

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 19/07/00
Ass.: 

**REATORES ANAERÓBIOS (TIPO UASB) PARA TRATAMENTO
DE ESGOTO DOMÉSTICO, EXECUTADOS EM CONCRETO E
ARGAMASSA DE ALTO DESEMPENHO: UMA ALTERNATIVA
CONSTRUTIVA**

LUANA MARIA MARELLI

DEDALUS - Acervo - EESC



31100016425

Dissertação apresentada à escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção de título de Mestre em Tecnologia do Ambiente Construído.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Jefferson B. Libardi Libório



São Carlos 2000

Class. TESE-EESC
Curt. 3310
Tombo T0161100

31100016425

st 1098314

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

M3233v Marelli, Luana Maria
Reatores anaeróbios (tipo UASB) para tratamento de
esgoto doméstico, executados em concreto e argamassa
de alto desempenho : uma alternativa construtiva /
Luana Maria Marelli. -- São Carlos, 2000.

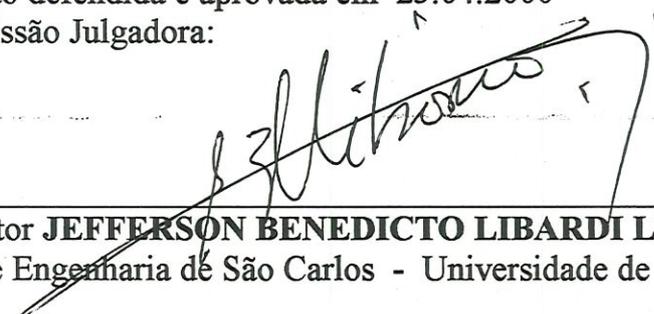
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2000.
Área: Tecnologia do Ambiente Construído.
Orientador: Prof. Dr. Jefferson B. Libardi Libório.

1. Reatores anaeróbios. 2. Pré-moldagem.
3. Concretos e argamassas de alto desempenho.
4. Projetos e modelo. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidata: Engenheira **LUANA MARIA MARELLI**

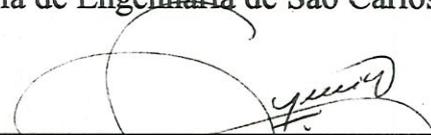
Dissertação defendida e aprovada em 25.04.2000
pela Comissão Julgadora:



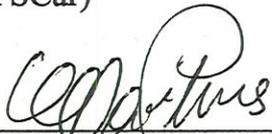
Prof. Doutor **JEFFERSON BENEDICTO LIBARDI LIBÓRIO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MARCIO ROBERTO SILVA CORREA**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **JASSON RODRIGUES DE FIGUEIREDO FILHO**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Assoc. **CARLOS ALBERTO FERREIRA MARTINS**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Tecnologia do Ambiente Construído



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

*Aos meus queridos pais Gaddo e Odette,
grandes exemplos de vida.*

*Ao irmão Adalberto, um inestimável
amigo e companheiro.*

*À avó Idalina, personificação de amor e
resignação.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Jefferson Benedicto Libardi Liborio, pela orientação, amizade e confiança que me dedicou durante a pesquisa.

Aos professores Dr. Marcio Roberto Silva Corrêa, Dr. Jasson Rodrigues de Figueiredo Filho e Dr. Eugênio Foresti pela atenção e apoio dispensados neste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro e acompanhamento da pesquisa, imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao grande amigo Prof. Ms. Benedito A.S. Rodrigues, por abrir as portas de sua empresa e de seu conhecimento, contribuindo sobremaneira para a realização deste trabalho

Ao Eng^o André Luiz Fiorentino, diretor geral do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de São Carlos (SAAE), pela atenção e interesse em formalizar uma parceria no sentido de viabilizar a execução do protótipo proposto na pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlito Calil Junior, pela amizade e grande incentivo acadêmico.

À equipe de profissionais do Laboratório de Construção Civil- EESC-USP – Paulo Pratavieira, Sérgio Trevellin, Renato Dibbo e Odnei- pelo apoio técnico na execução do trabalho e pela agradável convivência no laboratório.

Aos técnicos do Departamento de Estruturas- EESC-USP, pela assistência prestada em várias fases de execução do reator anaeróbio.

À grande família GUERRINI- Délio, Iria, Daniel, Lília e Claudio- pela acolhida, incentivo e amizade, proporcionando-me momentos alegres durante esses anos de convívio.

Ao querido Fabio Guerrini pelo carinho, paciência e inúmeros momentos de alegria proporcionados no decorrer deste trabalho.

Aos queridos amigos que conquistei no decorrer desses anos: Vanessa, David, André, Itamiro, Augusto, Luciana, Isabel Sakamoto, Alessandra Marelli, Maria Julia, Rodrigo, Stella, Silvinha, Dirlane, Evandro e Mércia.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Arquitetura- EESC-USP, que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS.....	vi
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 1- A tecnologia de reatores anaeróbios utilizados no tratamento de esgoto doméstico	
Introdução	07
1.1-Contexto geral do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil.....	07
1.1.1- A qualidade das águas em corpos receptores	07
1.1.2- Níveis , processos e sistemas de tratamento utilizados em água residuária doméstica.	09
1.1.3 Os reatores anaeróbios tratando o esgoto doméstico no Brasil	14
1.2- Fundamentos teóricos sobre reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB).....	15
1.2.1 Algumas definições	15
1.2.2 Funcionamento de um reator UASB.....	16
1.2.3- Vantagens e cuidados com o reator UASB.....	17
1.3.-Critérios básicos de dimensionamento para reatores anaeróbios UASB.....	18
1.3.1 Critérios para determinar as características geométricas do reator.....	19
1.3.1.1- Volume do reator	19
1.3.1.2- Altura do reator	20
1.3.1.3- Forma do reator.....	21
1.3.2. Critérios para o dimensionamento de cada parte constituinte do reator	22
1.3.2.1 Sistema separador de fases-(gás- sólido e líquido).....	22
1.3.2.2. Sistema de distribuição de águas residuárias (afluente).....	26
1.3.2.3 Dispositivo de coleta do efluente	27
1.3.3. Estruturas periféricas	28
1.3.4. Materiais de construção	29

CAPÍTULO 2- Concretos e argamassas: Um enfoque para a durabilidade

Introdução	30
2.1. Durabilidade: Conceitos e Definições	31
2.2- As causas de deterioração do concreto, afetando a durabilidade das estruturas	31
2.2.1- Deterioração do concreto por ações físicas.....	33
2.2.1.1- Desgaste Superficial do Concreto	33
2.2.1.2- Fissuração	33
2.2.2- Deterioração do concreto por reações químicas.....	34
2.2.2.1- A pasta de cimento endurecida	35
2.2.2.2- Interações químicas entre agentes agressivos do meio externo e os constituintes da pasta de cimento endurecida.....	36
2.2.2.2.1 Reações envolvendo hidrólise e lixiviação dos componentes da pasta de cimento endurecida	36
2.2.2.2.2- Reações de troca entre fluidos agressivos e os componentes da pasta de cimento endurecida: Os três tipos de interações químicas.	36
2.2.2.2.3- Reações formando produtos expansivos.....	38
2.2.3- A água do mar como agente de vários processos de deterioração do concreto....	44
2.3- Fatores que influenciam a durabilidade dos concretos	45
2.4- O avanço de novas técnicas e tecnologias influenciando na durabilidade do concreto	49
2.4.1- Os Concretos de Alto Desempenho (CAD)	49
2.4.1.1- Conceitos e definições de Concreto de Alto Desempenho.....	49
2.4.1.2- Proporcionamento e materiais constituintes do CAD	50
2.4.1.3- A cura no Concreto de Alto Desempenho	56
2.4.2- Conseqüências da utilização de aditivos químicos (superplastificantes) e aditivos minerais na resistência e durabilidade dos concretos.....	57
2.4.3- Aplicação do CAD em peças estruturais pré- moldadas.....	59

CAPITULO 3- Estudo dos materiais a serem utilizados na estrutura do reator anaeróbio UASB

Introdução	62
3.1- Metodologia para a caracterização dos materiais	62
3.1.1- Agregados	63
3.1.1.1- Agregado miúdo	63
3.1.1.2- Agregado graúdo com diâmetro máximo de 9,5 mm (pedrisco)	64

3.1.1.3- Composição agregado graúdo com agregado miúdo: Determinação do menor índice de vazios	64
3.1.2- Cimentos Portland	65
3.1.3- Água de amassamento	65
3.1.4- Aditivo	65
3.2- Resultados obtidos com o ensaio de caracterização dos materiais	66
3.2.1- Agregados	66
3.2.1.1- Agregado miúdo.....	66
3.2.1.2- Resultados obtidos com o agregado graúdo.....	67
3.2.1.3- Resultados dos ensaios da composição dos agregados.....	67
3.2.2- Resultados obtidos com os ensaios de cimento Portland.....	69
3.3- Composição dos traços e a caracterização das argamassas e concretos.....	70
3.3.1- Escolha dos traços	71
3.3.2- Fixação de parâmetros	71
3.3.3- Caracterização das argamassas e concretos no estado fresco	72
3.3.4- Condições de cura	74
3.3.4.1- Cura Normal	74
3.3.4.2- Cura térmica.....	74
3.3.5- Caracterização das argamassas e concretos no estado endurecido.....	77
3.4- Resultados da caracterização das argamassas e concretos no estado endurecido ..	79
3.4.1- Resistência a compressão	79
3.4.2- Módulo de Elasticidade	82
3.4.3- Porosidade	83
3.5- Considerações sobre os resultados e as propriedades desenvolvidas pelos concretos e argamassas de estudo.....	83
3.5.1- Resistência mecânica.....	83
3.5.1.1- Desempenho dos concretos e argamassas sob diferentes condições de cura....	83
3.5.2- Módulo de elasticidade.....	88
3.5.3- Porosidade	88
3.6- As expectativas de durabilidade dos materiais estudados	88
3.6.1- Avaliação da agressividade no interior do reator anaeróbio UASB	89
3.6.1.1- pH, alcalinidade e acidez.....	90
3.6.1.2- Considerações sobre a presença sais dissolvidos na água residuária causando efeitos deletérios para o processo anaeróbio e para o concreto	92
3.6.1.3- Considerações sobre a presença de íons sulfatos no interior do reator anaeróbio	94

3.6.1.4- Considerações finais sobre a agressividade da água em contato com o reator	95
3.6.2- As expectativas de durabilidade dos materiais estudados.....	96
3.6.3- A potencialidade dos materiais de estudo quando introduzido em sua composição a sílica ativa.	97

CAPÍTULO 4- Proposta construtiva para reatores anaeróbios do tipo UASB

Introdução.....	101
4.1- Projeto hidráulico da proposta construtiva de reator anaeróbio (Tipo UASB).....	102
4.1.1- Fluxograma da mini estação de tratamento de esgoto	102
4.1.2- Parâmetros de projeto do reator anaeróbio tipo UASB	103
4.1.2.1- Período de projeto	103
4.1.2.2- Etapas de Construção	104
4.1.2.3- População no fim do plano (p).....	104
4.1.2.4- Topografia local	104
4.1.2.5- Determinação da vazão de projeto	104
4.1.3- Determinação das características geométricas do reator anaeróbio UASB	106
4.1.3.1- Forma do reator	106
4.1.3.2- Volume do Reator	106
4.1.3.3- Altura do reator	107
4.1.4- Dimensionamento de cada constituinte do reator tipo UASB	108
4.1.4.1- Câmara de coleta e distribuição de afluente.	108
4.1.4.2- Separador de Fases	110
4.1.4.3- Dispositivo de coleta do efluente	114
4.1.4.4- Estruturas periféricas	115
4.1.5- Projeto hidráulico do reator anaeróbio tipo UASB	116
4.2- Projeto estrutural da proposta construtiva de reator anaeróbio (Tipo UASB)....	131
4.2.1- Paredes do reator anaeróbio	131
4.2.1.1- Comportamento estrutural	131
4.2.1.2- Expressões para cálculo de esforços e deslocamentos na parede.....	132
4.2.1.3- Cálculo dos esforços solicitantes e deslocamentos na parede.....	133
4.2.1.4- Dimensionamento da parede do reator UASB	135
4.2.1.5- Ligações dos elementos pré- moldados de parede	140
4.2.2- A estrutura interna do reator anaeróbio de manta de lodo	143
4.2.2.1- Dimensionamento dos elementos que compõe a estrutura interna do reator	144

4.2.2.2- Arranjo das armaduras da estrutura interna	154
4.2.2.3- Ligações entre os elementos pré- moldados da estrutura interna.....	155
4.3- A base do reator anaeróbio	156
4.4- Considerações finais sobre o projeto estrutural e os materiais utilizados no reator.....	158
 CAPÍTULO 5- A utilização de um modelo reduzido para a avaliação do reator anaeróbio proposto	
Introdução	168
5.1- Modelos e protótipos: Definições	168
5.2- Classificação dos modelos.....	170
5.3- Condições de semelhança	170
5.3.1- Fator de escala dos comprimentos (S_L)	171
5.3.2- Fator da escala das deformações (S_ϵ)	171
5.3.3- Fator de escala das tensões (S_σ)	172
5.3.4- A escolha da escala.....	173
5.4- Execução do modelo de reator anaeróbio: Processo de produção das peças pré- moldadas e montagem da estrutura.	176
5.4.1- Parede do reator anaeróbio	176
5.4.2- Estrutura interna do reator anaeróbio	179
5.4.2.1- Processo de produção das câmaras de coleta e distribuição do afluente.....	179
5.4.2.2- Processo de produção da câmara de coleta do efluente.....	181
5.4.2.3- O material utilizado na execução dos elementos que formam a estrutura interna do modelo	183
5.4.3- O processo de montagem do modelo de reator anaeróbio	184
5.5-Análise experimental do modelo de reator anaeróbio.....	188
5.5.1- Aplicação e descrição dos instrumentos de medição utilizados no ensaio estrutural do modelo	188
5.5.2- A aplicação do carregamento no modelo de reator anaeróbio	189
5.5.3- Apresentação dos resultados.....	190
5.5.3.1- Acompanhamento e avaliações das tensões, deformações e deslocamentos nas paredes do reator, durante as etapas de carregamento do modelo	190
5.5.3.2- Curva carregamento x deslocamento do protótipo, calculada a partir dos ensaios com o modelo-.....	195
5.6- Considerações finais.....	196

CAPÍTULO 6- Conclusões e prosseguimento da pesquisa.....	197
Referências bibliográficas.....	202

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 -Esquema dos temas abordados na pesquisa e suas inter-relações.....	04
Figura 02 -Comparação entre os principais sistemas de tratamento	13
Figura 03 - Esquema geral do funcionamento de um reator anaeróbio tipo UASB	16
Figura 04 - Pontos de velocidades máxima e mínima do líquido ascendente no interior do reator.....	23
Figura 05 - Tipos de separadores de fases.....	25
Figura 06 - Sistema de distribuição do afluente circular ou retangular.....	26
Figura 07 – Classificação das causas de deterioração do concreto.....	32
Figura 08 - Mecanismo de fissuração do concreto devido a retração plástica.....	33
Figura 09 - Mecanismo de fissuração do concreto devido cristalização dos sais nos poros.....	34
Figura 10 - Formação de ácido sulfúrico em tubulações coletoras de esgoto	37
Figura 11 - Mecanismo de expansão e fissuração do concreto devido presença de sulfato.....	39
Figura 12 -Mecanismo de expansão e fissuração do concreto devido a reação álcali- agregado	41
Figura 13 - Processo de corrosão da armadura	43
Figura 14 - Transformação do aço metálico em ferrugem	44
Figura 15 - Influência da relação água/ cimento e do grau de hidratação, na porosidade e resistência de pastas de cimento hidratadas.	47
Figura 16 - Representação gráfica da zona de transição e a matriz da pasta de cimento.	48
Figura 17 - Atuação da sílica ativa na interface pasta-agregado.	53
Figura 18 - Verificação quantitativa relacionando a porosidade com a distância da interface quando da introdução da sílica ativa.	54
Figura 19 - Micrografia de duas pastas de cimento Portlan, com mesma relação a/c onde a) não possui superplastificante e b) possui aditivo superplastificante.	55
Figura 20 - Curva granulométrica da areia.....	66
Figura 21 - Curva granulométrica do pedrisco	67
Figura 22 - Índice de vazios da composição de agregado graúdo com miúdo	68

Figura 23- Curva granulométrica da composição agregado miúdo com graúdo.....	68
Figura 24 - Ciclo de típico de Cura Térmica (VPA)	76
Figura 25 - Exemplo típico do menor ciclo de Cura Térmica (VPA).....	76
Figura 26- Resistência mecânica com cimento CPV-ARI-RS e CPII-E-32- cura normal	84
Figura 27 - Resistência mecânica com cimento CPV-ARI-RS e CPII-E-32 – cura térmica.	84
Figura 28- Resistência mecânica das misturas com cimento de alta resistência inicial sob cura normal.....	85
Figura 29- Resistência mecânica de misturas com cimento de alta resistência inicial sob cura térmica	85
Figura 30- Influência da cura térmica na resistência mecânica dos concretos e argamassas (depreciação em cada idade)	87
Figura 31- Produtos resultantes formados no processo de digestão anaeróbia.....	89
Figura 32- Dissociação do sulfeto de hidrogênio de acordo com o pH da água (T= 25°C).....	95
Figura 33 - Perda de massa em misturas com cimento CPV-ARI-RS sob cura normal e cura térmica	96
Figura 34- Concreto com e sem sílica ativa (CPV ARI RS)- Cura Normal:	97
Figura 35- Vida útil de estrutura sujeita a carbonatação em faces externas dos componentes estruturais de concreto.....	100
Figura 36- Fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto.....	103
Figura 37- Sistema de coleta de gás.....	113
Figura 38- Esforços em cascas cilíndricas com simetria axial geométrica e de carregamento	131
Figura 39 - Esforços solicitantes finais nas paredes do reator	136
Figura 40- Arranjo das armaduras das paredes pré- moldadas	137
Figura 41- Arranjo das armaduras na região das emendas- Corte transversal.....	142
Figura 42- Arranjo das armaduras na região das emendas- Corte longitudinal.....	142
Figura 43- Ligação entre parede pré- moldada com o fundo do reator	143
Figura 44- Corte transversal e vista superior da estrutura localizada no interior do reator.....	144
Figura 45- Ações atuantes na câmara de coleta do efluente.....	147

Figura 46- Disposição das telas nas câmaras de coleta e distribuição do afluente e na câmara de coleta de efluente (peça 1) - Vista superior e corte transversal.....	154
Figura 47- Arranjo das armaduras do coletor de efluente (peça2) – Corte transversal.....	155
Figura 48- Ligações entre os tubos 1 e 2 com tubo 4 e ligação do tubo 4 com pilar central –Corte transversal	155
Figura 49- Ligações entre as peças 1 e 2 da câmara de coleta do efluente– Corte transversal.....	156
Figura 50- Carga na laje de fundo.....	156
Figura 51- Cálice de fundação para pilar central	157
Figura 52 - Tipos de modelos que se pode concernir	169
Figura 53 – Dimensões da estrutura do protótipo.....	174
Figura 54 – Dimensões da estrutura do modelo.....	175
Figura 55 – Fôrma unilateral utilizada para execução dos setores de parede pré-moldados.....	176
Figura 56- Corte da armadura (a) e colocação dos espaçadores (b) dos setores circulares que formam a parede do modelo do reator.....	177
Figura 57 – Lançamento (a), adensamento (b) e acabamento (c) dos setores de parede pré-moldados.....	177
Figura 58 – Processo inicial de cura dos setores de parede pré-moldados.....	178
Figura 59 - Avaliação de resistência mecânica dos setores de parede pré-moldados.....	179
Figura 60 – Fôrmas metálicas utilizadas para as câmaras de coleta e distribuição do afluente respectivamente.	180
Figura 61 – Detalhe da armadura das câmaras de coleta e distribuição do afluente.	180
Figura 62– Lançamento e adensamento da argamassa das peças das câmaras de coleta e distribuição do afluente (a e b respectivamente).....	180
Figura 63 – Câmaras de coleta e distribuição do afluente após desmoldagem.....	180
Figura 64 – Detalhe da armadura para as peças pré-moldadas 1 e 2.....	181
Figura 65 – Detalhe da moldagem da peça 1, para a qual foi utilizada fôrma metálica.....	181
Figura 66 – Detalhe da peça 1 após desmoldagem.....	181

Figura 67 – Detalhe da fôrma, da armadura e marcação dos pinos de solidarização da peça 2	182
Figura 68 – Vista superior da peça 2, observando todas as previsões de furos para encaixe de parafusos e tubulações.	182
Figura 69 – Detalhes da fixação das peças 1 e 2 que formam a câmara de coleta do efluente	182
Figura 70 - Resistência a compressão axial da argamassa utilizada nos elementos que compõem a estrutura interna do modelo de reator.	183
Figura 71 – Escavação da sapata, do anel e da laje de fundo.....	184
Figura 72 – Pilar central (moldado “in loco”) após desmoldagem.	184
Figura 73 - Início da montagem dos setores de parede pré-moldados sobre o anel de fundação, utilizando um gabarito metálico para manter o posicionamento correto dos elementos.	185
Figura 74 -Detalhe da armadura da laje de fundo e anel do modelo e finalização da colocação dos setores de parede pré-moldados.....	185
Figura 75 -a) Concretagem da laje de fundo e anel do modelo. b) Finalização da base do modelo.....	185
Figura 76 - a) Colocação de fôrmas(metálicas) na ligação entre setores pré-moldado. b)Concretagem das emendas com auxílio de um funil..	185
Figura 77 - a) Finalização da ligação entre os setores de parede pré-moldados. b) Esquema adotado para as emendas- vista superior..	186
Figura 78 - a) A câmara de coleta do efluente é içada com auxílio de um caminhão munke. b) Detalhe do encaixe da câmara de coleta do efluente sobre o pilar central (parafusos).....	186
Figura 79 - Colocação da câmara de coleta do afluente sobre a câmara de coleta do efluente.....	186
Figura 80 - Colocação da câmara de distribuição do afluente sobre a câmara de coleta do efluente	187
Figura 81 - Estrutura final do modelo de reator anaeróbio montado.....	187
Figura 82 - Detalhe da colocação dos defletômetros em uma das paredes do reator, com auxílio de haste metálica e fixadores magnéticos.....	189
Figura 83 - Posicionamento do extensômetro elétrico de resistência e do extensômetro de compensação, ambos ligados ao terminal de leitura direta de deformação.....	189
Figura 84 – Detalhe de uma das etapas de carregamento.....	190
Figura 85 - Esquema do posicionamento dos defletômetros na estrutura do reator.	191
Figura 86 - Deslocamento da parede 1 durante o carregamento.....	191

Figura 87 - Deslocamento da parede 3 durante o carregamento.....	191
Figura 88 - Deslocamento da parede 2 durante o carregamento.....	192
Figura 89 - Deslocamento da parede 4 durante o carregamento.....	192
Figura 90 - Deslocamento medido e teórico das paredes para o ultimo carregamento ..	193
Figura 91 – Acompanhamento da deformação da armadura durante carregamento	194
Figura 92 - Curva carga x deslocamento no protótipo a partir do ensaio com o modelo	196

LISTA DE TABELAS

TABELA 01- Agentes poluidores da água e seus efeitos sobre o meio ambiente	08
TABELA 02 - Eficiência de remoção de poluentes por etapa de tratamento	10
TABELA 03- Operações, processos e sistemas de tratamento para esgoto doméstico a nível secundário	11
TABELA 03 (continuação)- Operações, processos e sistemas de tratamento para esgoto doméstico a nível secundário	12
TABELA 04 - Reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico no Brasil	15
TABELA 05 – Recomendações de dimensionamento para o sistema separador de fases.....	24
TABELA 06 - Recomendações da área por ponto de alimentação de acordo com o tipo de lodo no reator UASB	27
TABELA 07 - Recomendações para a determinação do número de pontos de alimentação de um reator UASB, considerando diferentes temperaturas	27
TABELA 08- Composição química do cimento Portland.....	35
TABELA 09- Ácidos formando sais solúveis de cálcio.....	36
TABELA 10 - Classificação do ataque por sulfatos e diretrizes para prevenção	40
TABELA 11- Características das fôrmas em função do material:.....	61
TABELA 12- Resultado dos ensaios com agregado miúdo	66
TABELA 13- Características da composição agregado graúdo/ miúdo	68
TABELA 14- Resultado de ensaios de cimento fornecido pelos fabricantes.....	69
TABELA 15- Características de cada tipo de cimento	69
TABELA 16- Média das resistências à compressão com vários tipos de cimento	69
TABELA 17- Tempo de pega para pastas sem uso de superplastificante.....	70
TABELA 18- Tempo de pega para pastas com uso do SP - Sikament 300 (1%).....	70
TABELA 19- Parâmetros fixados para o estudo de dosagem	71
TABELA 20- Consistência, consumo de cimento, água e superplastificante para os diferentes traços e tipos de cimento utilizados para as argamassas.....	73

TABELA 21- Consistência, consumo de cimento, de água e de superplastificante para os diferentes traços e tipos de cimento utilizados para os concretos	73
TABELA 22- Dados técnicos sobre a câmara de cura térmica	75
TABELA 23- Resumo das resistências a compressão axial para as curas normal e térmica das argamassas	80
TABELA 24- Resumo das resistências à compressão axial para as curas normal e térmica dos concretos	81
TABELA 25- Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas em GPa	82
TABELA 26- Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos concretos (brita zero) em GPa	82
TABELA 27- A análise da porosidade total das argamassas e concretos aos 28 dias baseado no estudo de Powers	83
TABELA 28- Esforços solicitantes nas câmaras de coleta e distribuição do afluente.....	145
TABELA 29 - Dimensão máxima do agregado para cada elemento pré-moldado do reator	159
TABELA 30 - Parâmetros fixados para o concreto utilizado nas paredes pré moldadas	178
TABELA 31- Parâmetros fixados para a argamassa utilizada na estrutura interna do modelo do reator tipo UASB	183

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema construtivo para a execução de reatores anaeróbios conhecidos como reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), mais especificamente aqueles destinados a tratar o esgoto doméstico.

O sistema construtivo tem como objetivo a racionalização e a padronização desses reatores anaeróbios, levando-se em consideração, principalmente, a durabilidade e a grande demanda desse tipo de estrutura em obras de infra-estrutura urbana. Além disso, esta proposta, de grande simplicidade, apresenta-se como uma solução alternativa aos processos tradicionais de execução e aos materiais empregados nestes reatores (concretos que dão origem a estrutura de grande espessura e outros materiais como o aço e a fibra de vidro).

Assim, para a proposta construtiva, apresentam-se a descrição e os resultados do estudo dos concretos (agregados de $D_{\text{máx}} \leq 9,5\text{mm}$) e argamassas, em que se verificam as características de alto desempenho destes materiais (resistência e durabilidade) frente aos agentes agressivos oriundos do próprio processo anaeróbio e à esbeltez das peças pré-moldadas. Em seguida, determina-se o projeto estrutural do reator composto por elementos pré-moldados esbeltos (espessuras entre 26mm e 46mm), desenvolvido juntamente com o projeto hidráulico e idealizado com os materiais estudados. Por fim, avalia-se o comportamento da estrutura proposta através dos resultados obtidos nos ensaios com o modelo reduzido (escala três vezes menor que o protótipo), que apesar de não serem conclusivos, indicaram um comportamento satisfatório frente às solicitações submetidas, ao processo de execução das peças pré-moldadas e a montagem do reator.

ABSTRACT

This study presents the development of a constructive system for the execution of anaerobic reactors know as Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors (UASB), more specifically the ones destined for the treatment of domestic waste water.

The constructive system aims at the rationalization and the standardization of these anaerobic reactors, taking in to consideration, mainly, the durability and the great demand of this type of structure in urban infrastructure. Moreover, this proposal of great simplicity is presented as an alternative solution to the traditional processes of execution and to the materials used in these reactors (concretes that originate the structure of great thickness and other materials, such as steel and fiber glass).

Thus, for the constructive proposal, the it description and the results of the study of concretes (aggregates of $D_{\text{máx}} \leq 9,5\text{mm}$) and mortars are presented, analysing the features of high performance of these materials (resistance and durability) concerning the aggressive agents derived from the proper anaerobic process and from the slenderness of the precast elements. Next, the structural design of the reactor composed of thin precast elements is determined (thickness between 26mm and 46mm). Such reactor was developed together with the hydraulical design and idealized with the studied materials. Finally, the behavior of the proposed structure is evaluated through the results obtained in the experiments with the reduced model (it scales three times less than the prototype), that indicated a satisfactory behavior concerning the submitted requests, the process of precast execution and the assembly of the reactor.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a preocupação com o meio ambiente vem aumentando, e uma ampla discussão, abordando todos os fatores e elementos que o compõem, está sendo difundida para que se tenha uma melhor qualidade de vida.

De acordo com WARTCHOW (1996), os três fatores que determinam a qualidade de vida de uma população são: a maneira como esta se organiza dentro do espaço urbano (geralmente é acompanhada pela condição social dos habitantes), a infra-estrutura e os serviços oferecidos na cidade. Assim, pode-se dizer que, quanto maior a ocupação do solo urbano, maior será a necessidade de uma infra-estrutura de saneamento básico para atender e propiciar a esta população uma qualidade de vida melhor.

No Brasil, dentre os diversos tipos de poluentes que estão agredindo o meio ambiente está o esgoto doméstico, lançado em rios sem quaisquer critérios, afetando a qualidade da água em corpos receptores, além de propiciar a difusão de doenças, já que a água é um transporte eficiente para contaminações.

Existe, então, a necessidade de um saneamento básico adequado, com o recolhimento e tratamento do esgoto doméstico, de forma a garantir o bem estar não só da população, mas de todos os seres vivos.

É neste contexto que se insere o tratamento dos esgotos domésticos, havendo a necessidade da população compreender a finalidade deste investimento público, pois é o usuário que viabilizará, através de cobranças das tarifas de água e esgoto, o financiamento de um sistema de saneamento básico com tratamento de esgoto.

Desta forma, é observada a importância de atingir o próprio produtor do esgoto, provocando neste mudanças de paradigmas, desenvolvendo, num contexto maior, "*... a vontade que a população tem de ver realizado um empreendimento, compatibilizada com sua capacidade pagadora*"(WARTCHOW (1996)), buscando uma forma das soluções técnicas e culturais coexistirem.

Nas tentativas de equacionamento da problemática do esgoto doméstico, existem diversas soluções de caráter técnico-operacional, dentre as quais, está o reator anaeróbio tipo UASB, desenvolvido por Lettinga e seus colaboradores na década de 70.

Este tipo de tratamento, devido à sua simplicidade, vem sendo alvo de diversas pesquisas relativas a microbiologia e operação, apresentando atualmente, neste aspecto, vantagens e grande número de adeptos no Brasil, justificando sua escolha como objeto de estudo deste trabalho (capítulo 1).

Entretanto, no que se refere à estrutura do reator, um dos problemas enfrentados é a especificação dos materiais com os quais este é executado, visto que, o processo de digestão anaeróbia gera um ambiente (microclima) corrosivo, desencadeando efeitos deletérios sobre estas estruturas.

A literatura indica diversos tipos de materiais já utilizados em reatores anaeróbios como aço, latão e fibra de vidro. Porém, o concreto armado convencional, tem sido um dos mais adotados para este tipo de obra. Este fato ocorre pois, em relação ao concreto, os reatores executados com aço ou latão apresentam grande intensidade de corrosão, devido a presença de ácido carbônico e a eventual formação de ácido sulfúrico, oriundo do processo de digestão anaeróbia, vindo afetar diretamente a vida útil da estrutura. No caso da fibra de vidro, este material apresenta como desvantagem a limitação de dimensões do reator e o seu custo elevado em relação ao concreto.

Neste aspecto, em 1990, iniciou-se na Escola de Engenharia de São Carlos, um estudo mais amplo e interdepartamental, entre o Departamento de Hidráulica e Saneamento e Departamento de Arquitetura e Urbanismo (Laboratório de Construção Civil), visando a construção de um reator anaeróbio tipo UASB, onde o Laboratório de Construção Civil se encarregaria dos estudos de materiais alternativos para a construção dessa estrutura.

Em 1992, um grupo de trabalho, sob a coordenação do Prof. Dr. Jefferson B. L. Liborio, iniciou então, o desenvolvimento de um estudo de produção de argamassas e concretos estruturais (agregado graúdo com $D_{\max} \leq 9,5\text{mm}$), envolvendo desde a caracterização de cada material interveniente, até sua adequada confecção e cura, tudo isso visando, além de estudos de resistência mecânica, uma perfeita avaliação do ponto de vista de durabilidade " *A conservação de recursos materiais através da produção de materiais duráveis é, além de tudo, um passo ecológico. Também os usos dos concretos estão sendo estendidos a ambientes cada vez mais hostis*" (METHA & MONTEIRO (1994)).

No ano de 1996, foi possível a integração desse estudo (ainda em desenvolvimento, só que do ponto de vista microscópico) com outras técnicas e tecnologias, surgindo o objeto de pesquisa do presente trabalho, ou seja, a proposta de elaborar um sistema construtivo para reatores anaeróbios, tipo UASB, utilizados em tratamento de esgoto doméstico.

O sistema construtivo tem por objetivo se apresentar como uma solução alternativa aos processos tradicionais de execução (moldagem "in loco") e aos materiais normalmente empregados para esses reatores (fibra de vidro, aço e concreto convencional). Mais especificamente, consiste em propor a construção de um reator anaeróbio (UASB) com elementos pré- moldados de pequenas espessuras, utilizando- se concretos e argamassas de alto desempenho.

Levando-se em consideração que a digestão anaeróbia no interior do reator gera um ambiente agressivo e os pequenos cobrimentos em peças esbeltas de concreto ou argamassas podem comprometer a proteção da armadura, é necessário conciliar, da melhor maneira possível, as diversas variáveis envolvidas no ato de construir, possibilitando o uso do material correto, com as técnicas corretas, numa obra adequadamente projetada.

Assim, o desenvolvimento dessa proposta construtiva, apoia-se de forma abrangente no tripé : potencialidade do material, técnicas de projeto com o estudo de execução (tanto no aspecto estrutural quanto no aspecto hidráulico) e conciliação destes dois primeiros com o ato de construir, buscando obter uma estrutura durável.

Para a elaboração de tal trabalho, foi necessário o entrelaçamento de diversos temas correlacionados.

