	82	1,34	116	0,10

Somente a partir de 82 min após o início do ensaio, é que começou a saída de material para o sistema de coleta de efluentes, como pode ser visto na figura 6.5.

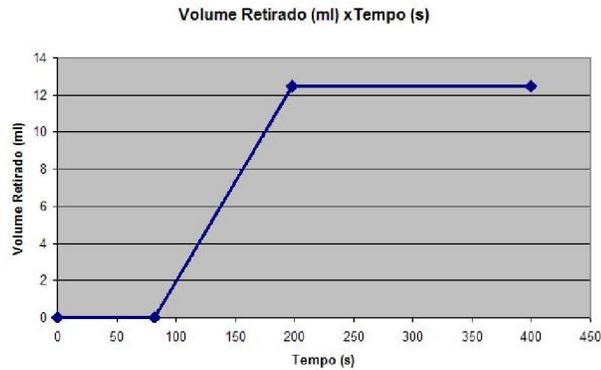


Figura 6.5 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 02, Primeiro lote).

Nos primeiros 30 minutos, observa-se um comportamento semelhante ao ensaio anterior, com uma zona de aquecimento maior na região esquerda inferior da caixa de inox, conforme mostrado na figura 6.6.



Figura 6.6 Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos.

Aos 120 min., nota-se novamente, um comportamento de distribuição de temperaturas semelhante ao ensaio anterior. Observa-se, também, que a zona de

aquecimento não ultrapassa a metade do comprimento da caixa ( 55 cm), como apresentado na figura 6.7.

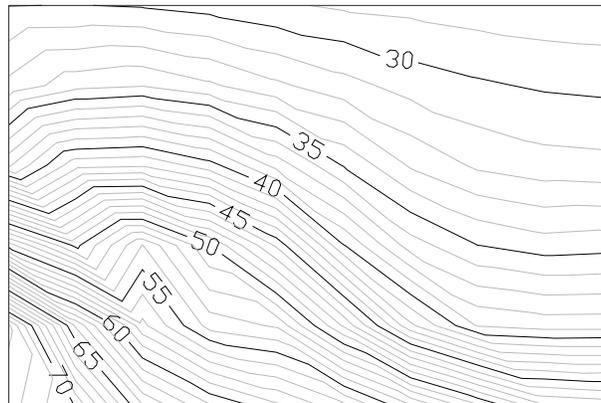


Figura 6.7 Curvas de isoterperatura no instante 120 minutos.

As temperaturas medidas nos termopares também se apresentaram mais elevadas ao final do ensaio (figura 6.8), indicando que a mistura injetada tinha uma temperatura mais elevada. Porém, observa-se que uma região da caixa apresentava temperaturas entre 35 e 45 °C. Esta zona de temperaturas mais baixas poderia facilitar o processo de condensação do contaminante volatilizado.



Figura 6.8 Curvas de isoterperatura no instante 270 minutos.

O volume de efluente extraído foi da ordem de 19% superior ao observado no ensaio anterior.

O fenômeno do aquecimento canto esquerdo inferior do modelo físico se amplia para toda a zona abaixo do N.A( nível d'água). Isto mais uma vez ocorre pelo fato da

condutividade térmica da água ser aproximadamente três vezes o valor da condutividade térmica do ar.

Com base nas equações 3.13, 3.14 e 3.15 calculou-se o valor teórico de efluente que poderia ser recuperado. Na anexo são apresentados os cálculos efetuados. De acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 97,50 ml e o valor obtido foi de 12,50 ml.

### 6.1.3 ENSAIO COM INJEÇÃO DE AR

O terceiro ensaio foi feito somente com injeção de ar (50 kPa). Dessa forma, a temperatura interna foi insuficiente para se atingir o ponto de ebulição do tolueno. Obteve-se um volume nulo de efluente nos 205 min. do ensaio.

As variações de temperatura ocorridas durante esse ensaio foram mínimas, como pode ser visualizado nas figuras 6.9 e 6.10 para os instantes 30 min e 180 min após o início do mesmo.

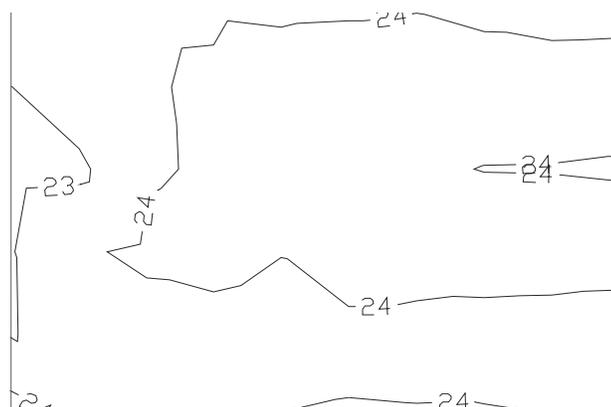


Figura 6.10 Curvas de isotemperatura no instante 30

Observa-se que, decorrido quase todo o tempo do ensaio, as temperaturas são baixas (temperatura ambiente) e praticamente invariáveis, como pode ser visto na figura 6.10. Desta forma, a eficiência da remoção foi muito limitada.

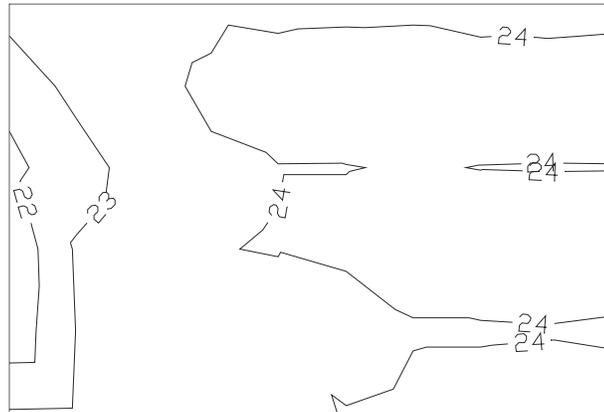


Figura 6.10 Curvas de isotemperatura no instante 180

Com base nas equações 3.13, 3.14 e 3.15 calculou-se o valor teórico de efluente que poderia ser recuperado. Na anexo são apresentados os cálculos efetuados. De acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 10,72 ml e o valor obtido foi de 0,0 ml.

Como neste ensaio não foi injetado o vapor, não se observou a ocorrência do aquecimento localizado da região saturada do solo.

#### 6.1.4 ENSAIO COM INJEÇÃO APENAS DE VAPOR

No quarto ensaio desta seqüência de testes, injetou-se apenas vapor com uma pressão de 50 kPa. Era de se esperar temperaturas médias superiores às observadas nos ensaios anteriores.

Como comentado anteriormente, a temperatura mais elevada favorece o início do processo de vaporização do contaminante por um lado mas, por outro, pode, também, acelerar e aumentar os processos de condensação de contaminantes junto à frente de calor. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados

Tabela 6.3 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
9,0	302	138	0,80	164	0,054

Somente a partir da velocidade de 138 min após o início do ensaio, é que começou a saída de material para o sistema de coleta de efluentes, como pode ser visto na figura 6.11.

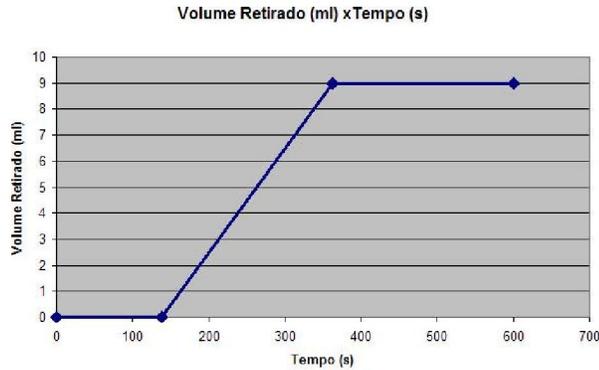


Figura 6.11 Volume retirado ao longo do tempo ( Ensaio 04, primeiro lote).

Os 30 minutos iniciais do ensaio apresentam comportamento semelhante aos outros ensaios, com a presença de uma zona de aquecimento do lado esquerdo inferior., conforme mostra a figura 6.12.



Figura 6.12 Curvas de isotemperatura no instante 30

Nos instante subsequentes, percebe-se que a zona de aquecimento se expandiu porém, existe uma região com temperaturas mais baixas no canto direito superior da caixa, com mostrado na figura 6.13.

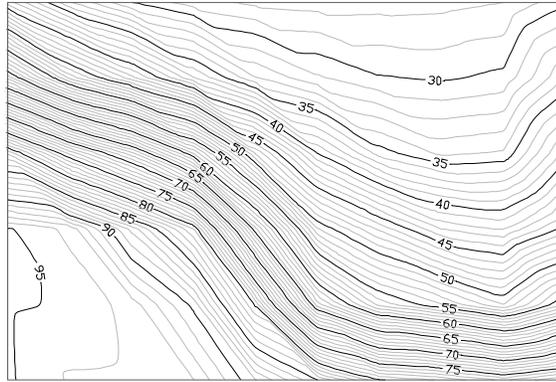


Figura 6.13 Curvas de isoterma no instante 150 min.

No instante 240 minutos, pode-se observar uma região pequena muito aquecida na base da caixa. No ponto central da caixa, observam-se variações de temperatura de 35 °C em relação ao ponto mais aquecido, conforme visto na figura 6.14. Lembrando-se que o contaminante foi inserido nesta região central e que, esta diferença de temperaturas pode atrapalhar o processo de volatilização do tolueno.

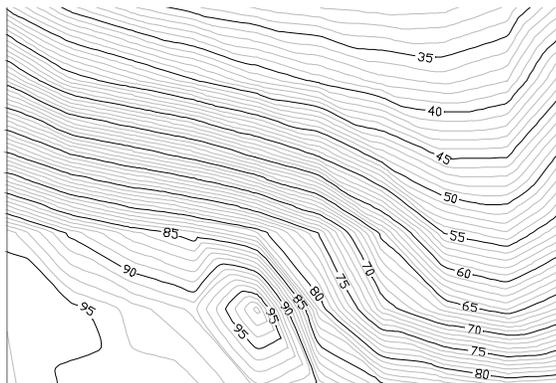


Figura 6.14 Curvas de isoterma no instante 240 min.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 132,11 ml e o valor obtido foi de 9,0. ml. Cabe lembrar que o modelo simplificado não considera a possibilidade da migração descendente que pode ocorrer quando da injeção somente de vapor.

Mais uma vez, observa-se a existência da zona de aquecimento no canto esquerdo inferior do modelo físico que se expandiu pela zona saturada do solo.

### 6.1.5 CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS PRELIMINARES.

Ficou evidenciada a importância da injeção conjunta de ar e vapor. A razão 1:1(ar:vapor) apresentou valor de volume de recuperação de efluente 11,67 % superior à razão 2:1, chegando a apresentar valor 40% superior ao valor obtido no ensaio feito somente com injeção de vapor.

A figura 6.15 apresenta o tempo de início, duração do ensaio e volumes retirados de efluente nos ensaios efetuados. Pode-se verificar o menor tempo gasto e também a maior quantidade de efluente retirada no segundo ensaio.

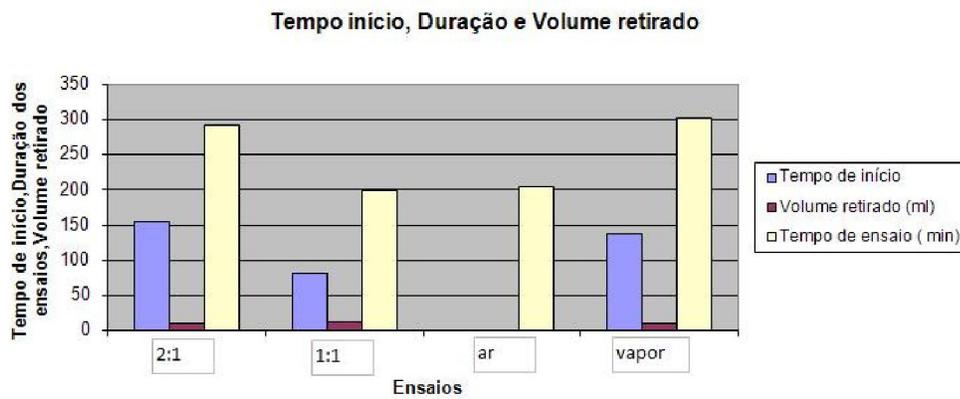


Figura 6.15 Tempos de início de retirada de efluente, duração e volume retirado nos ensaios.

No segundo ensaio, tem-se uma maior eficiência. Além do maior volume de efluentes registrado e menor tempo gasto, a temperatura interna é menor e têm-se menos oscilações de temperatura. Isto evita o fenômeno da condensação e migração descendente.

Os ensaios iniciais apresentaram baixa eficiência na recuperação dos gases, sugerindo que o sistema de drenagem adotado era insuficiente.

Levantou-se, também, a hipótese que a interferência tivesse origem no rearranjo das partículas da areia sob as pressões de injeção dos fluídos. Tal fato levaria a uma densificação adicional da mesma e, conseqüentemente redução na permeabilidade do solo. No entanto, a curva granulométrica desta areia é muito uniforme, com mais de 90% de material grosso, 7% de material de granulometria média e nenhum material fino. Daí, a hipótese do rearranjo dos grãos perde fundamento. Ao final dos ensaios, verificou-se que, de fato, o sistema de drenagem tinha sido bloqueado por partículas de solo.

Os resultados demonstraram que é conveniente o aumento da pressão de injeção de vapor. Deve-se atentar que deve existir um ponto ideal para esta pressão, como também para a pressão de injeção de ar. Valores muito elevados de pressão de vapor levariam a grandes gradientes térmicos e, conseqüentemente, favoreceriam a condensação do contaminante. Deve-se também destacar que no ensaio somente com injeção de vapor, as temperaturas mais elevadas localizaram-se no fundo da caixa, abaixo da zona de contaminação.

O fenômeno do aquecimento canto esquerdo inferior do modelo físico se manifesta por toda a região saturada do solo. Isto se deve ao fato da condutividade térmica da água ser aproximadamente três vezes o valor da condutividade térmica do ar. Este comportamento não é observado na zona não saturada do solo

Todos os valores obtidos foram significativamente menores do que os sugeridos pelo método simplificado, o que colabora com a hipótese de deficiência no sistema de drenagem.

## **6.2 SEGUNDO LOTE DE ENSAIOS**

Considerando-se os baixos valores de eficiência obtidos nos ensaios anteriores, decidiu-se fazer mudanças no modelo físico, em relação ao sistema de drenagem adotado. Desta vez, usou-se um tubo de PVC de 1" (2,54 cm) perfurado e revestido com palha de aço como elemento filtrante. Optou-se pela palha de aço por considerar que esta seria mais resistente ao contato com o contaminante e às elevadas temperaturas.

Deve-se destacar que os volumes de efluentes recuperados neste novo conjunto de ensaios foram significativamente superiores aos observados anteriormente. Tal fato confirma as suspeitas sobre a colmatação do sistema de drenagem anteriormente adotado.

Estes ensaios seguiram os mesmos procedimentos e trabalhou-se com os mesmos fatores adotados no primeiro conjunto de ensaios.

### 6.2.1 ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (2:1).

Este primeiro ensaio do segundo lote, foi feito com a proporção de pressões de 2 unidades de ar para 1 unidade de vapor. Foram adotadas as pressões de ar de 50 kPa e de vapor de 25 kPa. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 6.4 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
61	304	143	0,76	161	0,38

Na figura 6.16, apresenta-se uma representação do montante de efluente retirado (61 ml) ao longo do tempo de ensaio. A retirada iniciou-se após 143 min., tendo-se finalizado o ensaio em 304 min. A eficiência da recuperação apresentou-se muito superior à do primeiro ensaio.

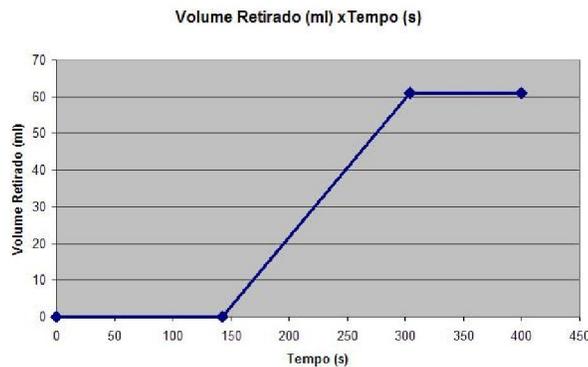


Figura 6.16 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, Segundo lote).

Nota-se, nos primeiros 30 minutos de ensaio, uma maior e mais uniforme distribuição de temperaturas dentro da zona de aquecimento. Além disto, a diferença entre o ponto mais aquecido e o menos, agora, é de 20 °C, conforme visto na figura 6.17.

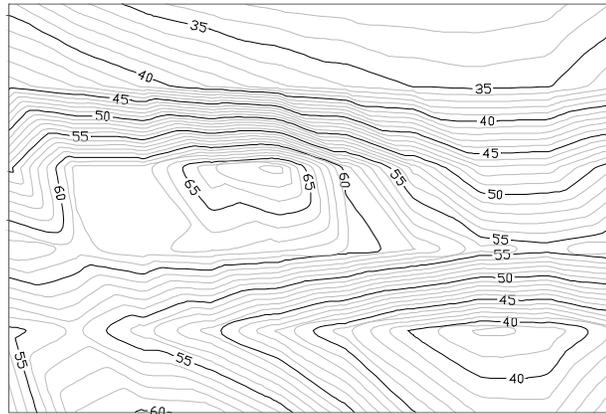


Figura 6.17 Curvas de isoterma no instante 30 min.

Observa-se a formação de uma zona de aquecimento central (onde foi depositado o contaminante). Este evento, provavelmente, iria favorecer o processo de volatilização do tolueno.

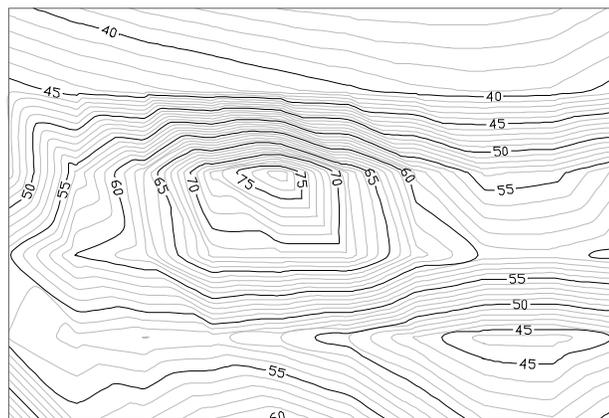


Figura 6.18 Curvas de isoterma no instante 120 min.

Nos instantes finais do ensaio, nota-se a permanência da zona aquecida. Ao mesmo tempo em que se observa um diferencial de até 40 °C entre esta região e a zona menos aquecida, como mostra a figura 6.19.

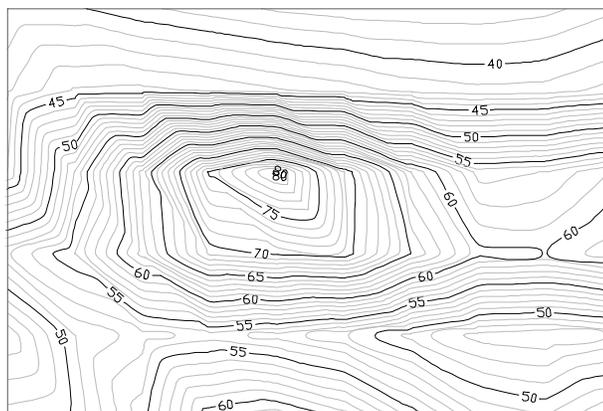


Figura 6.19 Curvas de isotemperatura no instante 180 min.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 70,04 ml e o valor obtido foi de 61,0. ml.

### 6.2.2 ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (1:1).

Nesse segundo ensaio foram adotadas as pressões de ar de 50 kPa e de vapor de 50 kPa. Obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 6.5 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
114	305	87	1,26	218	0,52

Na figura 6.20 apresenta-se a evolução da retirada de efluentes (114 ml) ao longo do ensaio. A retirada iniciou-se após 87 min., tendo-se finalizado o ensaio em 305 min. A eficiência da recuperação apresentou-se muito superior aos dos demais ensaios.

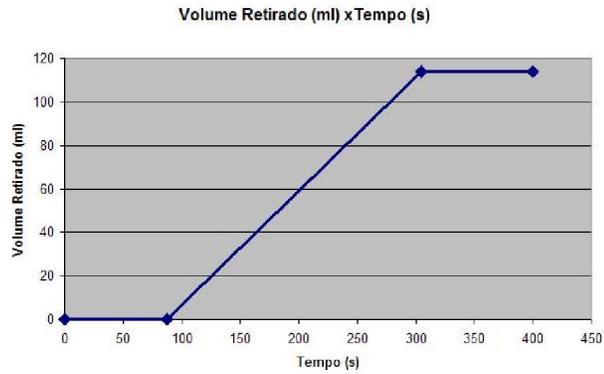


Figura 6.20 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 02, Segundo lote).

Nos instantes iniciais, nota-se um aquecimento da região à esquerda da caixa, com grandes diferenciais de temperaturas para os pontos mais à direita. Em alguns pontos, este diferencial chega a 35 °C entre os pontos mais e menos aquecidos, como visto na figura 6.21.



Figura 6.21 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

Aos 120 minutos, pode-se verificar que a zona de aquecimento aumenta substancialmente e um maior aquecimento na região central da caixa, conforme mostrado na figura 6.22.



Figura 6.22 Curvas de isoterma no instante 120 minutos.

As temperaturas medidas nos termopares também se apresentaram mais elevadas ao final do ensaio (figura 6.23), indicando que a mistura injetada tinha temperatura mais elevada.

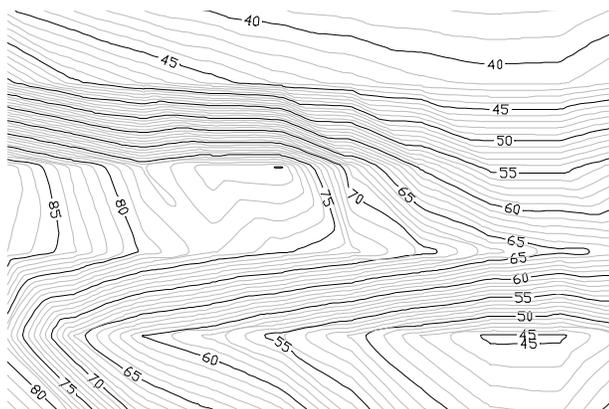


Figura 6.23 Curvas de isoterma no instante 210 minutos.

O volume de efluente extraído foi da ordem de 86 % superior ao observado no ensaio anterior.

Mais uma vez, observa-se que a zona saturada apresenta temperaturas superiores à região não saturada.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 72,46 ml e o valor obtido foi de 114 ml. Observa-se que este foi o único ensaio onde o valor obtido foi superior ao valor previsto. Isto confirma que a utilização do ar realmente teve efeito sobre o volume de efluente retirado.