O trabalho se inicia com o estudo aprofundado de concretos e argamassas compatíveis com a execução de elementos esbeltos (até 60mm de espessura). O intuito é estudar diversos traços desses materiais e verificar quais os mais adequados, ou seja aqueles com características de alto desempenho (resistência e durabilidade) para serem empregados na estrutura do reator de acordo com o ambiente a que estará exposto.

Em seguida é feita a elaboração de um protótipo do reator, que envolve a integração dos projetos estrutural e hidráulico, bem como a definição dos elementos pré- moldados que irão compor a estrutura.

Por fim é executado um modelo do reator. com escala três vezes menor que o protótipo, no intuito de se avaliar aspectos relativos a execução, montagem e comportamento estrutural. Uma forma simplista para a abordagem destes temas, pode ser esquematizada como mostra a figura 1.

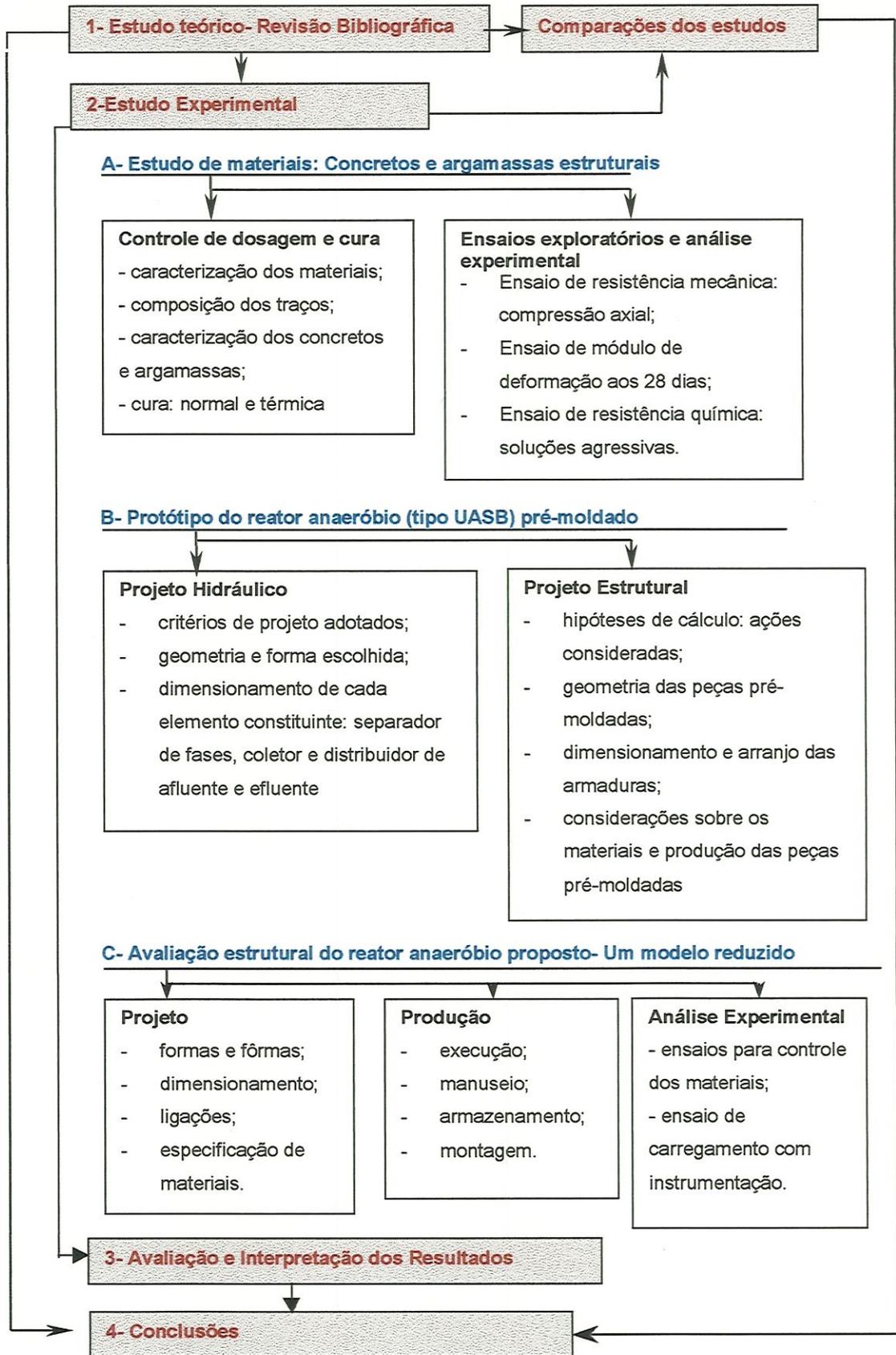


Figura 01- Esquema dos temas abordados na pesquisa e suas inter-relações

Em decorrência da situação exposta, o trabalho encontra-se subdividido em seis capítulos expostos da seguinte forma:

Capítulo 1: *A tecnologia dos reatores anaeróbios utilizados no tratamento de esgoto doméstico*

Inicialmente é feita, de forma genérica, uma avaliação da qualidade da água em corpos receptores, verificando como o esgoto doméstico vem contribuir para a sua degradação.

Faz-se uma abordagem dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico existentes e uma comparação genérica entre eles, para em seguida focalizar os reatores anaeróbios do tipo UASB, utilizados, no Brasil, para o tratamento de esgoto doméstico.

Finalizando, apresenta-se os fundamentos teóricos sobre o reator UASB envolvendo: definições, o seu funcionamento, as vantagens e cuidados com o sistema, os critérios para o seu dimensionamento e os materiais usualmente utilizados para a sua confecção (citando os agentes agressivos atuantes nesta estrutura). Este estudo é de fundamental importância para o desenvolvimento do projeto hidráulico e estrutural do reator proposto.

Capítulo 2- *Concretos e argamassas: Um enfoque para a durabilidade*

Para que se possa estudar os materiais mais adequados para a estrutura de um reator anaeróbio, é necessário discutir a durabilidade dos concretos e argamassas, levando em consideração: conceitos e definições sobre a durabilidade, os mecanismos físicos e químicos de deterioração dos concretos e argamassas, os fatores intrínsecos do material concreto e argamassa que interferem na velocidade de sua deterioração, o uso do CAD (Concreto de Alto Desempenho) como material utilizado na busca de estruturas duráveis e a aplicação do CAD em peças estruturais pré- moldadas.

Capítulo 3- *Estudo dos materiais a serem utilizados na estrutura do reator anaeróbio UASB*

Primeiramente, apresenta-se o estudo de materiais propriamente dito, visando conhecer e obter um concreto e uma argamassa que atendam as exigências de durabilidade, explicitadas no capítulo 2, considerando os aspectos mecânicos e as condições ambientais.

Em seguida, procura-se avaliar os possíveis efeitos deletérios que os agentes agressivos, oriundos do próprio processo anaeróbio, podem ocasionar aos concretos e às

argamassas de estudo. Esta avaliação será realizada com base na literatura, já que é muito difícil a avaliação do seu grau de agressividade ao concreto em laboratório.

Capítulo 4- Projeto da proposta construtiva para reatores anaeróbios do tipo UASB

A proposta construtiva envolve o projeto hidráulico e estrutural de um protótipo de reator anaeróbio tipo UASB. Para tais projetos, são abordados diversos temas, onde se procura sempre o embasamento em pesquisas e normalizações existentes.

Os projetos apresentados foram desenvolvidos simultaneamente, de forma a possibilitar uma integração entre materiais, estrutura e funcionamento hidráulico.

Capítulo 5- A utilização de um modelo reduzido para a avaliação do reator anaeróbio proposto.

Neste capítulo, são apresentados a execução e a instrumentação de um modelo reduzido (escala 1:3) do reator anaeróbio proposto.

Para tal, leva-se em consideração as condições básicas a serem observadas e utilizadas num modelo reduzido, de maneira que o processo de produção das peças pré-moldadas, seqüência de montagem e os resultados com ensaios sejam os mais próximos da realidade, permitindo que se possa avaliar a estrutura proposta de forma adequada.

Capítulo 6- Conclusões e prosseguimento da pesquisa

A interpretação dos resultados, principalmente aqueles apresentados nos capítulos 3 e 5, foram realizados comparando os resultados obtidos na duas análises experimentais, com estudos teóricos realizados no decorrer da pesquisa.

Assim, de acordo com os objetivos propostos, e com base nos resultados apresentados e discutidos anteriormente, foi possível tirar conclusões e fazer algumas considerações finais.

Neste capítulo são apresentadas, também algumas sugestões de prosseguimento da pesquisa realizada.

Referências bibliográficas

Apresenta-se, as referências bibliográficas que deram suporte a pesquisa e foram citadas no decorrer do trabalho.

CAPÍTULO 1- A tecnologia de reatores anaeróbios utilizados no tratamento de esgoto doméstico

Introdução

Para a discussão acerca da água residuária doméstica, é necessário, dentre outras coisas, situá-la num contexto nacional, verificando a forma como este resíduo está sendo disposto no meio ambiente, o seu impacto sobre a qualidade das águas em corpos receptores, os tipos de tratamento existentes e por fim focalizar o tratamento com o reator anaeróbio de fluxo ascendente com manta de lodo (UASB).

No enfoque do reator anaeróbio UASB, por ser este objeto maior de pesquisa, realiza-se um aprofundamento sobre o tema, levando em consideração: definições, funcionamento, suas vantagens e cuidados, os critérios de projeto e os materiais usualmente utilizados nesta estrutura.

1.1- Contexto geral do tratamento de águas residuárias domésticas no Brasil

1.1.1- A qualidade das águas em corpos receptores

A qualidade da água em corpos receptores (rios), é medida com base em parâmetros determinados em legislação ambiental.

Numa comparação entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento (pode o Brasil ser incluído), realizada por BECK *apud* VON SPERLING & CHERNICHARO (1996), verificou-se que nos países em desenvolvimento, a qualidade da água dos corpos receptores estão fora dos padrões ambientais estabelecidos na maior parte do tempo.

Esta situação é decorrente da disposição inadequada da água residuária oriunda do esgotamento pluvial, industrial, hospitalar e sanitário. Os principais efeitos dessa disposição,

sobre o meio ambiente, de acordo com as principais fontes poluentes, são apresentadas na tabela 1.

Tabela 01- Agentes poluidores da água e seus efeitos sobre o meio ambiente (Adaptado de VON SPERLING (1995))

POLUENTE	FONTE				EFEITO POLUIDOR
	ESGOTOS		DRENAGEM SUP.		
	Domésticos	Industriais	Urbana	Rural	
Sólidos em suspensão	muíto	variável	Médio	Pouco	- problemas estéticos - depósitos de lodo - adsorção de poluentes - proteção de patogênicos
Matéria orgânica biodegradável	muíto	variável	Médio	Pouco	- consumo de oxigênio - mortandade de peixes - condições séptica
Nutrientes	muíto	variável	Médio	Pouco	- crescimento excessivo de algas - toxicidade aos peixes(amônia) - doenças em recém nascidos(nitrato) - contaminação do lençol freático
Patogênicos	muíto	-	Médio	Pouco	- Doenças de veiculação hidrica
Matéria orgânica não biodegradável	-	variável	-	Médio	- toxicidade - espumas (detergentes) - redução de oxigênio - maus odores
Metais pesados	-	variável	-	-	- toxicidade - inibição de tratamento biológico - contaminação do lençol freático
Sólidos inorgânicos não dissolvidos	-	-	-	Pouco	- salinidade excessiva - toxicidade a plantas - problemas de permeabilidade do solo (sódio)

Dentre as águas residuárias citadas acima, existe de acordo com RIBEIRO (1996) uma atenção especial sobre o controle da poluição industrial, ficando principalmente os efluentes pluviais e sanitários negligenciados, devido até uma certa complacência do órgão ambiental para com a poluição provocada pelo lançamento “in natura” do esgotos domésticos e águas pluviais, já que não se tem registro de aplicação de penalidades, para o lançamento dessas águas diretamente nos cursos d'água.

De acordo com a tabela 01, a quantidade de poluentes gerados pelo esgoto doméstico é considerável, trazendo diversos efeitos nocivos ao Meio Ambiente.

No Brasil, VIEIRA (1994) apresenta um levantamento do número de municípios que fazem coleta e algum tipo de tratamento de esgoto doméstico, onde se constata que dos 4425 municípios pesquisados, 2091 (47,25%) possuem coleta de esgoto e destes 345 (16,5%) possuem algum tipo de tratamento, ou seja, dos 4425 municípios somente 7,8% tratam o esgoto.

Esta alarmante carência na área de tratamento deste tipo de esgoto no Brasil, dificilmente está relacionado com as soluções técnicas- operacionais, mas sim com a escassez de recursos aplicados na área de saneamento básico. Esta deficiência, vem refletir na seleção do sistema de tratamento de esgoto a ser implantado para uma comunidade, fazendo com que aspectos como custos, sustentabilidade e simplicidade tenham maior importância que aspectos relativos à eficiência, confiabilidade e impacto ambiental.

Apesar da falta de recursos no setor, muitas pesquisas vem mostrando que há caminhos alternativos que podem ser trilhados, de forma a agregar todas as características, acima citadas, utilizando, na medida do possível, processos mais naturais, menos mecanizados e mais econômicos de se implantar e operar, no intuito de se iniciar o processo de reversão desse déficit.

1.1.2- Níveis , processos e sistemas de tratamento utilizados em água residuária doméstica.

O tratamento de águas residuárias tem como objetivo a remoção de impurezas físicas, químicas, biológicas e organismos patogênicos, atingindo o efluente um determinado padrão de qualidade em função da legislação específica. Esse padrão de qualidade irá depender do nível e eficiência do tratamento. O tratamento de esgoto doméstico é classificado através dos seguintes níveis (FORESTI, 1996):

- tratamento preliminar: remove sólidos grosseiros e areia, utilizando gradeamento e caixas de areia respectivamente;
- tratamento primário: tem por objetivo remover materiais flutuantes e sólidos em suspensão sedimentáveis, podendo se utilizar flotores ou sedimentadores;
- tratamento secundário: esta é uma etapa biológica onde ocorre remoção de matéria orgânica através de reações realizadas por microrganismos podendo-se utilizar: lagoa de estabilização, lodos ativados, filtros biológicos, tratamento anaeróbio e disposição no solo.
- tratamento terciário : é utilizado após tratamento secundário, quando se deseja obter um grau elevado de redução de contaminantes no efluente, principalmente a redução de con-

centração de nitrogênio e fósforo. Neste caso, CARRASCO (1993) salienta que este tratamento é pouco empregado em países em desenvolvimento como é o Brasil.

A eficiência da remoção de poluentes, por etapa, varia de acordo com a tabela 02.

TABELA 02 - Eficiência de remoção de poluentes por etapa de tratamento (Fonte: GASI (1988))

Tipo de tratamento	Matéria Orgânica (%DBO rem)	Sólidos suspensos (%SS rem)	Nutrientes (%Nutrientes removido)	Bactérias (% remoção)
Preliminar	5-10	5-20	Não remove	10-20
Primário	25-50	40-70	Não remove	25-75
Secundário	80-95	65-95	Pode remover	70-99
Terciário	40-99	80-99	até 99	até 99,999

O esgoto doméstico é, segundo FORESTI (1996), uma água residuária classificada como predominantemente orgânica (vide tabela 01), ou seja, apresenta grande quantidade de matéria orgânica biodegradável em sua composição, indicando assim a importância de se ter conhecimento dos principais sistemas de tratamento a nível secundário (etapa biológica para remoção de matéria orgânica).

Os principais sistemas de tratamento utilizados para esgoto doméstico são apresentados na tabela 03.

TABELA 03- Operações, Processos e Sistemas de Tratamento para esgoto doméstico a nível secundário

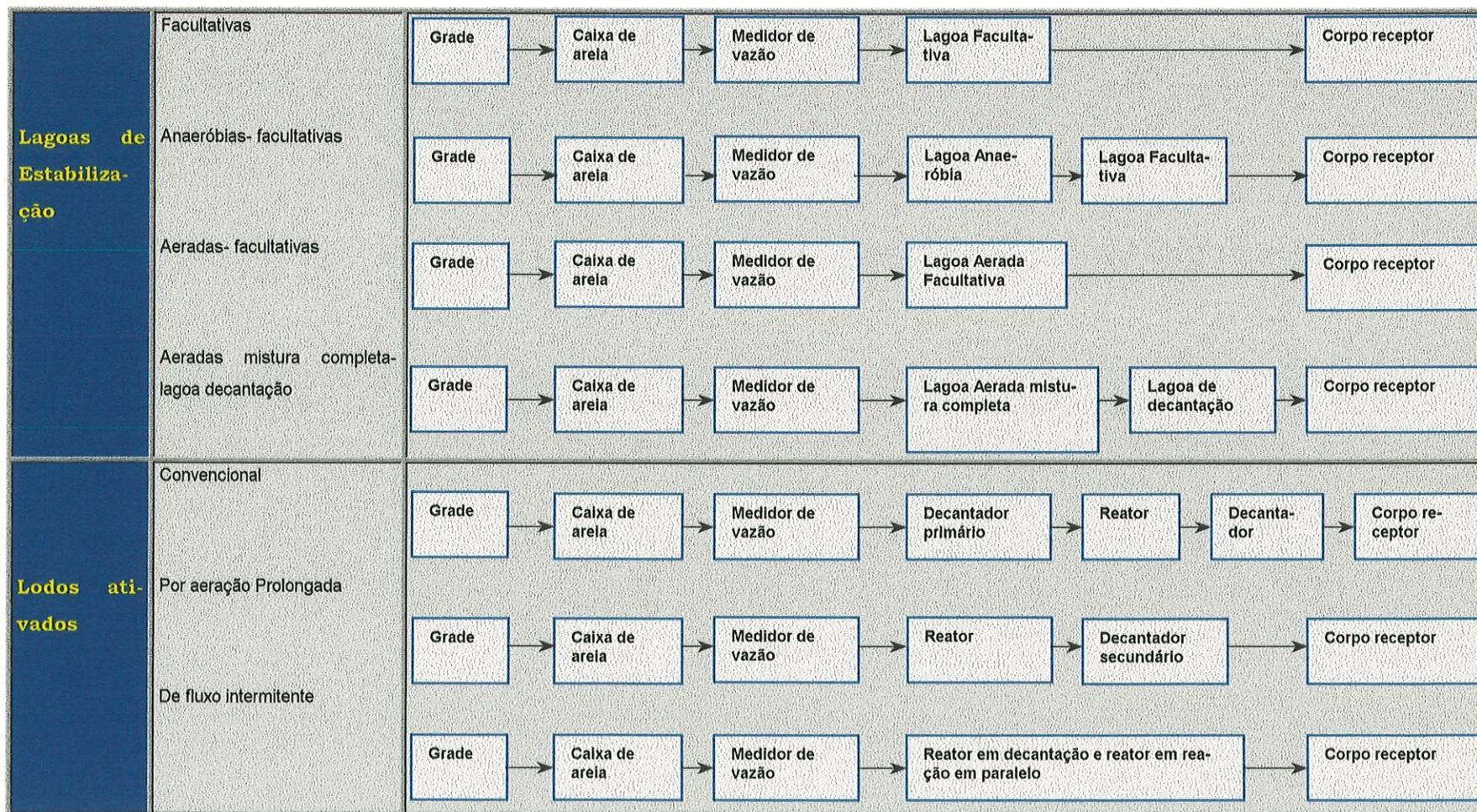


TABELA 03 (continuação)- Operações, processos e sistemas de tratamento para esgoto doméstico a nível secundário

Anaeróbios c/ Biofilme	Filtros de baixa carga e Filtros de alta carga	Grade → Caixa de areia → Medidor de vazão → Decantador primário → Filtro biológico → Decantador → Corpo receptor		
	Biodisco	Grade → Caixa de areia → Medidor de vazão → Decantador primário → Biodisco → Decantador → Corpo receptor		
Anaeróbios	Manta de lodo	Grade → Caixa de areia → Medidor de vazão → Reator Anaeróbio → Corpo receptor		
	Filtro Anaeróbio	Grade → Caixa de areia → Medidor de vazão → Fossa Séptica → Filtro Anaeróbio → Corpo receptor		
Disposição no solo	Infiltração lenta	<p>A água residuária é disposta sobre uma grande área de solo (aspersão)</p> <p>A água residuária é lançada sob o solo em pequenas áreas ("valas")</p> <p>A água residuária é lançada sob o solo uniformemente em grandes áreas</p> <p>A água residuária é lançada sobre uma superfície inclinada, escoando até local de infiltração rápida</p>	<p>Grade → Caixa de areia → Medidor de vazão → Decantador primário ou fossa séptica</p>	<p>Infiltração lenta ou Infiltração rápida ou Infiltração subsuperficial ou Escoamento superficial</p>
	Infiltração rápida			
	Infiltração subsuperficial:			
	Escoamento superficial			

Através de diagramas (figura 02), VON SPERLING (1995), apresenta uma comparação entre os sistemas de tratamento apresentados na tabela 03, condensando os processos de um mesmo sistema numa mesma barra, sem levar em consideração as especificidade de cada processo.

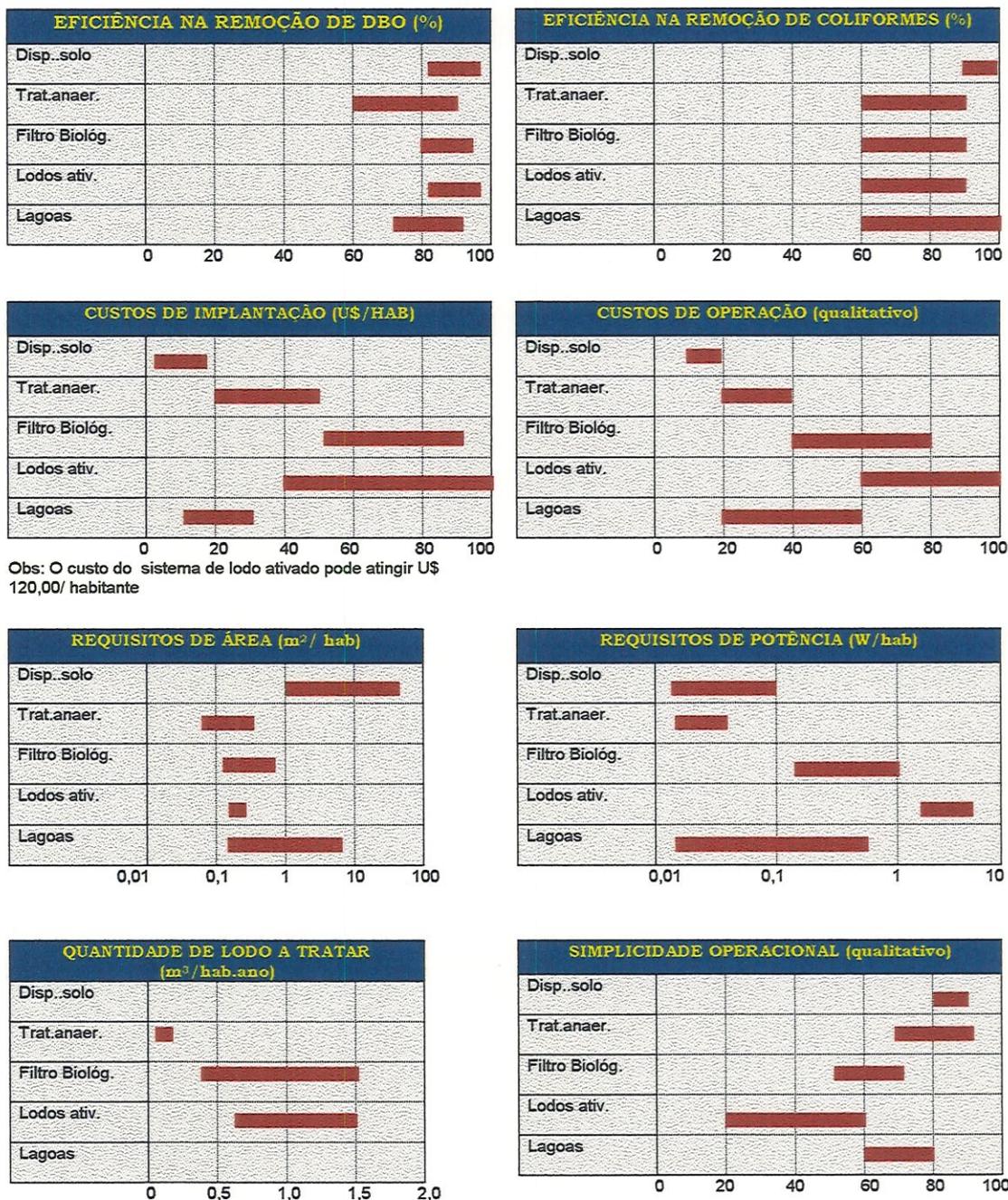


Figura 02-Comparação entre os principais sistemas de tratamento (Adaptado de VON SPERLING (1995))

A figura 02, apresenta uma visão geral dos diversos tipos de sistemas para tratamento de esgoto, onde a escolha do processo a ser adotado irá depender, basicamente, dos critérios técnicos e econômicos, sempre integrados à realidade em foco, não havendo fórmulas para tal escolha, somente o bom senso ao se atribuir a importância relativa de cada aspecto técnico.

Entretanto, os reatores anaeróbios apresentam características técnicas, econômicas e até de simplicidade, que comparados com outros sistemas (figura 02) chamam atenção, quando se tem em mente a sua utilização principalmente em centros urbanos. As vantagens apresentadas por este sistema são apresentadas no item 1.2.3.

1.1.3 Os reatores anaeróbios tratando o esgoto doméstico no Brasil

Os tanques anaeróbios, foram desenvolvidos e são utilizados há muitos anos para o tratamento de esgoto doméstico, sendo os primeiros, segundo VIEIRA (1994), datando de 1881. Estes primeiros reatores, chamados convencionais, são: os tanques sépticos, os filtros anaeróbios, os tanques Imhoff, as lagoas anaeróbias e os biodigestores.

A partir da década de 70, a utilização dos reatores anaeróbios apresentaram um grande avanço diminuindo consideravelmente o volume dos tanques, comparativamente àqueles citados. Dentre esses novos reatores não convencionais, CAMPOS (199) cita o reator anaeróbio de contato, o filtro anaeróbio, o reator de manta de lodo (UASB) e o reator de leito expandido.

Neste aspecto, VIEIRA (1994) apresenta um levantamento do número de reatores anaeróbios (não convencionais), tratando especificamente o esgoto doméstico no Brasil até julho de 1994, onde verificou a total predominância dos reatores tipo UASB. A unanimidade para o uso deste sistema, ocorre devido ao funcionamento deste tipo de tratamento, que tem se mostrado bastante apropriado às nossas condições (item 1.2.2).

No Brasil, a quantidade de reatores anaeróbios, todos do tipo UASB, tratando esgoto doméstico é dado na tabela 04.

TABELA 04 : Reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico no Brasil

Estado	n. de reatores tipo
	UASB
Paraná	186
São Paulo	7
Rio Grande do Sul	3
Rio de Janeiro	2
Paraíba	1
Minas Gerais	1
Total	200

Obs: O Paraná, apresentava até julho de 1994, 118 projetos em andamento através do SANE-PAR (Compania de Saneamento do Paraná)

A quantidade de reatores instalados ainda é muito pequeno, face às necessidades de tratamento de esgoto no país. Porém, o número de reatores anaeróbios tipo UASB, instalados é um forte indicativo da potencialidade de utilização desse tipo de sistema de tratamento específico.

1.2- Fundamentos teóricos sobre reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB)

1.2.1 Algumas definições

Esse tipo de reator anaeróbio especificamente, na sua versão mais aperfeiçoada foi desenvolvido pela equipe do Prof. Gatze Lettinga, na Universidade de Wageningen (Holanda), na década de setenta, sendo denominados reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors).

No Brasil existem diversas denominações para este tipo de estrutura, que são:

- DAFA- Digestor Anaeróbio de Fluxo Ascendente;
- RAFA- Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente;
- RAFAALL- Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente Através de Leito de Lodo.

Essa diversidade de denominações, torna confusa a ideal terminologia a ser utilizada. Portanto, é mantido para este sistema de tratamento a nomenclatura original dada por Lettinga e seus colaboradores: Reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors).

1.2.2 Funcionamento de um reator UASB

A concepção do reator anaeróbio tipo UASB, baseia-se no princípio de fluxo ascendente, pelo qual a água residuária é introduzida pelo fundo do reator, atravessa um leito de biomassa ativa com uma manta de lodo, e é descartada após passar através de um sistema de placas defletoras, colocadas no topo do reator, para a separação das fases líquida, sólida e gasosa (ARAIN E, 1982).

Um desenho esquemático (figura 03) é mostrado, com os dispositivos de separação das fases e a rede de fluxo de entrada típica do reator UASB.

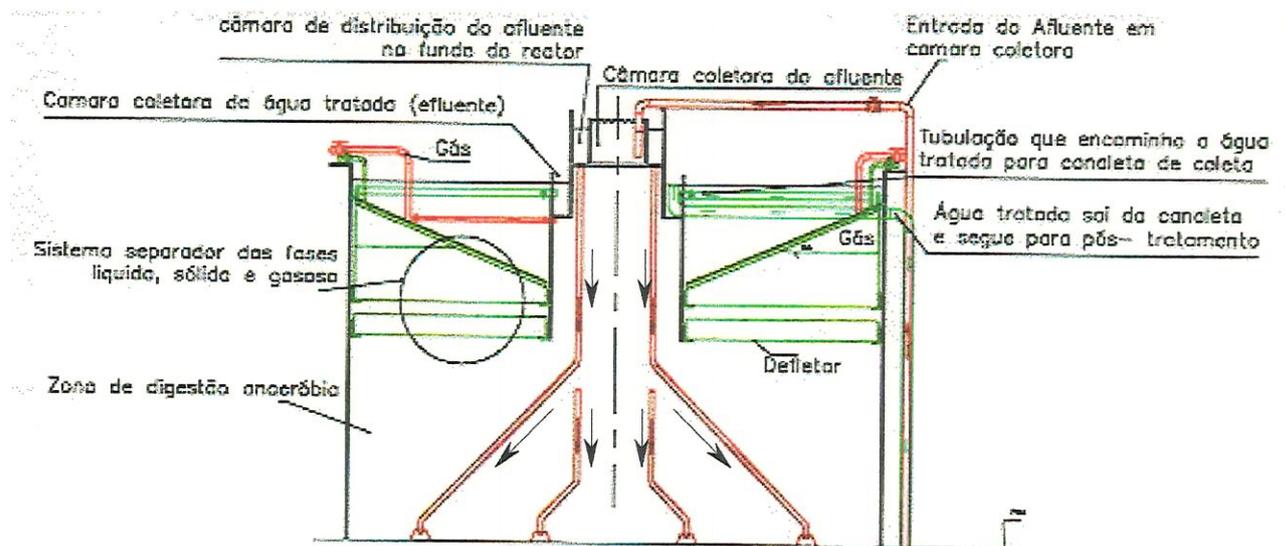


Figura 03- Esquema geral do funcionamento de um reator anaeróbio tipo UASB (Adaptado do projeto hidráulico apresentado no capítulo 4)

Conforme desenho esquemático, temos de forma sucinta que:

- a água residuária entra pelo fundo do reator através de uma série de tubos que parte da câmara de distribuição;
- em contato com o leito de lodo (zona de digestão anaeróbia), onde estão os microrganismos acetogênicos, metanogênicos e fermentativos; a água residuária passa a sofrer degradação dos seus componentes biodegradáveis que são convertidos em biogás (principalmente metano e dióxido de carbono), água, gás sulfídrico e amônia;
- flocos de lodo são levados pelas bolhas de gás em fluxo ascendente através do digestor, para a interface líquido-atmosfera. O gás é desprendido ao encontrar a interface líquido-atmosfera, ficando aprisionado nas placas defletoras de decantação (separador de fases), e

o lodo retorna à região de digestão do reator. O fluxo em movimento descendente do lodo, opera em contra corrente ao fluxo hidráulico dentro do digestor , promovendo o processo de mistura necessária para um contato eficiente entre as bactérias (fixadas no lodo) e a água residuária afluyente;

- a fração líquida (água tratada) do substrato continua em fluxo ascendente através do decantador extravasando por tubos ou vertedores , e deixa o reator através de calhas coletoras ou de tubulações. O ideal é que a água tratada passe por um pós tratamento.

O biogás produzido pelo lodo anaeróbio é suficiente para provocar uma mistura entre a matéria orgânica afluyente e os microrganismos presentes no reator. Assim, a mistura forçada (mecânica) normalmente não é necessária, sendo inclusive indesejada devido efeito negativo na sedimentação da biomassa anaeróbia. Por outro lado porém, torna-se indispensável um sistema bem dimensionado de distribuição sobre o fundo do reator.

1.2.3- Vantagens e cuidados com o reator UASB

Comparando com o método aeróbio convencional (necessita de aeração para que os organismos aeróbios sobrevivam e degradem a matéria orgânica), pois outros métodos não são muito utilizados para a infra estrutura urbana, o tratamento anaeróbio oferece as seguintes vantagens (LETTINGA et al- 1996):

- ao invés de consumir energia, usualmente é produzida energia em forma de biogás;
- o espaço necessário para aplicar esse sistema de tratamento é relativamente pequeno;
- o volume de lodo produzido, devido à reprodução dos microrganismos, é geralmente baixo. Este lodo, sai estabilizado do sistema(não precisa de tratamento) e apresenta características gerais adequadas até para reaproveitamento em outros sistemas;
- os organismos anaeróbios podem ser preservados por um longo período de tempo, sem qualquer comprometimento de suas atividades;
- o tratamento anaeróbio pode ser combinado com tratamento posterior, para a remoção de nutrientes, recuperando- se totalmente a água.

As possibilidades de sérios prejuízos antes enfrentados, podem ser controladas e até desaparecerem (LETTINGA et al, (1996))como:

- os organismos metanogênicos e acetogênicos, responsáveis pela degradação da matéria orgânica existentes nas águas residuárias, eram susceptíveis a compostos tóxicos, e atualmente é cada vez mais conhecida a extensão de toxicidade através de estudos, e as soluções estão assim, sendo obtidas;
- a “partida”(funcionamento do ponto de vista biológico) para este tipo de tratamento era lenta, mas hoje pode ser feita dentro de poucos dias, utilizando “cultura” de lodo de reatores já existentes;
- os problemas de mal odor, podem ser prevenidos com métodos físico-químicos.

Para que o processo apresente resultados satisfatórios, deve-se levar em consideração alguns *requisitos ambientais* e um *dimensionamento adequado* das estruturas constituintes.

Os requisitos ambientais, para o bom desempenho das bactérias, descritas por CHERNICHARO (1996), são as quantidades de nutrientes (nitrogênio, fósforo, enxofre e micronutrientes) necessários para suprir as necessidades mínimas das bactérias e a temperatura que afeta o crescimento microbiano (recomendado

Os esgotos sanitários, geralmente, apresentam todos os tipos apropriados de nutrientes (sem limitações para o processo anaeróbio) e a temperatura recomendada para o crescimento microbiano adequado deve estar entre 25°C a 35°C, valores que se enquadram na maioria das regiões brasileiras (CHERNICHARO, 1996).

A seguir, apresentam-se os critérios de dimensionamento para o reator UASB, para que se possa na proposta construtiva, levar em consideração todos os aspectos intervenientes, para o funcionamento adequado dessa estrutura.

1.3.-Critérios básicos de dimensionamento para reatores anaeróbios UASB.

Os critérios de dimensionamento, são de grande importância para o desenvolvimento de o projeto de reator anaeróbio tipo UASB, pois de acordo com VON SPERLING (1996), apesar desse tipo de reator ter grande numero de seguidores, nos últimos anos tem ocorrido o surgimento de projetos com graves erros conceituais.

Assim, busca-se para a estrutura pré- moldada proposta, o apoio conceitual para que se possa evitar problemas de funcionamento e operação.

Os parâmetros utilizados no dimensionamento de unidades de tratamento, geralmente, são obtidos empiricamente, através de pesquisas experimentais em escala de laboratório, pi-

loto ou protótipo, ou através da experiência acumulada com a operação de unidades em escala natural (FORESTI, 1996).

Partindo dessas experiências, diversos autores discutem e apresentam critérios de projetos utilizados no dimensionamento de reatores anaeróbios UASB.

1.3.1 Critérios para determinar as características geométricas do reator

Para a determinação da *forma do reator*, o parâmetro principal utilizado é a carga hidráulica ou a carga orgânica. Se o resíduo a ser tratado possui uma DQO (demanda química de oxigênio) menor que 1000 mg/l, então o projeto da unidade de tratamento é fixado pela carga hidráulica, caso contrário o projeto impõe carga orgânica volumétrica (NOYOLA, 1994).

No caso de esgoto municipal, VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) esclarecem que, como são águas relativamente diluídas, a determinação da *forma do reator* irá depender da carga hidráulica.

Assim, o tempo médio de detenção hidráulica (TDH), é utilizado para determinar, mais especificamente, o volume e a altura. Conceitualmente, o TDH representa o tempo médio de permanência das moléculas de água em uma unidade de tratamento alimentada continuamente (FORESTI, 1996).

Diversos autores estimam o TDH de acordo com a temperatura da região em que a unidade vai operar. Para regiões tropicais e subtropicais, onde o Brasil pode ser inserido, os valores recomendados são:

- VAN HAANDEL & LETTINGA (1994): o TDH é de 6 horas;
- WILDSCHUT (1989 a) *apud* CARRASCO (1993) para temperatura entre 20 e 23°C o TDH é 12 horas; para temperatura entre 23 e 26°C o TDH é 8 horas e para temperatura maior que 26°C o TDH considerado é de 6 horas;
- NOYOLA (1994) cita genericamente que o TDH varia de 6 a 12 horas.

1.3.1.1- Volume do reator

Com o tempo de detenção hidráulica (TDH), é possível estabelecer o volume do reator que se deseja dimensionar, utilizando a equação 1.1:

$$V_r = TDH \cdot Q \quad (1.1)$$

Onde;

Q- vazão média do afluente;

V_r- volume do reator.

Existem divergências, entre alguns autores, quanto ao volume máximo de um reator para que ele opere adequadamente como:

- VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), recomenda que se o volume for maior que 1000m³, é conveniente construir mais de um reator para melhorar a flexibilidade operacional do sistema de tratamento (manutenção e reparos), distribuição do lodo e do afluente. Os reatores podem ser construídos à medida que a demanda para tratamento se desenvolve;
- WILDSCHUT (1989) *apud* CARRASCO (1993) cita que, por razões de flexibilidade na operação, deve-se construir no mínimo duas unidades de tratamento, não sendo recomendado que o volume de cada uma ultrapasse 500 m³;
- SOUZA (1984) considera que o reator UASB deve ter um volume máximo de 1000 a 1500m³.
- NOYOLA (1994) recomenda modular a partir de 400m³, pois este volume oferece algumas vantagens sobre a aplicação de um só reator como a facilidade de partida, de limpeza e reparação dos módulos em separado(evitando parada total do reator).

1.3.1.2- Altura do reator

A altura do reator, implica na eficiência da remoção de material orgânico, pois determina a velocidade ascendente da fase líquida no reator. Este controle da velocidade ascensional afeta a interação entre o lodo e a água residuária e, conseqüentemente, o desempenho do reator. Se por exemplo a velocidade de ascensão é "muito alta", partículas sólidas de lodo podem ser arrastadas, ocasionando sérios problemas de desempenho (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

A velocidade ascendente para águas residuárias diluídas, como é o esgoto doméstico, é em média 1m/h. Neste aspecto, NOYOLA(1994) cita que os reatores UASB com *lodo granular*, podem suportar em média 3m/h. VON SPERLING (1996), afirma que para velocidade

des maiores que 5m/h (vazão média) e 10 m/h (vazão máxima), pode ocorrer significativo carreamento dos sólidos para o compartimento de decantação.

O tempo de detenção hidráulica (TDH) juntamente com a velocidade ascensional, são utilizados para projeto, acabando por determinar a altura do reator de acordo com a equação 1.2 :

$$h = (Q/A) \cdot TDH \Rightarrow h = V_a \cdot TDH \quad (1.2)$$

onde: V_a - velocidade ascendente (m/h);

A- área superficial do reator (m^2);

h- altura do reator (m);

Q- vazão média de projeto (m^3/h);

Por razões econômicas, alguns autores apresentam limitações para a altura do reator como:

- NOYOLA (1994) recomenda que a altura varie de 3 a 5m, para tratamento de águas residuárias diluídas semelhantes às domésticas. No entanto, em caso da DQO (demanda química de oxigênio) se encontrar entre 1000 e 5000 mg/l, recomenda-se uma altura de reator de 5 a 6m. Águas mais concentradas em DQO produzirão uma importante quantidade de gás, devendo então reduzir a altura do reator para menos de 5m, com o objetivo de se evitar problemas de retenção de sólidos suspensos;
- CHERNICHARO (1995) recomenda alturas úteis de 4m a 5m onde a altura do compartimento de decantação varie de 1,5 a 2,0 m e a altura do compartimento de digestão varie de 2,5 a 3,5m.

Verifica-se, então, que a velocidade de ascensão do líquido irá depender do tempo de detenção hidráulico, já que a altura pode ser adotada a partir dos dados citados acima.

1.3.1.3- Forma do reator

Com o volume e a altura determinados, é possível estabelecer uma forma geométrica para o reator. As formas geométricas atualmente utilizadas, são basicamente circular ou retangular. Cada uma delas tem suas vantagens e desvantagens como apresenta VAN HAANDEL & LETTINGA (1994):

- circular: esta forma apresenta maior estabilidade estrutural, porém é difícil a construção do separador de fases (item 1.3.2.1) se comparado com o separador de fases para o reator retangular;
- retangular: o separador de fases é mais fácil de construir, se comparado com o circular maior dificuldade de se ter uma unidade monolítica.

Observa-se que ambas as formas podem ser utilizadas com sucesso, mas não é adequado fazer um reator circular e um separador de fases retangular, já que a área do decantador é importante para seu bom desempenho.

1.3.2. Critérios para o dimensionamento de cada parte constituinte do reator

Após dada as características geométricas gerais do reator, são apresentadas outras estruturas e sistemas que um reator anaeróbio UASB deve conter, sendo eles: sistema separador de fases, sistema de coleta e distribuição de águas residuárias (afluente), sistema de coleta da água tratada (efluente) e sistemas periféricos.

1.3.2.1 Sistema separador de fases-(gás- sólido e líquido)

Através da própria descrição do funcionamento de um reator UASB, verifica-se que o sistema separador de fases é o dispositivo mais importante e característico de um reator UASB, pois tem como objetivos separar *fisicamente* (calhas e defletores em forma triangular) o líquido, o gás e o sólido. Assim, é necessário que todos os parâmetros que envolvem seu adequado dimensionamento sejam abordados

Os elementos principais para o projeto do separador de fases, segundo Van HAANDEL & LETTINGA (1994) são:

- a velocidade ascensional do líquido entre as aberturas dos elementos separadores que é máxima (V_{ab}) e a velocidade ascensional do líquido no nível de descarga do efluente (V_{de}). Estas velocidades são encontradas a partir das equações 1.3 e 1.4:

$$V_{ab} = Q_a / A_{ab} = v_1(A/A_{ab}) \quad (1.3)$$

$$V_{de} = Q_a / A_{de} = v_1(A/A_{de}) \quad (1.4)$$

Onde;

A- Área do reator UASB;

Aab- área das aberturas entre os volumes do separador;

Ade- área disponível no nível de descarga do efluente;

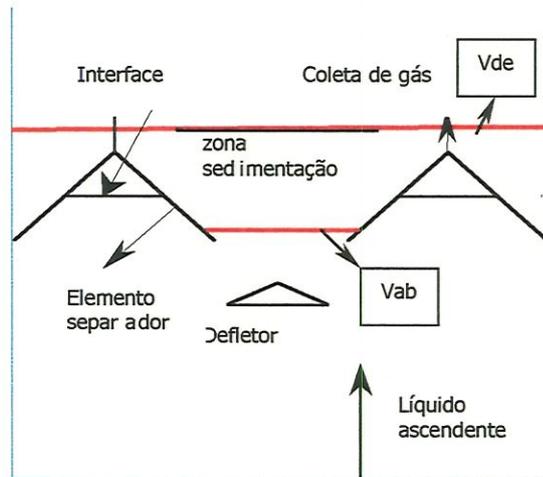


Figura 04- Pontos de velocidades máxima e mínima do líquido ascendente no interior do reator

De acordo com a figura 04, VAN HAANDEL & LETTINGA (1994) explicam que, os flocos com velocidade de sedimentação menor que V_{ab} , entrarão na zona de sedimentação. Dentro dessa zona, os flocos com velocidade de sedimentação maior que V_{de} podem ser retidos pois se acumularão no separador, até formar uma massa suficiente para vencer a fricção e deslizarão para a zona de digestão abaixo do separador de fases. Os flocos com velocidade de sedimentação menor que V_{de} mínimo sairão junto com o efluente, a não ser que estas partículas floculem ou haja adsorção na zona de sedimentação.

- a posição do separador de fases, relativa ao nível da superfície líquida no reator, pois esta determina a proporção entre volume de zona de digestão e o volume da zona de sedimentação. Em reatores UASB a zona de sedimentação tem volume de 15 a 20% do volume total;
- a inclinação dos elementos do separador, responsável por determinar a altura dos elementos de separação e portanto a quantidade de material de construção necessário. A inclinação dos elementos, na prática é apresentado por diversos autores na tabela 5;
- o nível do gás abaixo do separador de fases, pois este determina a área da interface líquido/ gás e, portanto, a taxa de abstração do gás nesta interface. No caso de águas residuárias diluídas como o esgoto doméstico, esta taxa de abstração geralmente é baixa ($< 1-3 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), podendo então formar uma camada flutuante na interface que com o tempo

se torna grossa e dura e acabará dificultando o desprendimento do biogás. Assim, NOYOLA (1994) acrescenta que se deve prever instalações especiais para a retirada dessa nata.

Diferentes autores como VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), HULSHOFF(1989)*apud* CARRASCO (1993), WILDSHUT (1989), SOUZA (1986) e NOYOLA (1994)), apresentam as principais recomendações de projeto do dispositivo de separação de fases, para um adequado escoamento do efluente e retorno do lodo. As recomendações são feitas baseadas principalmente nas velocidades acima apresentadas e encontradas na prática, sendo as principais delas apresentadas na tabela 05:

TABELA 05 - Recomendações de dimensionamento para o sistema separador de fases

Características do separador de fases	LETTINGA	SOUZA	WILDSHUT	NOYOLA
Declividade das paredes do sedimentador	45- 60°	50°	45-60°	45-60°
Carga superficial no sedimentador (m/h)	0,7	1,0	0,8- 1,5	1,0
altura do dispositivo (m)	1,5- 2,0	1,5	1,0- 1,5	1,5- 2,0
Traspasse p/ placas defletoras (cm)	10- 20	20	m'n 10	mín 20

Os tipos mais utilizados de separadores de fases, apresentados por Van HAANDEL & LETTINGA (1994) são:

- separadores de fases submerso: Neste caso, é necessário que se crie uma pressão maior que a pressão atmosférica através de um selo hidráulico externo, para manter a interface líquido e gás num nível desejado.
- separador com biogás sob pressão atmosférica: Neste caso, o topo do separador se situa acima da superfície da água, portanto a interface líquido e gás se forma automaticamente, sem a necessidade de se utilizar um selo hidráulico.
- separador de fases híbrido: Este separador elimina as desvantagens que podem ocorrer nos dois tipos de separadores anteriores, através da introdução de uma abertura abaixo do nível normal da interface líquido e gás.

Os três tipos de separadores de fases, suas vantagens e desvantagens estão na figura 05.

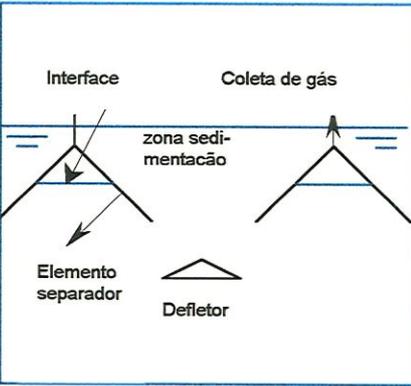
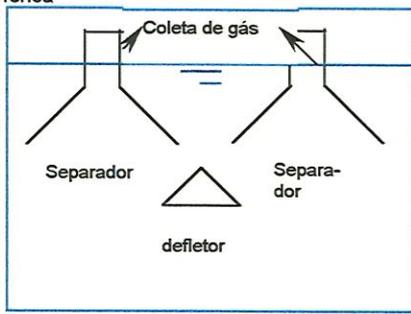
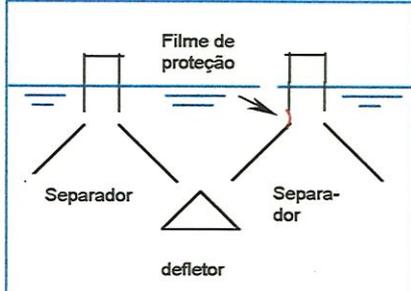
Tipos de separador de fases	Vantagens	Desvantagens
<p>Separador de fases submerso</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - toda a área superficial do reator fica disponível para decantação, tendo uma velocidade ascensional mínima e eficiência de retenção de sólidos é máxima - o biogás será pressurizado automaticamente e facilmente pode ser transportado para o seu lugar de utilização - vazamentos de gás podem ser detectados facilmente; - se o gás é queimado num flare, então o selo externo forma um dispositivo de segurança contra possíveis explosões na câmara de gás abaixo do separador. 	<ul style="list-style-type: none"> - problemas hidráulicos quando houver entupimento na tubulação p/ remover o biogás coletado.
<p>Separador com biogás sob pressão atmosférica</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - não necessita de selo hidráulico; - o separador se torna mais acessível para inspeção e manutenção 	<ul style="list-style-type: none"> - problemas hidráulicos quando houver entupimento na tubulação p/ remover o biogás coletado
<p>Separador de fases híbrido com abertura para manutenção</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - fácil acesso à interface líquido-gás - calha não precisa ser fixada ao reator - facilidade de limpeza da calha 	<ul style="list-style-type: none"> - grande turbulência causada pelo biogás acima e abaixo da calha separadora, tornando menos eficiente a retenção de sólido, necessitando então de filme plástico, que é pouco durável

Figura 05- Tipos de separadores de fases

1.3.2.2. Sistema de distribuição de águas residuárias (afluente)

Os esgotos sanitários, são caracterizados por apresentarem grandes flutuações de vazão. BUTLER et al (1995) *apud* OLIVA (1997), relatam em seus estudos de estimativa de vazão, que o tempo dos picos de vazão dos esgotos são, em geral, distintos e maiores que as vazões consideradas nos projetos de estações de tratamento de esgoto. Entretanto, OLIVA (1997), avaliando um reator UASB durante quatorze meses, verificou que apesar das variações de vazão, não há significativas respostas negativas de desempenho, recomendando que se utilize alguma forma de amortizar os picos de vazão do esgoto.

Este controle da vazão é importante, principalmente porque em reatores anaeróbios, tipo UASB, a distribuição do afluentes sobre o fundo está intimamente relacionado com o seu desempenho, determinando: um maior ou menor contato entre o lodo e a água residuária, a formação de caminhos preferenciais e a formação de zonas mortas (NOYOLA, 1994).

O sistema de distribuição do afluente deve ser tal que: a vazão para cada ponto de descarga é a fração certa da vazão total, os eventuais entupimentos no dispositivo de entrada do afluente sejam facilmente detectáveis e os obstáculos que causam entupimentos possam ser removidos (Van HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Os sistemas de distribuição de afluente, sobre o fundo do reator mais utilizados são o circular e o retangular. Um exemplo destes dois tipos de sistema é apresentado na figura 06.

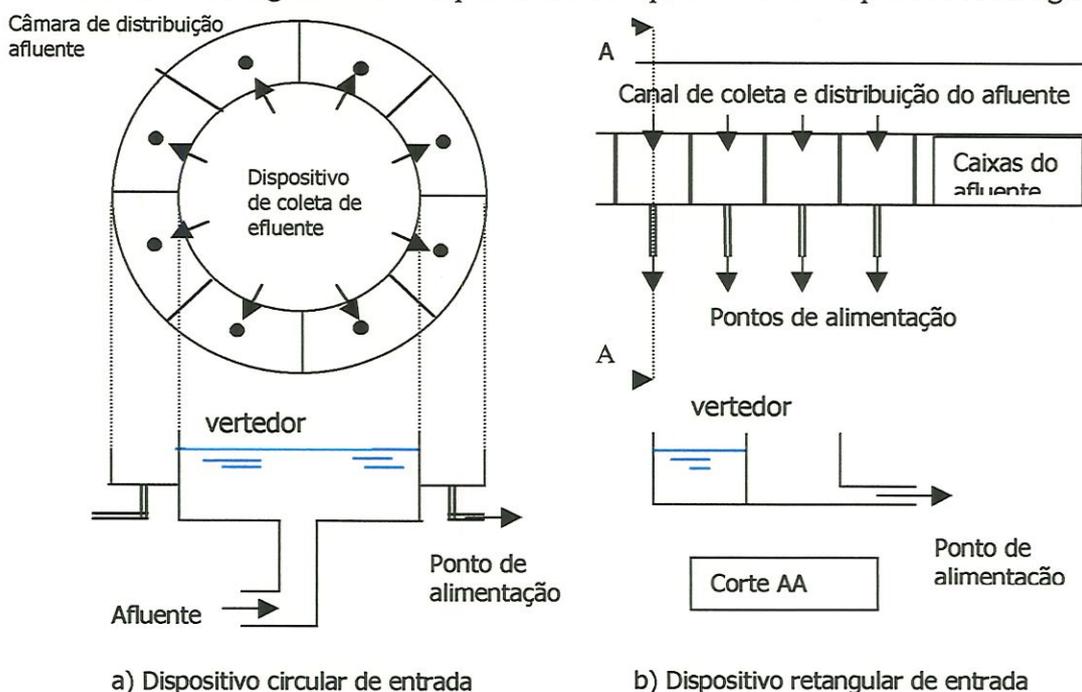


Figura 06 - Sistema de distribuição do afluente circular ou retangular

Em ambos os casos, apresentados na figura 06, o afluente chega até um poço ou canal de distribuição, passando em seguida por vertedores triangulares, que encaminham esta água para compartimentos com pontos de alimentação (tubos) destinados a descarregar o afluente sobre o fundo do reator. VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), salientam que, se a diferença de nível entre o compartimento de distribuição e a água no UASB for pequeno (menor que 10 cm), haverá entupimentos freqüentes, mas se este desnível for maior que 30 cm o entupimento será muito raro.

Existem algumas recomendações dadas por LETTINGA et al (1984) *apud* CARRASCO (1993), para a determinação do número de pontos de alimentação em um reator UASB, em função do tipo de lodo, dividindo a vazão uniformemente por ponto (tabela 06).

TABELA 06 - Recomendações da área por ponto de alimentação de acordo com o tipo de lodo no reator UASB

Tipo de lodo	Área (m²) por ponto
lodo floculento denso (> 40Kg.SD/ m ³)	1 m ² :p/ cargas < 1-2 KgDQO/m ³ dia
lodo floculento fino(< 40Kg.SD/ m ³)	5 m ² :p/ cargas > 3 KgDQO/m ³ dia
lodo granular denso	1 m ² :p/ cargas de 1-2 KgDQO/m ³ dia

Além do tipo de lodo, a temperatura também influencia no número de pontos de alimentação em um reator UASB, WILSHUT (1989) *apud* CARRASCO (1993) apresenta as algumas recomendações em função da temperatura (tabela 07).

TABELA 07 - Recomendações para a determinação do número de pontos de alimentação de um reator UASB, considerando diferentes temperaturas

Temperatura (° C)	No de entradas/m²
20	1
20-24	0,5- 1
>24	0,3

1.3.2.3 Dispositivo de coleta do efluente

O dispositivo de coleta do efluente tem por objetivo coletar uniformemente a água residual tratada e está situado na parte superior do reator UASB. Para os reatores anaeróbios,

esse dispositivo são, geralmente, calhas horizontais com vertedores triangulares a distâncias regulares. De acordo com CARRASCO(1993), normalmente essas calhas apresentam retentores de espuma para evitar que esta saia no efluente. No entanto, um problema freqüente desse dispositivo é que parte da calha fica bloqueada devido aos sólidos flutuantes, mesmo na presença de retentores de espuma, não havendo assim mais uma coleta uniforme do efluente. Por isso, recomenda-se que a lâmina d'água nos vertedores não seja inferior a 25mm.

Outro tipo de dispositivo de coleta do efluente utilizado para reatores, se compõe de um número de tubos de PVC que descarregam subsuperficialmente em um canal do efluente, que pode ser limpo periodicamente VAN HAANDEL & LETTINGA (1994).

1.3.3. Estruturas periféricas

Para um funcionamento ótimo de um reator serão necessários dispositivos especiais e componentes adicionais que são (WILDSHUT, 1989 *apud* CARRASCO, 1993):

- pontos de amostragem de lodo a diferentes profundidades: usados para avaliar o desempenho do reator UASB, do ponto de vista de operação;
- dispositivos de descarga de lodo: em geral a descarga de lodo tenderá a ter uma rotina pré-estabelecida no sentido de que a intervalos regulares (ex: semanais) haja descarga de um determinado volume de lodo (ex: 20%), para isso deve ter um dispositivo de descarga;
- estrutura de entrada: serve para controlar o escoamento no sistema, limitando a vazão máxima de projeto;
- “by-pass”: permite separar o sistema para propósitos de manutenção;
- grades: empregadas na remoção de matéria de maior tamanho, que pode provocar danos ou obstruções no sistema;
- bombas: se necessário a utilização dessas, permite elevar a água residuária até o sistema de tratamento ou levar o efluente até local de destino;
- caixa de areia: empregada para retirada de matéria sólida inorgânica que poderia se acumular no interior do reator UASB provocando sérios problemas;
- pós tratamento: quando as regulamentações de qualidade são estritas, pode-se requerer um sistema de pós tratamento para melhorar a qualidade do efluente, especialmente na remoção de nutrientes;

- desinfecção: pode ser necessária quando há uma elevada demanda de qualidade higiênica do efluente;
- tratamento de lodo (desidratação): pode ser necessário para um transporte e disposição eficiente de lodo;
- tratamento de gás: por razões de segurança deve-se utilizar um sistema de queima de gás. Pode-se também utilizar este gás como fonte de energia;
- equalizador: pode ser utilizado para evitar problemas operacionais no sistema, causados pelas variações de vazão e carga orgânica.

Os critérios de dimensionamento para a maioria das estruturas aqui apresentadas podem ser encontrados em : METCALF & EDDY (1985), AZEVEDO NETO (1970), IMHOFF (1986), MENDONÇA(1990) E ABNT (NB-570/90).

1.3.4. Materiais de construção

O processo de digestão anaeróbia gera um ambiente corrosivo, por isso a escolha do material de construção desse reator é de suma importância. A experiência atual diz que materiais nobres como o aço e o latão sofrem corrosão severa nos reatores UASB. Na maioria dos casos o material de construção mais adequado é o concreto ou alvenaria reforçada com malha de concreto (Van HAANDEL & LETTINGA, 1994).

O principal problema de corrosão em alguns reatores UASB de concreto está na parte superior (interface líquido- atmosfera) principalmente devida a formação de gás sulfídrico (H_2S) que se oxida formando o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e devido à formação de gás carbônico (CO_2) na fase líquida, ambos atacando o óxido de cálcio (CaO) do concreto (NOYOLA, 1994).

Aspectos relativos principalmente a durabilidade do material concreto, se tornam ainda mais importantes, quando da sua utilização em elementos pré-moldados de pequenas espessuras. Neste caso, a literatura não vem indicar reatores anaeróbios tipo UASB pré-moldados executados com elementos delgados de concreto, havendo então, a necessidade de se realizar antes do estudo experimental de argamassas e concretos, uma abordagem teórica destes materiais.

A seguir, é apresentado um estudo sobre a durabilidade dos concretos para que se possa evitar a deterioração destes, quando inseridos em diversos ambientes agressivos.

CAPÍTULO 2- Concretos e argamassas: Um enfoque para a durabilidade

Introdução

Em obras correntes de concreto armado e argamassas estruturais, a característica de resistência mecânica tem sido a propriedade de principal interesse dos projetistas. Porém, falhas prematuras, estão ocorrendo devido a falta de durabilidade desses materiais, sendo apontada por pesquisadores como METHA & MONTEIRO (1994) uma característica tão importante quanto a própria resistência mecânica e custo inicial da obra.

SITTER (1984) *apud* HELENE (1992), cita que a falta de medidas levando em consideração a durabilidade, adiando uma intervenção que deveria ser realizada em projeto e na fase de execução, significa aumentar os custos diretos numa progressão geométrica de razão cinco.

Desta forma, é necessário que, antes de apresentar o estudo de materiais e a proposta construtiva para um reator anaeróbio tipo UASB, se tenha o conhecimento abrangente de todos os aspectos que envolvem a durabilidade de uma estrutura de concreto e/ou argamassa.

Discute-se a durabilidade dos concretos e argamassas, levando-se em consideração seu conceito e definições de durabilidade; os mecanismos físicos e químicos de deterioração do concreto e os fatores intrínsecos da estrutura de concreto que interferem na velocidade de sua deterioração. Esse estudo estende-se também às argamassas.

A partir da compreensão dos elementos que envolvem a durabilidade, verifica-se como o avanço de novas técnicas e tecnologias vem influenciar para que os concretos e argamassas, e conseqüentemente as estruturas, apresentem melhor desempenho. Trata-se, mais especificamente, do uso do CAD (Concreto de Alto Desempenho) como material e a sua aplicação em peças estruturais pré- moldadas.

2.1. Durabilidade: Conceitos e Definições

A definição de durabilidade dos concretos, dada pelo Committee 201 do ACI, é: “*Um concreto durável deve ter a capacidade de resistir às intempéries, ataques químicos ou qualquer processo de deterioração, conservando sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao meio ambiente*”. Porém, todo material tem suas propriedades e microestrutura modificadas com o passar do tempo, atingindo um fim na sua vida útil se tornando insegura e anti- econômica. Assim, METHA & MONTEIRO (1994) salientam que esta durabilidade é avaliada pelo período de tempo que a estrutura é colocada em serviço (vida útil).

No Brasil não existe uma norma específica que defina durabilidade. Porém, alguns autores, tomando por base documentos existentes (Código Modelo CEB-FIP 90, publicações do CEB e do ACI, o projeto de norma europeia ENV- 206 e artigos de especialistas no tema), apresentam algumas definições.

SOBRAL (1990), por exemplo, define: “*A durabilidade de um concreto é a sua capacidade de resistir aos agentes destrutivos e comportar-se satisfatoriamente durante um determinado período de tempo. Esta propriedade depende das condições ambientais, de um lado, e da qualidade do concreto, do outro*”.

Apesar dessas definições, PALERMO (1995), salienta que não há atualmente nenhuma metodologia de ensaio, universalmente aceita, para caracterizar a estrutura porosa do concreto ou para relacioná- la com a sua durabilidade. Assim, são especificadas metodologias, combinadas ou isoladamente, como: absorção por imersão e fervura (NBR 9778 ou ASTM- C- 642); penetração de água sob pressão (NBR 10787 ou DIN 1048 ou ENV 206); resistividade elétrica volumétrica e absorção por capilaridade (NBR 9779).

2.2- As causas de deterioração do concreto, afetando a durabilidade das estruturas

Apesar dos fenômenos deletérios ocorrerem, geralmente, de forma simultanea, classificam- se as causas de deterioração do concreto separadamente (figura 07) , para que se tenha um melhor entendimento dos possíveis fenômenos físicos e químicos que desencadeiam a sua deterioração.

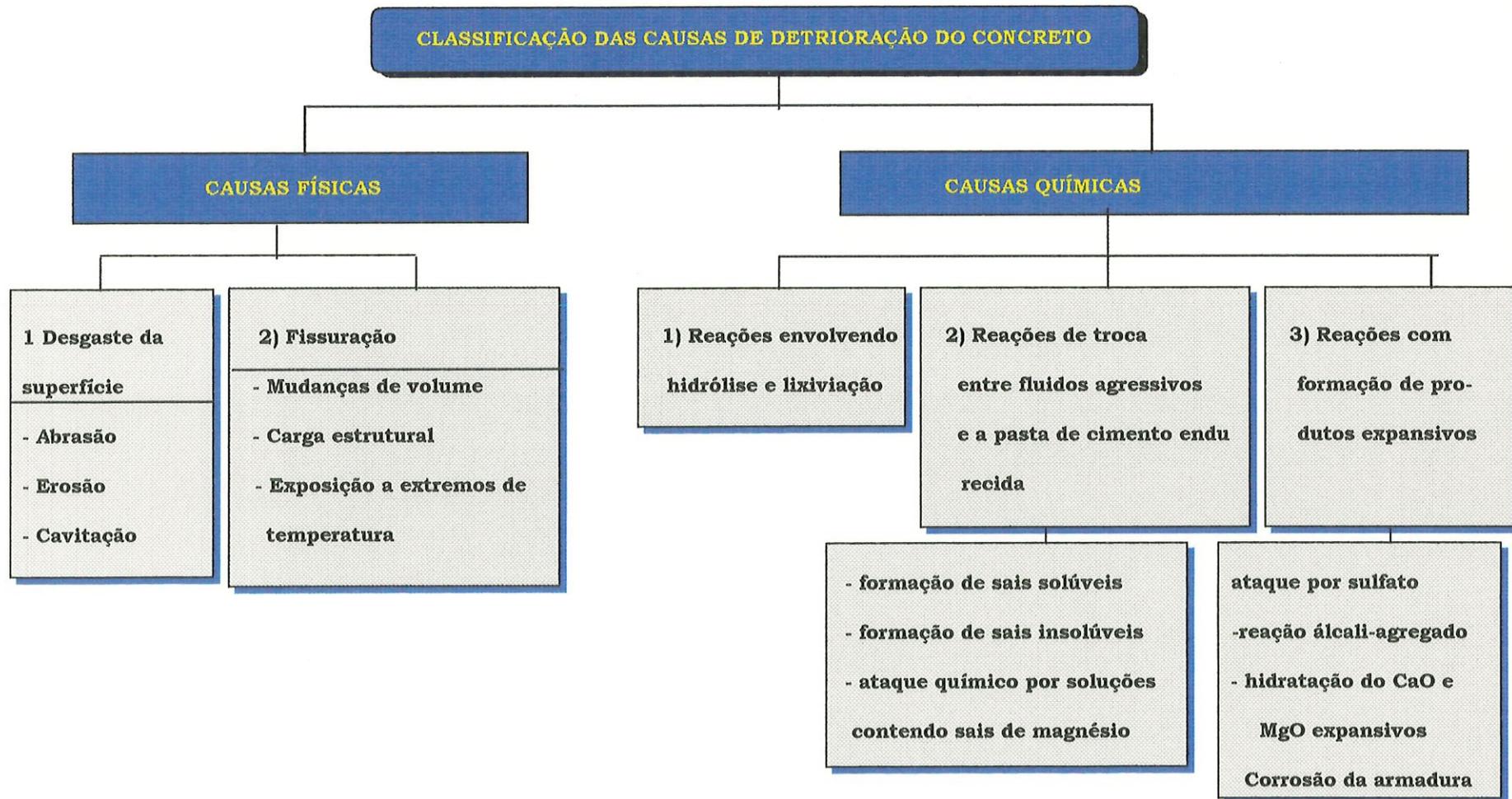


Figura 07- Classificação das causas de deterioração do concreto (Adaptado de METHA & MONTEIRO (1994) e RILEM (COMISSÃO 32))

2.2.1- Deterioração do concreto por ações físicas

2.2.1.1- Desgaste Superficial do Concreto

O desgaste superficial é a perda de massa da superfície do concreto que pode ser causada por erosão, cavitação e abrasão. Dentre esses três tipos de ação física, pode ocorrer sobre o fundo do reator anaeróbio, o desgaste superficial devido a erosão provocada pelas partículas sólidas carregadas pela água residuária que entra no fundo do reator. A velocidade de erosão, de acordo com NEVILLE (1982) vai depender da quantidade, forma, tamanho e dureza das partículas transportadas pela água, bem como da sua velocidade, da presença de turbilhões e da qualidade do concreto.

2.2.1.2- Fissuração

O aparecimento de fissuras na estrutura do reator em concreto, pode se dar no estado plástico e/ou no estado endurecido.

Independente da tipologia e origem da fissura, a proteção da armadura e a durabilidade do concreto podem ficar comprometidas, principalmente, se a estrutura estiver num ambiente agressivo.

NEVILLE (1992), LIBÓRIO & MELO (1997) e METHA & MONTEIRO (1994) descrevem as diversas formas de aparecimento de fissuras, tanto no estado plástico como no estado endurecido (retração plástica, retração no concreto e retração hidráulica).

a) Fissuras do concreto no estado fresco

As fissuras do concreto no estado fresco (plástico), geralmente ocorrem durante o início de pega e o início do endurecimento do concreto.

a.1) Retração plástica e retração no concreto

O mecanismo de retração plástica, dando origem a fissuras no concreto, pode ser esquematizada conforme a figura 08.