### 6.2.3 ENSAIO COM INJEÇÃO DE AR

O terceiro ensaio, deste segundo lote, foi feito somente com injeção de ar (50 kPa). Aconteceu, como no ensaio correspondente do primeiro lote, que a temperatura interna foi insuficiente para se atingir o ponto de ebulição do tolueno. Assim, obteve-se também, neste ensaio, uma retirada nula de efluente nos 305 min. do ensaio.

Novamente, as oscilações de temperaturas, ocorridas durante este ensaio, foram mínimas, como pode ser visualizado nas figuras 6.24 e 6.25 para os instantes 30 min e 270 min após o início do mesmo.



Figura 6.24 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.



Figura 6.25 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 11,26 ml e o valor obtido foi de 0,0 ml.

#### 6.2.4 ENSAIO COM INJEÇÃO DE VAPOR

No quarto ensaio do segundo lote, injetou-se apenas vapor a uma pressão de 50 kPa. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 6.6 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
44	301	133	0,82	168	0,26

Na figura 6.26 apresenta-se a evolução da retirada de efluentes (44 ml) ao longo do ensaio. A retirada iniciou-se após 133min., tendo-se finalizado o ensaio em 301 min. Apesar da temperatura mais elevada, a recuperação ficou aquém do que se verificou nos dois ensaios anteriores ( Ensaios 1 e 2 do segundo lote).

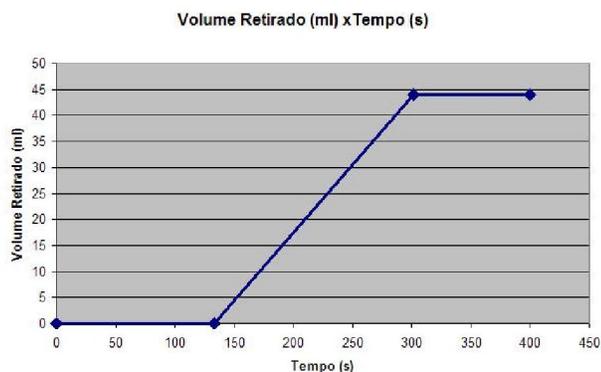


Figura 6.26 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 04, Segundo lote).

A temperatura mais elevada favorece o início do processo de vaporização do contaminante por um lado mas, por outro, pode, como já comentado, aumentar os gradientes de temperatura e favorecer os processos de condensação de contaminantes junto à frente de calor.

Nos primeiros 30 minutos, observa-se uma zona de aquecimento deslocando-se em sentido à zona central da caixa de inox, conforme mostra a figura 6.27.



Figura 6.27 Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos.

Ao longo do ensaio, percebe-se a formação de uma zona mais aquecida na região central que percorre da face esquerda até a face direita da caixa inox, conforme visto na figuras 6.28.

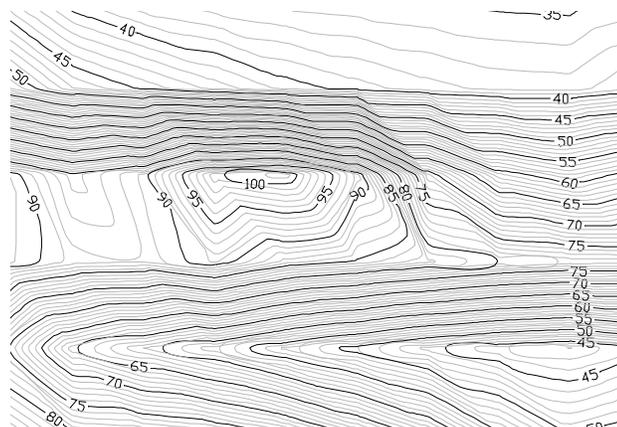


Figura 6.28 Curvas de isotemperatura no instante 90 minutos.

Nos instantes finais do ensaio, o comportamento mencionado anteriormente se mantém, conforme visto na figura 6.29. Além disto, nota-se que entre esta região mais aquecida e a menos aquecida há um diferencial de temperatura de até 55 °C.

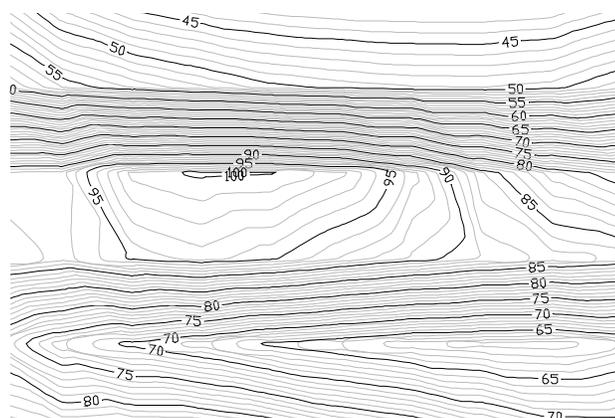


Figura 6.29 Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos.

Neste ensaio também foram observadas diferenças importantes entre as temperaturas das zonas saturada e não saturada do solo.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 132,11 ml e o valor obtido foi de 44,0 ml.

### 6.2.5 CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS DO SEGUNDO LOTE.

O ensaio com a razão 1:1(ar:vapor) apresentou volume de efluente 86 % maior do que se verificou para a razão 2:1, apresentando-se 150% superior ao valor obtido somente com injeção de vapor.

Neste segundo lote de ensaios finais verificou-se comportamento qualitativo similar ao observado no primeiro lote (ensaios preliminares). No entanto os volumes extraídos de efluente foram muito superiores.

Em todos os ensaios foram observadas diferenças importantes entre as temperaturas das zonas saturada e não saturada do solo.

No ensaio de maior eficiência ( ensaio 1:1) obteve-se, neste segundo lote, uma recuperação 912% superior à obtida no primeiro lote. Nesse ensaio, a recuperação ainda foi baixa, cerca de 38% do volume inicialmente injetado no solo ( 300 ml). No entanto, ficou destacado o potencial da técnica e a importância da injeção mista ar/vapor, em relação às técnicas convencionais de injeção somente de vapor ou de ar.

Na figura 6.30, apresenta-se o gráfico com o tempo de início, duração e volumes retirados de efluente nos ensaios efetuados. Novamente, pode-se verificar o menor

tempo gasto e também a maior quantidade de efluente retirada no segundo ensaio, onde foi aplicada a proporção 1:1 nas pressões ar/vapor.

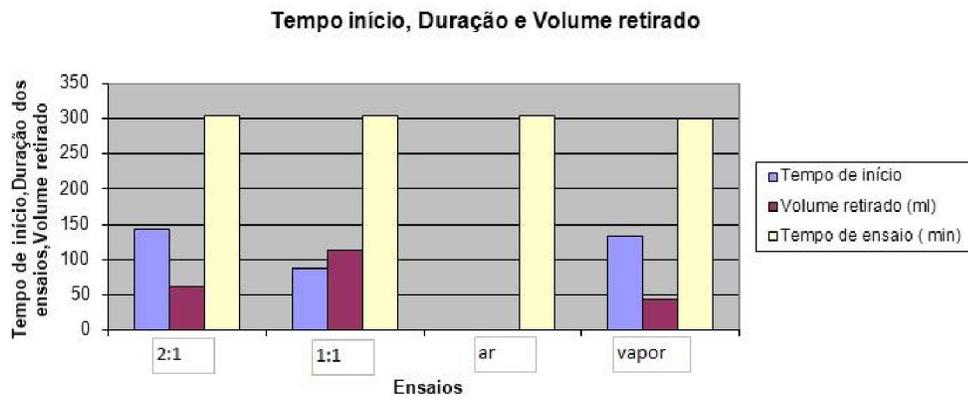


Figura 6.30 Tempos de início de retirada de efluente, duração e volume retirado nos ensaios.

### 6.3 TERCEIRO LOTE DE ENSAIOS

Para o terceiro lote de ensaios, foram feitas algumas modificações, com vistas a melhorias no processo de extração dos efluentes. Estas mudanças são mencionadas no item 4.3.5. Basicamente, incluiu-se o banho térmico e a bomba à vácuo para otimizar a coleta de efluentes.

Os volumes de efluentes recuperados neste novo conjunto de ensaios foram superiores aos observados anteriormente. Tal fato sugere a eficácia das mudanças adotadas.

Estes ensaios seguiram os mesmos procedimentos e trabalhou-se com os mesmos fatores adotados nos primeiros conjuntos de ensaios.

#### 6.3.1 ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (2:1).

O primeiro ensaio do terceiro lote, foi feito com a proporção de pressões de 2 unidades de ar para 1 unidade de vapor. Foram adotadas as pressões de ar de 50 kPa e de vapor de 25 kPa. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 6.7 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
85	270	118	0,93	152	0,56

Na figura 6.31, apresenta-se uma representação do montante de efluente retirado (85 ml) ao longo do tempo de ensaio. A retirada iniciou-se após 118 min., tendo-se finalizado o ensaio em 270 min. A eficiência da recuperação apresentou-se superior ao ensaio correspondente do segundo lote.

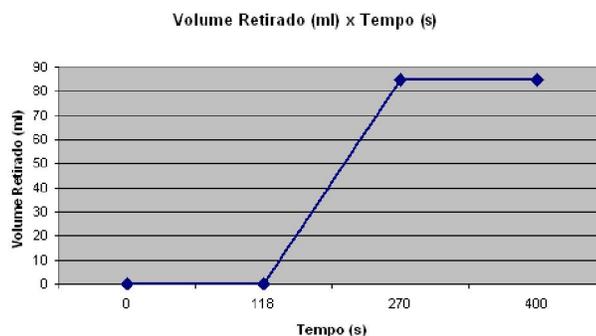


Figura 6.31 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, terceiro lote).

Nos primeiros 30 minutos do ensaio, observa-se que as temperaturas no interior estão muito pouco acima da temperatura ambiente, conforme mostra a figura 6.32. Acredita-se que este fenômeno tenha sido causado pelo uso do vácuo no sistema. Este efeito porém, foi contraposto, pelo fato de o vácuo reduzir a pressão externa sobre o tolueno. Desta forma, foi possível a volatilização do contaminante com temperaturas mais baixas.

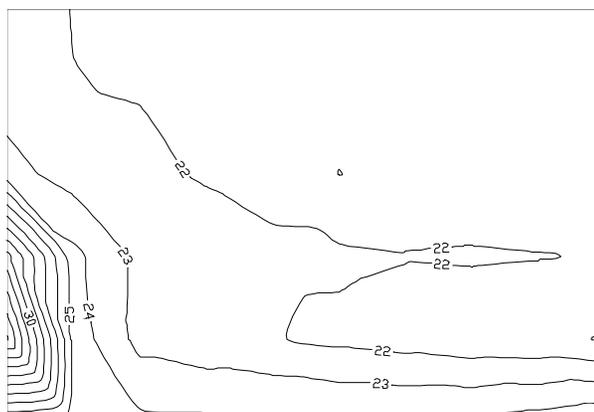


Figura 6.32 Curvas de isotemperatura no instante 30 min.

Com o decorrer do ensaio, observa-se uma zona aquecida muito pequena à esquerda da caixa. Além disto, nota-se um diferencial de temperaturas de até 40 °C entre as regiões mais e menos aquecidas, de acordo com a figura 6.33.

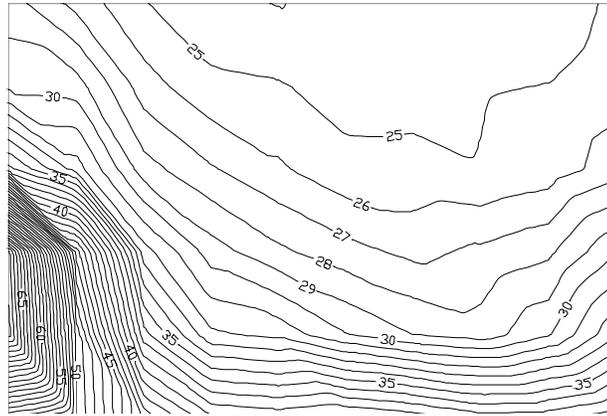


Figura 6.33 Curvas de isoterma no instante 120 min.

Na sequência, a zona de aquecimento aumenta, com o mesmo comportamento anterior, de acordo com a figura 6.34.

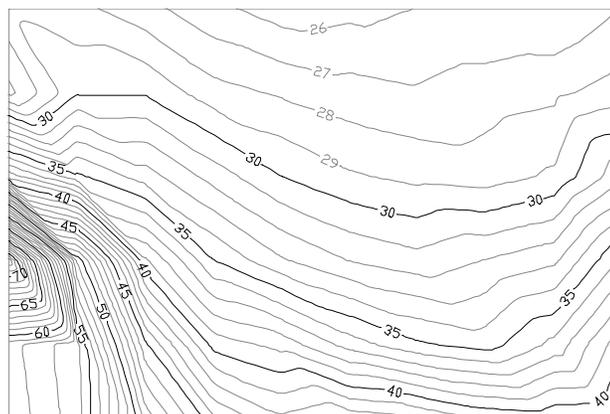


Figura 6.34 Curvas de isoterma no instante 180 min.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 229,84 ml e o valor obtido foi de 85,0 ml. Apesar das temperaturas mais baixas, a recuperação do tolueno apresentou-se superior nesse ensaio comparativamente ao correspondente do ensaio anterior, destacando a eficiência do novo sistema de coleta.

Nos minutos finais do ensaio, com a diminuição da geração de vapor e o uso contínuo do vácuo, torna-se a verificar uma região mais aquecida no lado esquerdo da caixa, como visto na figura 6.35

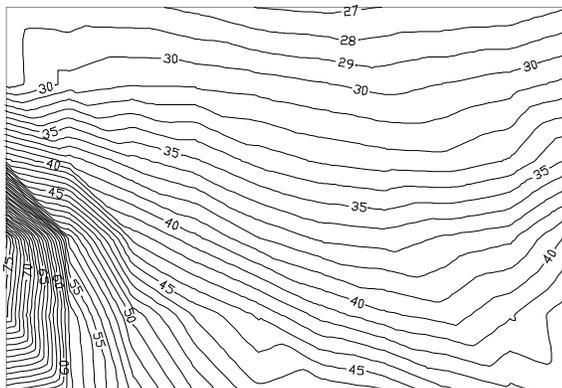


Figura 6.35 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

O comportamento mencionado no início do ensaio ( maior aquecimento da zona saturada) permanece até o final.

### 6.3.2 ENSAIO COM INJEÇÃO DE MISTURA AR/VAPOR (1:1).

Nesse segundo ensaio foram adotadas as pressões de ar de 50 kPa e de vapor de 50 kPa. Obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 6.8 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
153	316	73	1,50	243	0,63

Na figura 6.36 apresenta-se a evolução da retirada de efluentes (153 ml) ao longo do ensaio. A retirada iniciou-se após 73 min., tendo-se finalizado o ensaio em 316 min. A eficiência da recuperação apresentou-se muito superior aos dos demais ensaios.

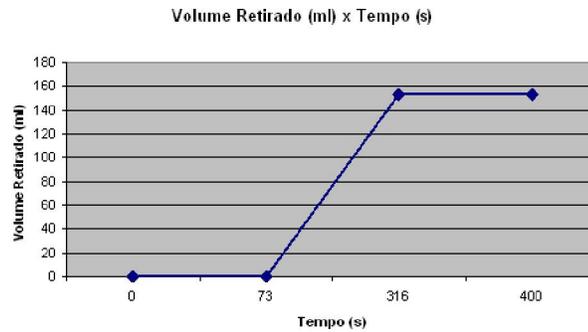


Figura 6.36 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 02, terceiro lote).

Nos instantes iniciais, nota-se um aquecimento da região à esquerda da caixa, com grandes diferenciais de temperaturas para os pontos mais à direita. Em alguns pontos, este diferencial chega a 35 °C entre os pontos mais e menos aquecidos, como visto na figura 6.37. Note-se que a zona aquecida, neste instante, é maior do a zona correspondente apresentada no ensaio anterior.

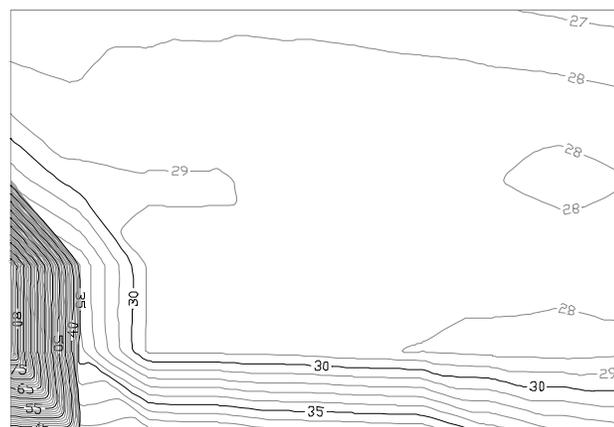


Figura 6.37 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

Aos 120 minutos, observa-se a continuidade da semelhança com o ensaio anterior, com um espalhamento maior da zona aquecida. Verifica-se, neste estágio, um diferencial de até 65 °C entre os pontos mais e menos aquecidos, de acordo com a figura 6.38.

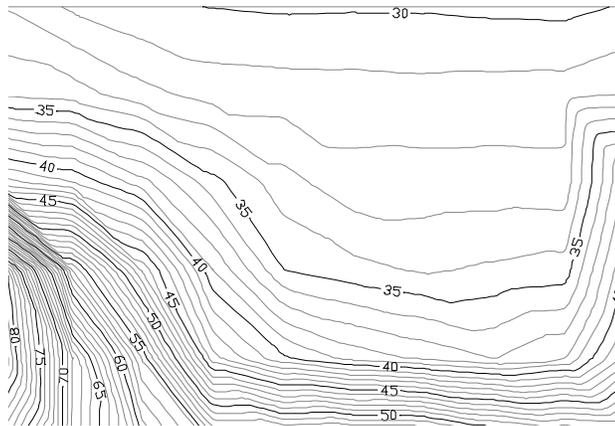


Figura 6.38 Curvas de isoterma no instante 120 minutos.

O comportamento observado anteriormente se manteve até o fim do ensaio, observado na figura 6.39.

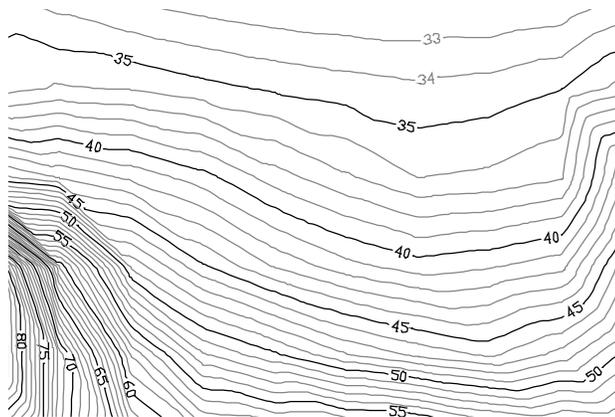


Figura 6.39 Curvas de isoterma no instante 210 minutos.

O volume de efluente extraído foi da ordem de 80 % superior ao observado no ensaio com taxa 2:1 deste lote. Obteve-se, nesse ensaio, o maior volume de remoção dentre todos os efetuados.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 229,84 ml e o valor obtido foi de 153,0 ml.

O comportamento mencionado de maior aquecimento da zona saturada se apresenta durante todo o período de ensaio.

### 6.3.3 ENSAIO COM INJEÇÃO DE AR

O terceiro ensaio, deste terceiro lote, foi feito somente com injeção de ar (50 kPa). Este foi o primeiro dos ensaios com apenas injeção de ar onde foi possível a coleta de algum volume de efluente. Com certeza, este fato ocorreu devido às mudanças adotadas para este lote de ensaios.

Tabela 6.9 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
7,60	314	86	1,28	228	0,033

Na figura 6.40, apresenta-se uma representação do montante de efluente retirado (7,60 ml) ao longo do tempo de ensaio. A retirada iniciou-se após 86 min., tendo-se finalizado o ensaio em 314 min.

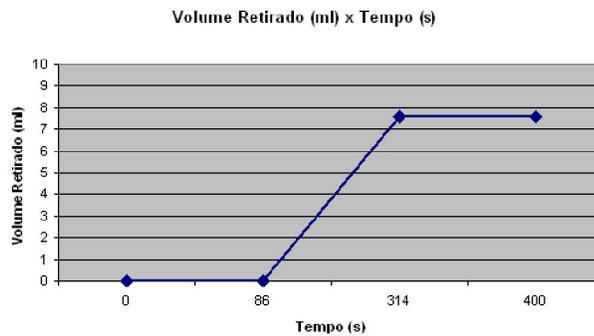


Figura 6.40 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 03, terceiro lote).

A temperatura é basicamente a ambiente e as oscilações ocorridas durante este ensaio foram mínimas, como pode ser visualizado nas figuras 6.41 e 6.42 para os instantes 30 min e 270 min após o início do mesmo.

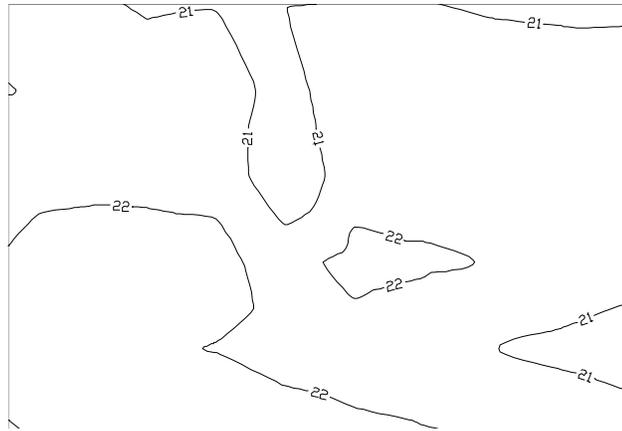


Figura 6.41 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

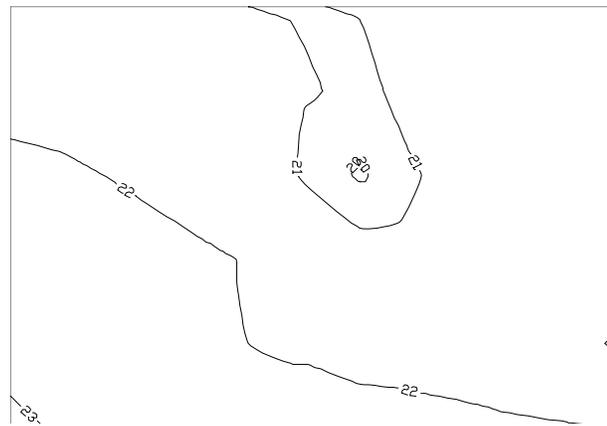


Figura 6.42 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 229,84 ml e o valor obtido foi de 7,60 ml, mostrando com clareza a ineficiência do arranjo em questão.

#### 6.4.4 ENSAIO COM INJEÇÃO DE VAPOR

No quarto ensaio do terceiro lote, injetou-se apenas vapor a uma pressão de 50 kPa. Neste ensaio, obtiveram-se os seguintes resultados.

Tabela 6.10 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
63	292	121	0,91	171	0,37

Na figura 6.43 apresenta-se a evolução da retirada de efluentes (63 ml) ao longo do ensaio. A retirada iniciou-se após 121 min., tendo-se finalizado o ensaio em 292 min. A recuperação ficou acima do que se verificou nos ensaios.