Figura 08- Mecanismo de fissuração do concreto devido a retração plástica

A retração no concreto, provocando fissuras, ocorre da mesma forma que por retração plástica. Entretanto, a perda de água de amassamento é mais lenta e é devido, principalmente, à umidade relativa local. Neste caso, a cura é extremamente importante para evitar a retração e fissuração.

a.2) Retração hidráulica

A retração hidráulica provoca o encurtamento nos elementos estruturais, aparecendo trincas que podem ultrapassar a espessura do elemento estrutural como as vigas.

b) Fissuração do concreto no estado endurecido

As fissuras que aparecem no concreto endurecido desencadeando alguns processos de deterioração na estrutura do reator podem ocorrer, principalmente, devido a: deficiência de projeto, deficiência de execução e presença de determinados sais nos poros.

b.1) Deficiência de projeto e execução

As fissuras por deficiência de projeto e execução ocorrem, principalmente, devido ao arranjo incorreto das armaduras, a não previsão de solicitações nos processos produtivos e a não previsão de solicitações oriundas de carregamentos (fissuras de tração, flexão e cisalhamento).

b.2) Presença da sais nos poros do concreto

Quando o concreto endurecido está na presença de soluções salinas, o mecanismo de fissuração no concreto é (figura 09):



Figura 09- Mecanismo de fissuração do concreto devido cristalização dos sais nos poros

2.2.2- Deterioração do concreto por reações químicas

O ataque químico sobre o concreto, consiste numa troca de massa entre o concreto e o meio ambiente, isto é, interações químicas entre agentes agressivos no meio externo e os constituintes da pasta de cimento, o que resulta eventualmente na modificação de certas propriedades do concreto.

Para uma melhor compreensão dos mecanismos de deterioração desencadeados num concreto, inserido em diversos ambientes agressivos (os quais podem estar o reator anaeróbio), é interessante primeiramente verificar como é a estrutura da pasta de cimento endurecida, já que esta é tida como a parte mais susceptível do concreto ao ataque químico.

2.2.2.1- A pasta de cimento endurecida

A composição química do cimento Portland, consiste basicamente de vários compostos de cálcio, como mostra NEVILLE (1982) através da tabela 08:

TABELA 08- Composição química do cimento Portland (Adaptado- NEVILLE (1982))

OXIDO	ABREVIACÃO	COMPOSTOS	ABREVIACÃO
CaO	C	3CaO. SiO ₂	C ₃ S
SiO ₂	S	2CaO. SiO ₂	C ₂ S
Al ₂ O ₃	A	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO. Al ₂ O ₃ . Fe ₂ O ₃	C ₄ AF
MgO	M	4CaO. 3Al ₂ O ₃ . SO ₃	C ₄ A ₃ S
SO ₃	S*	3CaO. 2SiO ₂ .3H ₂ O	C ₃ S ₂ H ₃
H ₂ O	H	CaSO ₄ . H ₂ O	CS*H ₂

Quando um aglomerante mineral , no caso o cimento Portland, se mistura com a água é formada uma pasta ou nata. Após alguns minutos de hidratação do cimento, surgem nesta ordem,. os cristais de um sulfoaluminato de cálcio (etringita), os cristais de hidróxido de cálcio Ca (OH)₂ e os cristais de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H)(METHA & MONTEIRO ,1994).

Dentro dessa formação faz- se algumas observações importantes sobre as fases da pasta de cimento endurecida:

- silicato de cálcio hidratado (C-S-H): são cristais que ocupam de 50% a 60% do volume do sólido de uma pasta de cimento hidratado, sendo a fase mais importante na determinação das propriedades da pasta, já que esses cristais *possuem a ligação mais forte da pasta*;
- hidróxido de cálcio (Ca (OH)₂): são cristais que ocupam de 20% a 25% do volume da pasta hidratada. A contribuição potencial do Ca(OH)₂ , quando comparada ao C-S-H, na resistência devido forças de Van-Der -Vals é limitada, pois tem área específica menor do que o C-S-H. A presença de Ca (OH)₂ no cimento Portland hidratado tem efeito

desfavorável na resistência química às soluções ácidas por ter solubilidade maior que o C-S-H;

- sulfoaluminatos de cálcio (etringita): são cristais que ocupam de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta e, conseqüentemente, desempenham um papel menor nas relações estrutura- propriedade.

2.2.2.2- Interações químicas entre agentes agressivos do meio externo e os constituintes da pasta de cimento endurecida

Este item, vem elucidar como ocorrem as interações químicas entre o meio externo e a pasta de cimento endurecida em diversos ambientes agressivos. A partir dos mecanismos de deterioração que podem ocorrer, é possível prever e até prevenir futuras manifestações patológicas em estruturas como o reator anaeróbio.

2.2.2.2.2- Reações de troca entre fluidos agressivos e os componentes da pasta de cimento endurecida: Os três tipos de interações químicas.

As reações que podem ocorrer entre a pasta de cimento endurecida e soluções agressivas ao concreto (geralmente ácidas) são: as reações formando sais solúveis, as reações formando sais de cálcio insolúveis não expansivos e as reações envolvendo soluções contendo sais de magnésio

a) Reações formando sais solúveis

Existem algumas soluções ácidas que, quando em contato com a pasta de cimento endurecida, estabelece uma reação onde ocorre a troca de cátions, gerando sais solúveis de cálcio como o cloreto de cálcio e acetato de cálcio.

Todos estes sais são solúveis são facilmente removíveis por lixiviação, aumentando a porosidade e a permeabilidade do concreto, o que permite um crescente processo de deterioração. Os principais ácidos formando sais solúveis são apresentados na tabela 09.

TABELA 09- Ácidos formando sais solúveis de cálcio (SOBRAL, 1990)

Ácidos/ Cloretos	Onde são encontrados
Hidroclórico, Sulfúrico, Nítrico	Efluentes de indústrias químicas
Cloreto de amônia	Indústria agrícola e fertilizantes
Acético, Fórmico, Láctico	Indústria de produtos alimentícios
Carbônico	Refrigerantes e Água naturais

Dentre os ácidos acima citados, chama-se atenção ao ácido carbônico e sulfúrico respectivamente, sendo citados como agentes de deterioração dos reatores de concretos.

A acidez da água na natureza (águas do mar, mineralizadas e subterrâneas), devido ao dióxido de carbono (CO_2) dissolvido, é considerado danoso, quando o pH desta água estiver menor que sete, formando o ácido carbônico e conseqüentemente produtos solúveis de cálcio (METHA & MONTEIRO, 1994).

O ataque do ácido carbônico ocorre da seguinte forma:

1) ácido carbônico (H_2CO_3) formado a partir de CO_2 na água + hidróxido de cálcio da pasta ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formam o carbonato de cálcio (CaCO_3 —produto insolúvel).

Se houver excesso de CO_2 na água, então:

2) carbonato de cálcio (CaCO_3) + CO_2 livre + água \Rightarrow bicarbonato de cálcio (solúvel, podendo ocorrer dissolução do hidróxido de cálcio da pasta de cimento).

O ácido sulfúrico, geralmente é encontrado em efluentes industriais. Porém, um caso muito freqüente de ataque de ácido sulfúrico à matriz da pasta de cimento, é encontrado em tubulações de concreto utilizadas para captar esgoto doméstico. HELENE (1986), apresenta um exemplo de formação de ácido sulfúrico em tubulações coletoras de esgoto de concreto (figura 10):

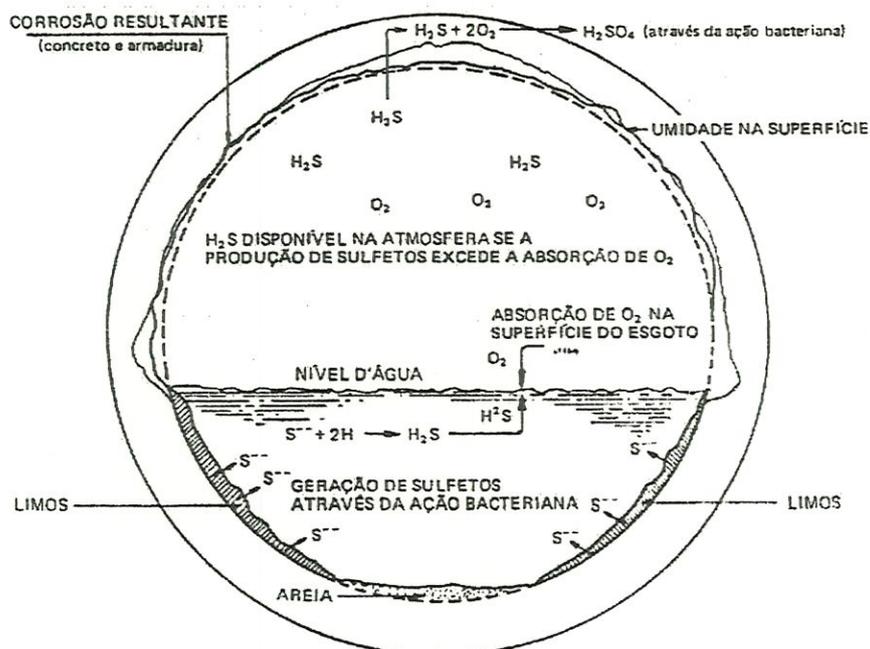


Figura 10: Formação de ácido sulfúrico em tubulações coletoras de esgoto (HELENE, 1986)

No caso dessa ação bacteriológica na tubulação de esgoto, as camadas internas de limo, que se formam junto às paredes dos tubos de concreto, tem organismos anaeróbios degradando matéria orgânica, originando o sulfeto de hidrogênio (H_2S).

O sulfeto de hidrogênio, atravessa a camada externa do limo que contém microorganismos aeróbios e se oxida total ou parcialmente, formando o ácido sulfúrico que ataca o concreto (SOBRAL, 1990).

b) Formação de sais de cálcio insolúveis e não expansivos

Existem alguns ácidos que, quando em contato com a pasta de cimento, geram sais praticamente insolúveis, muitas vezes benéficos ao concreto como os ácidos oxálicos, tartárico e fluorídrico.

A ação dos fluoretos por exemplo, é conhecida por transformarem o óxido de cálcio (CaO) do cimento Portland, em fluoreto de cálcio, um sal altamente insolúvel, que se deposita nos poros da pasta de cimento endurecida (SOBRAL, 1990).

c) Ataque químico por soluções contendo sais de magnésio

As soluções de magnésio como cloreto, sulfato ou bicarbonato de magnésio, reagem com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento endurecida, formando sais solúveis de cálcio; acarretando assim aumento da permeabilidade e porosidade do concreto.

Este ataque por íon de magnésio, pode se estender ao silicato de cálcio hidratado, que se transforma em silicato de magnésio hidratado ($Mg-S-H$). Este silicato, não possui nenhuma característica cimentícia, estando presentes, geralmente, na água do mar, águas subterrâneas e efluentes industriais (CINCOTTO, 1997).

2.2.2.2.3- Reações formando produtos expansivos

São associados com as reações químicas expansivas no concreto quatro fenômenos: ataque por sulfato, ataque álcali- agregado, hidratação retardada de CaO e MgO livres e corrosão da armadura no concreto.

a) Primeiro fenômeno expansivo: Ataque por sulfatos

A degradação do concreto devido ao ataque por sulfatos, pode ocorrer de duas formas: expansão do concreto ou perda progressiva da resistência e de massa. Esses sulfatos, podem ser encontrados na maioria dos solos em forma de gipsita, em águas subterrâneas, águas de agricultura (sulfato de amônia) e efluentes industriais (METHA & MONTEIRO, 1994).

No interior do reator anaeróbio, devido a própria digestão anaeróbia, existe a presença de sulfatos. Assim realiza-se um aprofundamento na discussão dos mecanismos de deterioração causado por este agente agressivo.

A expansão do concreto é decorrente do contato do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e as fases portadoras de alumina (C_3A $\text{CS}^* \cdot \text{H}_{18}$) da pasta de cimento, com o íon sulfato. Quando essas duas fases entram em contato com o íon sulfato, ocorre a formação da etringita, responsável pela expansão e fissuração do concreto (figura 11).

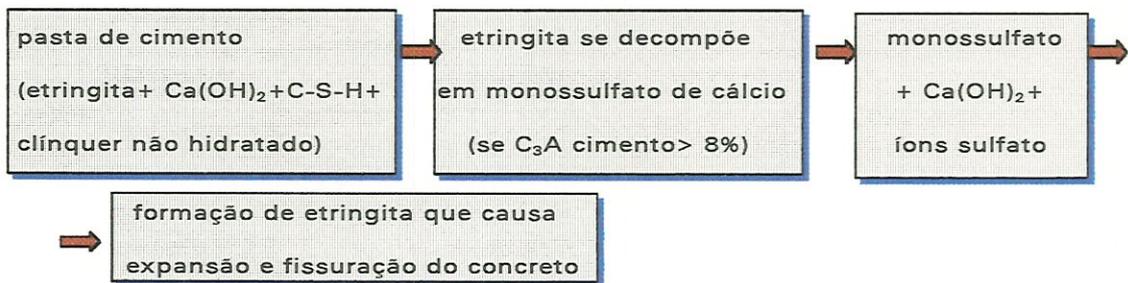


Figura 11 :Mecanismo de expansão e fissuração do concreto devido presença de sulfato

A perda progressiva de massa e da resistência do concreto, ocorre dependendo do cátion presente na solução de sulfato, como por exemplo Na^+ e Mg^+ . Neste caso, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o silicato de cálcio hidratado (C-H-S) da pasta de cimento, podem ser convertidos em gipsita. Essa gipsita pode causar expansão; porém antes disso ocorre uma redução da rigidez e resistência do concreto (SOBRAL, 1990).

Existem dois casos clássicos de ataque por sulfatos citados por METHA & MONTEIRO (1994): o ataque pelo sulfato de sódio (íons de Na^+) e o ataque pelo sulfato de magnésio (íons de Mg^+).

O sulfato de sódio (Na_2SO_4), quando entra em contato com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) da pasta de cimento endurecida, forma a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e o hidróxido de sódio (NaOH). A formação desse último assegura a continuidade da alcalinidade do sistema, fazendo com que a fase cimentícia C-S-H (silicato de cálcio hidratado) não seja atingida, ocorrendo somente a perda da resistência.

O sulfato de magnésio, quando entra em contato com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento endurecida ocorre a formação da gipsita (expansiva) e do hidróxido de magnésio. Este último faz com que a fase cimentícia C-S-H seja reduzida lentamente à silicato de magnésio hidratado (Mg-S-H), que não possui propriedades aglomerantes.

De acordo com HELENE (1986) a qualidade do concreto é a melhor proteção contra ataque por sulfatos, o que significa basicamente ter um concreto com baixa permeabilidade.

A ASTM C150 recomenda que se utilize cimentos Portland do tipo V. No Brasil a NBR 5737 apresenta como cimentos resistentes à sulfatos: CP I RS, CP I S RS, CP II E RS, CP II Z RS, CPIII RS, CP IV RS. Vale ressaltar também os cimentos de alta resistencia inicial CP V ARI RS.

Esses tipos de cimentos, podem não ser suficiente contra reações que formam a gipsita, especialmente se o teor de C_3S do cimento for alto, no caso de concentração de sulfatos muito elevadas. Por isso, os cimentos contendo pouco ou nenhum hidróxido de cálcio na hidratação tem um desempenho muito melhor. Os cimentos a serem citados são: cimentos com alto teor de alumina, cimentos de alto forno com mais de 70% de escória e pozolânicos com mais de 25% de pozolana.

SOBRAL (1990) apresenta como o “Bureau of Reclamation” dos Estados Unidos classifica o grau de agressividade dos solos e águas subterrâneas em termos de concentração de sulfatos. Complementando essa classificação o ACI Building Code 318- 83 *apud* METHA & MONTEIRO (1994) apresentam para esses graus de agressividade diretrizes para combater o ataque por sulfatos. Com base nessas informações tem-se a tabela 10:

TABELA 10 : Classificação do ataque por sulfatos e diretrizes para prevenção

Grau de ataque	sulfatos solúveis em água em amostras de solo (%)	ppm de sulfatos em amostras de água (ppm)	tipo de cimento recomendado	relação a/c recomendável para concreto de peso normal
Ataque negligenciável	0 a 0,10	0 a 150	sem restrição	sem restrição
Ataque moderado	0,10 a 0,20	150 a 1.500	<ul style="list-style-type: none"> Tipo II ASTM: $C_3A < 8\%$ e $C_3S + C_3A < 58\%$ Pozolânicos ou escória 	$a/c < 0,50$
Ataque severo	0,20 a 2	1.500 a 10.000	<ul style="list-style-type: none"> Tipo V ASTM Pozolânicos c/ resistência sulfato 	$a/c < 0,45$
Ataque muito severo	> 2	> 10.000	<ul style="list-style-type: none"> Tipo V ASTM com adição pozolânica Similar ao tipo V ASTM com adição pozolânica 	$a/c < 0,50$

Obs: Para ataque severo onde se utiliza concreto com agregado leve o ACI Building Code especifica que o $f_{cK}(28 \text{ dias}) = 28 \text{ MPa}$.

As especificações acima citadas são consideradas como diretrizes, devendo ser adotadas de acordo com as condições particulares de cada caso.

b) Segundo fenômeno expansivo: Reação álcali- agregado

A reação álcali agregado ocorre (figura 12), quando alguns componentes silicosos, presentes no agregado, entram em contato com íons alcalinos e íons hidroxila do cimento Portland, formando produtos que causam expansão e fissuração do concreto (METHA & MONTEIRO, 1994).

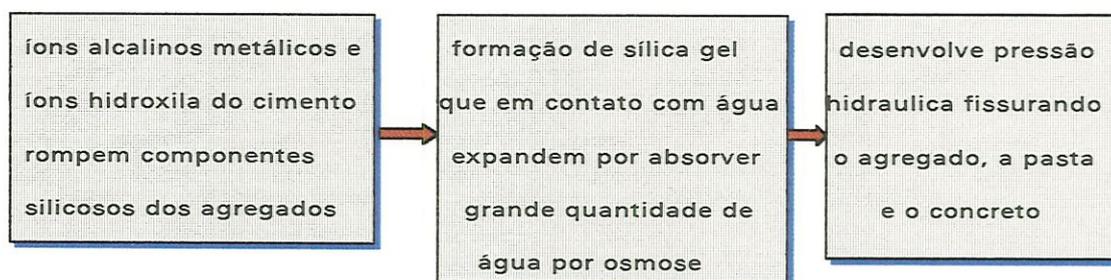


Figura 12: Mecanismo de expansão e fissuração do concreto devido a reação álcali-agregado

O tipo de fissura provocada, atinge a superfície externa de forma irregular sendo referidas como fissuras mapeadas.

Os fatores que influenciam para a reação álcali agregado são (METHA & MONTEIRO, 1994):

- o conteúdo de álcalis do cimento e o consumo do cimento;
- os íons alcalinos de fontes externas como: aditivos, água do mar ou solução salina no concreto;
- a umidade junto à estrutura;
- a quantidade, tamanho e reatividade dos constituintes reativos ao álcalis, presentes nos agregados;
- a temperatura.

Algumas recomendações, citadas por SOBRAL (1990), para controlar esses fatores são:

- uso do cimento Portland com teor de álcalis menor que 0,6% de Na_2O equivalente, ou o conteúdo total de álcalis no concreto pode ser reduzido pela substituição de parte do cimento de alta alcalinidade por adições cimentícias ou pozolânicas (escória, pedra pome, argila calcinada, cinza volante ou sílica ativa);

- se os agregados forem brandamente reativos pode-se utilizar um concreto com 25% a 30% de calcário;
- se necessitar utilizar areia de praia ou cascalho do mar, estes devem ser bem lavados com água doce para assegurar o conteúdo total de álcali do cimento e o volume de agregado no concreto menor que 3 Kg/m^3 ;
- para evitar umidade junto à estrutura, deve-se controlar o acesso de água ao concreto pelo imediato reparo de juntas com vazamento.

c) Terceiro fenômeno expansivo: Hidratação do MgO e CaO cristalinos

Quando os óxidos de magnésio e de cálcio (MgO e CaO (calcinado)) cristalinos, estão presentes em quantidades consideráveis no cimento Portland e são hidratados, estes podem causar expansão e fissuração no concreto (METHA & MONTEIRO, 1994).

Atualmente o fenômeno de expansão devido presença do CaO cristalinos em cimentos Portland é virtualmente desconhecido em concretos modernos, pois controles melhores na manufatura asseguram que o conteúdo de CaO cristalino não exceda à 1% (acima de 2,8% apresenta expansão considerável).

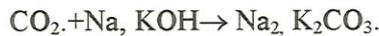
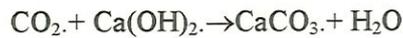
Nenhum dano estrutural devido a presença de MgO cristalino é reportado à países como o Brasil, pois existem as limitações na matéria prima.

d) Quarto fenômeno expansivo: Corrosão da armadura no concreto

O fenômeno da corrosão de armaduras, é mais freqüente do que qualquer outro fenômeno de degradação das estruturas de concreto armado, sendo sempre oneroso o seu reparo ou recuperação .

Normalmente, a armadura se encontra protegida da corrosão, devido a alta alcalinidade do concreto (pH entre 12,7 e 13,8), que favorece a formação de uma camada protetora de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, denominada de passiva, que é compacta e aderente a armadura. Esta proteção pode ser eliminada em dois caso, segundo HELENE & FIGUEIREDO (1994) e SOBRAL (1990):

- quando a alcalinidade é neutralizada pela ação do ácido carbônico num processo chamado *carbonatação*. Esse processo ocorre, quando em condições excepcionais, o pH do concreto na vizinhança do aço pode ser reduzida a menos de 11,5, destruindo a passividade do aço, armando o processo de corrosão. O processo de carbonatação, segue as seguintes reações químicas:



A umidade relativa no ambiente exerce influência considerável sobre a quantidade de água contida nos poros de concreto, o que condiciona a velocidade de difusão do CO_2 responsável pelo processo de carbonatação.

- quando a película passiva depositada sobre a superfície das barras é rompida devido a presença de *íons cloreto* (Cl^-).

Alguns valores limites de íon cloreto por peso de cimento são: o BRE (1982) cita que se menor que 0,4% o risco de corrosão é baixo, de 0,4% a 1% o risco é intermediário e acima de 1% existe alto risco de corrosão. O ACI Committee 222 (1985) permite um conteúdo máximo de 0,15% e o BSI-BS 8110 (1985) estabelece limite máximo de 0,4% para as estruturas correntes de concreto armado (HELENE & FIGUEIREDO, 1994).

O mecanismo de corrosão da armadura por carbonatação ou ataque de íons cloreto é apresentado na figura 13:

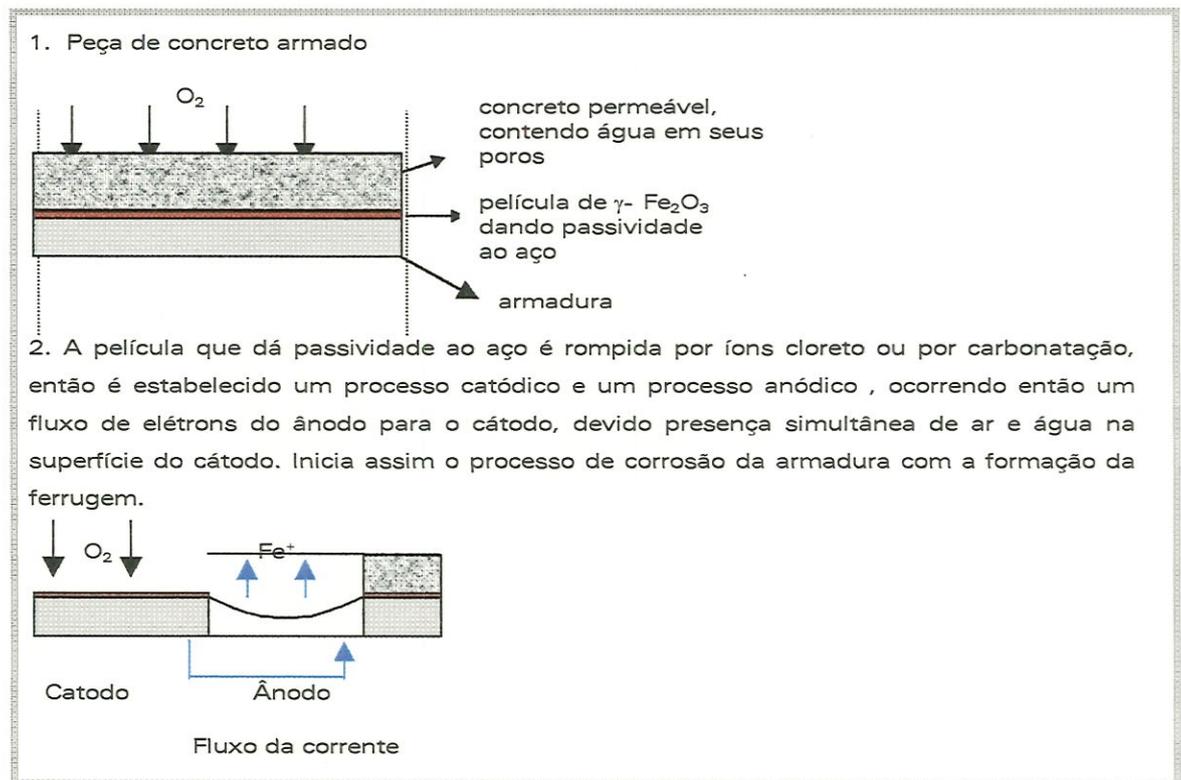


Figura 13- Processo de corrosão da armadura

A transformação do aço metálico em ferrugem, é acompanhada de um aumento de volume de até 600% do metal original. (figura 14). Esta tem sido a principal causa de expansão e fissuração do concreto.

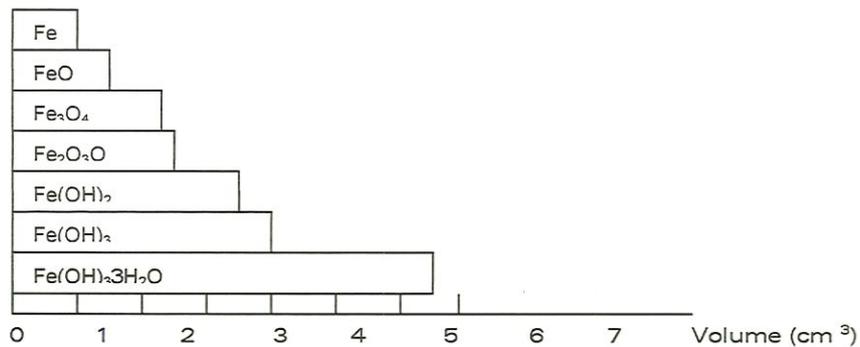


Figura 14- Transformação do aço metálico em ferrugem

A corrosão das armaduras no concreto armado só ocorre quando as condições de proteção proporcionadas pelo cobrimento de concreto são insuficientes. Assim, deve-se observar o cobrimento mínimos (normalizados), a qualidade do concreto e a uniformidade de execução da obra.

No Brasil, a norma que trata desse assunto é a NBR- 6118. Porém, esta não especifica a qual concreto esses cobrimentos se referem (tipo de cimento, consumo, relação a/c, etc) em relação ao ambiente em que a estrutura estará inserida.

2.2.3- A água do mar como agente de vários processos de deterioração do concreto

O efeito da água do mar sobre o concreto merece atenção especial, pois desencadeia vários mecanismos de deterioração apresentados até aqui. Isso se deve, além dos fatores externos como temperatura, a própria composição química das água marinha que é (METHA & MONTEIRO, 1994):

- 3,5% em peso de sais solúveis;
- concentração de $[Na^+]$ = 11 000 mg/l;
- concentração de $[Cl^-]$ = 20 000 mg/l;
- concentração de $[Mg^{2+}]$ = 1400 mg/l;
- concentração de $[SO_4^-]$ = 2700 mg/l;
- em condições onde CO_2 está dissolvido $pH < 7,5$;

O sulfato e o magnésio são constituintes da água do mar considerados danosos, já que a pasta de cimento Portland pode se deteriorar por reações de troca de cátions quando concentração de íons de magnésio excede 500 mg/l e quando a concentração de sulfatos excede 1500 mg/l (ACI 318-83- considera ataque severo).

A corrosão por ataque de íons cloreto também é, freqüentemente, encontrada em obras marítimas de concreto (HELENE, 1986). Este ataque ocorre devido a permeabilidade do concreto e a atração capilar, fazendo com que a água com íons cloreto, chegue à superfície das armaduras de aço, que juntamente com a presença de oxigênio, inicie o processo de corrosão eletrolítica.

2.3- Fatores que influenciam a durabilidade dos concretos

De acordo com os mecanismos de deterioração apresentados, o fator central para a maioria dos problemas de durabilidade no concreto, tem sido a água, já que é o veículo para transporte de íons agressivos.

Os mecanismos de transporte desse fluido no interior do concreto, irão influenciar diretamente na intensidade de deterioração, e conseqüentemente na sua durabilidade. Os três mecanismos de transporte, citados por HELENE (1993) *apud* LIBÓRIO & BRAZ DE MELO (1998) e OLLIVIER (1998), são:

- absorção: líquido entra por sucção capilar de acordo com viscosidade, tensão superficial, densidade e porosidade do concreto;
- difusão: líquido ou gás penetra no concreto devido a diferença de concentração (tende a encontrar um equilíbrio) entre dois líquidos;
- permeabilidade: Fluxo de um fluido através do concreto devido diferença de pressão;

Pode-se dizer então, que água e a concentração de íons agressivos dessa água é difícil controlar, pois depende das condições ambientais. Porém, a intensidade de deterioração do concreto pode ser controlada através da confecção de um concreto de qualidade (baixa permeabilidade).

Para obter um concreto durável e com alto desempenho, três aspectos são importantes: a qualidade dos agregados, a qualidade da pasta de cimento, a qualidade da interface pasta- agregado.(ALMEIDA, 1996).

a) A qualidade dos agregados

As características dos agregados que mais influenciam no desempenho dos concretos convencionais, são: resistência à compressão, módulo de elasticidade, diâmetro máximo, granulometria, módulo de finura, natureza petrográfica, absorção, forma e textura superficial.

Durante o processo de seleção desses agregados, deve-se dar preferência a aqueles que possuam (DAL MOLIN, 1995 e LIBÓRIO & BRAZ DE MELO, 1998):

- um módulo de elasticidade maior ou igual ao da pasta de cimento;
- uma granulometria que minimize o consumo de água e/ou concentração de tensões;
- características máximas de limpeza e isenção de materiais pulverulentos;
- uma forma e textura superficial que favoreçam a aderência com a pasta;
- isenção de minerais prejudiciais como sílica (se o cimento tiver álcalis), calcários dolomíticos, feldspatos, sulfuretos, gesso, anidrita, óxido de ferro e materiais argilosos;
- adequada resistência mecânica, na ligação cimento inerte, ao congelamento da água;
- adequadas propriedades térmicas.

b) A qualidade da pasta de cimento

Baseando-se na formação dos vários compostos hidratados apresentados no item 2.2.2.1, e como eles interagem com os agentes agressivos do meio, pode-se dizer que para aumentar a resistência da pasta é desejável:

- aumentar a quantidade de silicatos de cálcio na composição de cimento (fase C-S-H);
- eliminar ao máximo a quantidade de hidróxido de cálcio formado, que pode ser feito através de adição de algum material pozolânico, que de acordo com DAL MOLIN (1995), reage com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e o transforma em CSH adicional;
- reduzir ou eliminar as proporções de C_3A e C_4AF , o que não é possível devido à própria produção de cimento (SILVA, 1998).

Além da interferência na composição química da pasta, deve-se também observar a estrutura física dos produtos de hidratação, ou seja, como está distribuída a estrutura de poros nesta pasta. Existem três tipos de poros:

- poros de gel entre as camadas de CSH- não interferem na resistência da pasta;
- poros capilares- espaço não preenchido pelos produtos de hidratação do cimento afetando a resistência da pasta de acordo com seu tamanho e distribuição.

- Poros de ar- intencionalmente incorporados ou devido falta de adensamento (ar aprisionado);

Na pasta de cimento endurecida o tamanho e a continuidade dos poros que aparecem durante a hidratação (poros capilares), é que irão controlar o coeficiente de permeabilidade (K).

Para quantificar a porosidade de uma pasta de cimento endurecida, é necessário utilizar a relação água/ cimento para se estimar o volume total de poros capilares como mostra a figura 15.

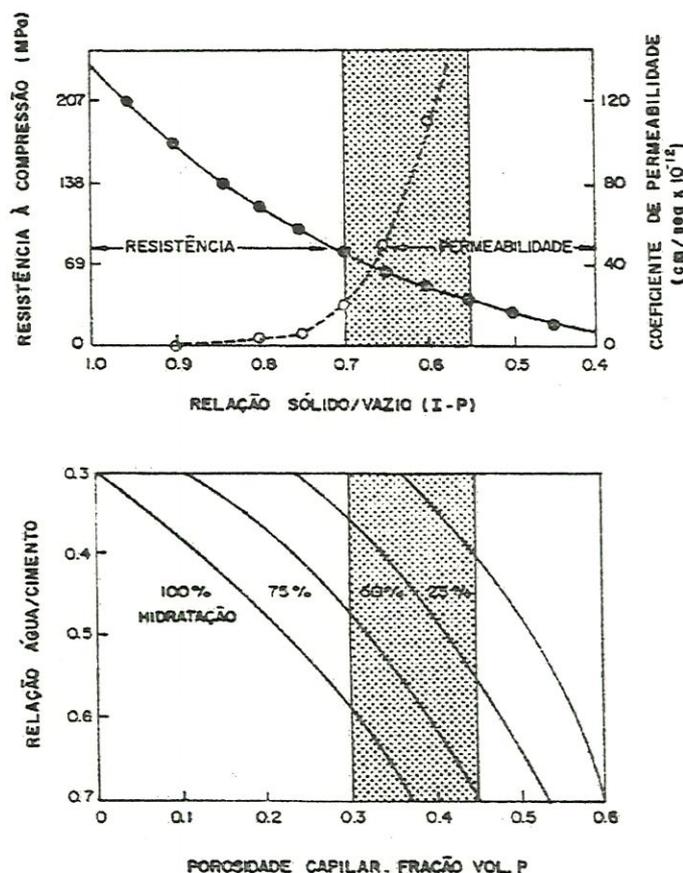


Figura 15- Influência da relação água/ cimento e do grau de hidratação, na porosidade e resistência de pastas de cimento hidratadas(DAL MOLIN, 1995).