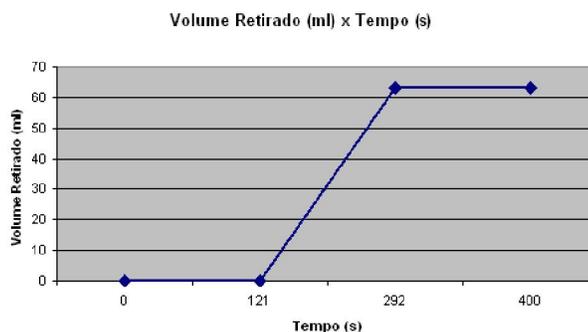


Figura 6.43 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 04, terceiro lote).

Como comentado anteriormente, a temperatura mais elevada favorece o início do processo de vaporização do contaminante por um lado mas, por outro os gradientes térmicos, podem, também, acelerar e aumentar os processos de condensação de contaminantes junto à frente de calor. Neste caso, porém, esta situação foi contornada com o uso do vácuo, uma vez que as temperaturas internas observadas não foram muito altas.

Nos primeiros 30 minutos, observa-se uma zona de aquecimento deslocando-se em sentido à zona central da caixa de inox, conforme mostra a figura 6.44.

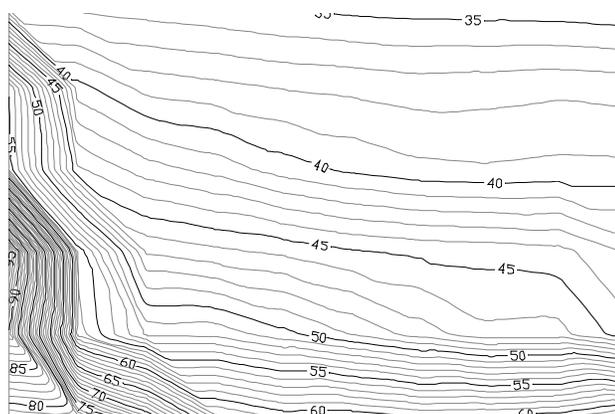


Figura 6.44 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

Ao longo do ensaio, percebe-se o deslocamento da zona mais aquecida de maneira semelhante a processo anteriormente mencionado, conforme visto na figura 6.45.

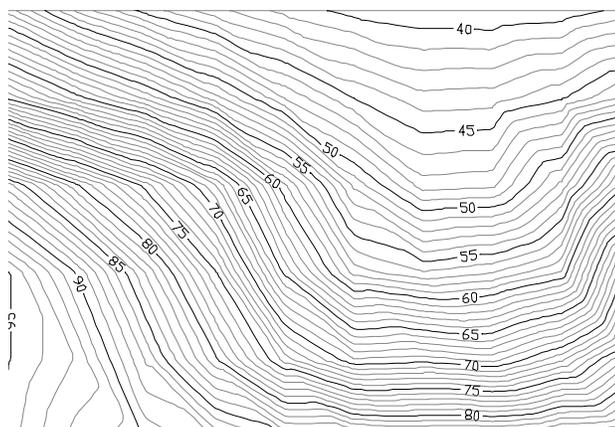


Figura 6.45 Curvas de isoterma no instante 240 minutos.

Para este ensaio, de acordo com o modelo simplificado adotado, o valor de efluente recuperado seria de 229,84 ml e o valor obtido foi de 63,0 ml. Também ficou claro que a injeção simples de vapor não é o arranjo mais adequado.

O comportamento mencionado de maior aquecimento da zona saturada se apresenta durante todo o período de ensaio e as temperaturas atingidas são maiores pelo fato de a injeção mista fornecer temperaturas menores de mistura de injeção.

Além disto, nota-se um grande gradiente térmico de até 50 °C entre as regiões mais e menos aquecidas.

#### 6.4.5 CONCLUSÕES SOBRE OS ENSAIOS DO TERCEIRO LOTE.

O ensaio com a razão 1:1 (ar:vapor) apresentou volume de efluente 80 % maior ao que se verificou para a razão 2:1, apresentando-se 142% superior ao valor obtido somente com injeção de vapor.

Na figura 6.46, apresenta-se o gráfico com o tempo de início, duração e volumes retirados de efluente nos ensaios efetuados. Novamente, pode-se verificar o menor tempo gasto e também a maior quantidade de efluente retirada no segundo ensaio, onde foi aplicada a proporção 1:1 nas pressões ar/vapor.

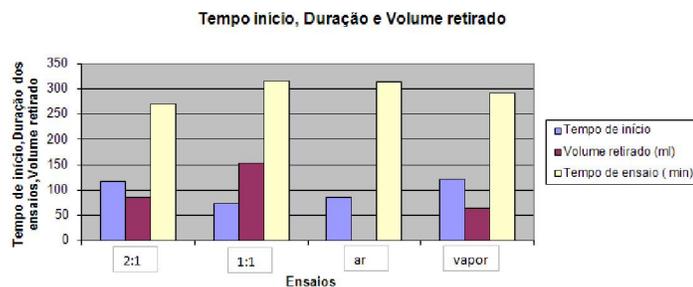


Figura 6.46 Tempos de início de retirada de efluente, duração e volume retirado nos ensaios.

Este terceiro lote de ensaios foi o de maior eficiência. Os volumes extraídos de efluente foram significativamente superiores aos demais grupos de ensaios.

A utilização de uma bomba à vácuo mudou muito as características da distribuição de temperaturas e pressão no interior da caixa de inox, facilitando a remoção do contaminante. Além disto, o banho térmico garantiu maior eficiência na captura do efluente no condensador.

Neste lote, assim como nos anteriores, observou-se um maior aquecimento da zona saturada e apresenta durante todo o período de ensaio em relação à zona não saturada do solo.

Esta última série de ensaios foi a que apresentou os melhores resultados dentre os realizados.

## 6.4 ENSAIO COMPLEMENTAR

Um ensaio complementar aos anteriores foi efetuado para verificar o efeito da injeção de ar no interior do gerador de vapor que visava manter a pressão interna no sistema constante, procedimento adotado nos ensaios anteriormente apresentados.

O ensaio foi realizado com pressão do vapor gerado medida e não controlada. Assim, verificou-se que a pressão ficou praticamente constante, sendo a média gerada de 0,25 KPa (variação de  $\pm 0,05$  KPa).

Também não contou-se com injeção externa de ar. Neste ensaio, desta forma, somente vapor foi injetado na caixa. Na coleta do efluente também empregou-se vácuo e o banho térmico.

A seguir, a tabela 6.1 apresenta os resultados deste ensaio.

Tabela 6.11 Resultados do monitoramento de efluentes do ensaio

VR (ml)	TE (min)	TI (min)	V (cm/min)	TR (min)	Q(ml/min)
48	294	144	0,76	180	0,27

Na figura 6.47 apresenta-se a evolução da retirada de efluentes (48 ml) ao longo do ensaio. A retirada iniciou-se após 144 min., tendo-se finalizado o ensaio em 292 min.

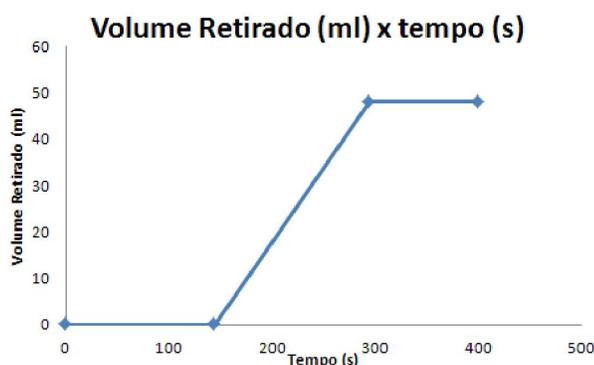


Figura 6.47 Volume retirado ao longo do tempo (Ensaio 01, lote complementar).

As temperaturas mais elevadas favorecem o início do processo de vaporização do contaminante por um lado mas, por outro lado, os gradientes térmicos podem aumentar os processos de condensação de contaminantes junto à frente de calor. As

temperaturas internas observadas foram mais altas do que o experimento do lote 03 no ensaio correspondente no qual somente se injetou vapor.

Nos primeiros 30 minutos, observa-se uma zona de aquecimento cobrindo a região esquerda e inferior da caixa de inox, conforme mostra a figura 6.48.

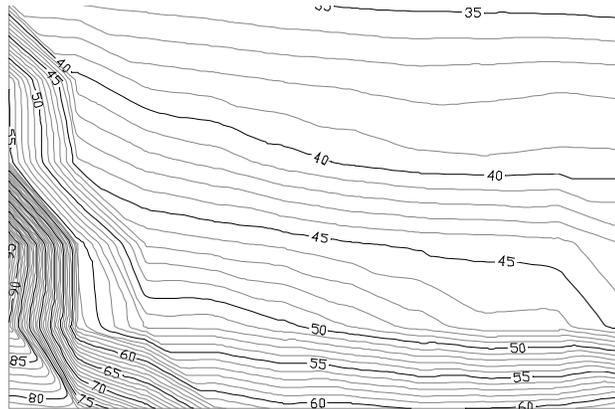


Figura 6.48 Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos.

Ao longo do ensaio, percebe-se que o comportamento anteriormente citado permanece e ocorre um leve resfriamento do canto direito da caixa. Nota-se que entre a região mais aquecida e a menos aquecida há um diferencial de temperatura de até 65 °C.

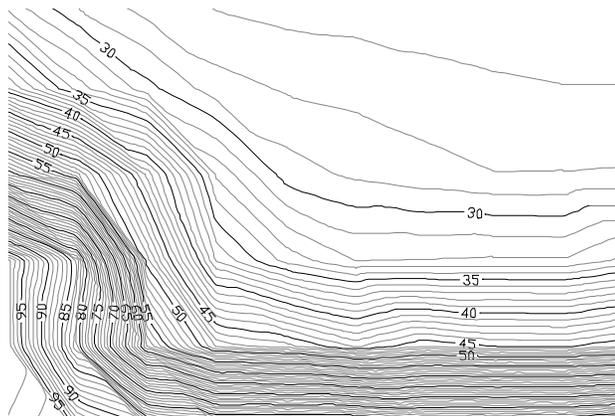


Figura 6.49 Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos.

Nos instantes finais, não se observa nenhuma mudança no comportamento das temperaturas internas e o diferencial de temperatura chega a 65 °C.

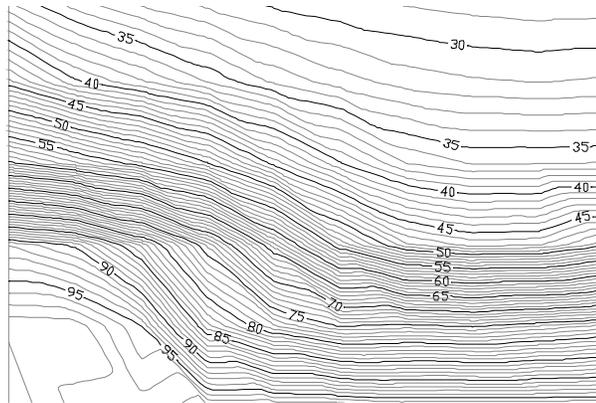


Figura 6.50 Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos.

De acordo com o modelo simplificado adotado, neste ensaio, o valor de efluente recuperado seria de 229,84 ml e o valor obtido foi de 44,0 ml. Como se observa, a eficiência desse ensaio foi muito baixa, demonstrando a importância de incluir a insuflação de ar no processo.

Sem o aquecimento de ar para dentro do gerador de vapor, percebe-se que o maior aquecimento da zona saturada permanece, mais uma vez, confirmando a tese de que este é fenômeno é causado devido à água ter maior condutividade térmica do que o ar.

### 6.5 VISÃO GERAL DOS ENSAIS REALIZADOS

A tabela 6.12 apresenta os valores previstos de retirada de efluentes para os ensaios realizados. Deve-se mencionar, novamente, as limitações do modelo teórico adotado.

Tabela 6.12 Valores previstos de retirada de efluentes (ml)

Relação ar/vapor	Lote 01	Lote 02	Lote 03
2:1	49,20	70,04	229,84
1:1	97,27	72,46	229,84
Ar	10,72	11,26	229,84
Vapor	132,11	132,11	229,84

Observa-se que o resultado previsto para o lote 02 para a relação ar/vapor 1:1 mostra-se discordante dos demais, uma vez que seria esperado um valor maior, como aconteceu para os outros valores. Isto aconteceu devido ao fato da mistura 1:1 lote lote 02 apresentar temperatura de mistura inferior à mistura 1:1 do lote 01.

A tabela 6.13 apresenta os valores de efluentes obtidos nos ensaios.

Tabela 6.13 Valores de retirada de efluentes obtidos (ml)

Relação ar/vapor	Lote 01	Lote 02	Lote 03
2:1	10,50	61,0	85,0
1:1	12,50	114,0	153,0
Ar	0,0	0,0	7,60
Vapor	9,0	44,0	63,0

Ao comparar-se os valores mencionados nas duas tabelas, observa-se que a maioria dos valores extraídos estão abaixo dos valores sugeridos pelo modelo simplificado. Note-se que o valor do ensaio de relações ar/vapor igual a 1:1 do segundo lote, é o único ensaio que apresenta valor superior ao sugerido pelo modelo simplificado, o que sugere a eficácia da injeção conjunta de ar e vapor para redução dos efeitos de migração descendente que podem ocorrer quando o uso somente de vapor.

O ensaio de relações ar/vapor igual a 1:1 do lote 03 foi o que apresentou maior eficiência e teve resultados mais próximos ao sugerido pelo modelo teórico adotado.

## **CAPÍTULO 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **7.1 CONCLUSÕES**

Apresentam-se comentários sobre os equipamentos desenvolvidos, os ensaios realizados e as dificuldades encontradas tanto na montagem dos equipamentos quanto na realização dos ensaios.

#### **7.1.1 EQUIPAMENTOS**

A primeira caixa do modelo físico desenvolvida mostrou-se problemática e teve-se grande dificuldade para garantir a vedação de forma a realizar ensaios confiáveis.

O sistema de pluviação mostrou-se eficiente porém, com elevado grau de dificuldade operacional devido ao seu peso.

O uso do banho térmico e do vácuo para o último lote de ensaios mostrou-se bastante interessante, conseguindo resultados superiores aos alcançados pelos ensaios dos lotes 01 e 02.

Os dados obtidos através do Data Logger e termopares foram muito úteis para visualização das temperaturas em tempo real durante os ensaios e para a elaboração das curvas de isotemperaturas que serviram de base para uma análise crítica detalhada dos ensaios.

A dificuldade encontrada pela não visualização dos ensaios com o uso da placa de aço ao invés da placa de vidro foi, de certa forma, contornada através da análise das curvas de isotemperaturas.

Em linhas gerais, o sistema final apresentou-se adequado

#### **7.1.2 ENSAIOS**

O Tolueno foi escolhido por ser um dos constituintes do BTEX, principais componentes da gasolina, e por ter a menor pressão de vapor dentre estes. Desta forma, a remoção de tolueno pode ser considerada como um limite inferior dos demais componentes.

Ficou destacada a importância de um sistema de drenagem de efluentes eficiente. O sistema final implantado mostrou-se adequado.

Os ensaios que apresentaram os menores volumes de extração foram os que apresentaram os maiores diferenças de temperaturas entre regiões vizinhas próximas. Este comportamento indica a existência de uma zona menos aquecida muito próxima à frente de calor, o que, certamente, aumenta as chances de condensação do tolueno volatilizado na zona mais aquecida. Assim, conclui-se que uma diminuição destes gradientes irá aumentar a eficiência do sistema de recuperação de efluentes.

Em todos os ensaios com injeção de vapor e/ou mistura ar/vapor observou-se que a região superior ao N.A (não saturada) apresentou temperaturas inferiores às da região saturada. Este comportamento é explicado pelo fato de a condutividade térmica da água ser 3 vezes maior do que a condutividade térmica do ar. Isto sugere que uma saturação da região contaminada pode vir a trazer ganhos importantes no volume de efluentes a serem extraídos quando se utilizar a técnica de injeção conjunta ar/vapor.

No conjunto de ensaios do segundo lote, com melhor sistema de drenagem, os volumes extraído chegaram a apresentar recuperação 912% superiores à obtida na campanha de ensaios do primeiro lote, confirmando as deficiências do sistema de drenagem que foram sanadas posteriormente.

Os ensaios realizados com o uso do banho térmico e do vácuo para o terceiro lote de ensaios e para o lote complementar mostraram-se bastante satisfatórios, evidenciando a eficiência dos novos equipamentos adicionados ao modelo.

O terceiro lote foi o que apresentou os melhores resultado como consequência das mudanças mencionadas acima.

Observa-se que, em todos os lotes estudados, o ensaio com maior eficiência na recuperação foi o que empregou pressões de ar e vapor iguais a 50 kPa (proporção 1:1).

Ficou destacada a importância da aplicação conjunta ar e vapor dentre os ensaios efetuados.

No entanto, a recuperação ainda apresentou-se baixa. O volume extraído limitou-se a 50% do inicialmente injetado no solo, para o melhor resultado obtido.

### **7.1.3 MODELOS MATEMÁTICOS**

Os modelos adaptado de Schmidt é muito útil para a previsão e cálculo de variáveis importantes no processo com massa de vapor a ser injetada, velocidade da

frente de calor e velocidade evaporação. O desenvolvimento matemático que foi aplicado ao modelo de Schmidt facilita a sua utilização com a parametrização de algumas variáveis envolvidas.

O modelo teórico adotado, mesmo com suas limitações intrínsecas, foi muito útil ao indicar volumes de efluentes que poderiam ser coletados com a aplicação da técnica

## **7.2 RECOMENDAÇÕES.**

Apresentam-se algumas sugestões para pesquisas futuras:

### **7.2.1 EQUIPAMENTOS**

Um dos problemas mais sérios enfrentados durante a montagem do equipamento e a realização dos ensaios foram os vários vazamentos ocorridos na estrutura da caixa de inox. Sendo assim, recomendam-se estudos de alternativas para sistemas de selamento da caixa.

O sistema de carregamento da caixa de inox pelo método da pluviação mostrou-se eficiente. Porém, para homogeneização da deposição de areia, a caixa era movimentada sobre trilhos logo abaixo do conjunto de peneiras. No entanto, à medida que a mesma ia sendo preenchida, o peso total (caixa + solo) aumentava consideravelmente, exigindo esforços maiores para o deslocamento, tornando o processo muito cansativo. Recomenda-se a utilização de um sistema motorizado para descolara caixa sobre os trilhos, o que garantirá maior uniformidade do enchimento e agilidade no processo.

Aperfeiçoamento do sistema de geração de vapor de forma a permitir ensaios de maior duração. Basicamente um sistema de maior volume inicial de água atenderia esta necessidade.

O uso das placas de orifício para medir as vazões, em massa, de vapor e ar será muito útil para que estes valores sejam usados em modelos que prevejam as velocidade de avanço da frente de calor e também da velocidade de evaporação do contaminante.

### **7.2.2 ENSAIOS**

Seria interessante a realização de campanhas de ensaios onde se variassem mais amplamente as relações e montantes de pressão de ar injetado/ pressão de vapor visando a maximização da eficiência

O monitoramento da água do lençol freático visando a verificação da ocorrência ou não de migração descendente de contaminante para o N.A.

Considerando-se que a água tem um papel muito importante na condução do calor no interior do modelo físico, sugere-se que sejam realizados estudos para diferentes condições do N.A no interior da caixa, buscando-se verificar sua influência no processo de remediação.

### **7.2.3 MODELOS MATEMÁTICOS**

A questão mais importante que envolve a modelagem do processo diz respeito ao valor das velocidades de avanço da frente de calor e da velocidade de evaporação contaminante. O conhecimento deste tópico é muito importante pois, caso a velocidade de avanço da frente de calor seja maior do que a velocidade de evaporação, ocorre um problema sério que será a existência de uma massa de vapor d'água sobre a região contaminada que irá dificultar o processo de evaporação do contaminante e reduzindo, em muito a eficiência do processo.

Assim, a utilização das placas de orifício para medidas das vazões em massa do ar e vapor será muito útil para fornecer os dados a serem usados no modelo matemático de Schmidt adaptado para prever as velocidades acima mencionadas.

O modelo simplificado poderá ser aperfeiçoado com considerações sobre as variáveis mencionadas acima e poder oferecer resultados mais próximos ao esperado dos realizados nos ensaios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abriola, L.M. e Pinder, G.F.,1985. **A multiphase approach to the modeling of porous media contamination by organic compounds, 1.Equation development.** Water Resource.Res., 21(1): 11-18.

AZAMBUJA, E.; CANCELIER, D.B.; NANNI, A.S (2000) **Contaminação dos solos por LNAPL: discussão sobre diagnóstico e remediação.** Anais do II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Porto Alegre, p.185 – 202.

BEAR, J., 1979. **Hydraulics of Groundwater**, McGraw-Hill, New York, pp. 268-269.

BEDIENT, P. B., RIFAI, H. S., NEWELL, C. J., 1994. *Ground Water Contamination: Transport and Remediation*. Prentice-Hall PTR, NEW JERSEY.

Betz, C., Farber, A., Schmidt, R., 1997. **Lab and technical scale experiments for NAPL removal by steam injection into porous media. Groundwater: An Endangered Resource.** Proceedings of Theme C, 27th IAHR Congress, San Francisco, USA. American Society of Civil Engineers, pp. 101–106.

CAMPANELA, R.G. eMICHELL,J.K., **Influence of Temperature Variations on Soil Behavior.**JSMFD, ASCE, Vol (94), 1968, pp. 709-734.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. Valores orientadores para soloeáguasubterrânea no estado de São Paulo em: [www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela\\_valores\\_2005.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/Solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf). Acessoem: 21 de setembro de 2008.

CHARLES J. NEWELL, STEVEN D. ACREE, RANDALL R. ROSS,SCOTT G. HULING **Light Non-aqueous Phase Liquids** USEPA/540/S-95/500 Ground Water Issue

CORSEUIL, H. X., 1992. **Enhanced Degradation of Monoaromatic Hydrocarbons in Sandy Aquifer Materials by Inoculation Using Biologically Active Carbon Reactors.** PhD dissertation, Ann Arbor, MI, EUA.

CORSEUIL, H. X., ALVAREZ, P. J .J., 1996. **Implications of the Presence of Ethanol on Intrinsic bioremediation of BTX Plumes in Brazil.** Hazardous Materials, 13 (2): 213-221.

CORSEUIL, H. X., MARTINS, M. D. M., 1997. **Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamentos de Gasolina: O Problema é Grave?**In: Engenharia Sanitária e Ambiental, Vol. 2, No. 2, Abril/Junho.

CORSEUIL, H. X., KAIPPER, B. I. A., FERNANDES, M. **Cosolvency effect in subsurface systems contaminated with petroleum hydrocarbons and ethanol.** Water Research, v.38, p. 1449-1456, 2004.