Através do gráfico acima, fica claro que uma das formas mais eficiente de aumentar a resistência da pasta e controlar a porosidade capilar, é através da redução do fator água/ cimento.

c) Qualidade da interface pasta- agregado

Utilizando agregados com baixa permeabilidade, juntamente com uma pasta de cimento de qualidade; a permeabilidade do sistema concreto ou argamassa deveria diminuir, já

que estes agregados interceptam o fluxo no interior da matriz da pasta. Entretanto, a permeabilidade da argamassa ou concreto é maior até que a permeabilidade da pasta, devido a existência de microfissuras na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento.

Observando a microestrutura da zona de transição de um concreto, PAULON (1996) e DAL MOLIN (1995), mostram que nesta existe uma pasta mais porosa, com relação água/cimento mais elevada. Essa situação, facilita a difusão de íons e deixa espaço disponível para a formação de cristais de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) numa proporção mais elevada que aquelas encontradas na pasta de cimento hidratada

Por isso, a zona de transição é considerada, a parte mais fraca do concreto endurecido e é nela que as primeiras ações irreversíveis poderão ocorrer, resultando em micro-rupturas (fissuração), quando sujeita à tração ou ao cisalhamento.

Uma vez iniciada a fissuração, esta se propaga de uma zona de transição para a outra onde, na maioria dos casos, a fratura segue o contorno dos agregados, facilitando a entrada de agentes agressivos no interior do concreto. Uma representação gráfica da zona de transição e a matriz da pasta de cimento é apresentada na figura 16.

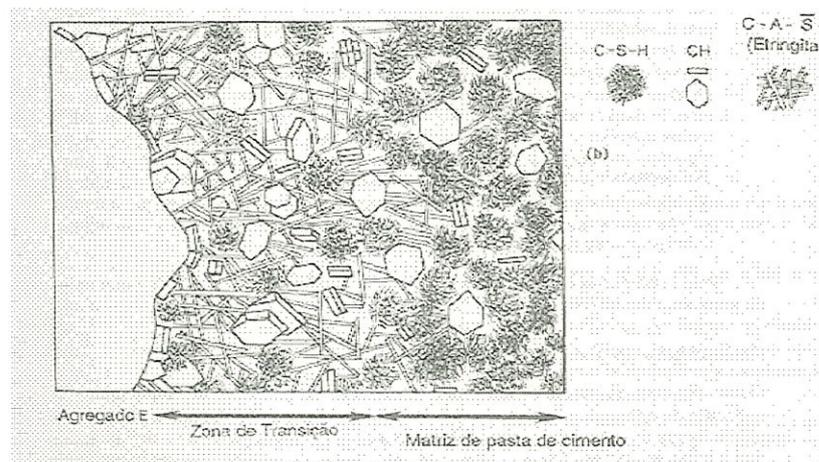


Figura 16- Representação gráfica da zona de transição e a matriz da pasta de cimento (METHA & MONTEIRO, 1994).

Para elevar o desempenho do concreto, pode-se melhorar as características dessa zona de transição através de um proporcionamento adequado de materiais, como por exemplo, diminuir a quantidade de água de amassamento ou a dimensão dos agregados utilizados.

Devido à grande importância da zona de transição, estudos estão sendo realizados no intuito de melhorar o seu desempenho. No item 4 apresenta-se a ação de alguns aditivos e adições sobre a zona de transição do concreto ou argamassa.

2.4- O avanço de novas técnicas e tecnologias influenciando na durabilidade do concreto

O concreto é um material que vem sofrendo grande desenvolvimento nas últimas décadas. Novos produtos adicionados ao concreto, dos quais os mais importantes são os aditivos superplastificantes e as adições minerais (sílica ativa, cinzas volantes e escória de alto forno), tiveram o seu desenvolvimento rápido, graças aos estudos de microestrutura que têm sido executados, permitindo um conhecimento aprofundado dos mecanismos de hidratação do concreto.

Esses aditivos químicos (superplastificantes) e adições minerais introduzidos aos concretos, transformaram estes em verdadeiros super concretos, considerados hoje como “de alta resistência e durabilidade”, também denominados “concretos de alto desempenho” ou abreviadamente CAD.

2.4.1- Os Concretos de Alto Desempenho (CAD)

2.4.1.1- Conceitos e definições de Concreto de Alto Desempenho

Devido a grande relatividade de problemas e variáveis envolvidas, uma definição simplista usada para este concreto é: *“O Concreto de Alto Desempenho (CAD) é um concreto que, em determinado tempo e local, produza resultados melhores que os convencionais que representem o conceito de desempenho local atual, conferindo características de resistência e durabilidade, que satisfaçam às necessidades de aplicação e conservação”* (PEREIRA, 1995).

Existem variações na determinação do que é um concreto de alto desempenho a partir de sua resistência. A seguir apresenta-se considerações de algumas instituições, apresentadas por PEREIRA (1995):

- American Concrete Institute- ACI 363: são concretos que apresentam resistência à compressão superior a 41MPa;
- FIP/ CEB- 213/ 214: são concretos com resistência à compressão superior à 80MPa;
- NBR 8953 (1992): são concretos com resistências características à compressão variando de 55MPa e 80 MPa (limite máximo classificado pela NB1).

2.4.1.2- Proporcionamento e materiais constituintes do CAD

A definição do traço de um Concreto de Alto Desempenho é um procedimento mais crítico do que de um concreto convencional, pois cada material constituinte deve ser avaliado criteriosamente. Além disso, deve-se analisar a interação e combinação dos materiais entre si, fazendo várias misturas experimentais até que se definam o proporcionamento ideal (ALMEIDA, 1996).

Apesar do Concreto de Alto Desempenho (CAD) seguir as mesmas considerações sobre a escolha do agregado, a qualidade da pasta de cimento e a qualidade da interface agregado-pasta, de um concreto convencional de qualidade, existem algumas peculiaridades a serem observadas em cada material constituinte e suas interações com outros materiais.

a) Cimento

Além da qualidade da pasta, o cimento influencia também na aderência agregado-pasta. Entretanto, a literatura técnica indica a obtenção de CAD com todos os tipos de cimento encontrados no mercado brasileiro, não existindo critérios científicos que especifiquem um tipo de cimento mais adequado.

METHA & AITCIN (1990) *apud* DAL MOLIN (1995) afirmam que é preferível o cimento Portland comum e aqueles com elevados teores de C_3S e C_2S .

b) Agregados

Para a qualificação dos agregados utilizados na confecção de um CAD, deve-se atender as exigências de normas para concretos convencionais. Entretanto, alguns aspectos podem ser observados:

b.1) Propriedades dos agregados graúdos

Para os agregados graúdos os principais aspectos a serem observados são:

– Dimensão máxima característica:

Para GJORV (1992) *apud* DAL MOLIN (1995), o agregado graúdo de menor dimensão máxima, é capaz de produzir um concreto mais resistente. Esta dimensão está em torno de 10mm a 14 mm.

A dimensão menor, possibilita uma microestrutura do agregado com menor probabilidade de falhas e fissuras, uma menor espessura da zona de transição (menor retenção de água em torno do agregado durante exsudação do concreto fresco) e a redução da tensão de aderência devido maior superfície específica (DAL MOLIN, 1995).

– Propriedades elásticas e mecânicas

Ao contrário dos concretos convencionais, para o Concreto de Alto Desempenho, devido utilização de aditivos químicos (superplastificantes) e minerais (ex: sílica ativa), existe uma forte aderência entre pasta e agregados como será visto adiante.

Essa forte aderência, faz com que as propriedades elásticas do agregado (módulo de deformação) assumam um papel de extrema importância para o desempenho do concreto, ou seja, a fragilidade do concreto pode ficar no agregado e não só na zona de transição como nos concretos convencionais (DAL MOLIN, 1995).

– Forma e textura superficial

Num CAD a aderência entre pasta e agregado também depende da forma e textura das partículas de agregado, sendo fatores relevantes no comportamento mecânico. Agregados angulares com superfícies ásperas, proporcionam melhor entrosamento entre pasta e agregado, que agregados lisos e arredondados (DAL MOLIN, 1995). Por outro lado, estes tipos de agregados requerem mais pasta de cimento para se ter uma mistura trabalhável. (METHA & MONTEIRO, 1994).

b.2) Agregados Miúdos

No CAD, a quantidade de finos é alto, devido a presença de cimento e adições minerais como a sílica ativa, necessitando maior consumo de água para adquirir trabalhabilidade. Assim, DAL MOLIN (1995) comenta que é aconselhável utilizar uma quantidade menor de areia e/ ou areia com módulo de finura maior (2,7 a 3,2). Além disso, o agregado miúdo com partículas arredondadas e lisas devem ser utilizadas, pois necessitam de menor quantidade de água de amassamento.

c) Água

É reconhecido, que a água potável é adequada à produção do concreto. Porém em termos quantitativos, a água, ou mais precisamente a relação água/ cimento, como visto anteriormente interfere diretamente na resistência e na durabilidade do concreto. Em geral, os fatores água/cimento utilizados em CAD estão entre 0,20 e 0,40 (ALMEIDA, 1996).

d) Sílica ativa

Existem diversos tipos de adições, porém o uso de adições minerais como cinza volante e escória de alto forno vem aumentando, trazendo benefícios técnicos e econômicos aos concretos.

Com a finalidade de alcançar durabilidade e resistências à compressão cada vez mais altas, tem se utilizado a sílica ativa sozinha ou em combinação com os outros dois tipos mais usados de adições citados acima. Assim, o enfoque dado neste item será para a sílica ativa também conhecida por fumo de sílica condensada, microssílica e sílica amorfa.

d.1) Propriedades físicas e Composição química

As propriedades físicas descritas pelo ACI Committee 226 (1987) são:

- cor: varia de cinza claro a cinza escuro;
- massa específica aparente: varia de 250 a 300 kg/m³, tendo o cimento Portland comum em torno de 1200 kg/m³;
- superfície específica: em torno de 20.000 m²/ kg. Se comparada com a cinza volante (400-700 m²/kg), escória de alto forno (350-600 m²/ kg) e cimento Portland comum (300-400 m²/kg) verifica-se a extrema finura da sílica ativa.

Para que o grau de reatividade da sílica ativa seja adequado, o teor mínimo de dióxido de silício que esta deve apresentar é de 85%.

d.2) Efeitos da sílica ativa sobre o concreto

A atuação da sílica ativa no concreto pode se dar de duas formas: atuação física e atuação química.

– Atuação física sobre o concreto

Os efeitos físicos gerados pela sílica ativa que são:

- *efeito microfiller*: Como o diâmetro médio das partículas de sílica ativa, é cerca de cem vezes menor que as partículas de grão de cimento, ocorre um preenchimento dos vazios no concreto pelas minúsculas partículas. Neste caso há um aumento na densidade do concreto.
- *refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação do cimento*: este refinamento, é causado pelas pequenas partículas de sílica ativa que agem como pontos de nucleação para os produtos de hidratação do cimento. Assim, o crescimento dos cristais ocorrerá não somente a partir dos grão de cimento mas também nos poros ocupados pela sílica ativa , gerando um grande número de pequenos cristais ao invés de poucos cristais de grande tamanho (DAL MOLIN ,1995);

- *alteração da microestrutura da zona de transição:* A sílica ativa também se posiciona ao redor dos agregados, interferindo na movimentação da água ao redor deste, podendo até eliminar esse acúmulo de água livre (reduz exsudação). Além disso, a sílica ativa preenche os espaços deixados pelas partículas de cimento próximas aos agregados e também interfere no crescimento dos cristais (reduz concentração e orientação dos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Todos estes fatores contribuem para uma melhora significativa da zona de transição.

- **Atuação química sobre o concreto (efeito pozolânico):**

As partículas amorfas de sílica ativa apresentam uma área superficial extremamente alta e reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, formando silicatos de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, que é o produto responsável pela resistência da pasta de cimento hidratado.

Nas figuras 17 e 18, respectivamente, apresenta-se um esquema da atuação da sílica ativa na interface agregado-pasta e uma verificação quantitativa relacionando a porosidade com a distância da interface quando da sua introdução no concreto.

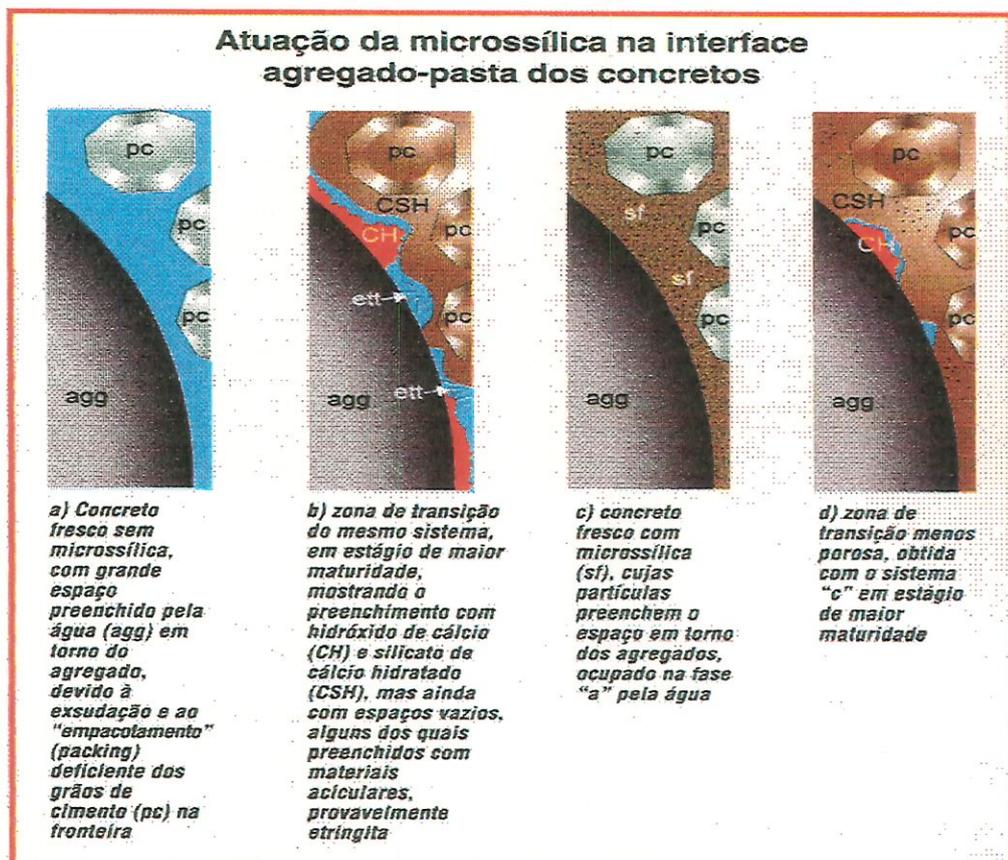


Figura 17- Atuação da sílica ativa na interface pasta-agregado (ALMEIDA (1996)).

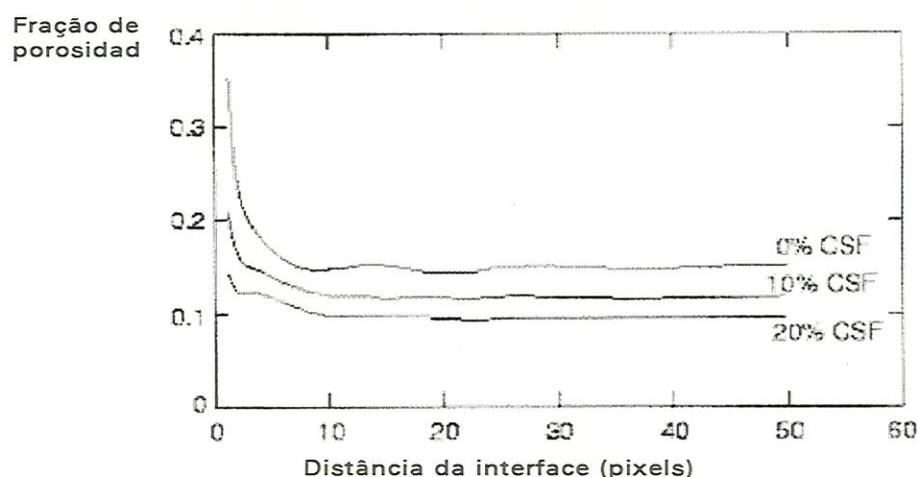


Figura 18- Verificação quantitativa relacionando a porosidade com a distância da interface quando da introdução da sílica ativa (<http://ciks.cbt.nist.gov/gabocz/paper29/>).

e) Aditivos químicos

Como o CAD apresenta uma grande quantidade de finos em sua composição, é imprescindível a utilização de aditivos redutores de água que possibilitem uma trabalhabilidade adequada, sem que para isso aumente a relação água/cimento.

Os requisitos para a aceitação de um aditivo químico, são estabelecidos pela ASTM C 494- 79 e BS 5075: Part 1 (1974).

No caso do CAD, os superplastificantes vem sendo os aditivos mais utilizados, pois apresentam alto poder de redução de água (até 30%). Cabe lembrar, que os aditivos plastificantes também são redutores de água (10% a 15%), porém, DAL MOLIN (1995) alerta que, dosagens elevadas trazem efeitos indesejáveis sobre o tempo de pega, exsudação, segregação e resistência

O superplastificante presente na pasta de cimento, atua na mistura do concreto ou argamassa de diversas formas, sempre contribuindo para minimizar o atrito entre as partículas que compõem o concreto (poder de dispersão de partículas). Esta atuação, permite reduzir grande parte da água de amassamento do concreto, interferindo na porosidade tanto da fase pasta quanto da fase pasta- agregado, fortalecendo as duas regiões. Como consequência direta, o material adquire resistência e durabilidade (ALMEIDA, 1996). Um exemplo de atuação do superplastificante na pasta de cimento é apresentada na figura 19.

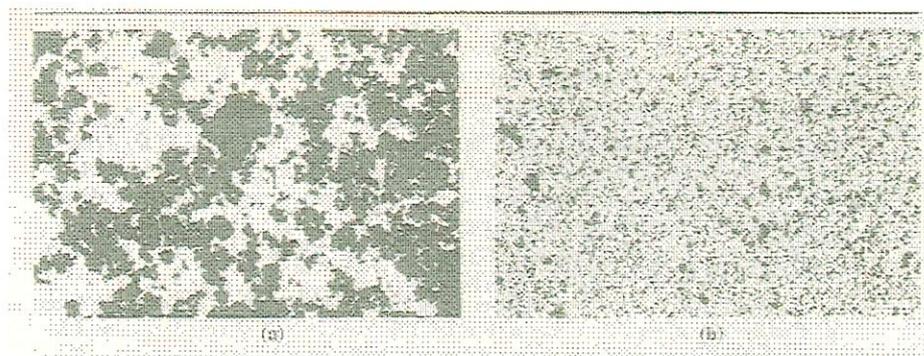


Figura 19 Micrografia de duas pasta de cimento Portland com mesma relação a/c onde a) não possui superplastificante e b) possui aditivo superplastificante

Ao utilizar superplastificantes, deve-se tomar alguns cuidados e levar em consideração alguns aspectos citados por DAL MOLIN (1995), NEVILLE (1992) e METHA & MONTEIRO (1994), como:

- consistência: A faixa de consistência que determina a trabalhabilidade em CAD com superplastificante, se mantém por um período de 30 a 60 minutos . Durante este período, ocorre uma perda da consistência inicial com o tempo, numa taxa relativamente mais alta que em concretos convencionais, permanecendo a trabalhabilidade máxima por um período de 10 a 15 minutos, dependendo do tipo de aditivo, dosagem, temperatura e procedimento de mistura;
- tipo de superplastificante: existem diversos tipos de superplastificantes inseridos em quatro categorias: condensados de formaldeído melanina sulfonados (SMF), condensados de formaldeído naftaleno sulfonados (SNF), lignosulfonatos modificados (MLS) e outros. Os dois primeiros tipos são os mais utilizados e além de apresentarem comportamentos diferentes sobre o concreto, um mesmo tipo de aditivo pode apresentar variações devido ao tipo de cátion associado com o superplastificante e seu peso molecular (quanto maior peso molecular maior a capacidade de dispersão das partículas).
- tipo de cimento: Todos os tipos de cimentos Portland, apresentam um aumento de trabalhabilidade com adição de superplastificante. No entanto, a eficiência para cada um deles não é a mesma. Além disso, é interessante que se teste para cada marca de superplastificante (do mesmo tipo) aquele que apresenta maior eficiência.

2.4.1.3- A cura no Concreto de Alto Desempenho

A cura tem sido mais importante para concretos com adições minerais (escória de alto forno, cinza volante e sílica ativa), que para concretos com cimento Portland comum.

RAMEZANIANPOUR & MALHOTRA (1996), investigaram o desempenho de seis misturas de concreto contendo aditivos minerais em quatro regimes de cura. As misturas designadas foram: mistura de controle (sem adição mineral), misturas com 25 e 50% de escória, misturas com 25 e 58% de cinza volante e mistura com 10% de sílica ativa em substituição ao cimento. Todas as misturas tiveram relação a/c de 0,50. As quatro condições de cura foram:

- condição de cura 1- cura úmida;
- condição de cura 2- cura em temperatura ambiente;
- condição de cura 3- cura em temperatura ambiente após dois dias de cura úmida;
- condição de cura 4- cura em 38 °C e 65% de umidade relativa;

Com este trabalho, verificou-se que uma cura úmida e contínua do concreto (cura 1), apresentou, para todas as misturas, a mais alta resistência quando comparados aos outros tipos.

Para os concretos onde não se fez a cura logo após a desmoldagem (cura 2) o desenvolvimento de resistência foi pobre. No entanto, concretos curados somente por dois dias em câmara úmida (cura 3) apresentaram significativo aumento de resistência quando comparado com aquele sem nenhum tipo de cura adotado.

Além dos quatro tipos de cura apresentados, é freqüentemente utilizada a cura acelerada (a vapor) onde, além de se evitar a saída da água de amassamento do concreto através de evaporação, é inserido um aumento de temperatura (LIBÓRIO & BRAZ DE MELO, 1998).

Neste caso, BRAZ DE MELO (1996) e CAO & DETWILER (1995), realizando avaliações da microestrutura da pasta de cimento Portland, verificaram que a elevação de temperatura, comparando com concretos em cura úmida normal, resultou em produtos de hidratação desuniformes e com maior quantidade de poros interconectados, afetando a resistência do concreto. O uso de escória, cinza volante e sílica ativa vem diminuir esses efeitos negativos da cura térmica.

2.4.2- Conseqüências da utilização de aditivos químicos (superplastificantes) e aditivos minerais na resistência e durabilidade dos concretos

Anteriormente foram apresentadas a atuação dos aditivos superplastificantes e da sílica ativa sobre o concreto. A seguir apresenta-se a conseqüência desses aditivos e adições sobre as propriedades do concreto separadamente em termos de resistência e durabilidade.

a) Conseqüências sobre o concreto no estado endurecido

a.1) Resistência à compressão beneficiada

Existe um consenso entre diversos autores sobre a melhora significativa da resistência à compressão do concreto, quando adicionada a sílica ativa juntamente com o superplastificante, apresentando resultados superiores à outros materiais cimentícios como a cinza volante e a escória de alto forno.

Neste aspecto, SIRIVIVATNANON & GROSS (1995) realizaram um estudo onde se comparou misturas de concreto com cimento Portland comum com misturas com adições minerais (escória, cinza volante e sílica ativa). Os resultados indicaram que concretos utilizando cimento Portland comum com sílica ativa, tiveram sua trabalhabilidade diminuída, mas sua propriedade resistência mecânica aumentou consideravelmente, inclusive quando comparadas àquelas misturas de cimento combinadas a outros tipos de adições (escória e cinza volante).

a.2) Resistência à tração

Não existe um consenso em relação ao comportamento dos concreto com adições de sílica ativa quando submetidos à tração. ALMEIDA (1996) comenta que a resistência à tração na flexão é beneficiada atingindo valores de até 14 MPa.

DAL MOLIN (1995) explica que a resistência à tração do concreto, com uma zona de transição com menor porosidade (efeito microfiller da sílica) continuará a ser fraca enquanto um grande número de cristais orientados de Ca(OH)_2 estiverem presentes, significando que o aumento de resistência à compressão, decorrente do efeito microfiller, não irá corresponder à um aumento proporcional na resistência à tração. Esse aumento de resistência à tração, só se dará quando ocorrerem as reações pozolânicas da sílica, com conseqüente redução do tamanho dos cristais de Ca(OH)_2 na zona de transição. Daí a grande importância de uma cura adequada.

a.3) Módulo de elasticidade

Os altos níveis de resistência à compressão, não se reproduzem com a mesma intensidade nos valores de módulo de deformação do CAD., sendo o agregado utilizado o fator limitante desta propriedade.

Em concretos de alto desempenho, além das propriedades citadas, tem-se (ALMEIDA,1996):

- o coeficiente de Poison, como nos concretos convencionais se mantém em 0,2;
- a fluência é extremamente reduzida chegando a ser 1/5 do concreto convencional (grande importância para o cálculo estrutural);
- a aderência entre armadura e concreto é grande , pois uma espécie de zona de transição, semelhante a que ocorre entre pasta e agregado, é diminuída;
- a resistência à abrasão chega a ser dez vezes maior que em concretos convencionais.

b) Conseqüências na durabilidade

Verifica-se a seguir o desempenho do concreto com adição de sílica ativa e superplastificante, frente ao desencadeamento de alguns processos de degradação.

b.1) Corrosão da armadura

A carbonatação e o ingresso de íons cloreto no concreto, são os principais agentes iniciadores da corrosão da armadura, sendo as fissuras, as condições de cura, a relação água/cimento, a agressividade do meio e a umidade, os fatores que determinam a velocidade e profundidade da frente de carbonatação e o alcance dos íons cloreto. Assim:

- efeitos da sílica ativa na carbonatação

Existem contradições no que diz respeito ao efeito da sílica ativa na carbonatação.

Pesquisadores da UFRGS (1994), descrevem que ao se utilizar a sílica, a *profundidade* de carbonatação no CAD, foi igual ou superior àquela apresentada pelos concretos convencionais. CARETTE & MALHOTRA (1993) *apud* DAL MOLIN (1995), apresentam valores onde a diferença de profundidade de carbonatação, entre o concreto de referência e aquele com sílica ativa (10%), só são observados a partir da utilização de uma relação água/ (cimento + sílica ativa) maior que 0,4. Assim o controle dessa relação água/cimento é de suma importância.

Quando é adicionada a sílica ativa no concreto, o pH do líquido presente nos poros diminui, facilitando a velocidade de carbonatação. Por outro lado, a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a porosidade e a permeabilidade do CAD é menor que dos concretos sem adição, fazendo com que a penetração do CO_2 seja retardada (HELENE, 1993).

– efeitos da sílica ativa na penetração de íon cloreto

Como o pH do concreto com sílica é um pouco inferior ao concreto sem sílica, é de se esperar que a tolerância à íons cloreto também diminua. No entanto, diversos pesquisadores como PIEON et al (1993) apresenta que concretos e argamassas com sílica ativa (10%) tiveram uma redução de até 65% de profundidade de penetração em relação a um concreto de referência.

b.2) Efeito da sílica ativa na resistência ao ataque de sulfatos e ácido sulfúrico

As reações deletérias como ataque por sulfatos e ácido sulfúrico, podem ocorrer no interior do reator anaeróbio.

Neste caso, HOOTN (1993), TORII & KAWAMURA (1994), TURKER & YUZER (1995) apresentaram resultados animadores quando da introdução de sílica ativa nos concretos imersos em solução com 5% de sulfato e em solução com 2% de ácido sulfúrico.

A mistura com 10% de sílica, se mostrou a mais eficiente na prevenção contra o ataque de ácido sulfúrico. As matrizes com porcentagens de sílica acima de 10%, não apresentaram aumento significativo de resistência.

2.4.3- Aplicação do CAD em peças estruturais pré- moldadas

Além da falta de conhecimento dos materiais e sua durabilidade, uma elevada percentagem das manifestações patológicas tem origem em falhas de execução (28%) e projeto (40%) (HELENE, 1992).

Essa situação se agrava quando o CAD, contendo sílica ativa, é utilizado na prática, necessitando de cuidados bastante precisos com projetos (concebidos especificamente) e execução na obra.

Uma forma de conciliar o projeto, os materiais e a execução utilizando o Concreto de Alto Desempenho, é tomar partido das vantagens trazidas pela pré- moldagem de elementos estruturais. Alguns parâmetros que tornam interessante a utilização do CAD em peças estruturais pré moldadas, segundo PEREIRA (1995) são:

- quando se utiliza a pré- moldagem, a reutilização de fôrmas é mais rápida; já que é possível confeccionar concretos que atinjam resistência suficiente para a desmoldagem em pequenas idades;
- todos os materiais envolvidos para a confecção do elemento estrutural podem ser controlados na pré- moldagem estabelecendo-se a máxima potencialidade dos produtos gerados;
- a pré- moldagem em si possibilita o controle rigoroso em todas as etapas de execução propiciando maior durabilidade devido prevenção de falhas durante execução.

Existem os elementos pré- moldados de canteiro (elementos feitos no pé da obra sem necessidade de transporte das peças) e pré-moldados de fábrica. No caso do pré moldado de fábrica este é dividido em três fases:

- atividades preliminares: preparação e transporte dos materiais;
- execução propriamente dita: preparação de fôrmas, lançamento e adensamento do concreto, cura do concreto e desmoldagem;
- atividades posteriores: transporte, acabamentos e armazenamento.

Na fase da execução de pré- moldados, existem três tipos de processo que podem ser utilizados (KONCZ, 1975):

- fabricação fixa: toda a execução se desenvolve em torno das fôrmas que permanecem na mesma posição;
- fabricação móvel: ocorre movimentação da fôrma;
- fabricação em linha- feita através de uma pista de concretagem, sendo produzidos seqüencialmente.

Para a execução da pré- moldagem, as fôrmas são de fundamental importância, pois elas determinam a qualidade do produto final e a produtividade do processo (EL DEBS, 1996). As qualidades desejáveis para estas fôrmas, apresentadas por KONCZ (1975) são: estabilidade volumétrica; possibilidade de grande numero de reutilizações; fácil manejo; pouca aderência; estanqueidade; versatilidade e facilidade de desmoldagem A seguir apresenta-se as características das fôrmas em função do material.

Tabela 11- Características das fôrmas em função do material (KONCZ ,1975):

CARACTERÍSTICAS	AÇO	MADEIRA	CONCRETO	PLÁSTICO
Estabilidade volumétrica	Boa	Menor	Boa	Boa
Manuseio	bom	Bom	Menor	Boa
Possibilidades. de transformação	Boa	Boa	Ruim	Ruim
aderência	Boa	Menor	Menor	Boa
Facilidade de transporte	Boa	Boa	Ruim	Boa

Para a execução dos elementos pré- moldados, deve-se prever nas fôrmas inclinação de nervuras, evitar cantos vivos, bordas especiais e cantos agudos.

No intuito de tornar as peças pré-moldadas de concreto, o mais compacto possível, é imprescindível um lançamento e adensamento adequados. Este último pode ser feito utilizando vibração interna (vibradores de agulha), vibração externa (vibradores fixados aos moldes) e vibração com régua superficial (BRAZ DE MELO ,1996).

Além do lançamento e adensamento, a cura é essencial para que um concreto possa desenvolver plenamente as propriedades que lhe conferem características de resistência e durabilidade. Os tipos de cura freqüentemente utilizados são:

- cura por aspersão: manter úmida as superfícies expostas;
- cura por imersão: colocação dos elementos em tanques d'água;
- cura térmica a vapor: aumenta temperatura;
- cura com película impermeabilizante; aplicação de pintura que impeça saída de água;

Um aspecto importante para a execução de elementos pré moldados é a liberação da fôrma o mais rápido possível, reduzindo o chamado "tempo morto". Assim, uma das formas de acelerar o endurecimento do concreto e atingir mais rapidamente a resistência para desmoldagem (em torno de 10 MPa) é realizar a escolha e o proporcionamento de materiais de forma adequada, utilizar aditivos e aumentar a temperatura de cura para acelerar as reações químicas (BRAZ DE MELO, 1996 e EL DEBS, 1996)

CAPITULO 3- Estudo dos materiais a serem utilizados na estrutura do reator anaeróbio UASB

Introdução

Os problemas de durabilidade são, geralmente, causados pela falta de conhecimento dos ambientes a que ficarão expostas as estruturas, especificações inadequadas de materiais e construção não executada de acordo com as normas técnicas. Partindo do pressuposto que a construção seja executada de maneira adequada, pode-se dizer que, numa estrutura de concreto, tem-se por um lado, a ação do meio ambiente e, por outro, o concreto suportando essas ações.

Desta forma, apresenta-se, primeiramente, o estudo de materiais propriamente ditos, onde os ensaios visam a análise das argamassas e concretos (agregados de $D_{\text{máx}} \leq 9,5\text{mm}$), para a aplicação em elementos estruturais pré-moldados, a serem idealizados e implementados em reatores anaeróbios tipo UASB.

Em seguida, avalia-se a agressividade da água no interior do reator, verificando os possíveis efeitos deletérios desencadeados no concreto, e as expectativas de durabilidade das misturas estudadas.

3.1- Metodologia para a caracterização dos materiais

A metodologia adotada para a caracterização dos materiais, não descreve detalhadamente os ensaios executados e sim as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) utilizadas.

3.1.1- Agregados

3.1.1.1- Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado é de origem quartzosa, oriunda do Rio Mogi Guaçu (região de São Carlos).

As amostras representativas desse agregado, para execução dos ensaios descritos a seguir, foram obtidas de acordo com as recomendações da norma NBR-7216.