CHATZIS, I. e DULLIEN, F. A. L., (1983). Dynamic Immiscible Displacement in Mechanisms in Pore Doublets: Theory versus Experiment. Journal of Colloid Interface Science. Vol 91 – pp. 191

DE CAMPOS, T. M. P., **Temperature Effects on the Engineering Properties of Saturated Clayey Soils**, 1979, Master Thesis – Department of Civil Engineering - Imperial College of Science and Technology – London

DELGADO, C. W. C (2000) **Desenvolvimento de um equipamento para o estudo da permeabilidade efetiva em meios multifásicos** Rio de Janeiro , 145 p. Tese (Doutorado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO.

Dias, N. L. C. (1986) Estimativas climatológicas de evaporação em lagos. Rio de Janeiro, 175 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro,

DUARTE, A. P. L. (2004) **Avaliação de propriedades termo-hidráulicas de solos requeridas na aplicação da técnica de dessorção térmica.** Tese (Doutorado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RIO.

FAROUKI, O. T., **Thermal Properties of Soils**, Series on Rock and Soil Mechanics, 1986. Vol. 11, 136p.

FERNANDES, M., CORSEUIL, H. X., 1996. **Contaminação de Águas Subterrâneas por Derramamento de Gasolina: Efeito Cossolvência.**In: 3o. Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (SIBESA), Gramado, Junho.

FREEZE, R. A. e CHERRY, J. A., (1979), Groundwater, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

FETTER, C. W., (1992), Contaminant Hydrogeology, Prentice Hall, Inc.

FREDLUND, D. G. E XING, A. **Equations for the soil-water characteristic curve**, Canadian Geotechnical Journal. 1994, 521-532.

FURTADO, M. **Remediação de solos. Para afastar o perigo que se esconde nos subterrâneos das grandes cidades, meios legais e econômicos devem fomentar obras de descontaminação.** Química e Derivados, 2005.

FREIRE, J.C. Retenção de umidade em perfil Oxissol do município de Lavras, Minas Gerais. Piracicaba, 76p. Dissertação ( Mestrado). ESALQ-USP.

GUIGUER, N. **Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento.** Waterloo Hydrogeologic, Inc. 356p. 2000.

H. CLASS \*, R. HELMIG. **Numerical simulation of non-isothermal multiphase multicomponent processes in porous media. 2. Applications for the injection of steam and air.** Advances in Water Resources 25 (2002) 551–564

HADIM, A., SHAH, F.H., KORFIATIS, G.P., 1993. **Laboratory studies of steam stripping of LNAPL-contaminated soils.** Journal of Soil Contamination 2, 27– 58.

HUNT, J.R., SITAR, N., UDELL, K.S., 1988a. **Non-aqueous phase liquid transport and cleanup: 1. Analysis of mechanisms.** Water Resources Research 24, 1247– 1258.

Hunt, J.R., Sitar, N. e Udell, K.S., 1988b. **Non-aqueous phase liquid transport and cleanup, 2. Experimental studies.** Water Resource. Res., 24(8): 1259-1269.

JAMES W. MERCER and ROBERT M. COHEN. **A review of immiscible fluids in the subsurface properties, models, characterization and remediation** Journal of Contaminant Hydrology, 6 (1990) 107- 163

JOHANSEN, O. **Thermal Conductivity of Soils.** PhD Thesis. Norway, USA. Corps of Engineers. ADA044002. 1975.

JOHNSON, P.C.; STANLEY, C.C.; KEMBLOWSKI, M.W.; BYERS, D.L.; COLTHART, J.D. (1990) **A practical Approach to the design, operation and monitoring of In Situ Soil-Venting Systems.** Groundwater Monitoring Review p. 159-178

JURY, W.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H., 1991, **Soil physics.**, John Wiley & Sons, New York 328 p,

KERSTEN, M.S.; **Laboratory Research for the determination of the thermal properties of soils**, ACFEL Technical Report 23, 1949.

LAMBE, T.W.; **The permeability of fine-grained soils**. STP 163, ASTM, J1954 pp. 56-67.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba; P.L. Libardi, 497 p. Movimento da água no solo, 1995.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. 2ªed. Piracicaba, CENA/ USP 509p., 1999.

MERCER, C., J.; COHEN, R. M., **A Review of Immiscible Fluids in the Subsurface: Properties, Models, Characterization and Remediation**, Journal of Contaminant Hydrology, Vol. 6, 1990, pp. 107-163.

MUALEM, Y.A. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media**. Water Resour. Res. V.12. 1976.p. 513-522,

NEWELL, C.J., ACREE, A.D., ROSS, R.R., HULING, S.G. (1995) **Light Non-aqueous Phase Liquids**, EPA Ground Water Issue.

OLIVEIRA, E. (1992). **Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo**. São Paulo. 112 p. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

PENNER, G.C. (2000) **Estudos laboratoriais da contaminação do solo por gasolina com o uso do detector de Fotoionização**. São Paulo. 132 p. Dissertação (Mestrado) – EESC-USP, Universidade de São Paulo.

POULSEN, M.; LEMON, L.; BARKER, J. F., 1992. **Dissolution of Monoaromatic Hydrocarbons into Groundwater from Gasoline – Oxygenate mixtures**. Environ. Sci. Technol., Vol. 26, pp. 2483-2489.

REID, R.C.; PRAUSNITZ, J.M.; SHERWOOD, T.K. **The properties of gases and liquids**, New York, McGraw-Hill, 1977.

RICHARDS, L.A., Capillary Conduction of Liquids through porous media. **Physics**, vol 1, 1931, pp. 318-333.

ROBINSON, R. A. e ESTOKES, R. H., (1965), **Electrolyte Solutions**, 2nd. Edition, Butterworth & Company (Publishers) Ltd., Sevenoaks, Kent, England.

R. SCHMIDT, J. GUDBJERG, T.O. SONNENBORG, K.H. JENSEN. **Removal of NAPLs from the unsaturated zone using steam: prevention of downward migration by injecting mixtures of steam and air.** Journal of Contaminant Hydrology 55 (2002) 233– 260

SCHWILLE, F., 1984. Migration of organic fluids immiscible with water in the unsaturated zone. In: B. Yaron, G. Dagan and J. Goldschmid (Editors), *Pollutants in Porous Media: The Unsaturated Zone between Soil Surface and Groundwater.* Springer, New York, N.Y., pp. 27--48.

SCHIRMER, M., MOLSON, J. W., and BARKER, J. F., 1999. ***The Potential Impact of Alcohol as a Gasoline Oxygenate on BTEX Degradation at Spill Sites.*** Petroleum Hydrocarbons Conference, Nov. 17-19, Houston, Texas.

SCHWARZENBACH, R.P.; GSCHWEND, P.M.; IMBODEN, D.M. **Environmental organic chemistry.** New York: J. Wiley, 1993.

SLATIER, R.O. **Plant-water relationships.** New York. Academic Press, 336p. 1967.

TAYLOR, D.W., **Fundamentals of Soil Mechanics.** John Wiley and Sons, 1948.

THIEM, S. M.; KRUMME, M. L.; SMITH, L. R.; TIEDJE, J. M., 1994. ***Use of Molecular Techniques to evaluate the Survival of a Microorganism Injected into an Aquifer.*** Appl. Environ. Microbiol., 60(4): 1059-1067.

UDELL, K.S., McCARTER, R.L., 1998. **Steam enhanced extraction of wood treatment chemicals from soils.** Proceedings of First International Conference on Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds, Monterey, USA. Batelle Press, Columbus, Ohio, pp. 121– 126.

USEPA, **Analysis of Selected Enhancements for Soil Vapor Extraction**, EPA-542-R-97-007, 246 pp, September, 1997a

U.S. Army Corps of Engineers, **Soil Vapor Extraction and Bioventing Engineering and Design**, EM1110-1-4001, November 1995.

USEPA, **Abstracts of Remediation Case Studies**, NRJ-080 -0227-02.njr,108 pp, March 1995

USEPA, **A Citizen's Guide to Soil Vapor Extraction and Air Sparging**, EPA-542-F,-96-008, 4 pp, April 1996 a

USEPA, **Best Management Practices (BMPs) for Soils Treatment Technologies**, EPA530-R-97-007, March 1997 b

USEPA, **Innovative Site Remediation Technology-Vacuum Vapor Extraction**, Volume 8, EPA 542/B-94/002, April. 1995 b.

VAN GENUCHTEN, M.A., 1980, **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Sci. p.892-898,.

YALKOWSKY, S. H. & ROSEMAN, T. 1981. **Solubilization of Drugs by Cosolvents. Techniques of Solubilization of Drugs**. Yalkowski, S. H., Ed. Marcel Dekker, Inc: New York, p. 91-134.

WIEDEMEIER, T.H.; et al. **Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 617 p. 1999

WILLIAMS, D.E., and D.G. WILDER, 1971. **Gasoline pollution of a ground-water reservoir - A case history**, Ground Water, 9(6):50-54.

Wilson, D. J.; Clarke, A .N. – **Hazardous waste site remediation**, Marcel Dekker Inc, 1994, 567pp.

## ANEXO 1

<b>ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA CONSTANTE</b>																																																				
Amostra :	AREIA		Prof.:		Operador:	sergio																																														
Local :					Data :	17/12/2009																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: left;">Características do Solo</th> <th colspan="3" style="text-align: left;">Características do Corpo de Prova</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tara + Solo Seco</td> <td>PTS ( g )</td> <td>6994,80</td> <td rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;"><math>K_{20} = \frac{V \times L_1 \times R_t}{h \times A \times t}</math></td> <td>Diâmetro</td> <td><math>\phi</math> ( cm )</td> <td>7,68</td> </tr> <tr> <td>Tara</td> <td>T. ( g )</td> <td>5783,30</td> <td>Área</td> <td>A ( cm<sup>2</sup> )</td> <td>46,32</td> </tr> <tr> <td>Solo Seco</td> <td>w<sub>s</sub> ( g )</td> <td>1211,50</td> <td>Alt. Inicial</td> <td>L ( cm )</td> <td>18,52</td> </tr> <tr> <td>Dens. R. Grãos</td> <td>G<sub>s</sub></td> <td>1,000</td> <td>Vol. Inicial</td> <td>V ( cm<sup>3</sup> )</td> <td>857,93</td> </tr> <tr> <td>Vol. de Sólidos</td> <td>V<sub>s</sub> ( cm<sup>3</sup> )</td> <td></td> <td>Índ. de Vazios Inic.</td> <td>e<sub>o</sub></td> <td>-0,292</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Alt. de Sólidos</td> <td>H<sub>s</sub> ( cm )</td> <td></td> <td>P. Esp. Ap. Seco</td> <td><math>\gamma_s</math> ( g/cm<sup>3</sup> )</td> <td>1,412</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>								Características do Solo			Características do Corpo de Prova			Tara + Solo Seco	PTS ( g )	6994,80	$K_{20} = \frac{V \times L_1 \times R_t}{h \times A \times t}$	Diâmetro	$\phi$ ( cm )	7,68	Tara	T. ( g )	5783,30	Área	A ( cm <sup>2</sup> )	46,32	Solo Seco	w <sub>s</sub> ( g )	1211,50	Alt. Inicial	L ( cm )	18,52	Dens. R. Grãos	G <sub>s</sub>	1,000	Vol. Inicial	V ( cm <sup>3</sup> )	857,93	Vol. de Sólidos	V <sub>s</sub> ( cm <sup>3</sup> )		Índ. de Vazios Inic.	e <sub>o</sub>	-0,292		Alt. de Sólidos	H <sub>s</sub> ( cm )		P. Esp. Ap. Seco	$\gamma_s$ ( g/cm <sup>3</sup> )	1,412	
Características do Solo			Características do Corpo de Prova																																																	
Tara + Solo Seco	PTS ( g )	6994,80	$K_{20} = \frac{V \times L_1 \times R_t}{h \times A \times t}$	Diâmetro	$\phi$ ( cm )	7,68																																														
Tara	T. ( g )	5783,30		Área	A ( cm <sup>2</sup> )	46,32																																														
Solo Seco	w <sub>s</sub> ( g )	1211,50		Alt. Inicial	L ( cm )	18,52																																														
Dens. R. Grãos	G <sub>s</sub>	1,000		Vol. Inicial	V ( cm <sup>3</sup> )	857,93																																														
Vol. de Sólidos	V <sub>s</sub> ( cm <sup>3</sup> )		Índ. de Vazios Inic.	e <sub>o</sub>	-0,292																																															
Alt. de Sólidos	H <sub>s</sub> ( cm )		P. Esp. Ap. Seco	$\gamma_s$ ( g/cm <sup>3</sup> )	1,412																																															
Distância entre os níveis piezométricos					L <sub>1</sub>	10,00	cm																																													
<b>OBS.:</b>	areia fina																																																			
<b>ENSAIO</b>		<b>1</b>		<b>2</b>		<b>3</b>																																														
Altura CP ( cm )	L	18,52		18,52																																																
L. Piezômetro 1 ( cm )	h <sub>1</sub>																																																			
L. Piezômetro 2 ( cm )	h <sub>2</sub>																																																			
Perda Carga (h1-h2) cm	h	164,5	164,5	164,5	164,5																																															
Vol. Água Perc. ( cm <sup>3</sup> )	V	965,0	960,0	948,0	961,0																																															
Tempo ( s )	t	46,0	45,4	44,0	45,2																																															
Temperatura da Água °C	T	25,0	25,0	25,0	25,0																																															
Fator de Correção	R <sub>t</sub>	0,8900	0,8900	0,8900	0,8900																																															
Coef. de Permeabilidade	K <sub>20</sub>	4,54E-02	4,57E-02	4,66E-02	4,60E-02																																															
20 °C ( cm/seg. )	Média	4,56E-02		4,63E-02																																																
		<b>Permeabilidade Média ( cm/s )</b>		<b>4,59E-02</b>																																																
<b>NOTA :</b>	Rt = Fator de correção para a viscosidade da água a 20 °C Caso os níveis piezométricos não sejam usados, toma-se L <sub>1</sub> = L e, h é medido desde o nível do reservatório de água até o nível inferior da água.																																																			
COPPE / UFRJ		LABORATORIO DE GEOTECNIA																																																		
Projeto :		Interessado :		Tese Petronio																																																
Referência :	TESE DOUTORADO				fig.:	1																																														

TABELA DE LOCAÇÃO DOS TERMOPARES									
11	12	13	14	15	16	17	18	19	110
CH 110	CH 109	CH 108	CH 107	CH 106	CH 105	CH 104	CH 103	CH 102	CH 101
21	22	23	24	25	26	27	28	29	210
CH 120	CH 119	CH 118	CH 117	CH 116	CH 115	CH 114	CH 113	CH 112	CH 111
31	32	33	34	35	36	37	38	39	310
CH 110	CH 109	CH 108	CH 107	CH 106	CH 105	CH 104	CH 103	CH 102	CH 101
41	42	43	44	45	46	47	48	49	410
CH 120	CH 119	CH 118	CH 117	CH 116	CH 115	CH 114	CH 113	CH 112	CH 111
51	52	53	54	55	56	57	58	59	510
CH 110	CH 109	CH 108	CH 107	CH 106	CH 105	CH 104	CH 103	CH 102	CH 101
61	62	63	64	65	66	67	68	69	610
CH 120	CH 119	CH 118	CH 117	CH 116	CH 115	CH 114	CH 113	CH 112	CH 111

ANEXO 2

CURVAS DE ISOTEMPERATURAS

PRIMEIRO LOTE

PRESSÕES DE AR DE 50 KPA E VAPOR DE 25 KPA



Figura A2.1 Curvas de isoterperatura no instante 0 min.



Figura A2.2 Curvas de isoterperatura no instante 30 min.

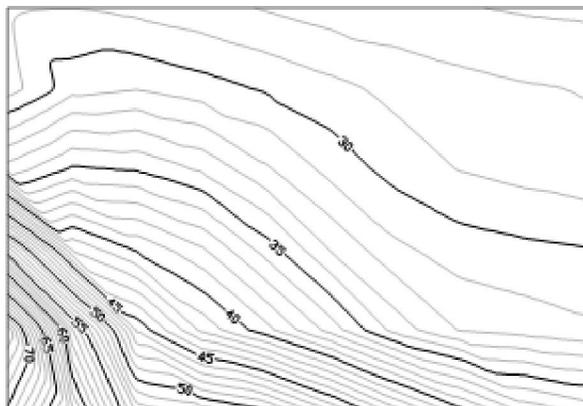


Figura A2.3 Curvas de isotemperatura no instante 60 min.

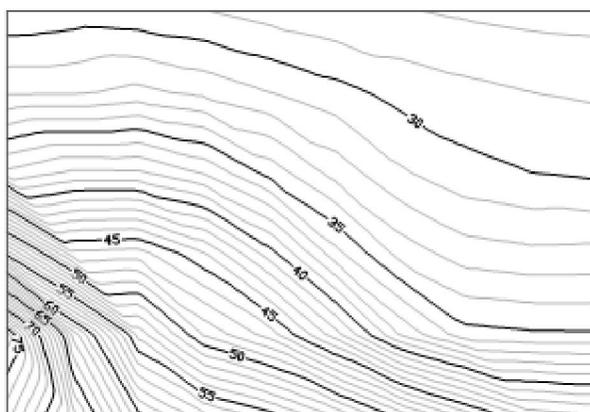


Figura A2.4 Curvas de isotemperatura no instante 90 min.

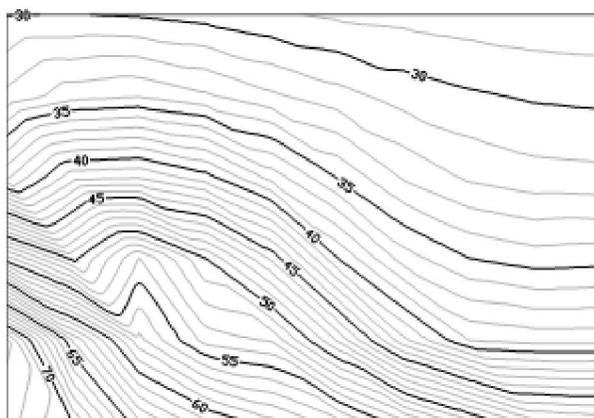


Figura A2.5 Curvas de isotemperatura no instante 120 min.

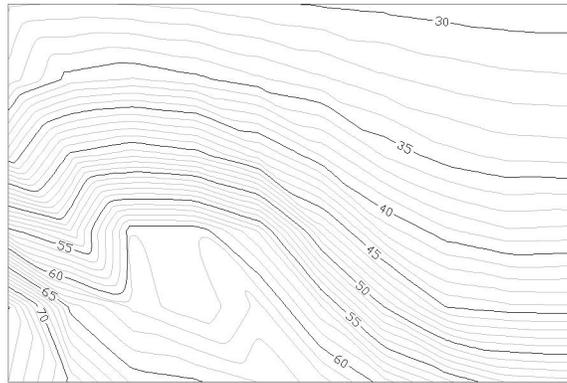


Figura A2.6 Curvas de isoterma no instante 150 min.

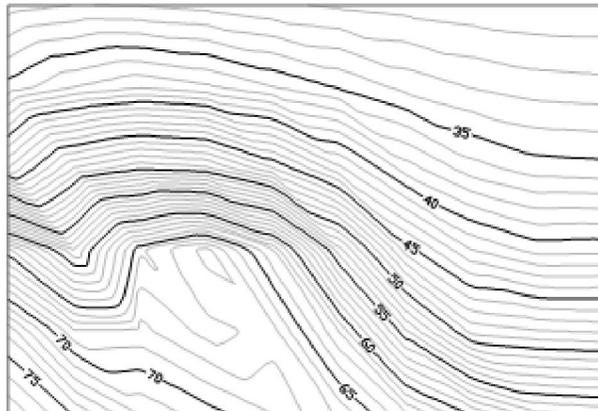


Figura A2.7 Curvas de isoterma no instante 180 min.

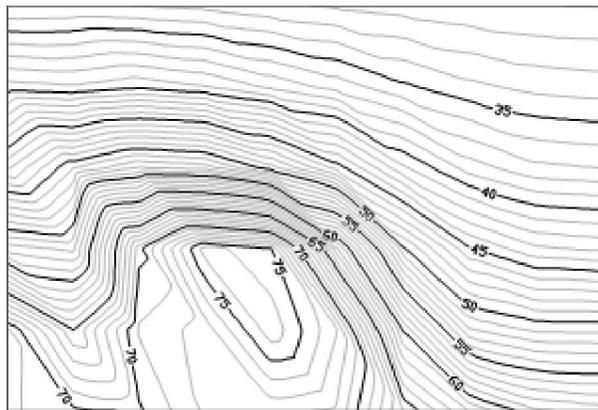


Figura A2.8 Curvas de isoterma no instante 210 min.

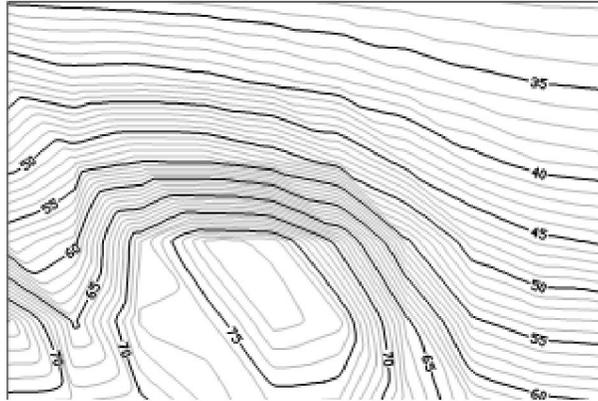


Figura A2.9 Curvas de isoterma no instante 240 min.

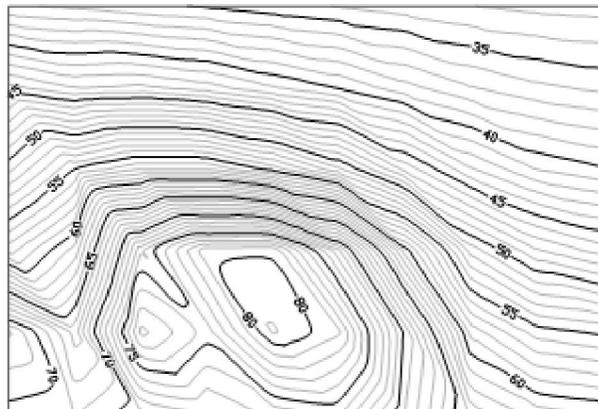


Figura A2.10 Curvas de isoterma no instante 270 min.

## PRESSÕES DE AR DE 50 KPA E VAPOR DE 50 KPA-LOTE 01

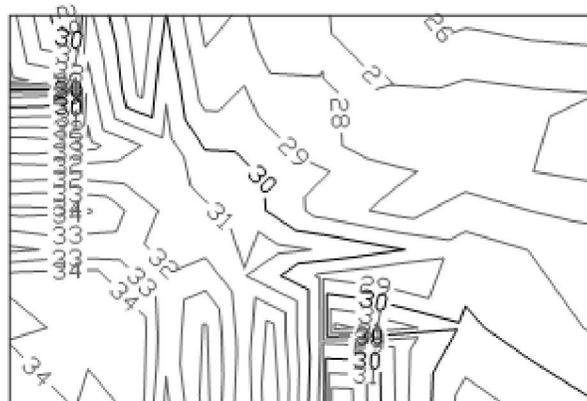


Figura A2.11 Curvas de isoterma no instante zero.

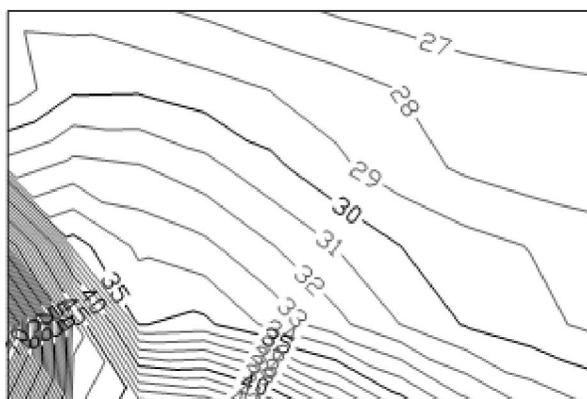


Figura A2.12 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

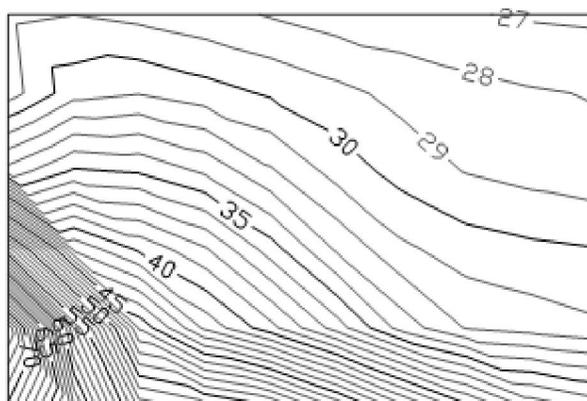


Figura A2.13 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

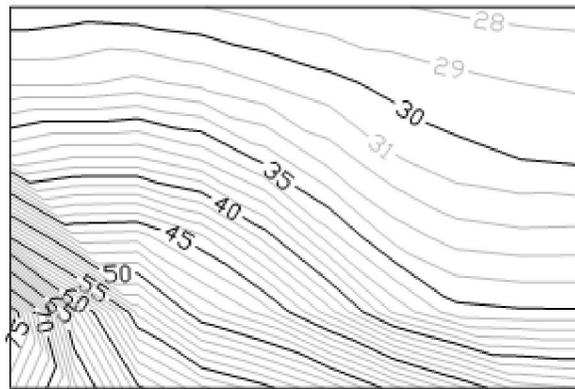


Figura A2.14 Curvas de isoterma no instante tempo 90 minutos.

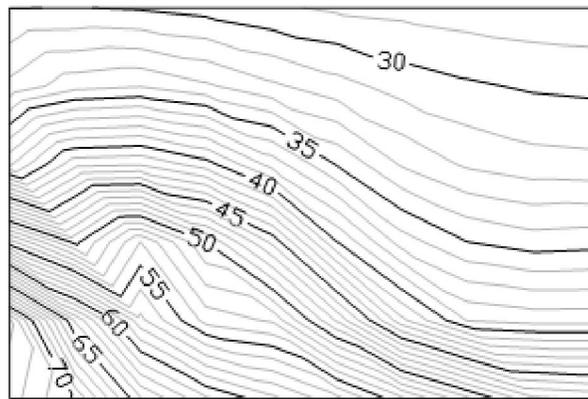


Figura A2.15 Curvas de isoterma no instante 120 minutos.



Figura A2.16 Curvas de isoterma no instante 150 minutos.

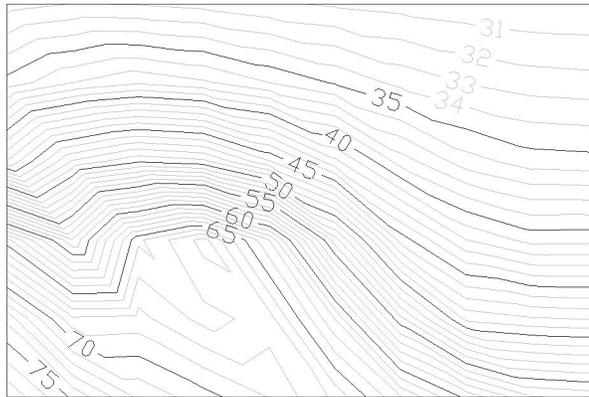


Figura A2.17 Curvas de isotemperatura no instante 180 minutos.

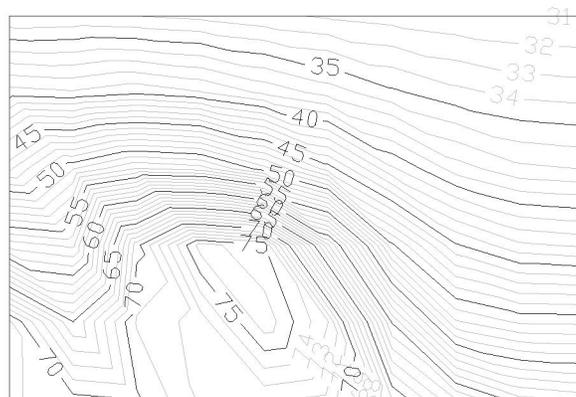


Figura A2.18 Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos.

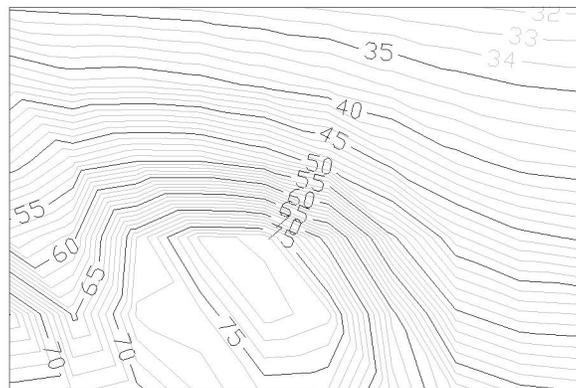


Figura A2.19 Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos.



Figura A2.20 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

## PRESSÕES DE AR DE 50 KPA

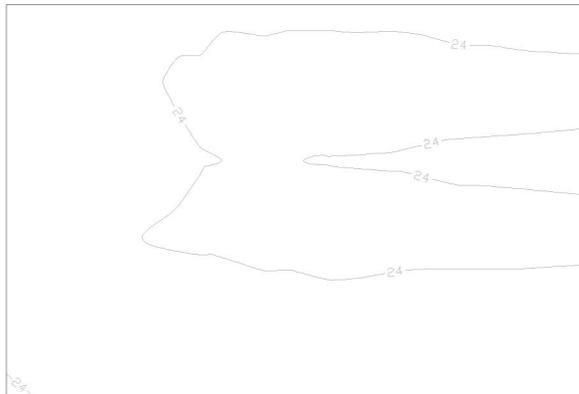


Figura A2.21 Curvas de isoterma no instante zero

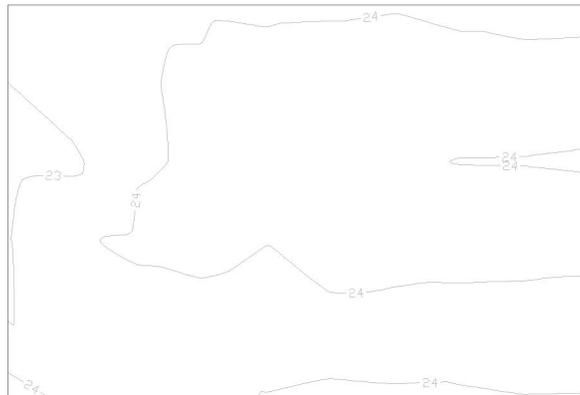


Figura A2.22 Curvas de isoterma no instante 30

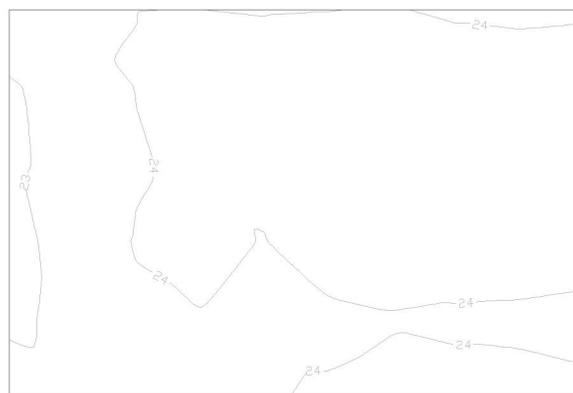


Figura A2.23 Curvas de isoterma no instante 60

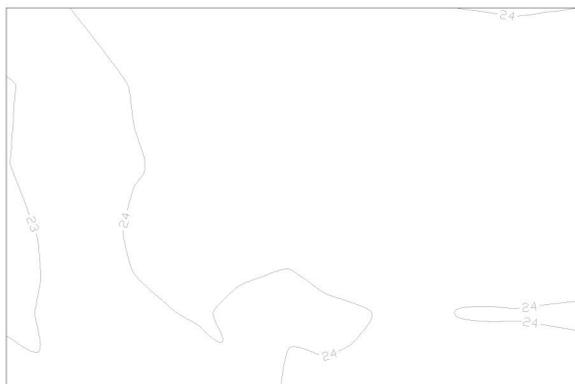


Figura A2.24 Curvas de isoterma no instante 120



Figura A2.25 Curvas de isoterma no instante 150

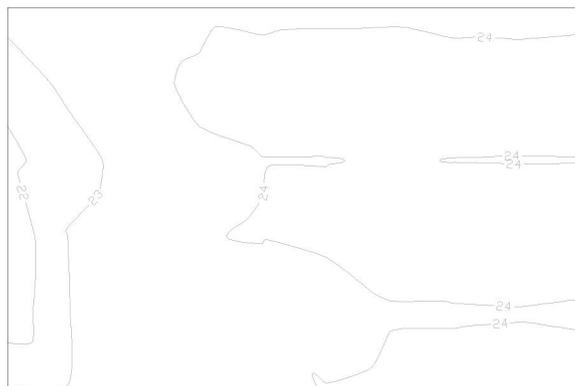


Figura A2.26 Curvas de isoterma no instante 180

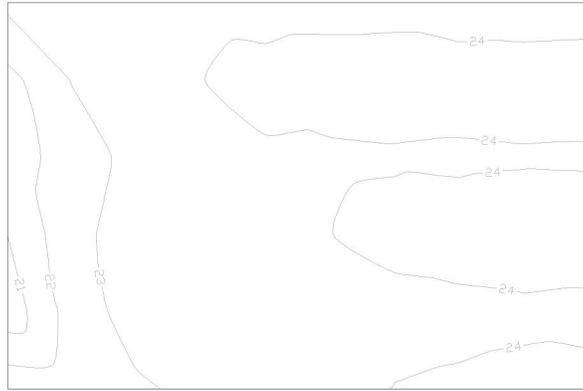


Figura A2.27 Curvas de isotemperatura no instante 210

## PRESSÕES DE VAPOR DE 50 KPA

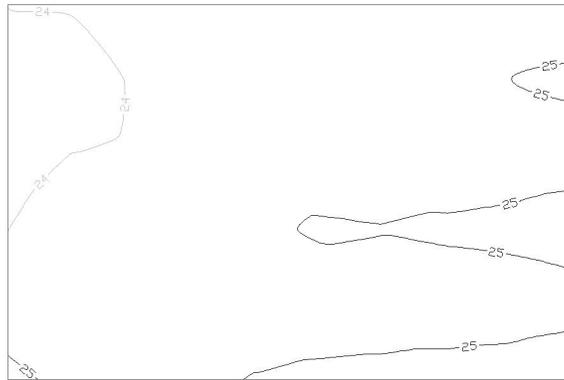


Figura A2.28 Curvas de isoterma no instante 0

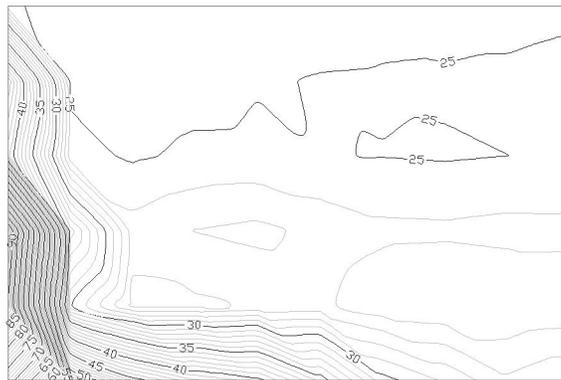


Figura A2.29 Curvas de isoterma no instante 30



Figura A2.30 Curvas de isoterma no instante 60

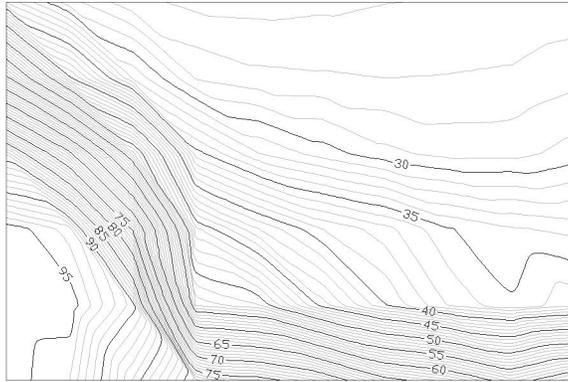


Figura A2.31 Curvas de isotemperatura no instante 90

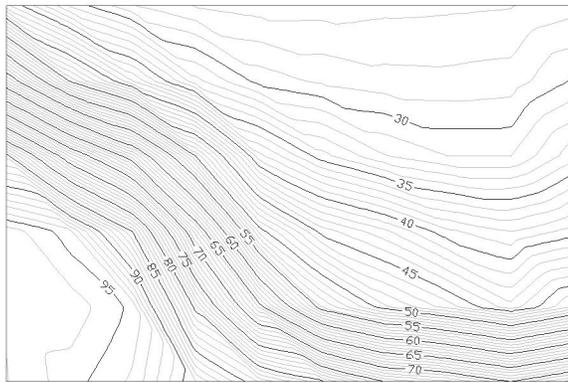


Figura A2.32 Curvas de isotemperatura no instante 120

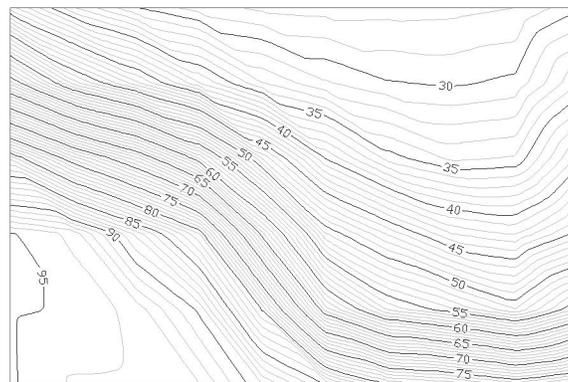


Figura A2.33 Curvas de isotemperatura no instante 150

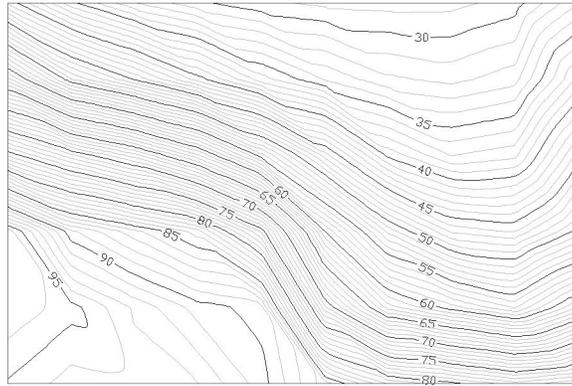


Figura A2.34 Curvas de isoterma no instante 180

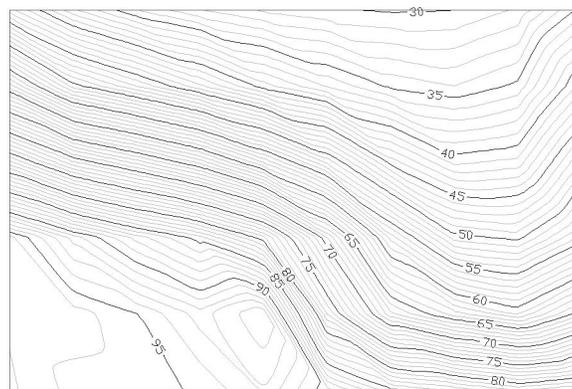


Figura A2.35 Curvas de isoterma no instante 210

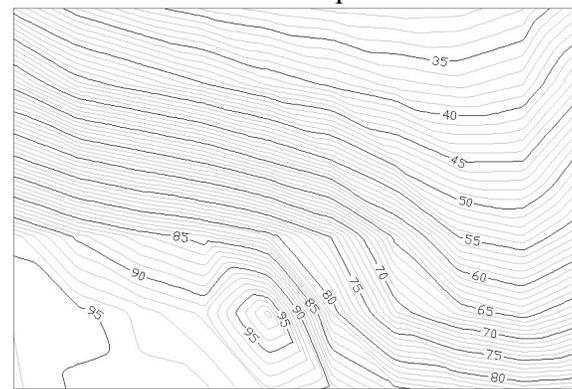


Figura A2.36 Curvas de isoterma no instante 240

# CURVAS DE ISOTEMPERATURAS

## SEGUNDO LOTE

**PRESSÕES DE AR DE 50 KPA E VAPOR DE 25 KPA**

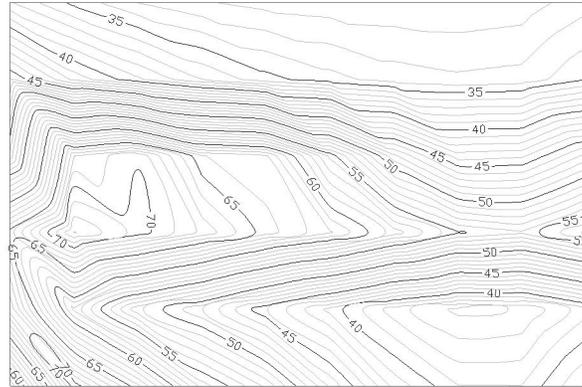


Figura A2.37 Curvas de isoterma no instante 0 min.

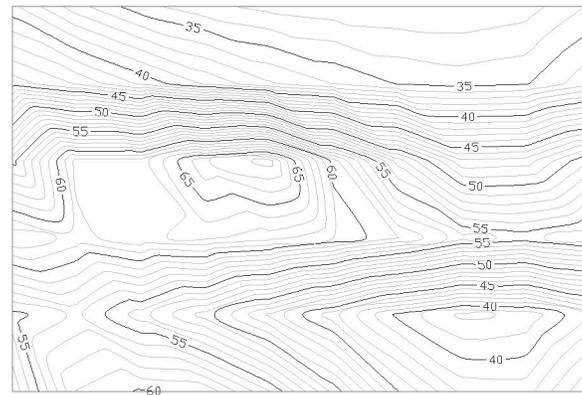


Figura A2.38 Curvas de isoterma no instante 30 min.

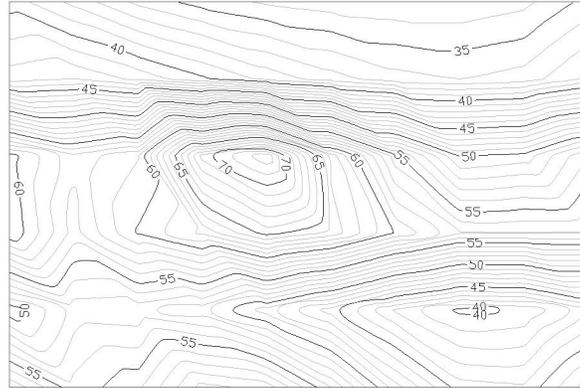


Figura A2.39 Curvas de isoterma no instante 60 min.

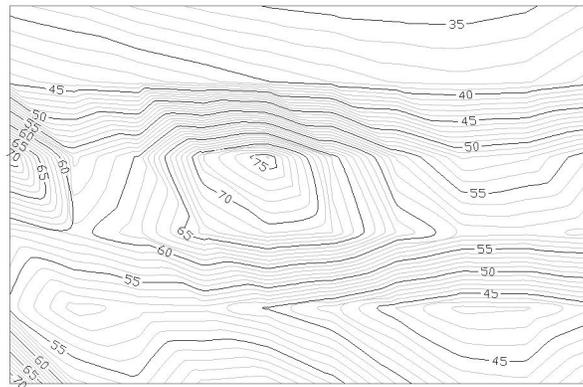


Figura A2.40 Curvas de isoterma no instante 90 min.

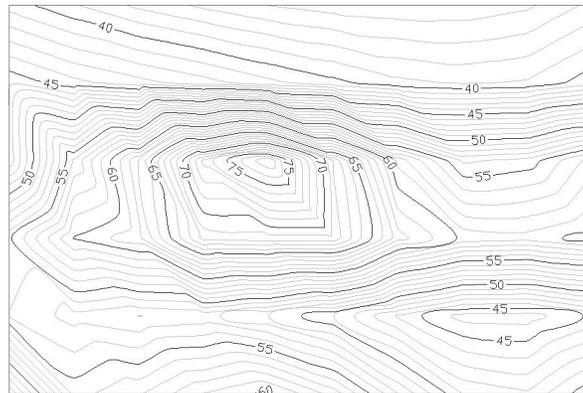


Figura A2.41 Curvas de isoterma no instante 120 min.

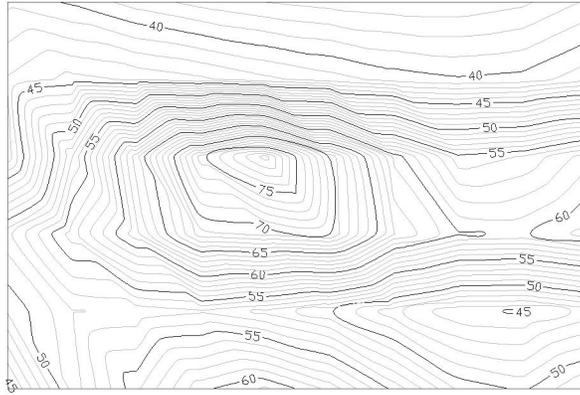


Figura A2.42 Curvas de isoterma no instante 150 min.

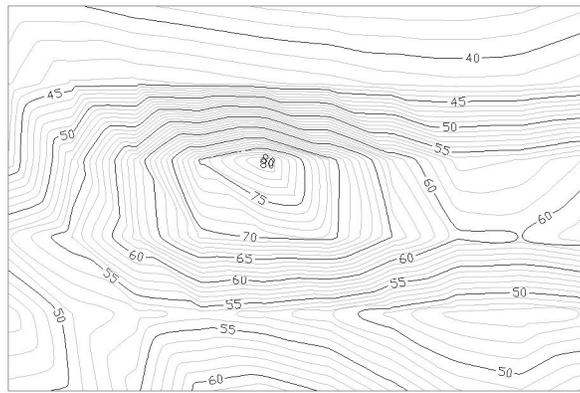


Figura A2.43 Curvas de isoterma no instante 180 min.