- *ensaio de qualidade*: a qualidade do agregado é determinada de acordo com a norma NBR 7221, que prescreve o método comparativo de resistência à compressão de argamassas elaboradas com a areia de estudo e com areia de comparação;
- *umidade por secamento*: A areia utilizada é seca a sombra, tendo uma umidade natural que depende da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente. Este ensaio é realizado segundo recomendações da norma NBR 7214;
- *umidade superficial pelo frasco de Chapman*: este ensaio é realizado segundo a norma NBR 9775/1987, onde a umidade superficial se refere à água aderente à superfície dos grãos, sendo expressa em porcentagem da massa do agregado úmido em relação à massa do agregado seco;
- *massa unitária*: para a determinação da massa unitária, definida como o quociente entre a massa do agregado seco compactado e o seu volume, utiliza-se a norma NBR 7810;
- *massa específica*: este ensaio é feito segundo determinações da norma NBR 9776, onde a massa específica é a relação entre a massa de agregado seco e seu volume, incluindo os vazios (sem compactação do material);
- *teor de materiais pulverulentos*: A determinação do teor de materiais pulverulentos, é realizada de acordo com a norma NBR 7219;
- *teor de argila em torrões*: para a determinação aproximada do teor de argila em torrões, utiliza-se a norma NBR 7218;
- *composição granulométrica*: a composição granulométrica da areia é obtida de acordo com a norma NBR- 7217, onde se determina o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado.

Para o agregado miúdo, não é apresentada a curva de inchamento, pois os traços das argamassas e concretos são elaborados em massa e não em volume.

3.1.1.2- Agregado graúdo com diâmetro máximo de 9,5 mm (pedrisco)

O agregado graúdo utilizado, é de origem basáltica possuindo diâmetro máximo de 9,5 mm, para que sejam compatíveis com a produção de elementos pré- moldados de pequenas espessuras. Os ensaios realizados com esse agregado foram:

- *composição granulométrica*: Este ensaio, segue as recomendações da norma NBR 7217, onde se determina o módulo de finura e a dimensão máxima do agregado;
- *determinação da massa unitária*: A massa unitária do pedrisco é determinada de acordo com as recomendações da norma NBR 7810;
- *determinação da massa específica*: Para este ensaio, utilizou- se o frasco de Chapman, de acordo com a norma NBR 9776.

3.1.1.3- Composição agregado graúdo com agregado miúdo: Determinação do menor índice de vazios

Como o objetivo de acrescentar o pedrisco, é melhorar o comportamento das argamassas, no que se refere à resistência mecânica e durabilidade, realizou- se o ensaio para obter o menor índice de vazios entre os agregados (pedrisco e areia), que segue os seguintes passos:

- corrigir a curva granulométrica do pedrisco, colocando a composição de agregados (pedrisco e areia) na faixa definida pela zona 4 (areia grossa);
- obter proporções ideais de areia e pedrisco, de modo a diminuir o consumo de pasta de cimento.

A determinação do menor índice de vazios, baseia- se na massa unitária e massa específica da composição dos agregados (normas citadas anteriormente), sendo definido como a relação entre a porcentagem de vazios e porcentagem de cheios, onde:

$$\% \text{ Cheios} = (\text{massa unitária} / \text{massa específica}) \times 100$$

$$\% \text{ Vazios} = 100 - \% \text{ Cheios}$$

Então:

$$IV = (100 / \% \text{ Cheios}) - 1$$

3.1.2- Cimentos Portland

Os tipos de cimento Portland adotados são:

- CPV ARI PLUS: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial;
- CPV ARI RS: Cimento Portland de Alta Resistência Inicial com Resistência a Sulfato e com adição de escória;
- CPII E 32: Cimento Portland com adição de escória.

Os ensaios realizados com os tipos de cimento citados, foram:

- *resistência à compressão*: a fim de se avaliar a qualidade dos cimentos utilizados, verificou-se as especificações de resistência mecânica conforme recomendações da norma NBR 7215;
- *início e fim de pega*: os ensaios para determinar o início e fim de pega dos cimentos foram realizados de acordo com a MB- 3434.

As análises químicas, a determinação da finura, a área específica Blaine e ensaios de perda ao fogo foram fornecidos pelos fabricantes de cimento.

3.1.3- Água de amassamento

A qualidade da água de amassamento utilizada deve ser controlada realizando para isso ensaios de qualidade e teores de substâncias agressivas. Neste aspecto, como a água de amassamento é proveniente de abastecimento público, é dispensada a realização de tais ensaios.

3.1.4- Aditivo

O aditivo utilizado, para determinados traços de argamassa e concreto, é o SIKAMENT 300, que atende às especificações do ASTM- C- 494 tipo F.

Trata-se de um aditivo superplastificante, de pega normal com altíssimo efeito redutor, sendo recomendado, principalmente, para concretos de alta resistência inicial.

Este aditivo, segundo o fabricante, confere ao concreto melhoria substancial na trabalhabilidade, na densidade, na compacidade (aumentando impermeabilidade). Além disso, não apresenta efeito retardador e permite a redução da água de amassamento em até 25%(depende da dosagem, traço e tipos de cimento).

As dosagens recomendadas para o uso desse superplastificante, varia de 0,6% a 2,0%, podendo ser adicionada diretamente no concreto e/ou argamassa, ou misturada na água de amassamento.

3.2- Resultados obtidos com o ensaio de caracterização dos materiais

3.2.1- Agregados

3.2.1.1- Agregado miúdo

TABELA 12- Resultado dos ensaios com agregado miúdo

ENSAIO	RESULTADO
ensaio de qualidade	boa qualidade.
determinação da umidade por secamento	$h = 2,35\%$
determinação umidade superficial (frasco de Chapman)	$h_s = 0,65\%$
determinação da massa unitária	1,51 kg/l
determinação da massa específica	2,604 g/cm ³
determinação do teor de materiais pulverulentos	1.1 %
determinação do teor de argila em torrões	0.5 %

– Composição granulométrica da areia- figura 20.

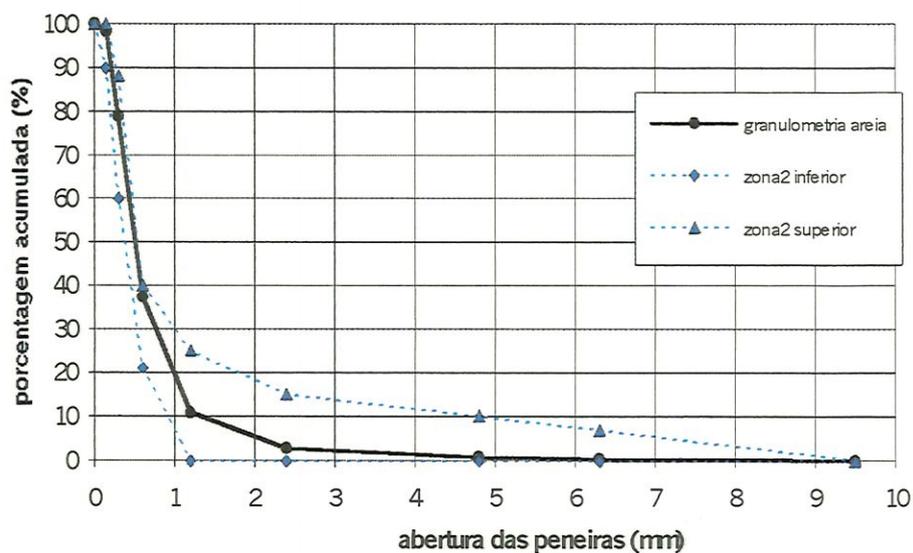


Figura 20- Curva granulométrica da areia

módulo de finura = 2.29

dimensão máxima = 2.40 mm

3.2.1.2- Resultados obtidos com o agregado graúdo

a) Determinação da massa unitária e específica

A massa unitária e da massa específica do pedrisco resultaram em:

- massa unitária = 1,37kg/l
- massa específica = 2,88g/cm³

b) Curva granulométrica do pedrisco

Apresenta-se na figura 21 a curva granulométrica do pedrisco:

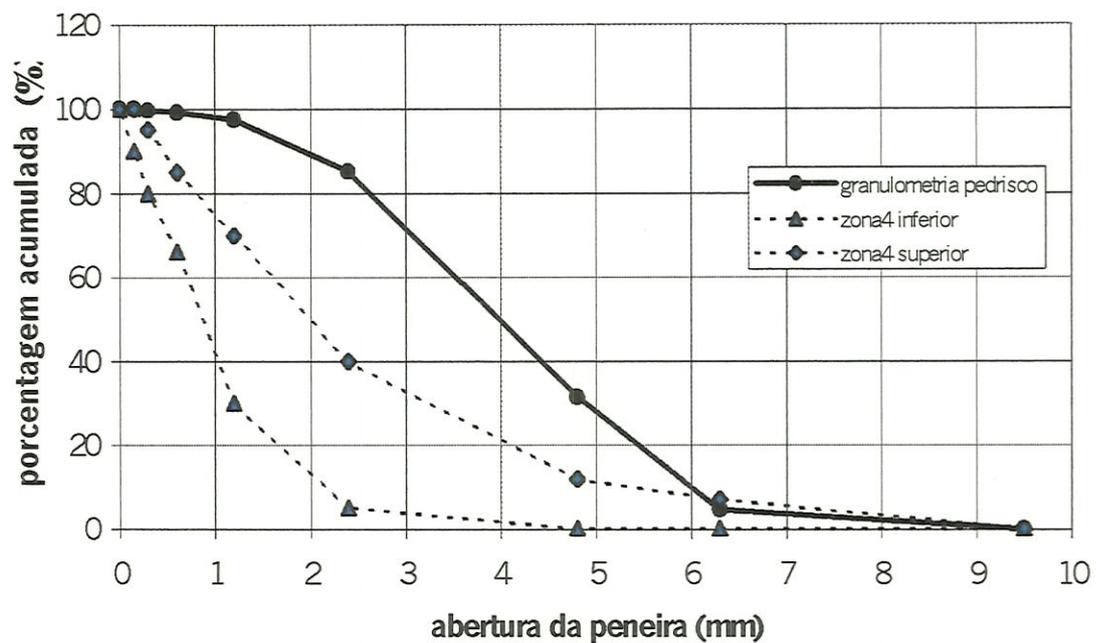


Figura 21- Curva granulométrica do pedrisco

módulo de finura= 5,18

dimensão máxima= 6,3mm

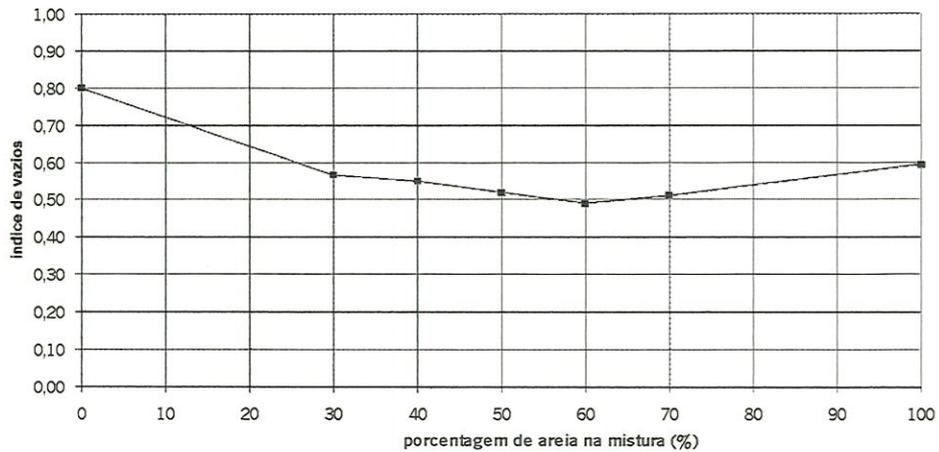
3.2.1.3- Resultados dos ensaios da composição dos agregados

a) Índice de vazios da composição dos agregados graúdos e miúdos

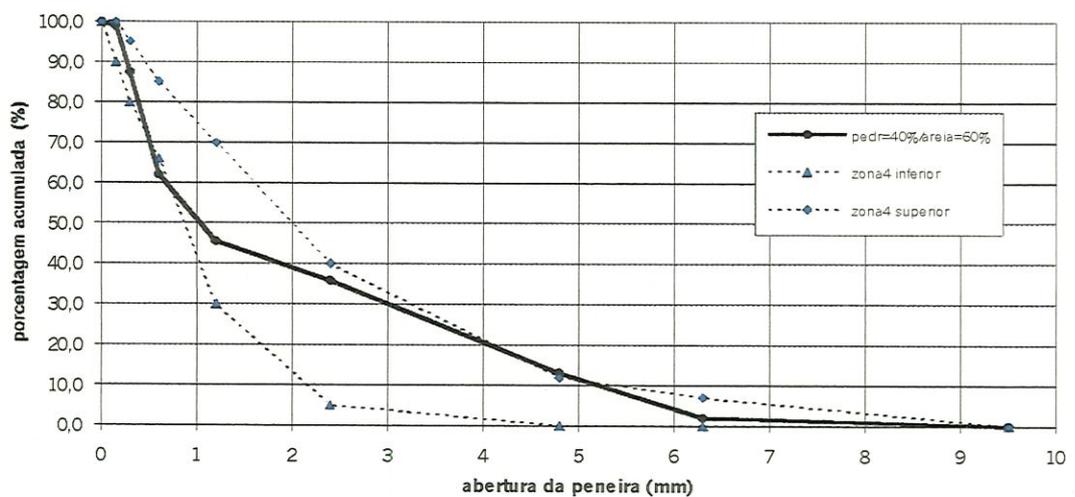
A composição com o menor índice de vazios é aquela onde se tem proporções de 60% areia e 40% pedrisco. Os resultados dessa proporção são (tabela 13 e figura 22):

TABELA 13- Características da composição agregado gráudo/ miúdo

areia (%)	pedrisco (%)	massa unitária (g/cm ³)	massa específica (g/cm ³)	% cheios	% vazios	índice de vazios
60	40	1.82	2.71	67.1	32.9	0.49

**Figura 22- Índice de vazios da composição de agregado gráudo com miúdo****b) Curva Granulométrica da composição agregado gráudo com miúdo**

A figura 23 apresenta a granulometria resultante dentro das faixas limites da zona 4 (areia grossa).

**Figura 23- Curva granulométrica da composição agregado miúdo com gráudo**

3.2.2- Resultados obtidos com os ensaios de cimento Portland

Os resultados dos ensaios, fornecidos pelos fabricantes, para cada tipo de cimento foram (tabela 14):

TABELA 14- Resultado de ensaios de cimento fornecido pelos fabricantes

ENSAIO	CP-II-E 32	CP-V-ARI-PLUS	CP-V-ARI-RS
Perda ao fogo (%)	0.40	2.20	2.31
Blaine(m ² / kg)	314	461	492
Finura-			
Peneira	200	325	325
% retida na peneira	4.12	2.00	1.50
Análises químicas			
Resíduo insolúvel(%)	0.58	0.33	0.73
SO ₃ (%)	1.86	3.05	2.67
MgO (%)	0.96	0.63	2.36
Expansibilidade (mm)	0.50	0.30	0.40

As características específicas de cada cimento são dadas na tabela 15:

TABELA 15: Características de cada tipo de cimento

(%)	CP II E- 32	CP V ARI- PLUS	CP V ARI- RS
CLÍNQUER	64,5%	90,6%	61,4%
ESCÓRIA	23,2%	-	29,7%
CALCAREO	10,0%	3,3%	3,9%
GESSO	2,3%	6,1%	5,0%

Os ensaios de resistência à compressão do cimento e tempos de pega (com e sem uso de superplastificante SIKAMENT 300- 1%), são apresentados nas tabelas 16, 17 e 18.

TABELA 16- Média das resistências à compressão com vários tipos de cimento (MPa)

IDADE DE RUPTURA	CP-II-E 32	CP-V- ARI PLUS	CP-V-ARI-RS
1 dia	----	29.7	14.6
3 dias	22.3	43.4	29.5
7 dias	28.8	47.9	33.4
28 dias	35.5	56.9	40.3

Com relação a resistência à compressão do cimento; conclui-se que as classes de cimento utilizadas na pesquisa foram aprovadas.

Com relação ao tempos de pega do cimento, os ensaios forneceram os resultados apresentados na tabela 17.

TABELA 17-Tempo de pega para pastas sem uso de superplastificante

CIMENTOS	CP-II-E 32	CP-V-ARI-PLUS	CP-V-ARI-RS
temperatura (°C)	20.0	23.0	21.0
umidade relativa (%)	71.0	75.0	83.0
água / cimento	0.268	0.305	0.310
início de pega(min)	200	135	210
fim de pega(min)	305	200	314

TABELA 18- Tempos de pega para pastas com uso do SP - Sikament 300 (1%)

CIMENTOS	CP-II-E 32	CP-V-ARI-PLUS	CP-V-ARI-RS
temperatura (°C)	18.0	23.5	19.5
umidade relativa (%)	60.0	75.0	82.0
água / cimento	0.268	0.305	0.310
início de pega(min)	350	195	310
fim de pega(min)	450	270	460

Verifica-se para todos os tipos de cimento que a utilização do superplastificante retardou o tempo de início e fim de pega, apesar de ser um superplastificante de pega normal.

3.3- Composição dos traços e a caracterização das argamassas e concretos

O procedimento para se obter a proporção mais adequada entre os materiais, pode apresentar efeitos compensadores no custo e nas propriedades apresentadas pelos concretos e argamassas no estado endurecido.

Para a avaliação do custo, este é de certa forma complexo, já que envolvem outros fatores como instalações necessárias para concretagem e mão de obra. No entanto, se for levado em consideração somente o custo do material, deve-se ter em mente que para os concretos e argamassas, o cimento e alguns tipos de adições (ex: sílica ativa) são mais caros que o agregado, devendo-se evitar o uso de altos teores. Além disso, a trabalhabilidade da mistura, pode demandar muita mão de obra, aumentando o custo com pessoal.

Assim, a proporção de materiais visando uma maior economia, sem negligenciar as propriedades de resistência e durabilidade, deve levar em consideração o teor e tipo de material cimentício, a relação água/ cimento e a coesão da mistura.

3.3.1- Escolha dos traços

A dosagem usual para pré- moldados de pequenas espessuras, tem sido a argamassa com maior teor de cimento, onde o consumo chega a 700 Kg/ m^3 . Deste modo, pretende-se apresentar alternativas em termos de dosagem (tabelas 20 e 21).

Para as argamassas, as proporções adotadas foram: 1:2,0, 1:2,5, 1:3,0 e 1:3,5.

Nos concretos os traços estudados foram obtidos substituindo parte do agregado miúdo das argamassas citadas acima, por pedrisco ($D_{\text{máx}}=6,3\text{mm}$). Como essa substituição leva em consideração a proporção de 60% de agregado miúdo e 40% de agregado graúdo (menor índice de vazios), as misturas de concreto tem as seguintes proporções: 1:1,2:0,8, 1:1,5:1,0, 1:1,8:1,2 e 1:2,1:1,4.

3.3.2- Fixação de parâmetros

Para os traços estudados, foram fixados os parâmetros apresentados na tabela 19:

TABELA 19- Parâmetros fixados para o estudo de dosagem

PARÂMETROS	VALOR FIXADO
Índice de Consistência (NBR 7215)	Argamassa K= $180 \pm 10 \text{ mm}$ Concreto K= $220 \pm 10\text{mm}$
Tamanho máximo do agregado	9,5mm
Relação água/ cimento (NBR 1259)	$a/c \leq 0,45$
Consumo máximo de água	250 Kg/ m^3
% Aditivo superplastificante	0 a 2%

Algumas considerações sobre os parâmetros adotados são:

- os índices de consistência adotados ($180 \pm 10\text{mm}$ e $220 \pm 10\text{mm}$), estão relacionados à trabalhabilidade para a moldagem de corpos de prova, podendo ser utilizados para alguns elementos pré- moldados de pequenas espessuras;
- o tamanho do agregado escolhido, considera as características geométricas das partes da estrutura (elementos delgados) e o espaçamento das armaduras;
- o valor fixado para a relação água/ cimento é descrito por diversos autores como sendo o mais apropriado na obtenção de concretos e argamassas duráveis. No

entanto, esbarra-se no problema de trabalhabilidade desses materiais, sendo necessária a utilização de um aditivo que confira às misturas maior plasticidade.

3.3.3- Caracterização das argamassas e concretos no estado fresco

A caracterização dos traços adotados no estado fresco, consiste em determinar o índice de consistência de cada mistura e realizar a moldagem de corpos de prova cilíndricos, visando atender os parâmetros fixados no item 3.3.2.

a) Determinação do índice de consistência:

A determinação do índice de consistência possibilita encontrar a relação água/cimento, o consumo de água e o teor de superplastificante necessários para dar às misturas a trabalhabilidade desejada.

Esse ensaio consiste em:

- fazer as pesagens dos materiais de acordo com o traço estudado, sendo que a quantidade de água introduzida na argamassa ou concreto é obtida através de tentativas;
- preparar a argamassa ou concreto utilizando o misturador mecânico próprio colocando os materiais em tempos determinados. Se for utilizada a sílica ativa na mistura, esta deverá ser misturada com uma certa quantidade de água;
- levar a mistura para a mesa do aparelho de consistência (flow table), onde é realizado o ensaio propriamente dito;
- se o índice de consistência não atingir os parâmetros pré estabelecidos, citados anteriormente, o ensaio é repetido alterando-se a quantidade de água e/ ou superplastificante, até que se encontre o valor desejado.

Os resultados dos índices de consistência para os traços estudados, são apresentados nas tabelas 20 e 21.

TABELA 20- Consistência, consumo de cimento, de água e de superplastificante para os diferentes traços e tipos de cimento utilizados para as ARGAMASSAS

CIMENTO (TIPO)	TRAÇO				CONSISTEN CIA (mm)	T (°C)	UR (%)	CONSUMO O CIMENT O (Kg/m ³)	CONSUMO DE ÁGUA (l/m ³)	CONSUMO DE SP (l/m ³)
	C	A	A/C	SP						
CPIIE32	1	2.0	0.375		180	11.5	78.5	694.1	256.6	
	1	2.5	0.450		176	13.6	84.5	578.4	260.3	
	1	3.0	0.470	1%	182	23.0	53.0	515.6	237.2	4.30
	1	3.5	0.550	1%	175	21.8	54.0	452.1	244.1	3.77
CPVARI RS	1	2.0	0.395		179	24.0	53.0	674.9	266.6	
	1	2.5	0.450		183	24.0	53.0	578.4	260.3	
	1	3.0	0.470	1%	179	23.0	45.0	515.6	237.2	4.30
	1	3.5	0.550	1%	182	22.0	43.0	452.1	244.1	3.77
CPVARI PLUS	1	2.0	0.375		180	19.0	81.0	684.1	256.6	
	1	2.5	0.440		180	23.0	75.0	581.7	256.0	
	1	3.0	0.455	1%	182	20.0	90.0	519.6	231.2	4.30
	1	3.5	0.540	1%	183	20.0	91.0	454.1	240.7	3.77

Onde: C- cimento; A- areia; a/c- relação água cimento; sp- superplastificante

TABELA 21- Consistência, consumo de cimento, de água e de superplastificante para os diferentes traços e tipos de cimento utilizados para os CONCRETOS

CIMENTO (TIPO)	TRAÇO					CONSISTEN CIA (mm)	T (°C)	UR (%)	CONSUMO CIMENTO (Kg/m ³)	CONSUMO DE ÁGUA (l/m ³)	CONSUMO DE SP (l/m ³)
	C	A	P	a/c	sp						
CPIIE 32	1	1.2	0.8	0.295	0.01	233	20.0	81.	740.7	211.1	6.17
	1	1.5	1.0	0.335	0.01	217	21.5	82	634.9	206.4	5.29
	1	1.8	1.2	0.390	0.01	222	22.0	74	551.0	209.4	4.59
	1	2.1	1.4	0.450	0.01	210	29.0	***	485.5	213.6	4.05
CPV- ARI RS	1	1.2	0.8	0.330	0.01	218	24.0	75.	722.0	231.0	6.02
	1	1.5	1.0	0.370	0.01	215	27.0	63	621.1	223.6	5.18
	1	1.8	1.2	0.400	0.01	213	27.5	57	548.0	213.7	4.57
	1	2.1	1.4	0.445	0.01	231	22.0	82	486.7	211.7	4.06
CPV ARI PLUS	1	1.2	0.8	0.330	0.01	221	26.0	69	722.0	231.0	6.02
	1	1.5	1.0	0.370	0.01	212.5	23.5	91	621.1	223.6	5.18
	1	1.8	1.2	0.400	0.01	217.5	24.0	68	548.0	213.7	4.57
	1	2.1	1.4	0.440	0.01	220	24.5	76	487.9	209.8	4.07

Onde: C- cimento; A- areia; P- pedrisco; a/c- relação água/cimento; sp- superplastificante

b) Moldagem dos corpos de prova cilíndricos

Para a avaliação das propriedades de cada mistura no estado endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos, onde a preparação das argamassas e dos concretos, foi realizada conforme descrição do ensaio para determinação do índice de consistência.

3.3.4- Condições de cura

A cura é, possivelmente, a operação mais importante para a execução de elementos de concreto, devido a influência decisiva sobre o desenvolvimento de resistência mecânica e demais propriedades.

Para todas as misturas em estudo, foram adotados dois métodos de cura, sendo elas: a cura normal e a cura térmica.

3.3.4.1- Cura Normal

Após moldagem, os corpos de prova destinados à cura normal, submeteram-se às seguintes etapas:

- são cobertos imediatamente com pequenas chapas de vidros, evitando evaporação da água de amassamento;
- seguido o período de 24 horas, os corpos de prova foram retirados dos moldes e colocados nas prateleiras da câmara úmida (umidade relativa superior a 95% e a temperatura no interior de $23 \pm 2^\circ\text{C}$), permanecendo até idade para ensaios de resistência mecânica (1, 3, 7, 28 e 91 dias).

3.3.4.2- Cura térmica

A cura térmica é adotada, pois permite menor tempo para desmoldagem de peças pré-moldadas e conseqüentemente um menor tempo de ocupação das fôrmas. Entretanto, apesar deste tipo de cura proporcionar vantagens relativas ao processo produtivo, existe uma preocupação com a qualidade final dos concretos e argamassas, principalmente, quando utilizados na execução de elementos de pequenas espessuras.

Assim, procura-se estabelecer uma correlação de qualidade desses materiais, comparando as argamassas e os concretos sob cura normal com aqueles sob cura térmica.

A cura térmica, é realizada com o auxílio de uma câmara com dispositivos geradores de vapor, onde para cada mistura é determinado o seu tempo de permanência e temperatura (ciclos de cura térmica).

a) A câmara de cura térmica.

Os dados técnicos sobre a câmara de cura térmica são:

TABELA 22- Dados técnicos sobre a câmara de cura térmica

DADOS TÉCNICOS	
Dimensões	SEÇÃO TRANSVERSAL: 0,6M X 0,9M COMPRIMENTO: 3,65M
Material	Chapas de aço pintadas com epoxi
Revestimento	Chapas externas de poliestireno
Gerador de Vapor SODRAMAR	Capacidade: 40 m ³ Potência: 24 KW Temperatura máxima: 90°C

A câmara de cura térmica também é equipada com:

- 2 ventoinhas para uniformizar e distribuir a temperatura interna ao longo da câmara;
- 6 termistores conectados a uma estação de controle de temperatura para verificar a média da temperatura no interior da câmara;
- 1 termômetro de referência (TR) para controlar o ciclo de cura térmica, ou seja, controlar o aumento de temperatura (6°C a cada 16 minutos) , a sua permanência desta num patamar determinado e o seu decréscimo (6°C a cada 8 minutos).

b) Determinação do ciclo de cura térmica

No processo de cura térmica, são estabelecidos ciclos para que os corpos de prova atinjam resistência à compressão axial que possibilite sua desmoldagem rápida ($f_{cj} > 10\text{MPa}$).

O ciclo de cura térmica ,para cada traço, é dividido em:

- *pré- cura*: período de tempo para que se inicie a pega do concreto ou argamassa, de acordo com o cimento utilizado.
- *início da cura térmica*: Após o período de pré- cura os corpos de prova (30 corpos de prova por traço), são colocados na câmara e submetidos a um aumento de temperatura de 6°C a cada 16 minutos através do gerador de vapor, até atingir o patamar de temperatura desejada.

- *patamar atingido*: De acordo com o tipo de cimento, dosagem e resistência mecânica desejada, a temperatura e tempo de patamar variam ($52\pm 1^\circ\text{C}$, $58\pm 1^\circ\text{C}$, $61\pm 1^\circ\text{C}$, $70\pm 1^\circ\text{C}$);
- *redução da temperatura*: Após atingir temperatura e passar o tempo de patamar é realizada a redução de temperatura 6°C a cada 8 minutos.

Dois exemplos típicos de ciclos de cura térmica são apresentados nas figuras 24 e 25 respectivamente:

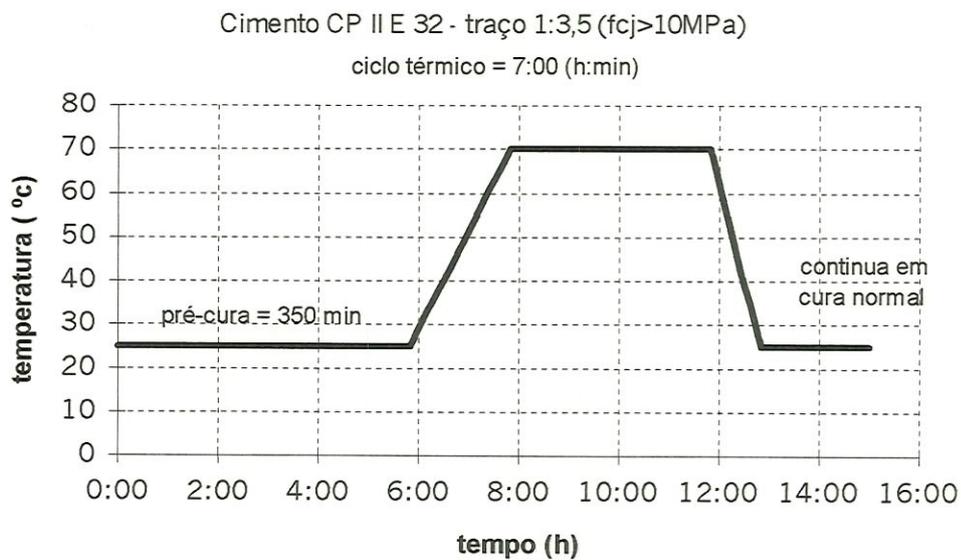


Figura 24 - Ciclo de típico de Cura Térmica (VPA):(BRAZ DE MELO , 1996)

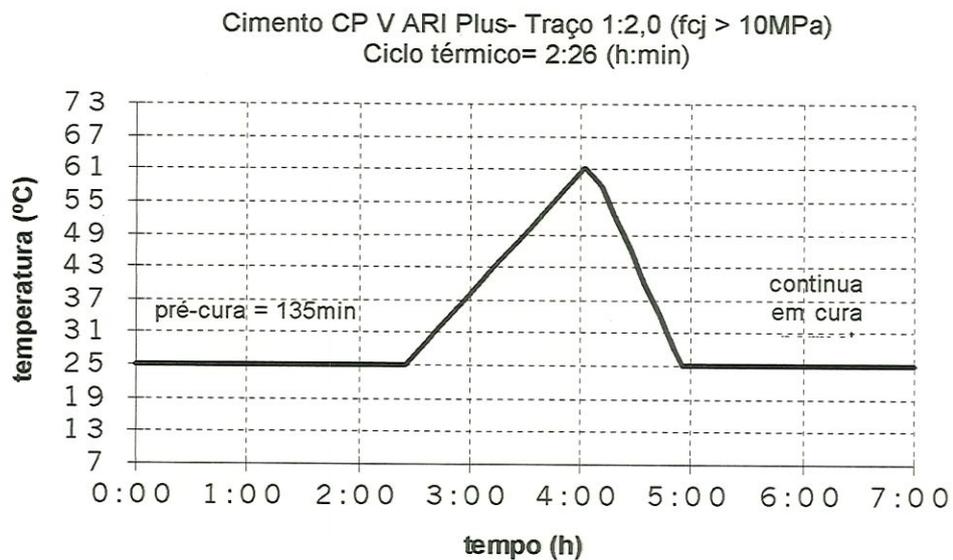


Figura 25 - Exemplo típico do menor ciclo de Cura Térmica (VPA)- BRAZ DE MELO (1996)

Após cada ciclo de cura térmica, 6 dos 30 corpos de prova moldados (para cada traço), são capeados com enxofre e submetidos imediatamente a ensaios de resistência à compressão axial. Os corpos de prova restantes, são colocados na câmara úmida até idade de ruptura (3, 7, 28 e 91 dias).

3.3.5- Caracterização das argamassas e concretos no estado endurecido

Para a caracterização dos concretos e argamassas no estado endurecido, realizaram-se os ensaios de resistência a compressão axial. Além disso, tem-se como complementação de avaliação mecânica, valores de módulo de deformação e porosidade teórica encontrados por BRAZ DE MELO (1996), quando do estudo de cura térmica realizada para as mesmas misturas.

a) Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é determinada de acordo com a descrição da norma NBR7215 (MB-1), utilizando a prensa AMSLER (100 D66)- Suíça, com escalas para 5tf, 10tf, 50 tf e 100tf.

Para a depuração dos dados, foi utilizado o critério de “Chauvenet”, onde numa série de medidas, se a probabilidade de ocorrência de um desvio de valor “x” é menor $1/2n$ (n- número de corpos de prova), então deve-se rejeitar tal medida.

b) Módulo de Elasticidade

O conhecimento do módulo de elasticidade é fundamental na análise das deformações elásticas das estruturas de concreto, sendo uma medida de resistência a este tipo de deformação.

A NBR 8522 apresenta três tipos de medida de módulo de elasticidade e os planos de carga correspondente à ele:

- *tangente inicial na origem*: plano de carga I;
- *tangente inicial em um ponto genérico*: plano de carga II;
- *secante no primeiro carregamento*: plano de carga III;

Os planos de carga I e II caracterizam a deformabilidade do concreto. Porém, o plano de carga II é utilizado na simulação de uma estrutura cuja carga acidental é grande em relação à carga permanente.

- *compostos não resistentes*: estes dizem respeito à porosidade propriamente dita e são representados por volumes de poros, volume de água livre e ar aprisionado (valor estimado).

3.4- Resultados da caracterização das argamassas e concretos no estado endurecido

3.4.1- Resistência a compressão

A seguir são apresentados, nas tabelas 23 e 24, os resultados dos ensaios de resistência a compressão das argamassas e concretos.

Como esta propriedade está intimamente relacionada com a porosidade, é possível, a partir desses resultados, realizar algumas observações prévias delimitando os traços que irão ser submetidos à avaliação de porosidade teórica.