## PRESSÕES DE AR DE 50 KPA E VAPOR DE 50 KPA

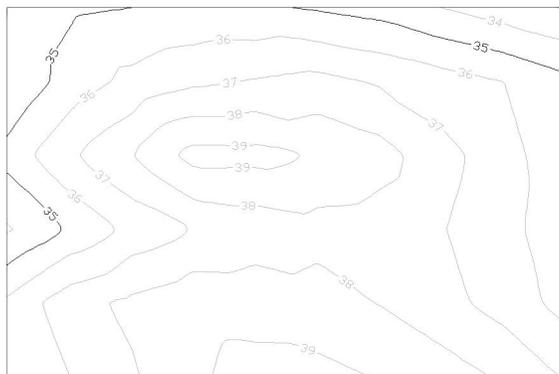


Figura A2.44 Curvas de isoterma no instante zero.

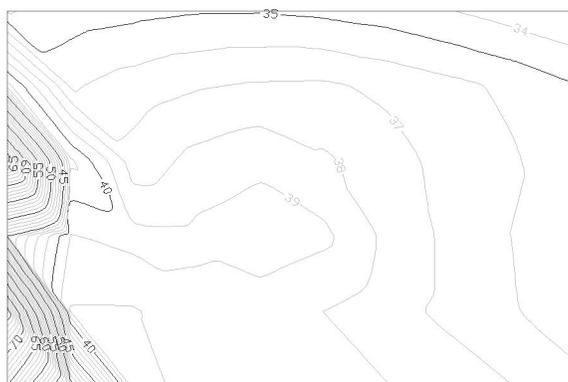


Figura A2.45 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

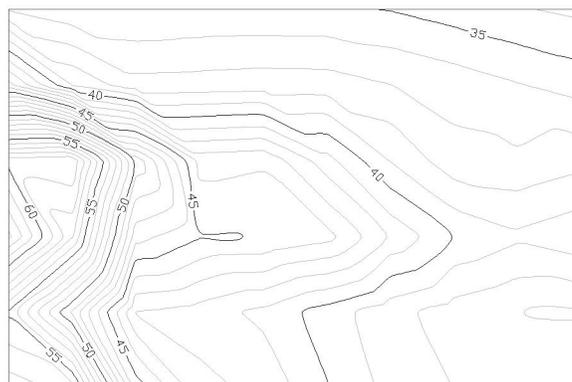


Figura A2.46 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

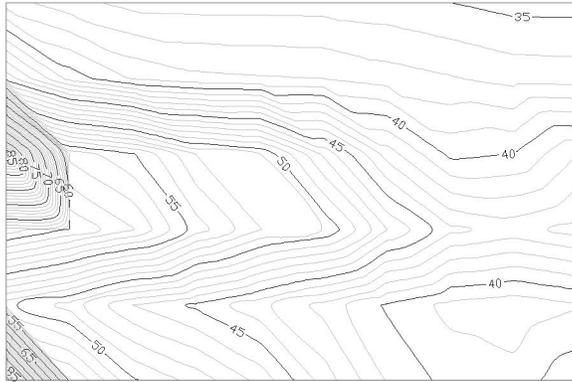


Figura A2.47 Curvas de isotemperatura no instante tempo 90 minutos.



Figura A2.48 Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos.

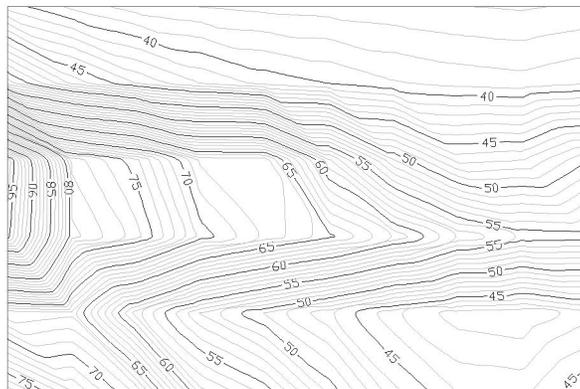


Figura A2.49 Curvas de isotemperatura no instante 150 minutos.

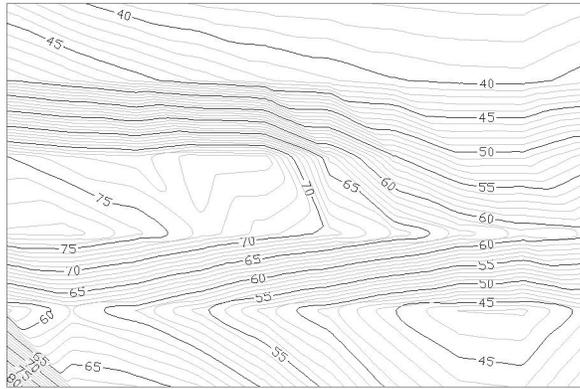


Figura A2.50 Curvas de isotemperatura no instante 180 minutos.

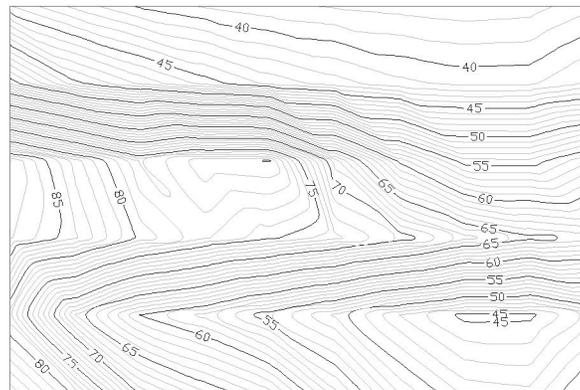


Figura A2.51 Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos.

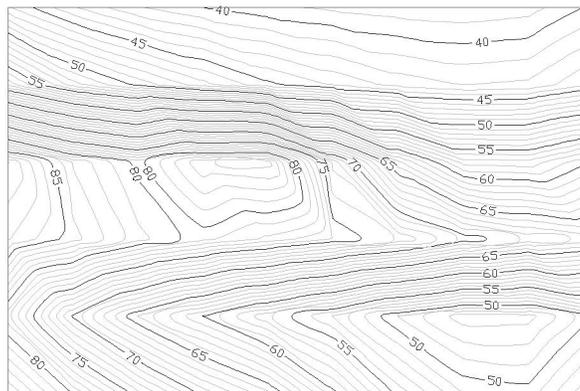


Figura A2.51 Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos.



Figura A2.52 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

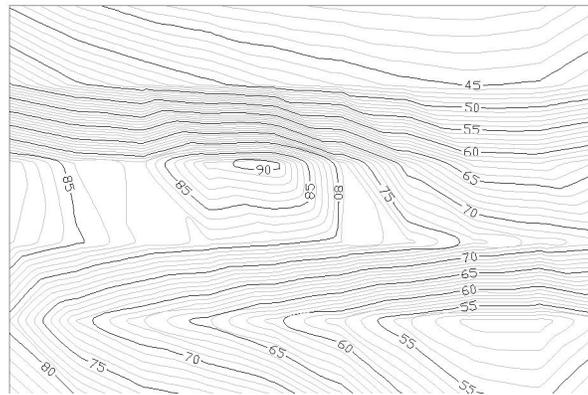


Figura A2.53 Curvas de isoterma no instante 300 minutos.

## PRESSÕES DE AR DE 50 KPA



Figura A2.54 Curvas de isoterma no instante zero.

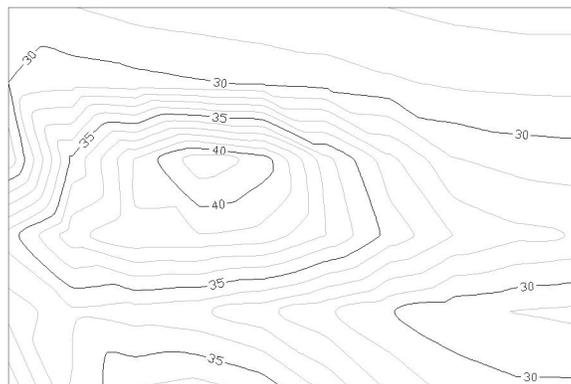


Figura A2.55 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

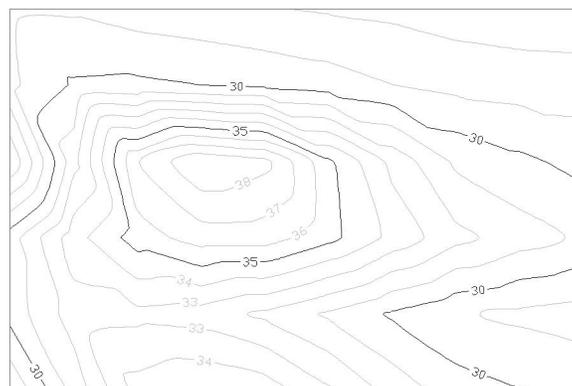


Figura A2.56 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

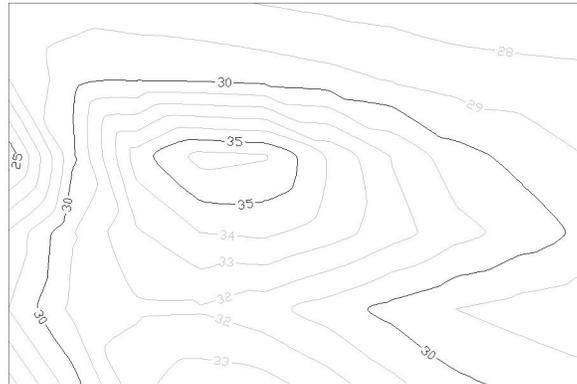


Figura A2.57 Curvas de isotemperatura no instante tempo 90 minutos.

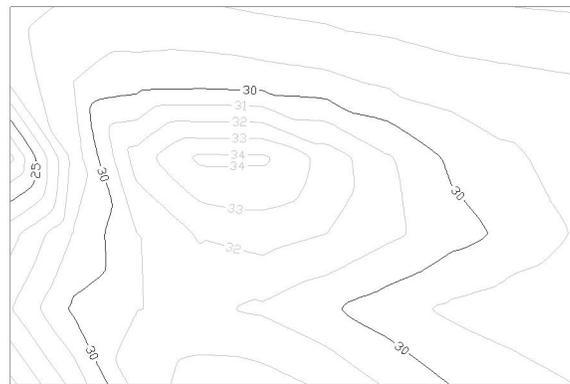


Figura A2.58 Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos.

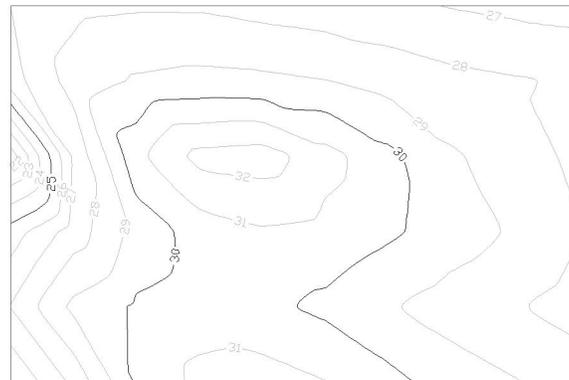


Figura A2.59 Curvas de isotemperatura no instante 150 minutos.



Figura A2.60 Curvas de isotemperatura no instante 180 minutos.

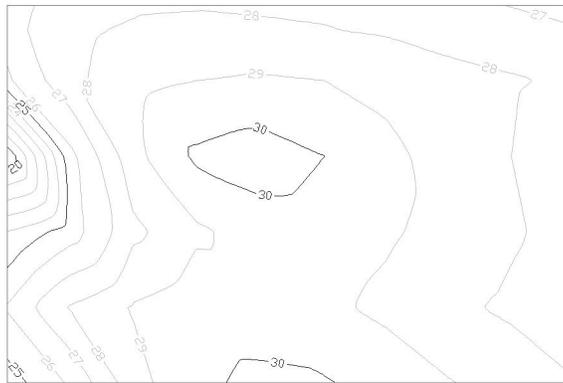


Figura A2.61 Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos.



Figura A2.62 Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos.

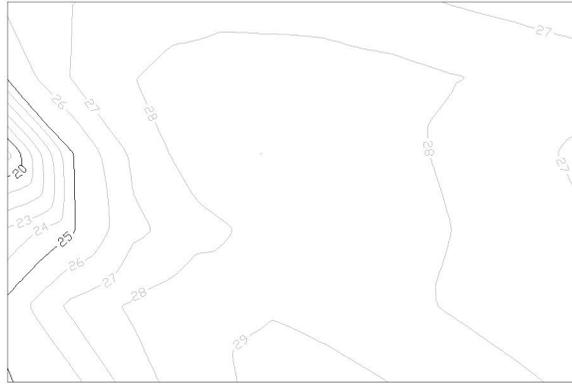


Figura A2.63 Curvas de isotemperatura no instante 270 minutos.

## PRESSÕES DE VAPOR DE 25 KPA

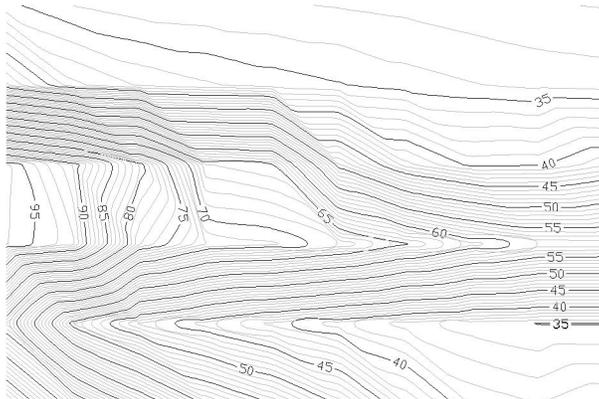


Figura A2.64 Curvas de isoterma no instante zero minutos.



Figura A2.65 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

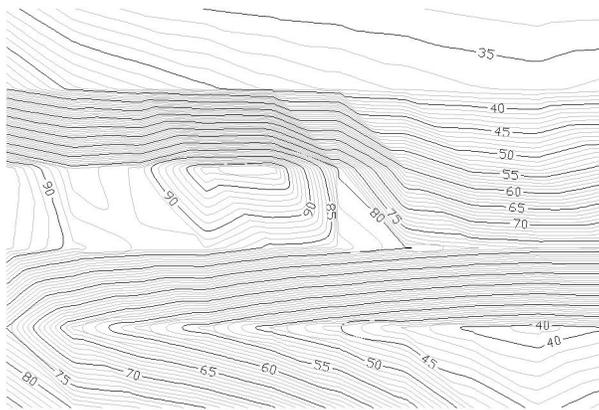


Figura A2.66 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

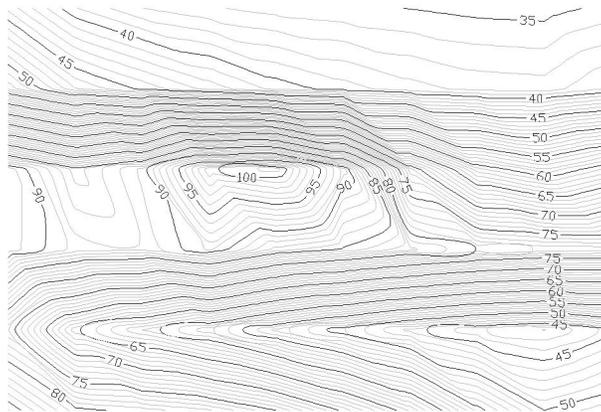


Figura A2.66 Curvas de isotemperatura no instante 90 minutos.

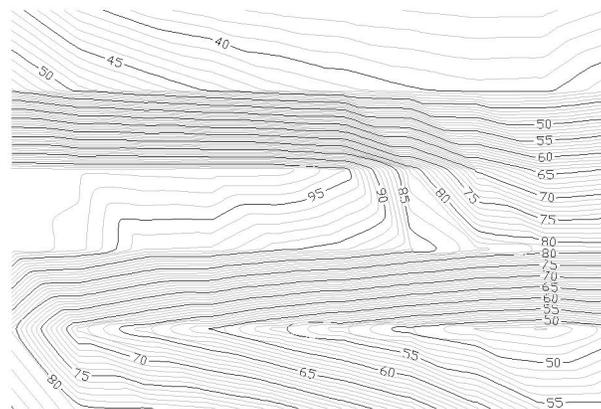


Figura A2.67 Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos.



Figura A2.68 Curvas de isotemperatura no instante 150 minutos.

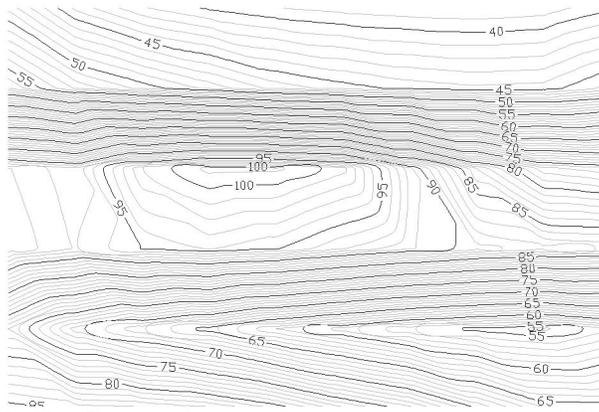


Figura A2.69 Curvas de isotemperatura no instante 180 minutos.

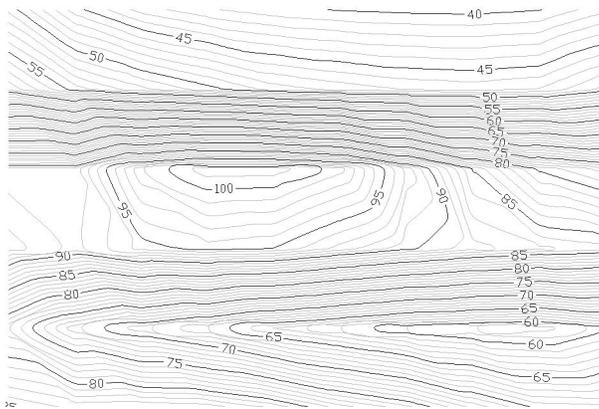


Figura A2.70 Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos.

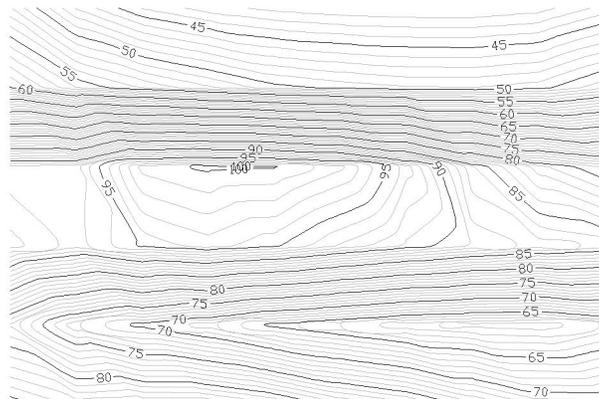


Figura A2.71 Curvas de isotemperatura no instante 240 minutos.

## CURVAS DE ISOTEMPERATURAS PARA ENSAIOS DO TERCEIRO LOTE

### PRESSÕES DE AR DE 50 KPA E VAPOR DE 25 KPA

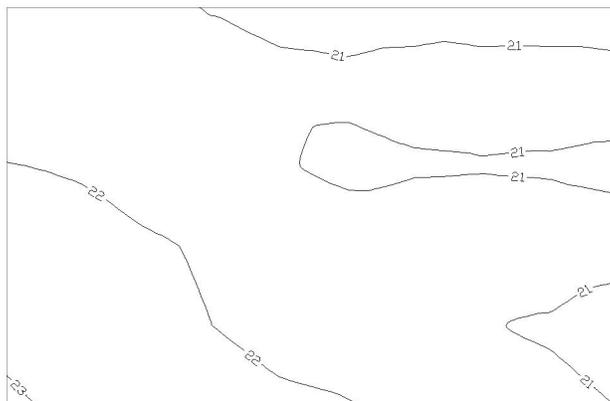


Figura A2.72 Curvas de isoterma no instante zero.

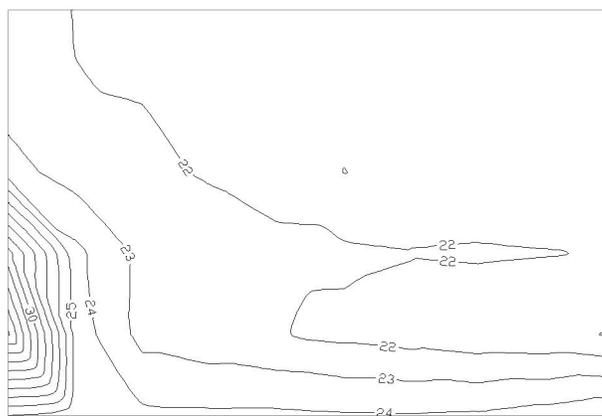


Figura A2.73 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

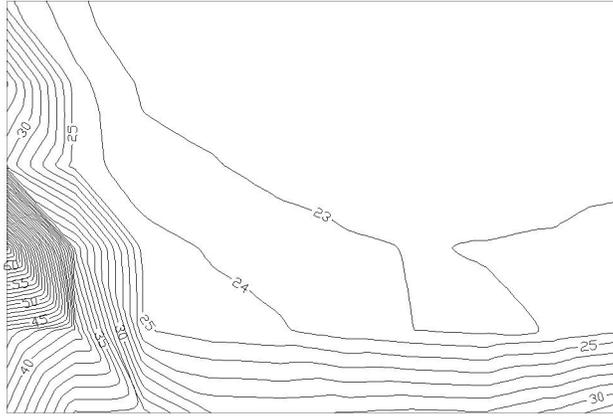


Figura A2.74 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

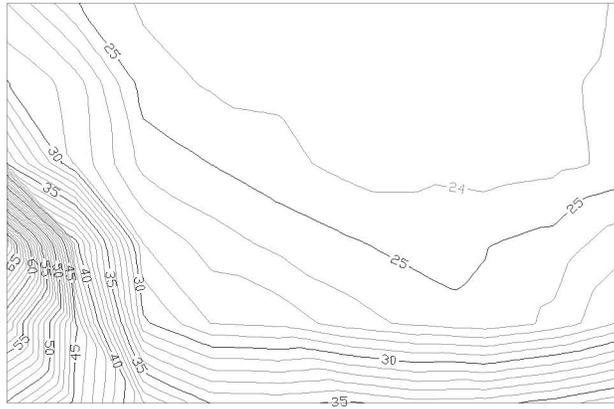


Figura A2.75 Curvas de isoterma no instante tempo 90 minutos.

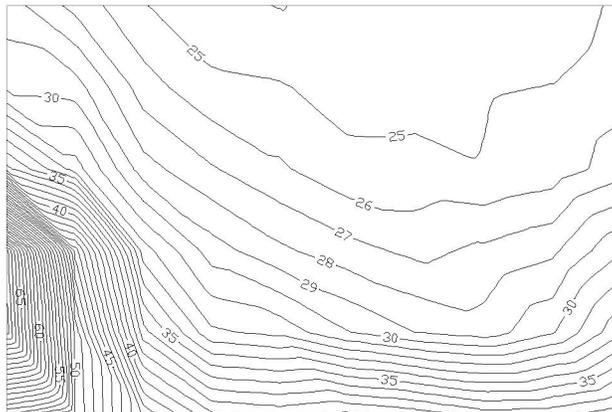


Figura A2.76 Curvas de isoterma no instante 120 minutos.

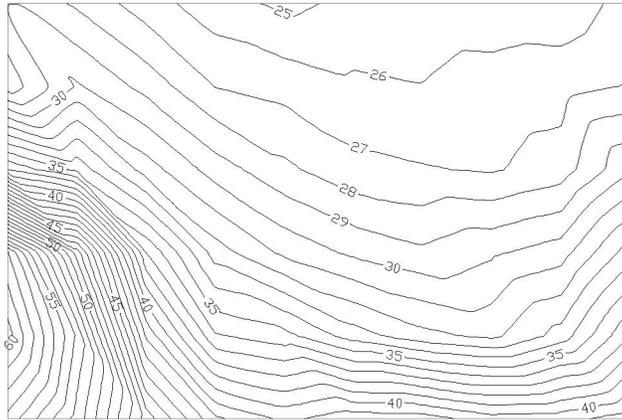


Figura A2.77 Curvas de isotemperatura no instante 150 minutos.

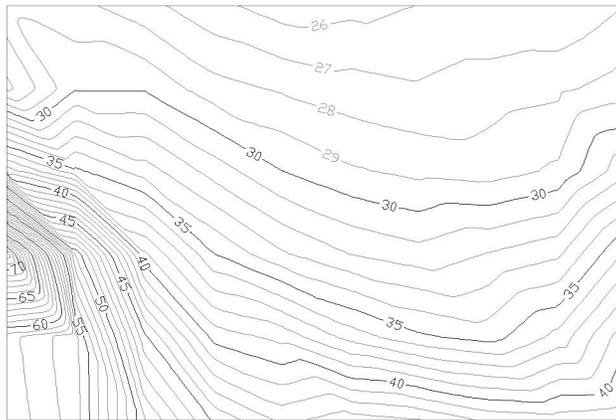


Figura A2.78 Curvas de isotemperatura no instante 180 minutos.

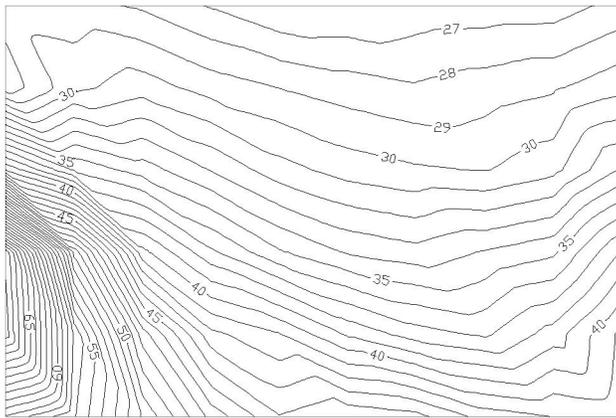


Figura A2.79 Curvas de isotemperatura no instante 210 minutos.

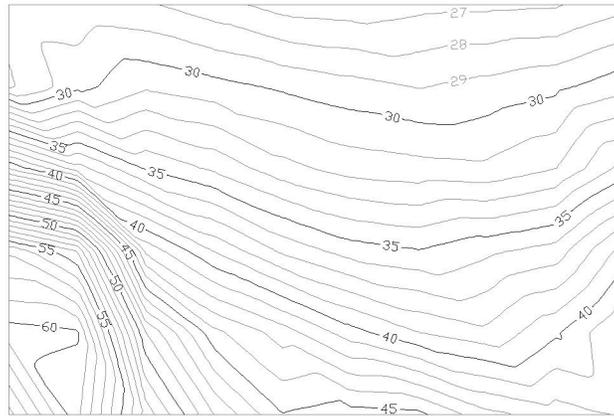


Figura A2.80 Curvas de isoterma no instante 240 minutos.

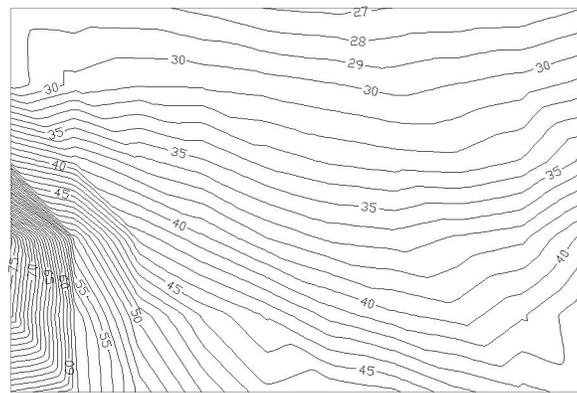


Figura A2.81 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

## PRESSÕES DE AR DE 50 KPA E VAPOR DE 50 KPA

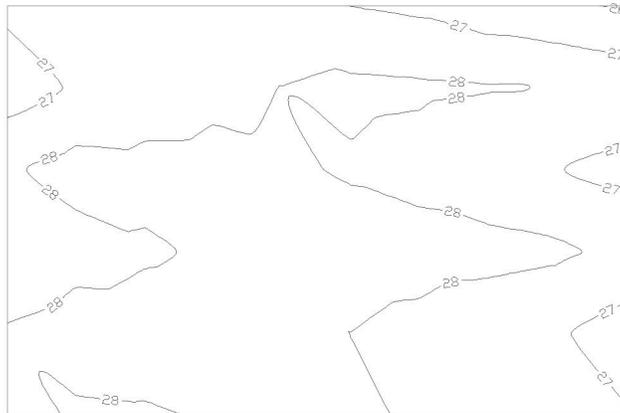


Figura A2.82 Curvas de isoterma no instante zero.

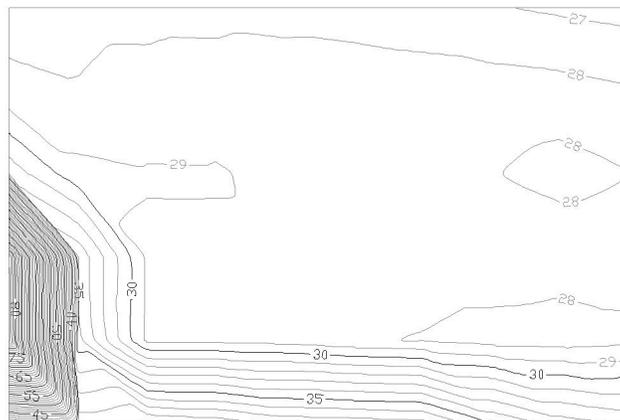


Figura A2.82 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.



Figura A2.83 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

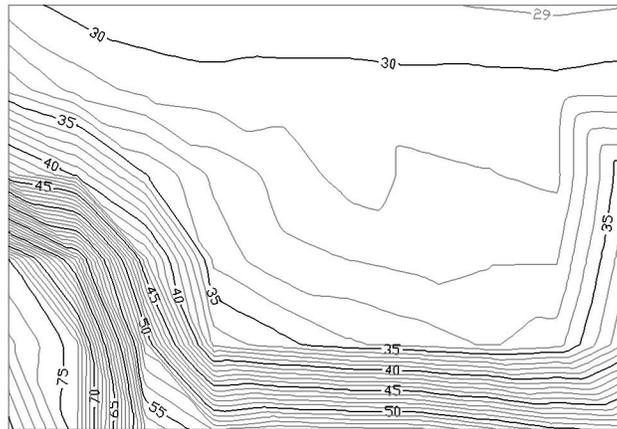


Figura A2.84 Curvas de isotemperatura no instante tempo 90 minutos.

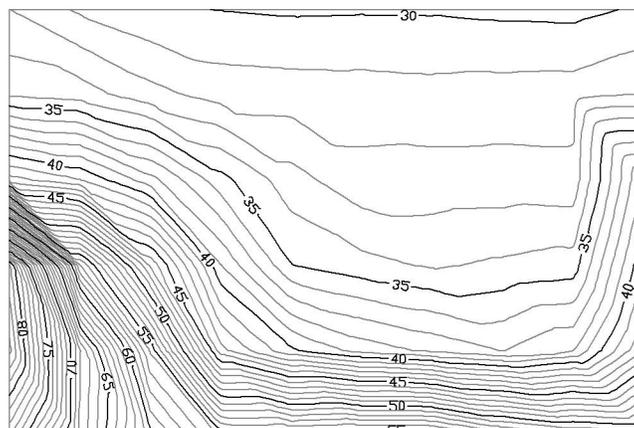


Figura A2.85 Curvas de isotemperatura no instante 120 minutos.

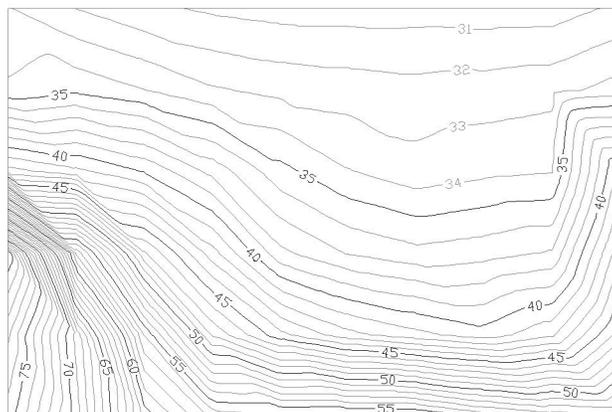


Figura A2.86 Curvas de isotemperatura no instante 150 minutos.

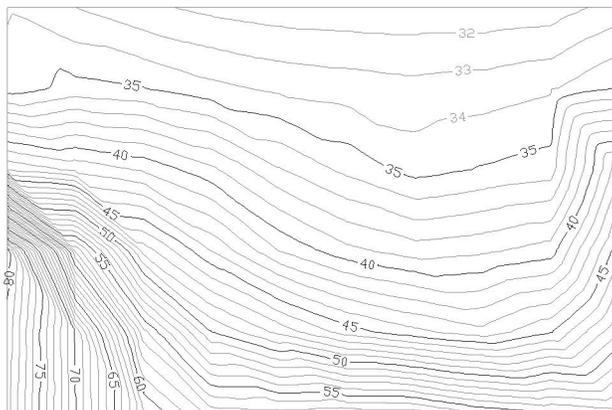


Figura A2.87 Curvas de isoterma no instante 180 minutos.

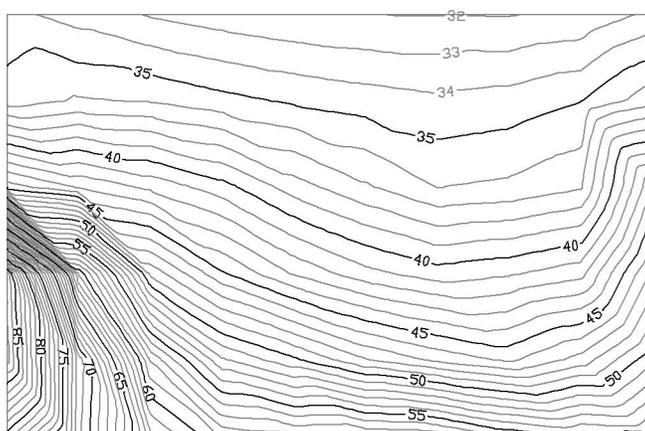


Figura A2.88 Curvas de isoterma no instante 210 minutos.

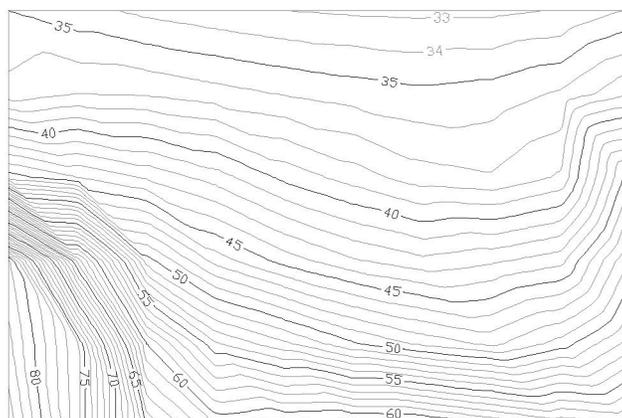


Figura A2.89 Curvas de isoterma no instante 240 minutos.

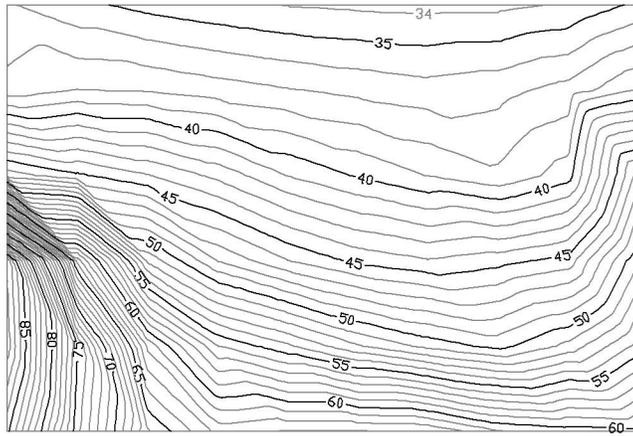


Figura A2.90 Curvas de isotemperatura no instante 270 minutos.

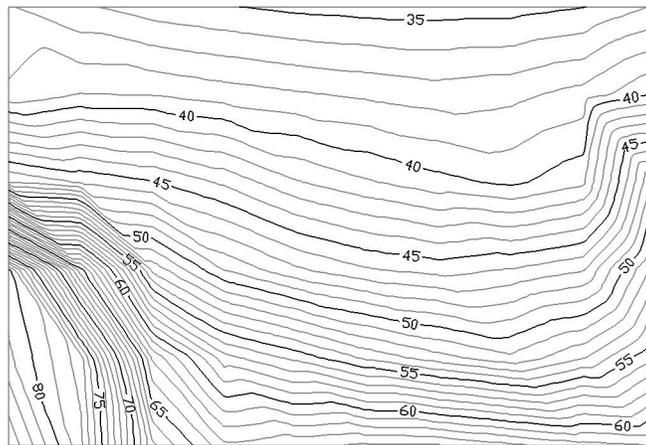


Figura A2.91 Curvas de isotemperatura no instante 300 minutos.

## PRESSÕES DE AR DE 50 KPA

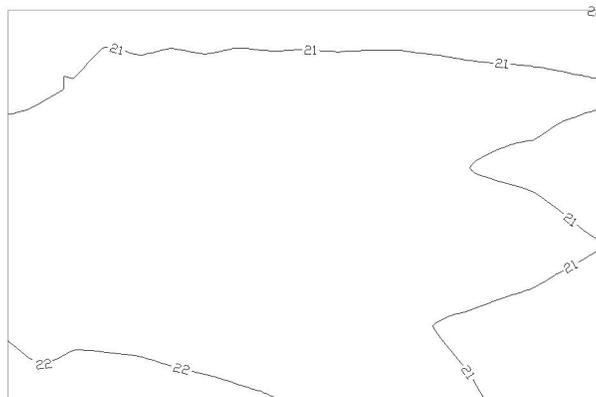


Figura A2.92 Curvas de isotemperatura no instante zero.

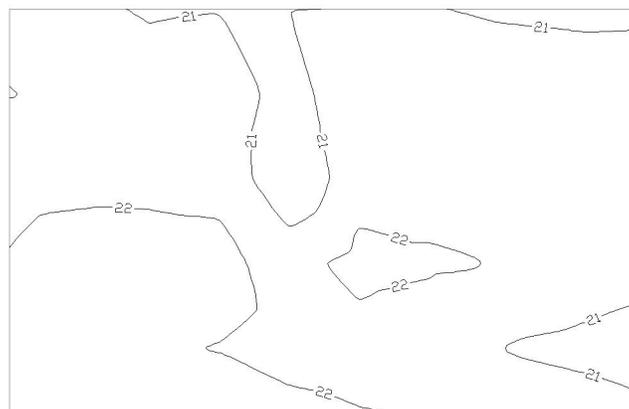


Figura A2.93 Curvas de isotemperatura no instante 30 minutos.

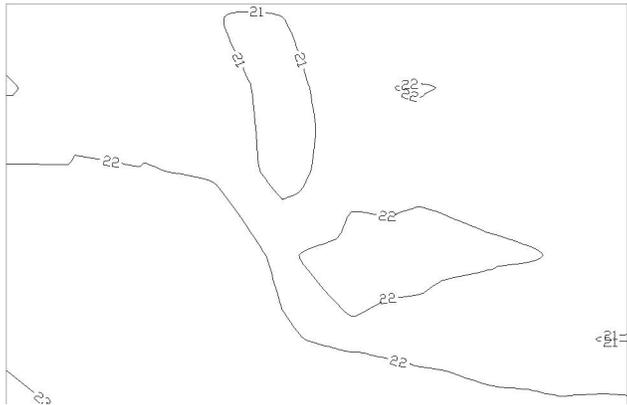


Figura A2.94 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

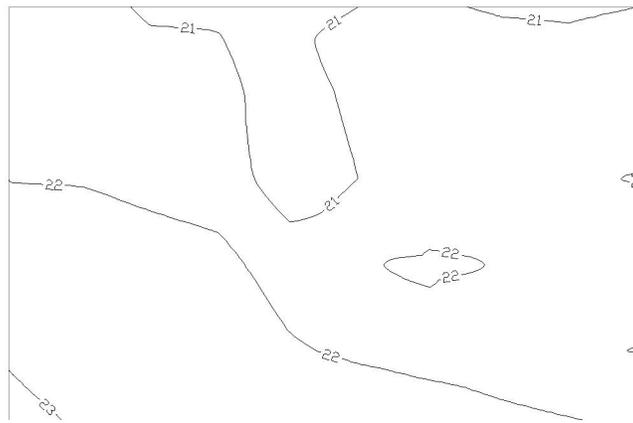


Figura A2.95 Curvas de isoterma no instante tempo 90 minutos.

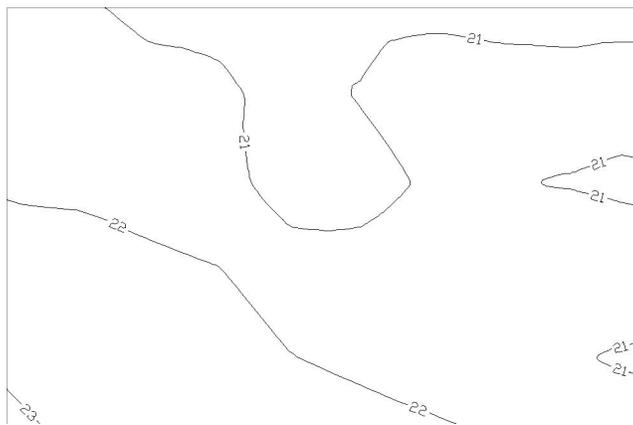


Figura A2.96 Curvas de isoterma no instante 120 minutos.

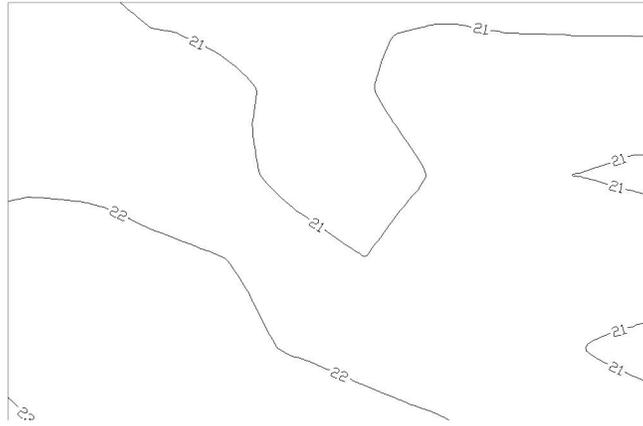


Figura A2.97 Curvas de isoterma no instante 150 minutos.

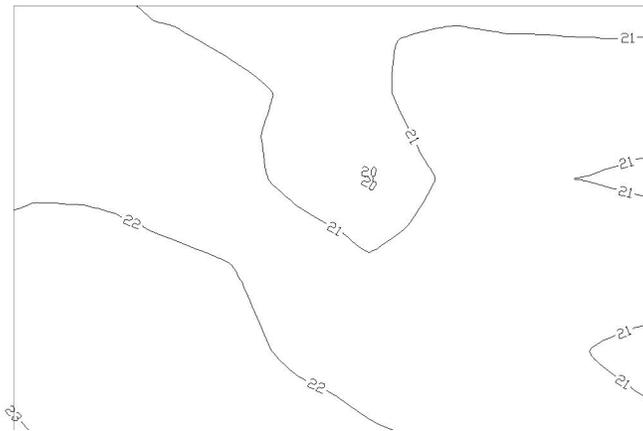


Figura A2.98 Curvas de isoterma no instante 180 minutos.

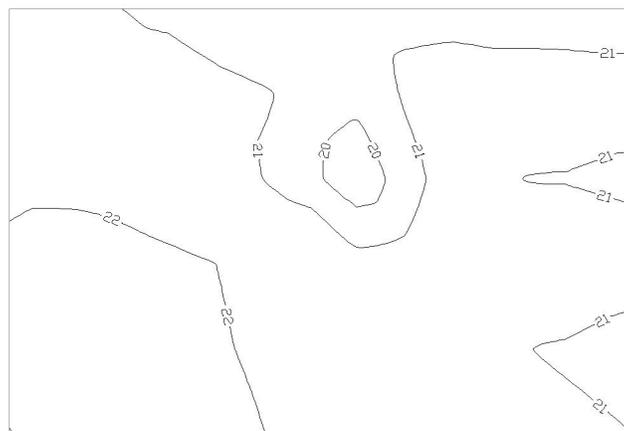


Figura A2.99 Curvas de isoterma no instante 210 minutos.

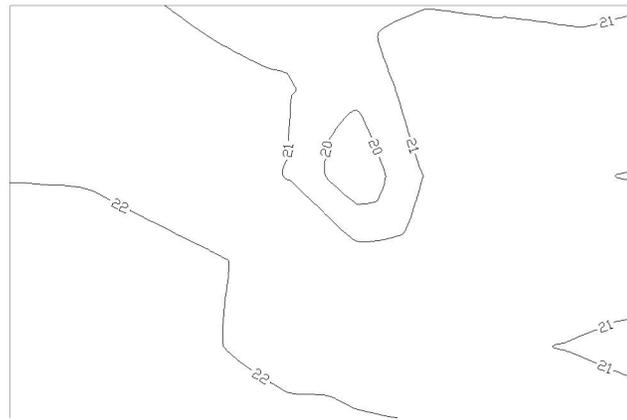


Figura A2.100 Curvas de isoterma no instante 240 minutos.