TABELA 23- Resumo das resistências a compressão axial para as curas normal e térmica das ARGAMASSAS

traço		consumo	T max	duracao	resistência compressão axial										
		cimento	ciclo térmico	ciclo térmico	1 dia		3 dias		7 dias		28 dias		91 dias		
					imediato	normal	térmica	normal	térmica	normal	térmica	normal	térmica	normal	
1:m	a/c	kg/m ³	°C	h	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
CPIIE32	1:2,0	0,375	684	70	04:00	12,0	12,8	22,5	29,4	29,2	38,4	35,2	50,8	45,4	57,5
	1:2,5	0,45	578	70	05:30	12,5	6,3	20,9	21,3	24,6	29,7	33,4	37,6	37,8	46,6
	1:3,0	0,47*	516	70	05:30	11,0	6,6	18,1	18,8	22,3	27,9	27,7	35,8	35,5	42,8
	1:3,5	0,55*	452	70	07:00	10,1	3,5	14,4	12,3	17,5	19,3	23,8	26,5	35,9	33,1
CPVARI RS	1:2,0	0,395	675	70	03:02	16,9	23,2	35,3	40,1	43	47	48,3	66,9	62,6	76,8
	1:2,5	0,45	578	70	03:02	10,8	14,5	29,4	30,8	34,1	37,4	41,8	46,4	52,8	58,5
	1:3,0	0,47*	516	70	03:02	11,1	11,2	28,6	27,6	36,9	39,3	40,8	48,9	54,1	63,2
	1:3,5	0,55*	452	70	04:00	12,0	5,5	23,5	20,2	28,1	32,4	37,5	43,8	45	50,4
CPVARI PLUS	1:2,0	0,375	684	61	02:26	21,7	41,2	43,9	45	49,4	54,9	56	61,1	66,5	74,4
	1:2,5	0,44	582	61	02:26	13,4	27,8	35,8	38,7	38,6	42,1	44,6	50,6	50,2	51,8
	1:3,0	0,455*	520	61	02:26	15,2	31,9	37,9	43,7	41,3	52,2	44	59,2	47,8	63,2
	1:3,5	0,54*	454	70	03:02	12,5	15,3	31,7	33,3	35,1	40,1	39,1	46,1	42,5	48,1

obs: * traços com 1% de superplastificante

TABELA 24- Resumo das resistências à compressão axial para as curas normal e térmica dos CONCRETOS

traço	consumo cimento	T max ciclo térmico	duração ciclo térmico	resistência compressão axial											
				1 dia		3 dias		7 dias		28 dias		91 dias			
				imediato	normal	térmica	normal	térmica	normal	térmica	normal	térmica	normal		
1:m	1:a:p:a/c	kg/m ³	°C	h	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
CPIIE32	1:2,0	1:1,2:0,8:0,295	741	70	03:02	19,9	24,3	44,4	46,1	49,7	52	61,6	67,7	68,2	74,1
	1:2,5	1:1,5:1,0:0,335	635	70	03:15	15,5	21,5	37,6	39,9	42	45,1	52,8	61,7	58,2	65,4
	1:3,0	1:1,8:1,2:0,39	551	70	04:00	13,7	13,3	28,6	30,7	35,3	41,2	46,5	49,6	48,2	57,7
	1:3,5	1:2,1:1,4:0,45	486	70	04:30	9,0	7,6	19,9	22,2	27,2	32,2	32,4	38,7	40,5	47,6
CPVARI RS	1:2,0	1:1,2:0,8:0,33	722	58	02:14	16,9	34,9	50,2	50,2	57,9	55,8	64,7	66,5	65,3	73,3
	1:2,5	1:1,5:1,0:0,37	621	61	02:26	13,3	29,0	39,4	43,4	44,6	48,7	54,8	56,5	64,6	70,4
	1:3,0	1:1,8:1,2:0,40	548	61	02:41	10,7	23,0	37,3	39,3	39,7	46,5	49,3	53,2	62,4	64,6
	1:3,5	1:2,1:1,4:0,445	488	70	03:15	10,6	19,6	32	36	35,8	42,9	46,6	53,2	54,5	61,9
CPVARI PLUS	1:2,0	1:1,2:0,8:0,33	722	52	01:50	13,5	50,3	57,2	59,3	61	62,5	68,8	65,7	80,2	77,2
	1:2,5	1:1,5:1,0:0,37	621	52	01:50	12,3	42,1	51	53,5	52,9	63,3	58,8	65,2	72,5	74,3
	1:3,0	1:1,8:1,2:0,40	548	58	02:14	14,2	38,9	45,2	53,9	45,9	57,2	53,4	62,3	67,9	66,2
	1:3,5	1:2,1:1,4:0,44	488	61	02:26	12,7	31,8	38,6	45,1	44,2	51,6	53,3	58,4	60,8	65

Obs: Para todos os traços foi utilizado 1% de superplastificante

Verifica-se através da tabela 23, que o traço 1:3,5 das argamassas, apresenta uma relação água/ cimento muito acima do parâmetro fixado (menor que 0,45), indicando que, mesmo atingindo resistências consideráveis, do ponto de vista de resistência à agentes agressivos podem estar comprometidas. Além disso, esse traço apresenta grande ciclo de cura térmica (contraproducente), o que justifica a não avaliação desse traço.

Os concretos (tabela 24), quando comparados às argamassas de mesmo traço (ex 1:2 da argamassa com 1: 1,2:0,8 do concreto), apresentaram um aumento no consumo de cimento. No entanto, independente do tipo de cimento utilizado, chama-se atenção para o traço 1: 2,1: 0,4 (1:3,5 do concreto), que do ponto de vista de resistência apresentou bons resultados comparados às argamassas nos traços 1:2,5 e 1:3,0. Além disso, e ciclos de cura térmica desse concreto são menores que aqueles apresentados pelas argamassas com traços 1:2,0; 1:2,5 e 1:3,0.

Assim, para a porosidade são avaliados e comparados os traços de argamassas - 1:2,0; 1:2,5; 1:3,0; com o concreto- 1:2,1:1,4 (1:3,5).

Cabe salientar que, avaliando o traço de concreto 1:3,5, “cobre-se” todos os parâmetros de resistência e durabilidade dos outros traços de concreto, ou seja, é possível realizar avaliações para os traços de concreto 1:2,0; 1:2,5 e 1:3,0.

3.4.2- Módulo de Elasticidade

Os resultados obtidos estão indicados nas tabelas 25 e 26.

TABELA 25- Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das argamassas em GPa (NBR 8522) (BRAZ DE MELO (1996))

traço	1:2,0		1:2,5		1:3,0		1:3,5	
	Normal	Térmica	Normal	Térmica	Normal	Térmica	Normal	Térmica
CPV-ARI PLUS	27,11	24,45	22,38	18,12	24,58	20,61	22,93	20,10
CPV-ARI-RS	26,53	22,63	22,29	16,96	25,75	20,37	19,69	18,50
CPII-E-32	21,43	18,47	20,71	14,25	19,75	16,01	17,53	13,97

TABELA 26- Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade das CONCRETOS (brita zero) em GPa (NBR 8522) (BRAZ DE MELO (1996))

traço	1:2,0 (1:1,2:0,8)		1:2,5 (1:1,5:1,0)		1:3,0 (1:1,8:1,2)		1:3,5 (1:2,1:1,4)	
	Normal	Térmica	Normal	Térmica	Normal	Térmica	Normal	Térmica
CPV-ARI PLUS	30,84	33,04	30,05	29,05	30,90	30,50	28,76	28,04
CPV-ARI-RS	31,10	30,53	24,16	21,26	28,63	37,47	28,74	25,57
CPII-E-32	35,88	32,86	28,41	26,52	22,97	22,55	20,05	16,99

3.4.3- Porosidade

A porosidade teórica das misturas é apresentada na tabela 27, sempre comparando a porosidade do concreto com traço mais pobre com as argamassas de traços mais ricos.

TABELA 27- A análise da porosidade total das argamassas e concretos aos 28 dias baseado no estudo de Powers

Tipo de cimento	Traço		a/c	Consumo de cimento/m ³	porosidade 28 dias**	fc ₂₈	
	1:m	1:a:p	kg/kg	kg/m ³	%	MPa	
CP V ARI RS	a	1:2,0		0,395	675	10,88	66,9
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,455*	488	11,13	53,2
	(c - a)				-187	0,25	-13,7
a	a	1:2,5		0,45	578	12,56	46,4
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,455*	488	11,13	53,2
	(c - a)				-90	-1,43	6,8
c	a	1:3,0		0,47*	516	12,47	48,9
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,455*	488	11,13	53,2
	(c - a)				-28	-1,34	4,3
CP V ARI Plus	a	1:2,0		0,375	684	10,15	61,1
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,44*	488	10,19	58,4
	(c - a)				-196	0,04	-2,7
a	a	1:2,5		0,44	582	12,06	50,6
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,44*	488	10,19	58,4
	(c - a)				-94	-1,87	7,8
c	a	1:3,0		0,455*	520	11,78	59,2
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,44*	488	10,19	58,4
	(c - a)				-32	-1,59	-0,8
CP II E 32	a	1:2,0		0,375	684	9,70	50,8
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,45*	486	11,13	38,7
	(c - a)				-198	1,43	-12,1
a	a	1:2,5		0,45	578	12,56	37,6
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,45*	486	11,13	38,7
	(c - a)				-92	-1,43	1,1
c	a	1:3,0		0,47*	516	12,47	35,8
	c	1:3,5	1:2,1:1,4	0,45*	486	11,13	38,7
	(c - a)				-30	-1,43	2,9

Observações: * traços com 1% superplastificante;

f_{c₂₈} = resistência à compressão axial aos 28 dias;

c - a = diferença entre valores dos concretos em relação às argamassas

3.5- Considerações sobre os resultados e as propriedades desenvolvidas pelos concretos e argamassas de estudo

Os resultados apresentados no item 3.4, permitem verificar o comportamento e a qualidade das misturas. Assim, as considerações são feitas comparando o traço mais pobre de concreto (1:2,1:1,4) com os traços mais ricos de argamassa (1:2,0; 1:2,5; 1:3,0).

3.5.1- Resistência mecânica

3.5.1.1- Desempenho dos concretos e argamassas sob diferentes condições de cura

Para argamassas e concretos sob diferentes condições de cura (normal e térmica), realiza-se a comparação de resistência mecânica, entre cimentos que apresentam em sua composição adição de escória, que são: CII-E-32 e CPV-ARI-RS (figuras 26 e 27).

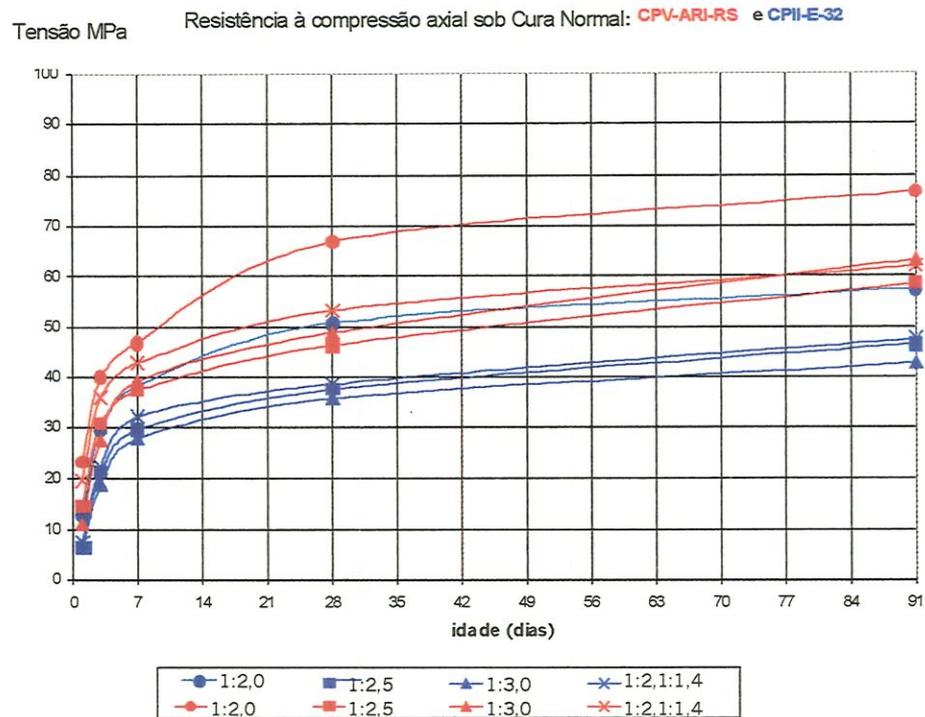


Figura 26 : Resistência mecânica com cimento CPV-ARI-RS e CII-E-32- cura normal

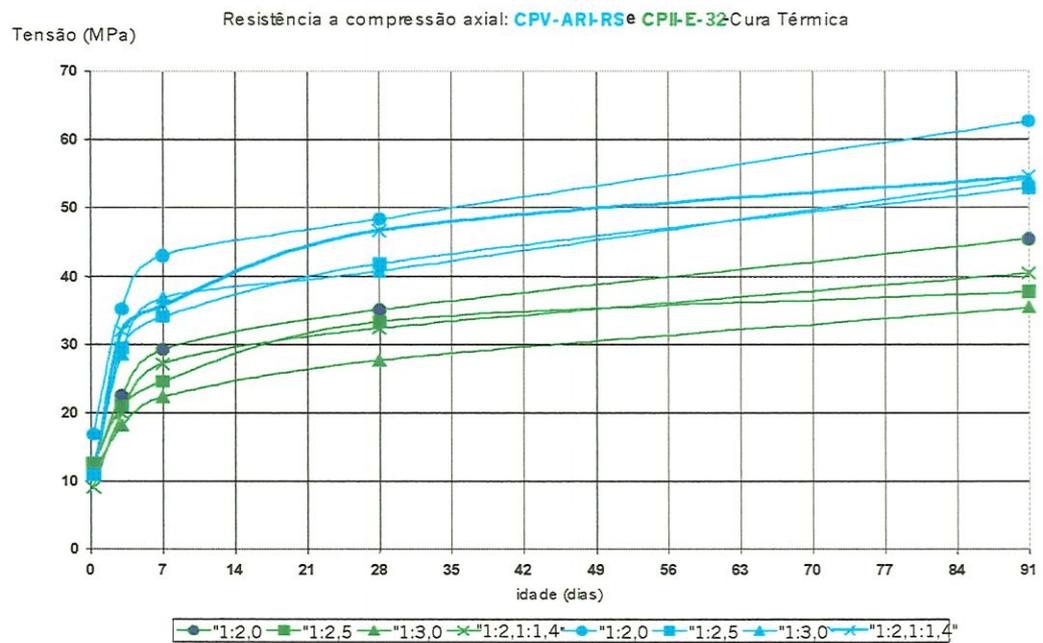


Figura 27 : Resistência mecânica com cimento CPV-ARI-RS e CII-E-32 -cura térmica.

A seguir observa-se, através das figuras 28 e 29, o desempenho mecânico das misturas com cimento de alta resistência inicial (CPV-ARI-RS e CPV-ARI-PLUS), sob os dois tipos de cura. Cabe lembrar que o cimento CPV-ARI-PLUS não contém escória.



Figura 28- Resistência mecânica das misturas com cimento de alta resistência inicial sob cura normal

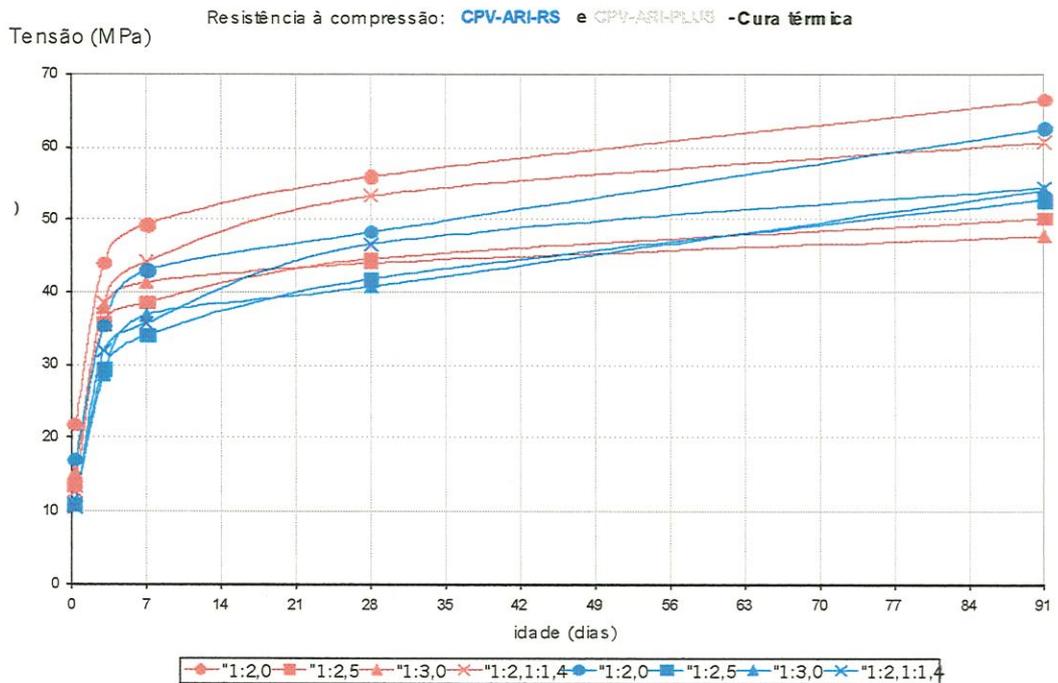


Figura 29- Resistência mecânica de misturas com cimento de alta resistência inicial sob cura térmica

De acordo com as figuras 26 e 27, para os dois tipos de cura e para todos os traços, as misturas com o cimento CPV-ARI-RS apresentaram melhor desempenho mecânico que aquelas moldadas com o cimento CII-E-32, em todas as idades.

Neste caso, apesar das argamassas e concretos, com traços correspondentes, apresentarem relação água/cimento e dosagem de superplastificante praticamente iguais, esta diferença de resistência mecânica, tanto na cura térmica quanto na cura normal, é decorrente da finura do cimento CPV-ARI-RS ser maior em relação ao cimento CII-E-32, (influência na velocidade de hidratação -tabela 16) e da composição química destes tipos de cimento (tabela 17).

Através das figuras 28 e 29, para os dois tipos de cura, as misturas com o cimento CPV-ARI-PLUS, apresentam valores de resistência mecânica superiores às misturas com o cimento CPV-ARI-RS, principalmente nas primeiras idades.

Entretanto, para idades mais avançadas (91 dias), estes valores tendem a ficar muito próximos. Este fato, provavelmente, está relacionado com a presença de escória no cimento CPV-ARI-RS, pois segundo NEVILLE (1997) a hidratação da escória é lenta nas primeiras idades retardando o ganho de resistência das misturas. Essa diminuição na velocidade de hidratação é favorável, pois controla a fissuração devido ao calor de hidratação.

A partir das figuras 26, 27, 28 e 29, pode-se observar, também, que:

- a elevação de temperatura (cura térmica), para todas as misturas, acelerou as reações químicas de hidratação, possibilitando que em poucas horas fossem alcançadas resistências superiores a 10MPa;
- após a idade de 7 dias, a resistência dos concretos e argamassas em cura térmica, teve uma depreciação de resistência mecânica, quando comparadas à cura normal, independente do tipo de cimento e traço. Provavelmente a hidratação rápida proporcionada pela cura térmica fez com que a estrutura da pasta de cimento ficasse mais porosa.
- apesar da perda de resistência mecânica ocorrida nos concretos e argamassas sob cura térmica, no que diz respeito ao desenvolvimento de resistência, todas as misturas se comportaram da mesma forma que as misturas sob cura normal.

A perda de resistência à compressão das misturas sob cura térmica, quando comparadas com a cura normal, pode ser avaliada em termos de porcentagem através da figura 30.

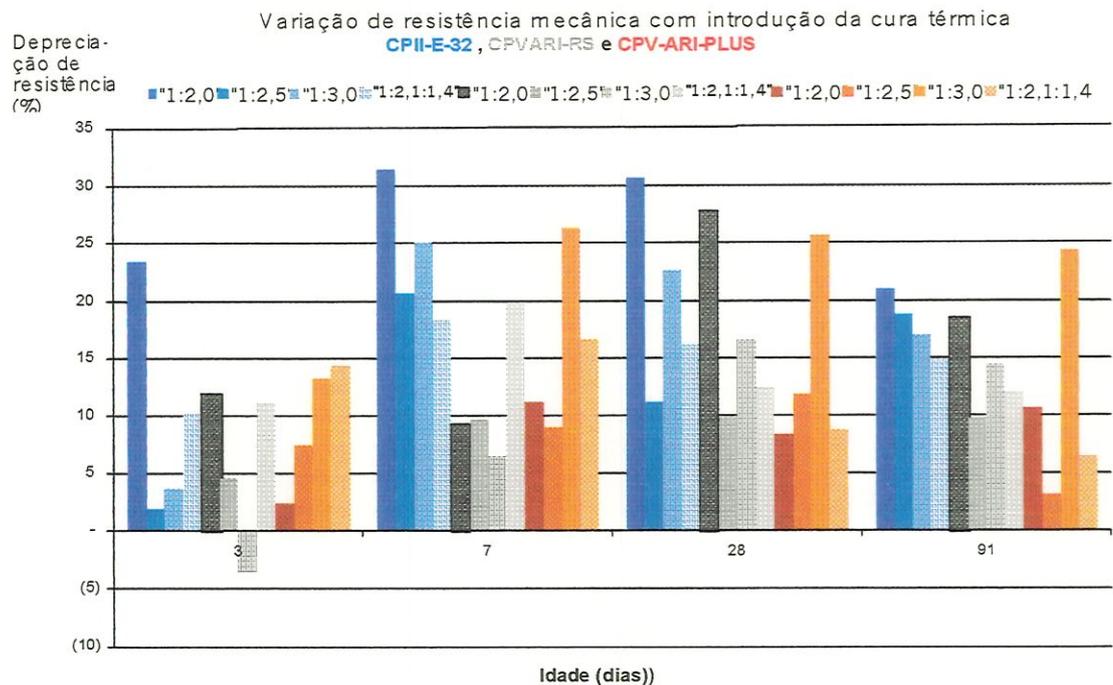


Figura 30 - Influência da cura térmica na resistência mecânica dos concretos e argamassas (depreciação em cada idade)

As perdas de resistência, para a maioria dos traços, são mais acentuadas nas idades de 7 e 28 dias.

Entretanto, mesmo sofrendo tais perdas, para a idade de 28 dias (idade onde se tem a resistência característica do concreto), quando utilizado o cimento Portland CPII-E-32, pode-se obter argamassas com resistências superiores à 25 MPa e concretos com resistências superiores a 30 MPa (traço mais pobre dos concretos).

Para o cimento de alta resistência inicial (ARI), os valores de resistência nas misturas sob cura térmica, são superiores a 35 MPa em argamassas e acima de 45 MPa para concretos, podendo ambos serem considerados de elevadas resistência. Podem ser citados alguns fatores que, neste caso, influenciaram a resistência a compressão axial como:

- *influência da introdução do pedrisco nas argamassas*: as misturas obtidas com a introdução do pedrisco ($D_{m\acute{a}x} \leq 6,3$ mm), substituindo parte do agregado miúdo nos traços das argamassas, apresentaram: aumento de resistência à compressão axial em todas as idades.
- *efeito do superplastificante nas argamassas e concretos de estudo*: os aditivos superplastificantes de pega normal, não têm efeito direto na resistência à compressão, mas sim um efeito indireto. A sua função é fazer com que as partículas

de cimento da mistura se dispersem, possibilitando uma microestrutura mais compacta nos concretos e argamassas. Este fato pode ser verificado, comparando o traços de argamassas 1:2,5 (sem superplastificante) e 1:3,0 (com 1% de superplastificante), onde este último apresentou resistência mecânica próxima ao traço mais rico, devido ao arranjo melhorado das partículas de cimento.

3.5.2- Módulo de elasticidade

Em geral, os fatores que afetam a resistência mecânica afetam o módulo de elasticidade. Alguns desses fatores a serem discutidos são:

- tipo e quantidade de agregado: Em todos os traços e tipos de cura, quando se introduziu o pedrisco nas argamassas, o módulo de elasticidade aumentou;
- tipo de cimento: A adição de escória no cimento pode influenciar no módulo de elasticidade, fazendo com que este fique menor. Este fato é verificado em todos os traços de argamassas e concretos com os tipos de cimento CP-II-E-32 e CPV-ARI-RS, ficando as misturas com o cimento CPV-ARI-PLUS (sem escória) com valores de módulo de elasticidade levemente superiores aos outros tipos de cimento;
- tipo de cura: Os concretos e argamassas curados com vapor sob pressão atmosférica, apresentaram módulo de elasticidade menor que aqueles curados normalmente. Este fenômeno, como na resistência à compressão axial, ocorre devido ao desarranjo cristalino da pasta de cimento, que está associado à cura térmica.

3.5.3- Porosidade

De acordo com a tabela 27, os traços de argamassas, exceto o traço 1:2,0, apresentaram uma porosidade teórica maior que o concreto. Além disso, o concreto com pedrisco apresenta uma economia de até 200Kg/m³ (comparando o traço 1:2,1:1,4 com 1:2,0 do cimento CPV-ARI-RS – tabelas 20 e 21). Assim, verifica-se que o concreto é mais compacto e econômico que as argamassas.

3.6- As expectativas de durabilidade dos materiais estudados

De acordo com as avaliações realizadas até aqui, para todas as propriedades apresentadas, o traço mais pobre de concreto estudado ((1:2,1:1,4), tem apresentado melhores comportamentos mecânicos que os traços 1:2,5 e 1:3,0 de argamassa, principalmente quando se utiliza cimento de alta resistência inicial.

Assim, realiza-se a seguir uma avaliação para as expectativas de durabilidade desse traço frente a ambientes agressivos gerados pelo processo anaeróbio avaliando previamente a agressividade da água no interior do reator e os possíveis efeitos deletérios desencadeados no concreto.

Essa avaliação, é realizada com base na literatura, já que a determinação do grau de ataque dos agentes deletérios ao concreto, em laboratório apresentam:

- dificuldade de reproduzir as condições reais da água residuária, quando em contato com a estrutura;
- as propriedades da água de um reator em operação ao ser coletada sofrem grandes alterações;
- a dificuldade em se determinar a velocidade com que a água circula no interior da estrutura.

3.6.1- Avaliação da agressividade no interior do reator anaeróbio UASB

O tratamento de esgoto doméstico, através da digestão anaeróbia, consiste basicamente na transformação da matéria orgânica em metano, gás carbônico, água, sulfeto de hidrogênio e amônia. Esta transformação é realizada por diversos grupos de microrganismos (bactérias anaeróbias), podendo ser esquematizada conforme a figura 31.

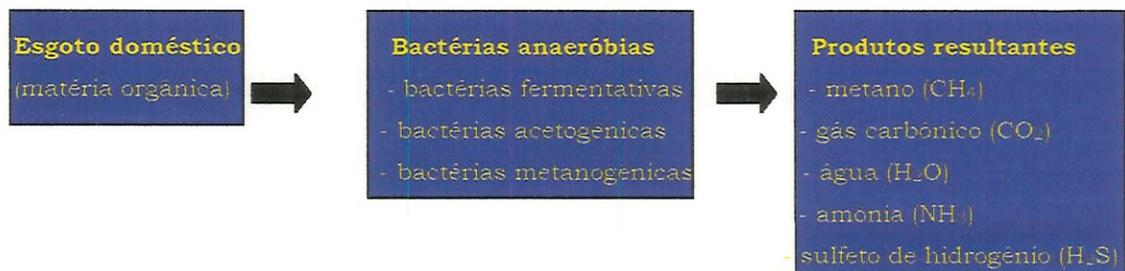


Figura 31- Produtos resultantes formados no processo de digestão anaeróbia.

Durante todo esse processo, a água residuária em contato com o concreto apresentará uma composição extremamente variável, podendo conter agentes agressivos que alterem a estrutura da pasta de cimento endurecida.

Alguns fatores importantes a serem levados em consideração, no que se refere ao comportamento agressivo da água em relação ao concreto, citados por CINCOTTO (1998), FURNAS (1997) e ALEXANDER & ADDIS & BASSON (1994) são:

- pH;
- acidez e alcalinidade;

- dióxido de carbono dissolvido;
- dureza;
- teor de matéria orgânica;
- concentração de sulfetos, bicarbonatos, carbonatos, hidróxidos, nitratos e nitritos, cloretos, sulfatos silicatos, amônio, cálcio, magnésio, ferro alumínio, zinco, estroncio, manganês sódio e potássio.

Muito dos fatores acima citados, são importantes para que o controle e operação do processo anaeróbio sejam adequados. Assim, apresenta-se a seguir uma abordagem de como esses parâmetros surgem, interferindo no processo anaeróbio e ao mesmo tempo no processo destrutivo do concreto.

3.6.1.1- pH, alcalinidade e acidez

O pH, a alcalinidade e a acidez, são fatores ambientais intimamente relacionados entre si e igualmente importantes, tanto para o controle e operação dos processos anaeróbios quanto para o controle de efeitos patológicos que podem ser desencadeados no concreto.

a) pH

VAN HAANDEL & LETTINGA (1994), VON SPERLING (1995) e CHERNICHIARO (1997), salientam que para a operação adequada de reatores anaeróbios o pH no seu interior deve manter-se entre 6,5 e 7,5.

Levando em consideração que a pasta de cimento endurecida se encontra em equilíbrio com um fluido que apresente pH entre 12,5 e 13,5, poderia-se afirmar que a água residuária no interior do reator é agressiva. No entanto, para que haja interações químicas entre a pasta de cimento endurecida e o meio aquoso, oferecendo riscos de deterioração da estrutura, HELENE (1996) e FURNAS (1997) citam que os valores de pH devem ser menores que 6.

Nos reatores anaeróbios, valores de pH menores que 6,0 só serão alcançados quando ocorrer o desequilíbrio do sistema ecológico no seu interior. Neste caso, a produção de ácidos, por determinadas bactérias, podem fazer com que o conteúdo do reator apresente pH de até 4,5 (“azedamento” do reator), sendo extremamente danoso ao concreto.

Verifica-se a seguir como mudanças ocorridas no pH, regidas pela alcalinidade e pela acidez do processo, surgem no reator podendo causar prejuízos ao concreto.

b) Alcalinidade e acidez

Diversos autores descrevem a alcalinidade como sendo a capacidade da água neutralizar uma determinada solução ácida.

No interior de um reator, o próprio processo anaeróbio gera ácidos e substâncias alcalinas que podem ou não neutralizar os ácidos, dependendo da quantidade de substâncias alcalinas produzidas para tal, alterando assim o pH do sistema.

O ácido carbônico e os ácidos voláteis são os fatores que afetam o pH do sistema (CHERNICHIARO, 1997).

O próprio processo anaeróbio gera uma determinada quantidade de gás carbônico (CO_2), o qual parte estará na forma de gás (sempre buscando estabelecer um equilíbrio entre as fases) e parte estará dissolvido formando o ácido carbônico que altera o pH do sistema.

Esse ácido em meio aquoso no entanto, pode se dissociar, conforme pode ser visto na equação 3.1:



O equilíbrio tende a ir para a direita ou para a esquerda rapidamente, dependendo dos sais que possam apresentar efeito de hidrólise e tampão (capacidade de uma solução em evitar mudanças no pH), verificando-se então a instabilidade desse ácido.

O ácido carbônico não dissociado (H_2CO_3), reage com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento endurecida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), dando origem ao carbonato de cálcio (CaCO_3), que é um produto insolúvel e não causa prejuízo ao concreto (equação 3.2).



O teor de ácido carbônico presente como gás dissolvido ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$), fará com que o carbonato de cálcio (CaCO_3) seja transformado em bicarbonato de cálcio (equação 3.3), que é um produto altamente solúvel.



O bicarbonato pode ser lixiviado devido ao movimento da água no interior do reator, destruindo o hidróxido de cálcio da pasta de cimento endurecida e diminuindo a capacidade resistente do concreto.

A presença de dióxido de carbono dissolvido, pode fazer com que o pH da solução dos poros da pasta de cimento diminua, promovendo a despassivação e corrosão da armadura.

Num reator anaeróbio existe a formação de ácidos voláteis e compostos alcalinos que neutralizam estes ácidos, sendo ambos oriundos da decomposição de compostos orgânicos durante a digestão.

Do ponto de vista operacional, quando necessário, a alcalinidade pode ser gerada a partir do esgoto afluente, utilizando: cal hidratada, cal virgem, carbonato de sódio, bicarbonato de sódio, hidróxido de sódio e bicarbonato de amônia para manter o pH do sistema entre 6,5 e 7,0 (CHERNICHIARO, 1997).

3.6.1.2- Considerações sobre a presença sais dissolvidos na água residuária causando efeitos deletérios para o processo anaeróbio e para o concreto

Qualquer processo de tratamento biológico adequado requer um ambiente favorável devendo, por isso, haver um controle de alguns compostos que podem ocasionar efeitos tóxicos aos microrganismos.

Os sais presentes na água residuária que podem estar em concentrações inibidoras aos microrganismos e, ao mesmo tempo, serem prejudiciais ao concreto, são íons, geralmente, associados a um cátion: Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} e NH_4^+ .

a) Acidez e dureza da água residuária com a presença de íons de cálcio e magnésio (Ca^{+2} e Mg^{+2}).

O ácido carbônico apresenta perigo de deterioração ao concreto somente se as quantidades de sais e carbonatos neutralizadores na água forem pequenas, principalmente, os carbonatos de cálcio e de magnésio. Assim, devem ser analisadas nas águas juntamente os teores de ácido carbônico e os teores de sais dissolvidos (dureza) (CINCOTTO, 1998).

No caso de reatores anaeróbios, o ácido carbônico pode realmente apresentar perigo ao concreto, pois os sais e compostos neutralizadores de cálcio e magnésio (Ca^{+2} e Mg^{+2} - sob forma de bicarbonato ou carbonato) presentes na água residuária, são consumidos pelo próprio processo para neutralizar os ácidos formados, sendo muitas vezes necessária até a suplementação da alcalinidade.

Como a suplementação da alcalinidade é feita no afluente, onde se tem a presença de grande quantidade de íons de cálcio (Ca^{+2}), podem ocorrer incrustações, possivelmente, no sistema de coleta e distribuição do afluente, e não na zona de digestão anaeróbia.

No caso dos íons magnésio (Mg^{+2}), que todos os sais de magnésio, com exceção do bicarbonato, atacam o concreto, sendo considerado um dos sais mais agressivos, principalmente quando na forma de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) (CINCOTTO, 1998).