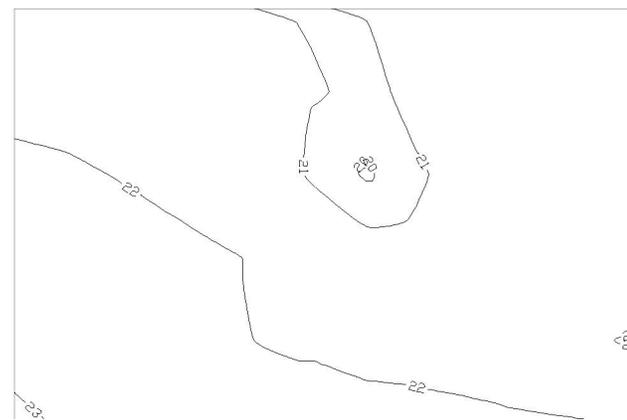


Figura A2.101 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

## PRESSÕES DE VAPOR DE 50 KPA

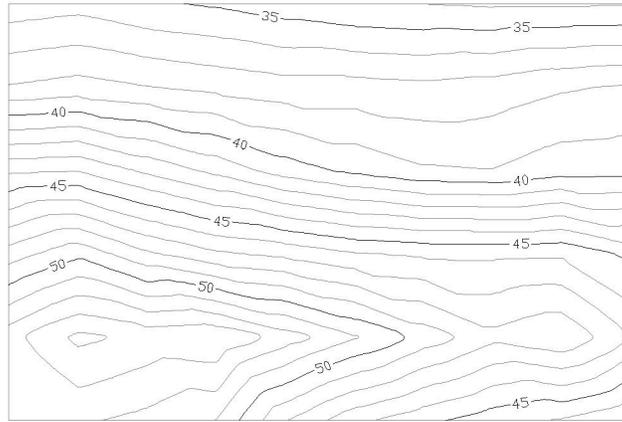


Figura A2.102 Curvas de isoterma no instante zero.

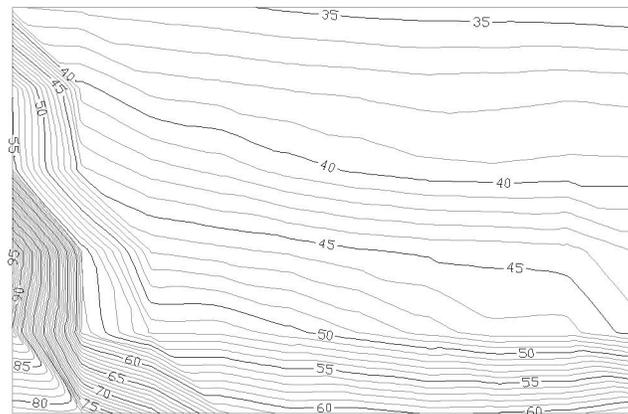


Figura A2.103 Curvas de isoterma no instante 30 minutos.

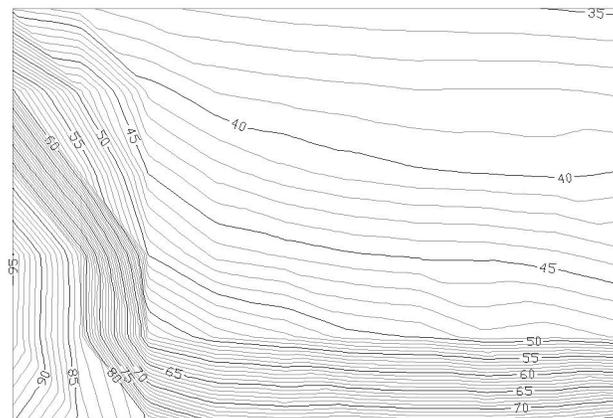


Figura A2.104 Curvas de isoterma no instante 60 minutos.

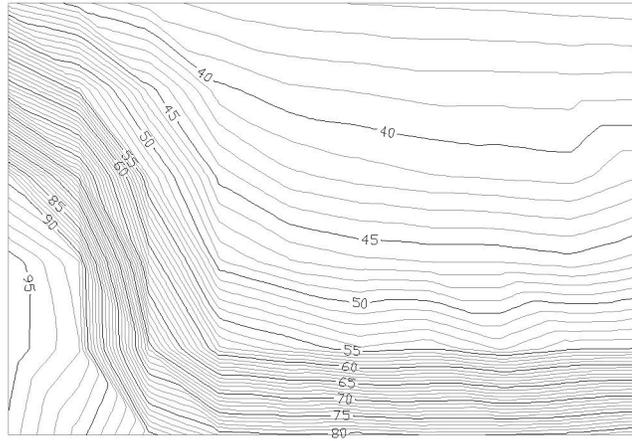


Figura A2.105 Curvas de isoterma no instante tempo 90 minutos.

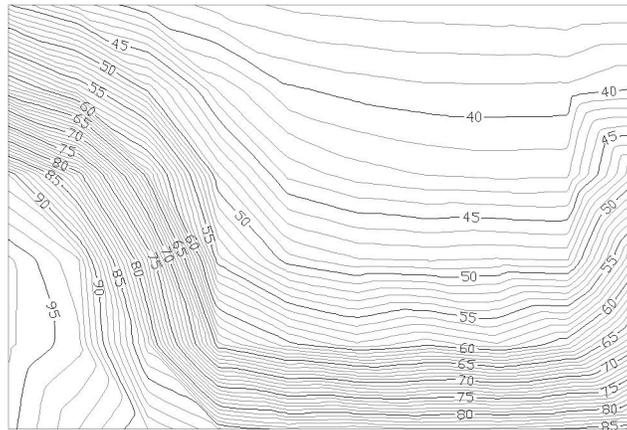


Figura A2.106 Curvas de isoterma no instante 120 minutos.

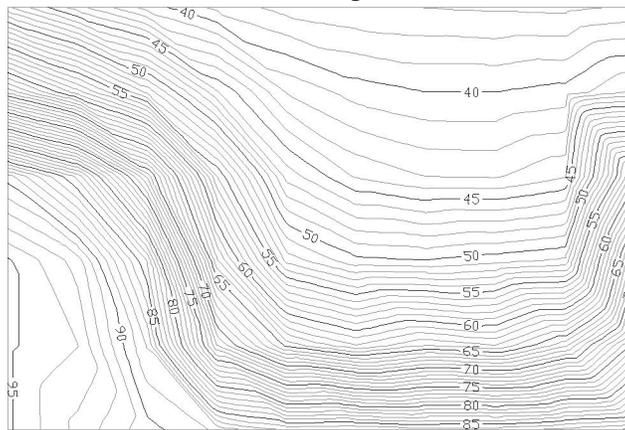


Figura A2.107 Curvas de isoterma no instante 150 minutos.

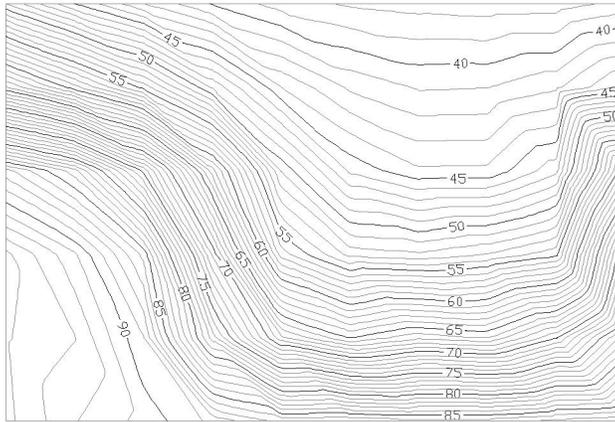


Figura A2.108 Curvas de isoterma no instante 180 minutos.

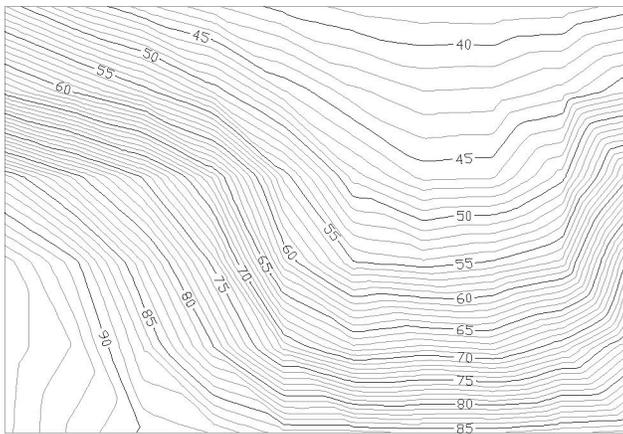


Figura A2.109 Curvas de isoterma no instante 210 minutos.



Figura A2.110 Curvas de isoterma no instante 240 minutos.

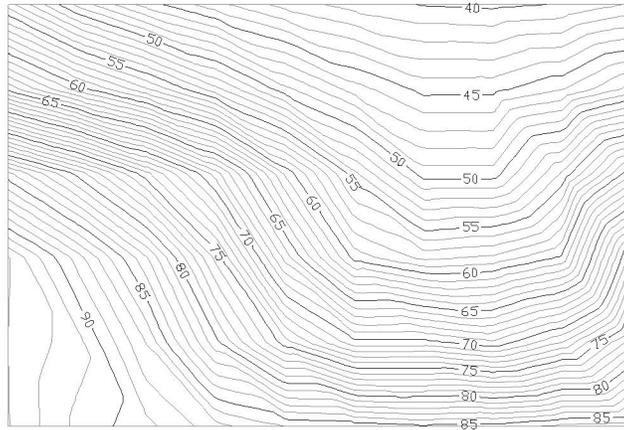


Figura A2.111 Curvas de isoterma no instante 270 minutos.

## CURVAS DE ISOTEMPERATURAS PARA ENSAIO COMPLEMENTAR

### Curvas de isotemperaturas para ensaios com injeção de vapor 50 kPa

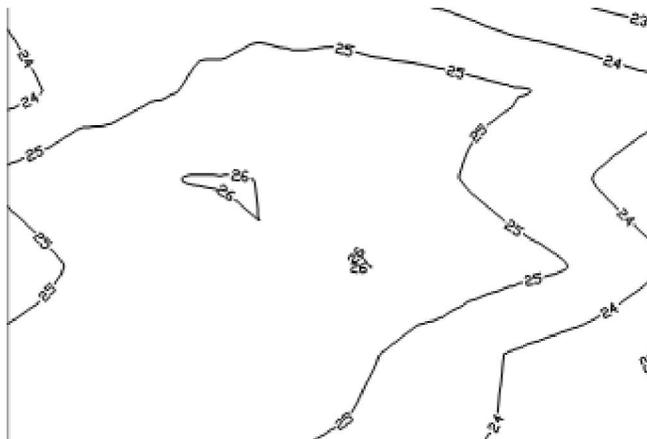


Figura A2.112 Curvas de isotemperatura no instante 0 min.

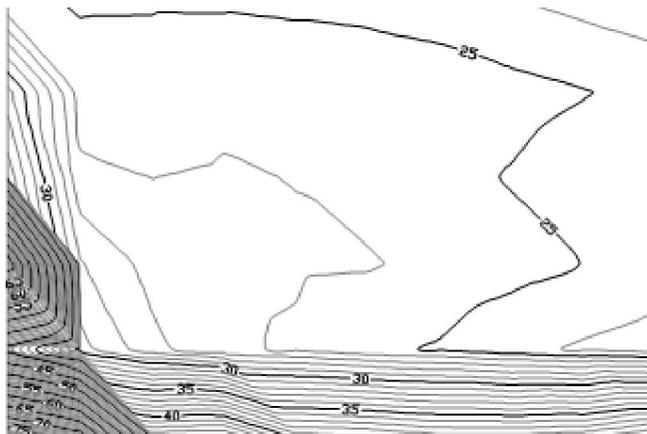


Figura A2.113 Curvas de isotemperatura no instante 30 min.

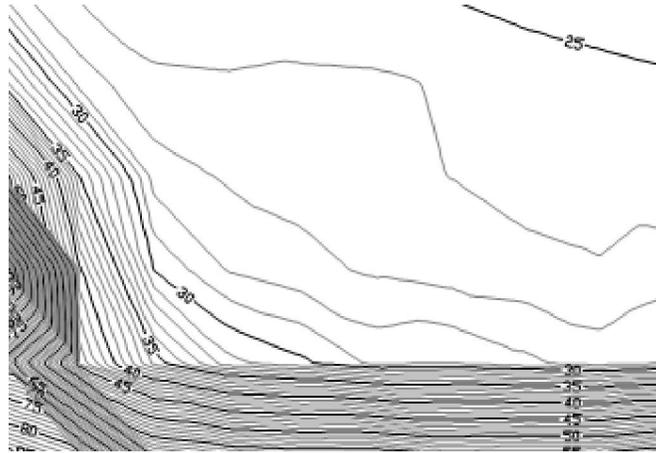


Figura A2.114 Curvas de isoterma no instante 60 min.

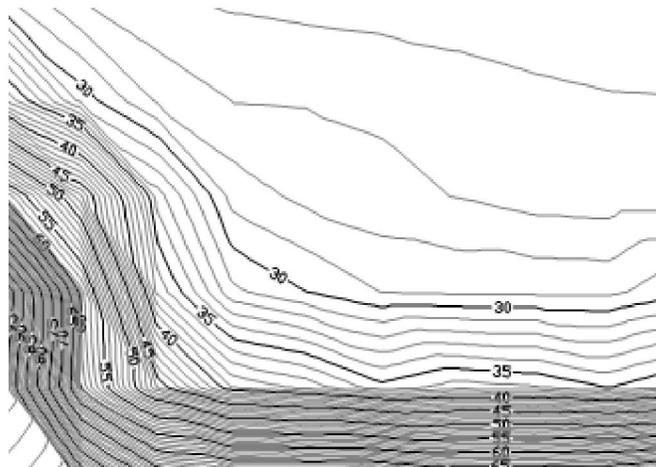


Figura A2.115 Curvas de isoterma no instante 90 min.

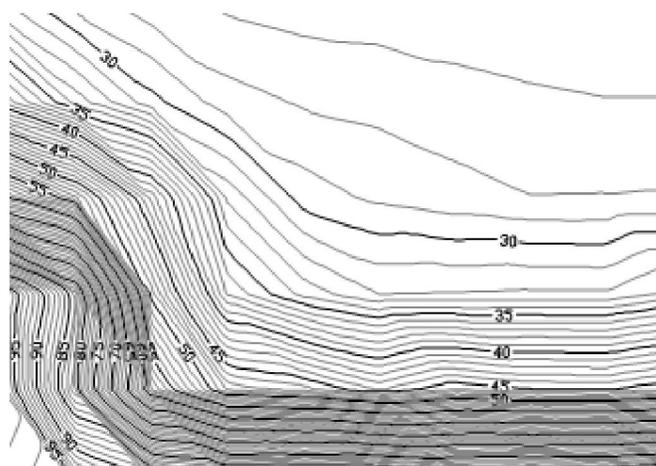


Figura A2.116 Curvas de isoterma no instante 120 min.

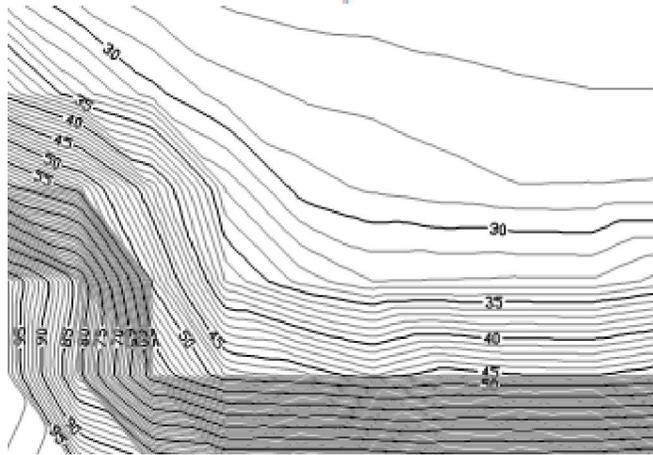


Figura A2.117 Curvas de isoterma no instante 150 min.

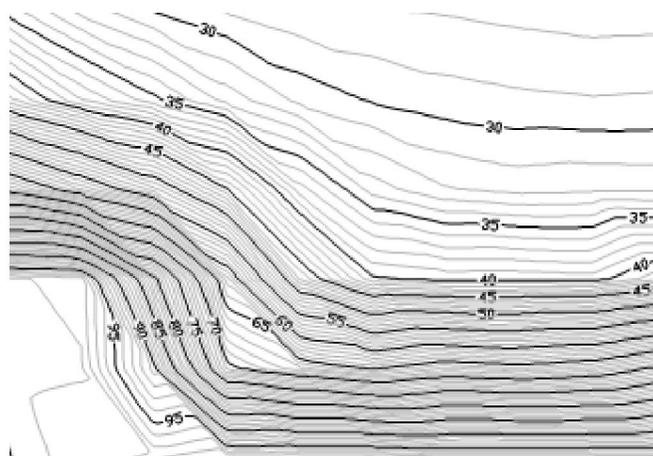


Figura A2.118 Curvas de isoterma no instante 180 min.

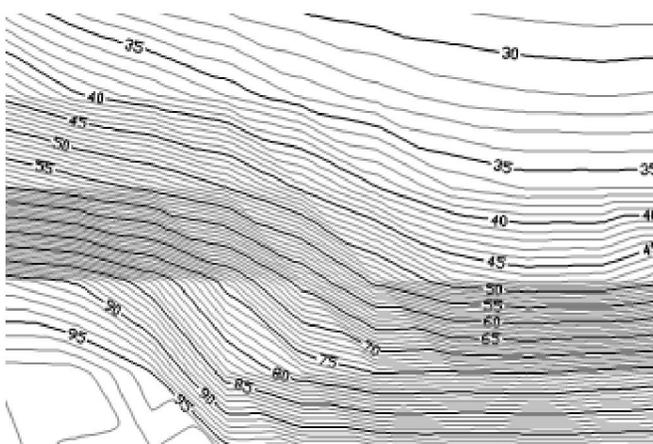


Figura A2.119 Curvas de isoterma no instante 210 min.

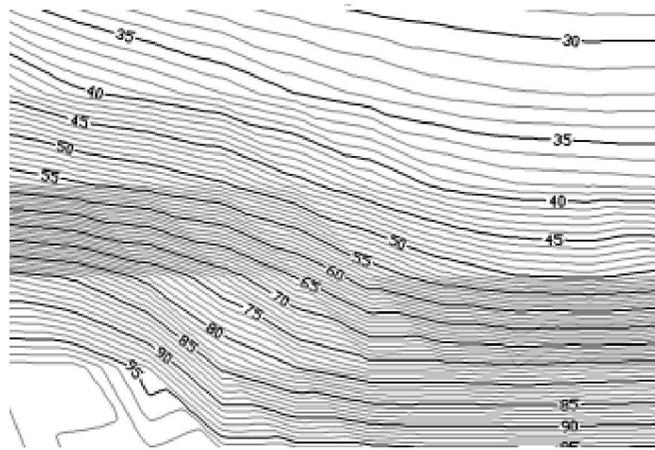


Figura A2.120 Curvas de isoterma no instante 240 min.

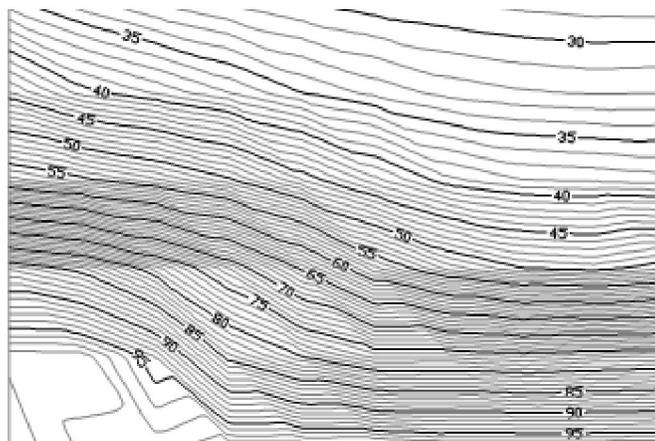


Figura A2.121 Curvas de isoterma no instante 270 min.

















ENSAIO AR/VAPOR 2:1  
 LOTE 03

Volume teórico de tolueno a  
 ser extraído

INJEÇÃO AR/VAPOR 2:1

Para os ensaios com injeção mista de ar e vapor, tem-se:

Temperatura média 110 C 383 K  
 O valor da pressão de vapor será 746.59 mm Hg

Então, faz-se novo cálculo para obter-se o número de mols correspondente:

Pv	mm Hg			746.59	mm Hg
Vc	Volume da caixa	69190	cm <sup>3</sup>	69.19	L
R				62.364	L.mm Hg. K-
T	K	110	C	383	1.mol-1 K
	n			2.16268	
n=		M=n*			
M/Pm	mol	Pm	Pm	92.14	g/mol
M	199.27	g			
d =		Vol=m/d			
m/Vol		g.ml-1			
d	0.867	ml			
vol	229.84				

( Volume de tolueno que evapora com pressão de 746,79 mm Hg à temperatura de 110 C)

Nestes ensaios usou-se vácuo com valor de 1 atm = 760 mm Hg.  
 Adota-se o valor de temperatura correspondente à esta pressão  
 da equação da pressão de vapor em função da temperatura

Assim,

P= 760 mmg

(Valor equivalente  
 adotado)

T 110 C

**ENSAIO AR/VAPOR 1:1**  
**LOTE 03**

Volume teórico de tolueno a  
ser extraído

INJEÇÃO AR/VAPOR 1:1

Para os ensaios com injeção mista de ar e vapor, tem-se:

Temperatura média	110 C	383 K
O valor da pressão de vapor será	746.59	mm Hg

Então, faz-se novo cálculo para obter-se o número de mols correspondente:

Pv	mm Hg								
Vc	Volume da caixa	69190	cm <sup>3</sup>	746.59	mm Hg	69.19	L		
R				62.364	L.mm Hg. K-		1.mol <sup>-1</sup>		
T	K	110	C	383	K				
	n	2.16268							
n=			M=n*						
M/Pm	mol		Pm	Pm	92.14	g/mol			
M	199.27		g						
d =									
m/Vol			Vol=m/d						
d	0.867		g.ml <sup>-1</sup>						
vol	229.84		ml						

( Volume de tolueno que evapora com pressão de 746,79 mm Hg à temperatura de 110 C)

Nestes ensaios usou-se vácuo com valor de 1 atm = 760 mm Hg.  
Adota-se o valor de temperatura correspondente à esta pressão  
da equação da pressão de vapor em função da temperatura

Assim,

P= 760 mmg

(Valor equivalente  
adotado)

T 110 C



## ENSAIO VAPOR LOTE 03

Volume teórico de tolueno a  
ser extraído

INJEÇÃO  
VAPOR

Para os ensaios com injeção mista de ar e vapor, tem-se:

Temperatura média 110 C 383 K  
 O valor da pressão de vapor será 746.59 mm Hg

Então, faz-se novo cálculo para obter-se o número de mols correspondente:

Pv	mm Hg								
Vc	Volume da caixa	69190	cm <sup>3</sup>	746.59	mm Hg	69.19	L		
R				62.364	L.mm Hg. K-		1.mol-1		
T	K	110	C	383	K				
	n	2.16268							
n=			M=n*						
M/Pm	mol		Pm	Pm	92.14	g/mol			
M	199.27		g						
d =									
m/Vol			Vol=m/d						
d	0.867		g.ml-1						
vol	229.84		ml						

( Volume de tolueno que evapora com pressão de 746,79 mm Hg à temperatura de 110 C)

Nestes ensaios usou-se vácuo com valor de 1 atm = 760 mm Hg.

Adota-se o valor de temperatura correspondente à esta pressão da equação da pressão de vapor em função da temperatura

Assim,

P= 760 mmg

(Valor equivalente adotado)

T 110 C

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)