Para uma concentração de íons magnésio de 75 a 150 mg/l o processo anaeróbio é estimulado, ou seja, estas concentrações são consumidas pelo próprio processo de forma benéfica. Para valores acima dos citados, o processo anaeróbio começa a ser inibido. CHERNICHARO (1997).

A agressividade do íon de magnésio ao concreto, provocando risco de deterioração, ocorre se o teor deste for superior a 150 mg/l e não estiver sob forma de bicarbonato.

b) Reação álcali- agregado e inibição do processo anaeróbio devido presença de íons de cálcio e potássio (Na^+ e K^+).

Para que ocorra a reação álcali- agregado numa estrutura de concreto, é necessário que o teor de compostos de sódio (Na_2O) e de potássio (K_2O), presentes no fluido dos poros do concreto e oriundos de outras fontes, seja grande (maior que 0,6%) e altamente alcalino (12,5-13,5), apresentando um teor total de álcali maior que 3 Kg/ m³. Além disso, os agregados utilizados no concreto devem também apresentar compostos de sílica e materiais silicosos (rochas ácidas).

No caso do reator anaeróbio, dificilmente os íons de Na^+ e K^+ presentes no meio aquoso irão formar compostos de Na_2O e K_2O (com alta alcalinidade), que somando-se ao compostos dos poros no concreto, provoquem reação álcali- agregado, pois o próprio processo requer um meio aquoso de pH entre 6,5 e 7,0 e existem níveis de sódio e potássio (100-200mg/l e 200- 400 mg/l) que agem de maneira benéfica ao processo sendo consumido. Além disso, a sanidade dos agregados utilizados para o concreto deve ser verificada, para que os teores de sílica estejam dentro do permitido pelas normas existentes.

c) Ações agressivas dos sais de amônio (NH_4^+)

De acordo com CHERNICHARO (1997) e VAN HAANDEL (1994), esgotos ricos em compostos proteicos ou uréia apresentam formação de bicarbonato de amônia ($(NH_4)_2CO_3$) após a digestão anaeróbia. Como este é um composto solúvel, os íons de amônia (NH_4^+) dispersos no meio aquoso podem se dissociar da seguinte forma (equação 3.4):



Se no meio aquoso o $\text{pH} \leq 7,2$, então o equilíbrio é deslocado para a esquerda na forma de íon amônia (NH_4^+), caso contrário, o equilíbrio é deslocado para a direita na forma de amônia livre (NH_3). Como o reator trabalha na faixa de pH entre 6,5 e 7,0, na maior parte do tempo se tem íons de amônio NH_4^+ .

Para o processo anaeróbio, utilizado para tratamento de diversos tipos de águas residuárias (não só esgoto doméstico), se o íon amônia (NH_4^+) ou a amônia livre (NH_3) apresentarem concentrações elevadas, acima de 3000 mg/l e 150 mg/l respectivamente, podem trazer inibição ao processo (tóxicas para as bactérias) (CHERNICHIARO, 1997).

A literatura indica que o risco de deterioração do concreto começa a ser significativo quando a concentração de íon amônia (NH_4^+) for maior que 150 mg/l. No tratamento de esgoto doméstico especificamente, a concentração de íon amônia (NH_4^+) presente no reator não atinge tal valor, o que garante a sanidade do concreto.

Para o tratamento de outros tipos de água residuária através da digestão anaeróbia, se houver no meio aquoso uma concentração do íon amônio NH_4^+ (maior que 150 mg/l), este irá reagir como íon OH^- da fase líquida da pasta de cimento endurecida e posteriormente com o hidróxido de cálcio da pasta conforme equação 3.5:



Após este íon amônia capturar o OH^- da pasta endurecida, ocorre a decomposição do composto formado em a amônia (NH_3), que posteriormente se evapora (equação 3.6):



A estrutura da pasta de cimento endurecida, fica cada vez mais porosa e a alcalinidade da sua fase líquida é reduzida.

3.6.1.3- Considerações sobre a presença de íons sulfatos no interior do reator anaeróbio

A água residuária doméstica, apresenta certa quantidade de íons sulfatos SO_4^- . Estes sulfatos são reduzidos a sulfetos (H_2S) através de ação bacteriológica dos microrganismos, compostos orgânicos contendo enxofre e degradação anaeróbia de compostos ricos em proteína.

A inibição processo anaeróbico, provocada pelo sulfeto de hidrogênio, depende da sua concentração na forma não dissociada (H_2S), sendo bastante tóxicos quando presentes em concentrações acima de 200 mg/l.

A dissociação do sulfeto de hidrogênio (H_2S) ocorre de acordo com o pH do meio, como mostra a figura 32 e as equações 3.7 e 3.8.

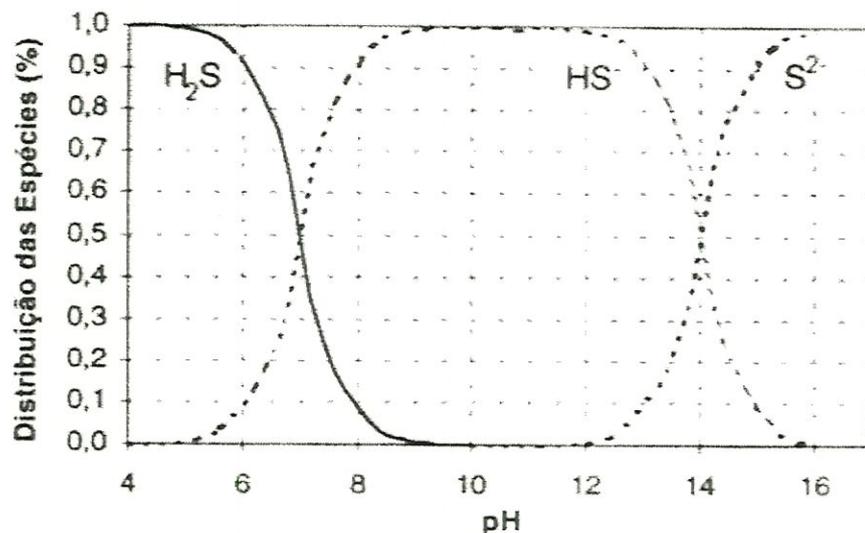
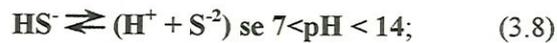
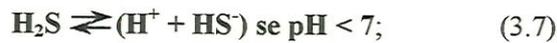


Figura 32- Dissociação do sulfeto de hidrogênio de acordo com o pH da água ($T=25^\circ C$)-CHERNICHIARO, 1997

No que diz respeito ao concreto, para níveis de pH de operação do reator (6,5-7,0) forma-se em torno de 50% e 60% de sulfeto de hidrogênio não dissociado, onde parte fica em fase líquida e parte fica em fase gasosa.

Apesar desta quantidade ser pequena, pode ocorrer a formação de ácido sulfúrico na região de interface líquido- atmosfera do reator, sendo agressivo ao concreto.

Os mecanismos de formação deste ácido e deterioração do concreto podem ser vistos no capítulo 2 (item- 2.2.2.2.2), quando se apresenta a formação de ácido sulfúrico em tubos de concretos para coletar esgoto doméstico.

3.6.1.4- Considerações finais sobre a agressividade da água em contato com o reator

A intensidade das possíveis ações agressivas ao concreto descritas, dependem das condições de mistura e da pressão no interior do reator.

O movimento da água residuária no interior da estrutura do reator UASB apresenta uma velocidade ascensional do líquido em torno de 1m/h. Esta situação, pode aumentar a velocidade de ataque ao concreto desencadeando deterioração por lixiviação ou por reações de troca iônica.

A pressão da água em tratamento, no lado interno da parede do reator, pode aumentar a ação agressiva sobre o concreto, devido à sua infiltração por efeito de pressão.

3.6.2- As expectativas de durabilidade dos materiais estudados

Nos reatores anaeróbios de concreto, dentre os agentes agressivos presentes mostrados no item anterior, as maiores degradações ocorrem devido principalmente ao ácido carbônico e ácido sulfúrico. Assim, mostra-se (figura 33) o comportamento dos concretos e argamassas de estudo, quando inseridos em solução com 10% de ácido sulfúrico realizada por BRAZ DE MELO (1996).

As argamassas e concretos comparados, são aqueles onde se utiliza o cimento de alta resistência inicial CPV-ARI-RS, pois:

- o cimento CPV-ARI-PLUS se mostrou inadequado frente a solução de ácido sulfúrico, sofrendo ataques severos, apesar das misturas apresentarem resistências mecânicas superiores às misturas com cimento ARI-RS, confirmando que um concreto ou argamassa resistente não é necessariamente durável.
- as misturas com o cimento CPII-E-32 apresentaram resistência inferior às misturas com o cimento CPV-ARI-RS, principalmente quando utilizada a cura térmica (grandes ciclos de cura).

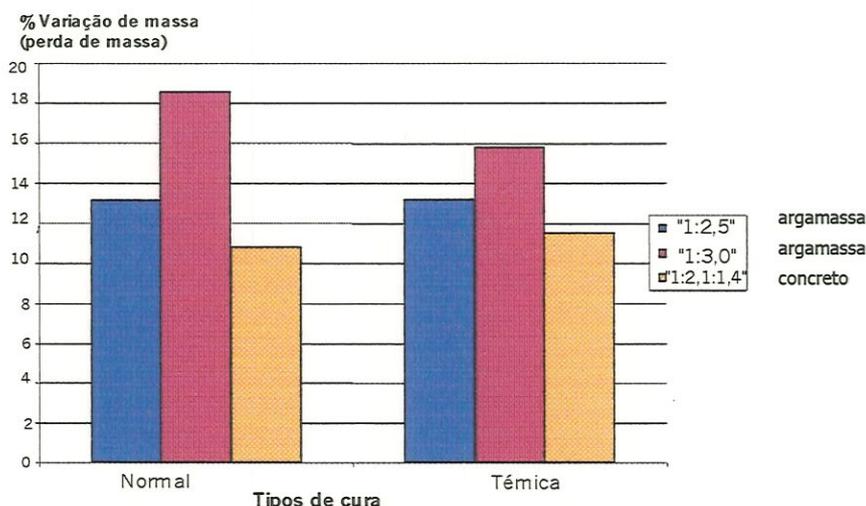


Figura 33 - Perda de massa em misturas com cimento CPV-ARI-RS sob cura normal e cura térmica

O concreto foi a mistura que menos perdeu massa, para os dois tipos de cura, quando comparada às argamassas com traços mais ricos, o que indica a boa qualidade dessa mistura em relação às argamassas usuais em elementos de pequenas espessuras.

3.6.3- A potencialidade dos materiais de estudo quando introduzido em sua composição a sílica ativa.

De acordo com que foi apresentado até o presente momento, *os concretos* com cimento CPV-ARI-RS apresentam indicativos de melhor desempenho referente à resistência mecânica e frente à solução de ácido sulfúrico, apesar das avaliações de resistência química não serem conclusivas.

Como o reator anaeróbio produz grande número de compostos químicos, sendo que alguns deles agressivos à pasta de cimento endurecida, os aspectos relativos à durabilidade é tão importante quanto a resistência mecânica.

Assim, para que os concretos e argamassas de estudo, utilizados na estrutura do reator anaeróbio, desenvolvam propriedades relativas à durabilidade, utiliza-se nas misturas a sílica ativa (10%).

a) Influência da sílica ativa na resistência à compressão-

Os resultados de resistência mecânica realizada para os concretos no traço 1:3,5 são apresentados na figura 34, onde a sílica ativa tem em sua composição química 94,3% de SiO_2 , massa específica de 2200 Kg/m^3 e superfície específica de $20000 \text{ m}^2/\text{kg}$.

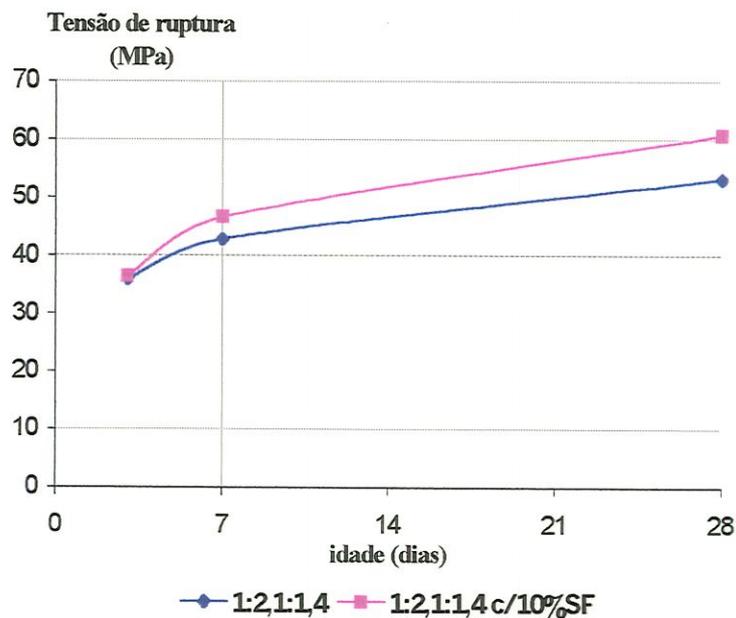


Figura 34- Concreto com e sem sílica ativa (CPV ARI RS)- Cura Normal: BRAZ DE MELO (1997)

Em todas as idades, ocorre um aumento de resistência mecânica, provavelmente, proporcionado pelo arranjo das partículas de sílica ativa entre os grãos de cimento e em torno dos agregados graúdos (efeito micro- filler), que ocorre até a idade de 7 dias.

O aumento de resistência entre 7 e 28 dias, está relacionado com o efeito pozolânico, onde a sílica ativa reage com o hidróxido de cálcio saturado formando, ao redor da sílica, silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Entretanto, cabe salientar que a sílica ativa por ser altamente reativa utiliza rapidamente a água da mistura fazendo com que a água externa (cura) tenha dificuldade em chegar às partículas de cimento ou sílica ativa localizadas numa profundidade maior em relação à superfície de concreto, interrompendo então o aumento de resistência a partir de uma certa idade (56 dias).

b) Influência da sílica ativa na durabilidade dos concretos estudados

A sílica ativa, vem potencializar algumas propriedades dos concretos e argamassas estudados como:

- porosidade e permeabilidade: A sílica ativa, interfere significativamente no tamanho dos poros capilares e na zona de transição das argamassas e concretos, fazendo com que a permeabilidade diminua significativamente. Para um teor de 5% de sílica reduziu o coeficiente de permeabilidade em diminui cerca de três vezes. Entretanto, a partir de um certo limite o aumento de sílica não traz benefícios ao concreto, pois esta deve ser suficiente para envolver o agregado graúdo, por isso usualmente utiliza-se um teor de 10% de sílica ativa;
- resistência ao sulfato: Devida a baixa permeabilidade e maior quantidade de silicato de cálcio hidratado permitida pela presença de sílica ativa a resistência à sulfatos aumentou;
- carbonatação- A sílica reduz o pH dos poros da pasta o que traria prejuízos ao que se refere à proteção do aço contra corrosão. Porém, essa redução é muito pequena mantendo o pH acima de 12,5, o que não afeta a resistência à carbonatação. Além disso, devido à falta de exsudação proporcionada pela sílica, a camada enfraquecida que geralmente se forma na superfície do concreto não ocorre aqui, possibilitando obter cobrimentos de armadura com maior qualidade e até com cobrimentos menores da armadura.

Uma forma de se verificar se o concreto estudado pode ser considerado durável, é confrontando os resultados obtidos e parâmetros utilizados, com uma literatura que apresente

a classificação de um concreto durável. Assim, utiliza-se aqui a classificação apresentada por HELENE (1995) que cita :

- risco de corrosão da armadura: Se a classe de resistência (NBR 8953) for maior que 50 (50 Mpa), o teor de sílica ativa estiver entre 8% e 10% a resistência à carbonatação e à penetração de íons cloreto é pequeno e o concreto é considerado durável;
- risco de deterioração por expansão e por lixiviação: Se a classe de resistência (NBR 8953) for maior que 50 (50 Mpa), o teor de sílica ativa for maior que 8%, a deterioração por lixiviação e expansão é pequeno e o concreto é considerado durável;
- risco de depreciação de resistência devido utilização de cura térmica: Quando uma mistura de concreto ou argamassa, contendo sílica ativa é submetida à cura térmica (50°C a 70°C), esta sofre menores depreciações na resistência mecânica e resistência à penetrabilidade de íons cloretos, que àquelas misturas sem a adição, principalmente, se no cimento houver teores de escória;
- vida útil da estrutura em função da qualidade do concreto e do meio ambiente a que está exposta: Todas as propriedades desenvolvidas nos concretos e argamassas, com a adição de sílica ativa, estão diretamente relacionadas com a sua vida útil, que é o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada, sem a necessidade de intervenções não calculadas.

Uma maneira de estimar a vida útil de uma estrutura é através de um ábaco apresentado por HELENE (1995) (figura 39), utilizado para determinar a espessura de cobrimento da armadura em função do ambiente, do concreto e da vida útil desejada.

O concreto estudado (1:2,1:1,4- CPV-ARI-RS), tendo sido adicionado em sua composição 10% de sílica ativa, apresentou um acréscimo de 15% de resistência a compressão atingindo uma classe de resistência acima de 60 MPa (28 dias). Observando a figura 35, verifica-se que para uma estrutura sujeita a carbonatação com cobrimento de armadura acima de 7,5mm, pode-se atingir uma vida útil para a estrutura de até 45 anos. Cabe lembrar, que o processo de carbonatação é um dos principais responsáveis pela degradação do material concreto do reator anaeróbio UASB.

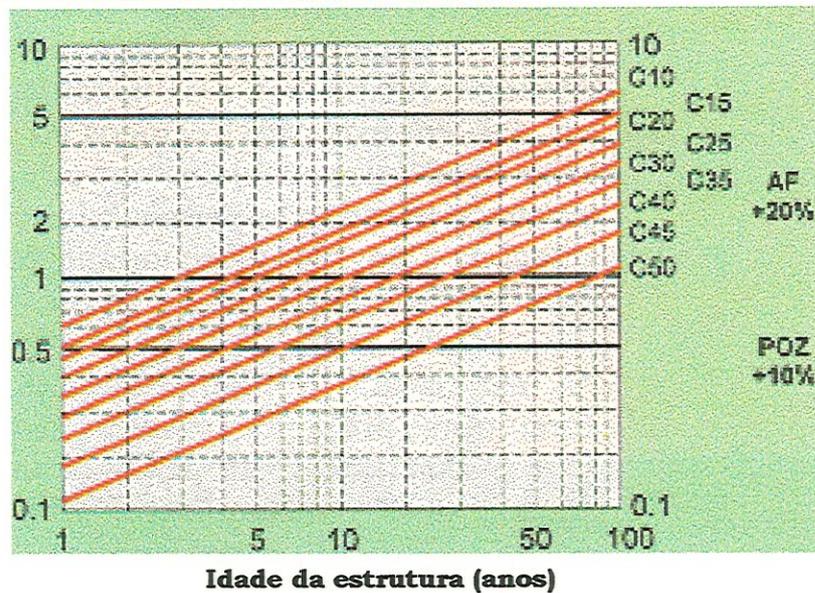
Espessura mínima de cobrimento de concreto à armadura mais exposta (cm)

Figura 35- Vida útil de estrutura sujeita a carbonatação em faces externas dos componentes estruturais de concreto (HELENE (1995))

Pode-se dizer, que o concreto de estudo, utilizando 10% de sílica ativa, é durável, sendo possível até a utilização da cura térmica para produzir peças estruturais pré- moldadas, sem que concreto perca as características de durabilidade alcançadas com a cura normal.



CAPÍTULO 4- Projeto da proposta construtiva para reatores anaeróbios do tipo UASB

Introdução

A aplicação das argamassas e dos concretos de alto desempenho em obras civis exigem controle rigoroso em todas as fases de execução da construção. Assim, para a elaboração de uma alternativa construtiva do reator anaeróbio do tipo UASB, busca-se adequar os materiais estudados a um projeto hidráulico e estrutural, utilizando para tal, a tecnologia da pré- moldagem na execução dos elementos de pequenas espessuras que o compõem.

Cada módulo deste reator visa atender uma população de até três mil habitantes, onde a qualidade da água desejada, após o tratamento, pode ser alcançada de duas formas:

- expandindo fisicamente o número de unidades de reatores UASB (módulos), após ter se verificado o crescimento da carga de água residuária. Neste caso, a eficiência de remoção de poluentes não é total, porém é ,seguramente, mais desejável do que um descumprimento total aos padrões ambientais.
- aplicando processos de tratamento integrados, onde implanta-se numa primeira etapa o processo anaeróbio com o reator UASB e numa segunda etapa, de forma integrada à primeira, um sistema mais eficiente ou mais abrangente em termos de poluentes removidos, como por exemplo um reator aeróbio.

Para o projeto hidráulico e estrutural do reator, não se tem a pretensão de especificar uma metodologia de projeto, mas sim apresentar procedimentos técnicos que, concordando com HANAI (1992), são aqueles empregados na elaboração, na análise e na avaliação técnica de propostas prévias de execução de obras, com base em métodos teóricos, métodos experimentais e mesmo em dados empíricos das tecnologias envolvidas.

A apresentação desses procedimentos, vem contribuir com projetistas da área, no que se refere à um ordenamento de dimensionamento, tomando o projeto do reator em escala real como exemplo, já que de acordo com VON SPELLING (1996) atualmente *“Apesar do conhecimento acumulado sobre os reatores UASB no nosso país, não há ainda um roteiro claro e sistematizado, acessível aos projetistas, sobre dimensionamento desses reatores. É reconhecida a importância de que os diversos critérios e parâmetros de projeto de reatores UASB sejam expressos de forma compreensível e seqüencial... Este ordenamento de dimensionamento, com certeza evitaria alguns equívocos de projeto que tem sido observados”*.

Os projetos hidráulico e estrutural, baseados em pesquisas e normalizações existentes, foram desenvolvidos simultaneamente de forma a permitir uma integração entre materiais, estrutura e funcionamento hidráulico. Porém, para um melhor entendimento, serão apresentados separadamente.

4.1- Projeto hidráulico da proposta construtiva de reator anaeróbio (UASB)

Em seguida, apresenta-se os parâmetros de projeto quantitativos do reator, ou seja, os parâmetros qualitativos, que levam em consideração composição e concentração do esgoto do local não serão abordados, já que o objetivo não é operar o reator.

O dimensionamento do reator se baseia na revisão bibliográfica realizada (capítulo 1) e em autores que serão citados, complementando esta revisão.

4.1.1- Fluxograma da mini estação de tratamento de esgoto

Antes do esgoto sanitário entrar no reator anaeróbio para o tratamento, e após o tratamento propriamente dito, são necessárias algumas estruturas, formando assim, uma estação de tratamento. Para esta obra de infra estrutura urbana, inserida num espaço urbano pré-determinado, o fluxograma da estação de tratamento e os elementos que o compõem são apresentadas na figura 36.

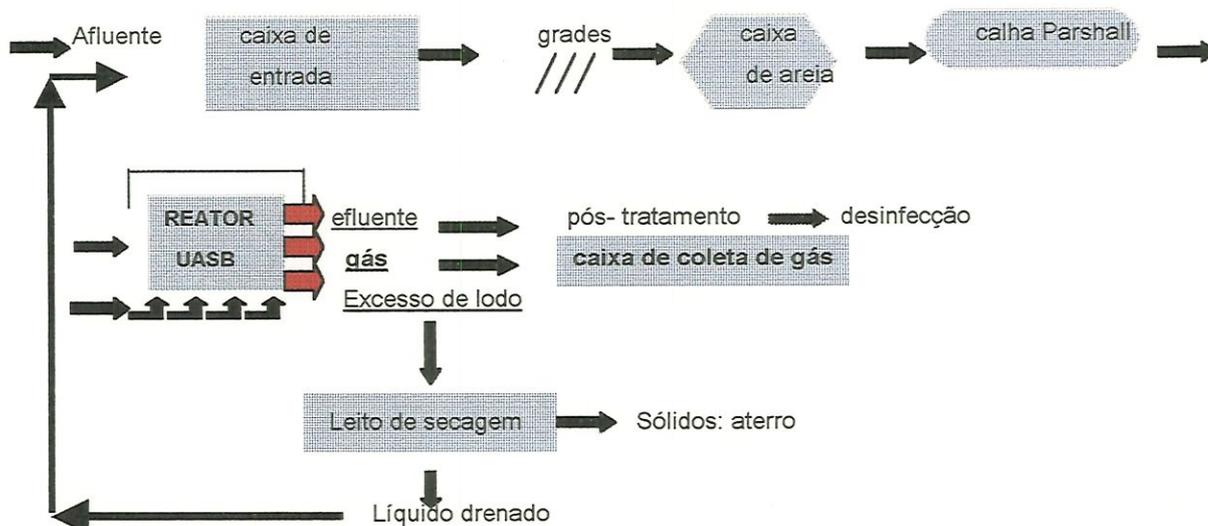


Figura 36- Fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto

Apesar de, geralmente, serem aplicados ao esgoto doméstico, somente os tratamentos preliminar e secundário, é ideal que o efluente sofra um pós- tratamento e desinfecção, para que a água residuária seja totalmente recuperada.

Concordando com VON SPERLING (1996), deve-se entender a estação de tratamento de esgoto como uma indústria, transformando a matéria prima (esgoto bruto) em produto final (esgoto tratado), onde os cuidados na busca da otimização e qualidade dos serviços das indústrias modernas sejam os mesmos utilizados nesta indústria de tratamento de esgotos.

Dentro do fluxograma apresentado, trata-se especificamente do reator UASB, para o qual são determinados os parâmetros de projeto e realizado o dimensionamento de todos os elementos internos que o compõe.

4.1.2- Parâmetros de projeto do reator anaeróbio tipo UASB

Para o dimensionamento adequado de um sistema de tratamento de esgoto, os parâmetros gerais a serem considerados, segundo MARTINS (1973), são: o período de projeto, as etapas de construção, a população no fim do plano; a topografia local, as vazões de projeto e os recursos disponíveis.

4.1.2.1- Período de projeto

O conceito de vida útil, para obras correntes de concreto (aspecto técnico), é tido como o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as

quais foi projetada, sem necessidade de intervenções não calculadas. O valor de referência para vida útil geralmente é adotado de acordo com sua importância social e estrutural (HELENE, 1995).

Entretanto, o período de projeto estimado para obras hidráulicas deste tipo, nem sempre leva em conta os aspectos técnicos que dizem respeito a sua vida útil, mas sim os aspectos relacionados aos contratos de financiamento.

No caso do reator anaeróbio, como a estrutura será composta por elementos esbeltos, de concreto e argamassas de alto desempenho, a vida útil de projeto desejada é adotada a partir dos estudos dos materiais, da espessura de cobrimento das peças que o compõe e do meio ambiente (dióxido de carbono provocando a carbonatação). Neste caso, pode-se atingir uma vida útil para a estrutura de até 45 anos, quando inserida em meio ambiente onde existe a possibilidade de ocorrer processo de carbonatação.

4.1.2.2- Etapas de Construção

As etapas de construção da estrutura proposta, será abordada no momento de execução do modelo reduzido (capítulo 5).

4.1.2.3- População no fim do plano (p)

Como o reator anaeróbio proposto é pré moldado, este tem um volume máximo que visa tratar o esgoto doméstico de uma população de três mil pessoas (pequenas comunidades). Assim, acima deste valor deve-se colocar módulos de forma a permitir que um contingente populacional maior seja atendido.

4.1.2.4- Topografia local

Busca-se com este projeto, no que diz respeito à sua concepção, não ter a topografia como fator limitante para a sua implantação. Assim, para a utilização desse reator basta que seja possível executar um fundo plano sobre qual as peças pré- moldadas possam ser instaladas.

4.1.2.5- Determinação da vazão de projeto

a) Contribuição “per- capta”(q) e relação água/ esgoto

Considerando a NBR 9648 e NBR 9649 (ABNT 1986), a contribuição “per- capta” (q) adotada foi de 200 l/ hab dia e a relação água/esgoto foi de 0,8.

b) Coeficientes de contribuição (NBR 9649)

Os coeficientes de contribuição considerados para estimar a vazão de projeto, são:

- coeficiente de máxima contribuição diária: K_1
- coeficiente de máxima contribuição horária: K_2
- relação de vazão mínima e máxima anual (Q_{\min} e $Q_{\text{méd}}$): K_3

Os valores especificados para esses coeficientes são:

- $K_1 = 1,2$
- $K_2 = 1,5$
- $K_3 = 0,5$ (valor utilizado quando não se tem medição de vazões)

c) Estimativa de vazões

Para o dimensionamento de sistemas de rede e tratamento de esgotos sanitários, é importante obter as vazões de projeto que são: vazão mínima (Q_{\min}); vazão média ($Q_{\text{méd}}$) e vazão máxima ($Q_{\text{máx}}$). Se não existirem formas de medir as vazões pode se utilizar a norma NBR 9649-ABNT(1986) (equações 4.1, 4.2 e 4.3).

$$Q_{\min} = [(c \times p \times q) / 86400] \times K_3; \quad (4.1)$$

$$Q_{\text{méd}} = [(c \times p \times q) / 86400]; \quad (4.2)$$

$$Q_{\text{máx}} = [(c \times p \times q) / 86400] K_1 \times K_2; \quad (4.3)$$

Onde;

c- coeficiente de retorno = 0,8;

p- população = 3000 habitantes;

q- quota "per capita" = 200 l/ hab.dia;

K_1, K_2 e K_3 - coeficientes de contribuição que tem valores especificados.

Assim, as vazões estimadas de projeto são:

$$Q_{\min} = 2,78 \text{ l/s};$$

$$Q_{\text{méd}} = 5,55 \text{ l/s};$$

$$Q_{\text{máx}} = 10,00 \text{ l/s};$$

d) Estimativa de vazões adicionais

As contribuições adicionais às vazões , consideradas em projeto são a vazão de infiltração (Q_I) e a vazão não controlada

A vazão não controlada é estimada em 20% da vazão média (MENDONÇA, 1990).

A vazão de Infiltração (Q_I) é dada pela equação 4.4.

$$Q_I = I \times L \quad (4.4)$$

onde;

I- taxa de contribuição de infiltração que varia de 0,05 a 1,0 l/s. Km;

L- extensão total dos coletores que pode ser estimado, segundo MARTINS (1973):

⇒ Por hectare- 200m/ ha ou ⇒ Por habitante- 1,4m/ hab

A taxa de infiltração (I) considerada foi de 0.05l/s.Km.

Assim:

$$Q_I = 0,05 \times (1,4 \times 3000)/1000 = 0.21\text{l/s}$$

4.1.3- Determinação das características geométricas do reator anaeróbio UASB

4.1.3.1- Forma do reator

Para os reatores tipo UASB, a literatura apresenta apenas duas formas geométricas da seção transversal utilizadas na prática que são a circular e a retangular. Porém, existem outras estruturas, com finalidades diferentes, que possuem semelhanças com o reator anaeróbio em questão, sendo elas os reservatórios de água e os silos para armazenamento de determinados produtos.

Dentre as alternativas, foi escolhida a forma circular para a seção transversal do reator onde os elementos de parede pré- moldados propostos, são apresentados no projeto hidráulico e estrutural (item 2 deste capítulo).

4.1.3.2- Volume do Reator

Como o esgoto doméstico é uma água residuária relativamente diluída, sendo a carga hidráulica o parâmetro mais importante e não a carga orgânica, o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a vazão média ($Q_{\text{média}}$) é que irão definir o volume do reator.

Para o tempo de detenção hidráulica (TDH), não existe um consenso sobre qual é o valor ótimo a ser utilizado em países de clima subtropical e tropical como o Brasil. O valor máximo para este parâmetro, citado pela maioria dos autores pesquisados, é doze horas (43.200 segundos), valor este que será estimado para o projeto do reator em questão. Tem-se então (equação 4.5):

$$V_{\text{estimado}} = \text{TDH} \times Q_{\text{média}} = 43.200 \times (5,5 + 0,21) = 248.832 \text{ l} = 249\text{m}^3 \quad (4.5)$$

Caso seja utilizado, um tempo de detenção hidráulico menor, o reator poderá tratar um volume de água residuária maior, aumentando o contingente populacional a ser atendido.

O volume acima apresentado não é o definitivo, pois outros elementos constituintes do reator tipo UASB, principalmente o separador de fases, interferem na determinação do volume final. A partir de acertos feitos entre estes elementos, através de sucessivos ajustes, principalmente na altura do reator, o valor definitivo adotado foi de 264m³.

4.1.3.3- Altura do reator

Para se determinar a altura do reator os parâmetros utilizados são o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a velocidade ascendente (Va). Este último, depende da vazão média de projeto (Q_{média}) e da área superficial do reator (A). Observa-se, entretanto, que para uma determinada vazão média, a literatura recomenda que a velocidade ascendente não ultrapasse 1m/h.

A equação para a altura estimada do reator é dada pela equação 4.6:

$$h = V_a \times \text{TDH} \quad (4.6)$$

Por razões econômicas, a altura do reator não deve ultrapassar 6m e depende também dos ajustes dos seus elementos constituintes que são:

- manta de lodo + leito de lodo = 3m;
- defletor = 0,30m;
- distância entre defletor e calha de coleta de gás = 0,20m;
- calha de coleta de gás = 1,50m
- distância entre calha de coleta de gás e nível d'água do reator = 0,25m.

Sendo assim, a altura adotada foi:

$$h_{\text{adotado}} = 5,25\text{m}.$$

Com a altura pode-se determinar a área superficial do reator e conseqüentemente a velocidade ascendente, que são:

$$A = 50,265\text{m}^2$$

$$V_a = 0,437\text{m/h}$$

4.1.4- Dimensionamento de cada constituinte do reator tipo UASB

Os elementos constituintes do reator UASB são: câmara de coleta e distribuição do afluente, separador de fases, câmara de coleta de efluente, dispositivo de coleta de gás, pontos de amostragem do lodo e dispositivo de descarga do lodo. Para um melhor entendimento do que irá ser apresentado, acompanhe plantas do projeto hidráulico.

4.1.4.1- Câmara de coleta e distribuição de afluente

Para ser distribuído no interior do reator UASB, o afluente vai primeiramente para uma câmara de coleta e segue para os tubos de distribuição através de vertedores triangulares. Cada tubo é um ponto de distribuição do afluente para o fundo do reator (plantas 01 e 02 do projeto hidráulico).

Estas estruturas são importantes pois, se a água residuária que entra num reator UASB não for bem distribuída sobre o fundo, pode ocorrer a formação de caminhos preferenciais, diminuindo o contato da água residuária com o lodo.

a) Forma e localização

O sistema de coleta e distribuição do afluente é circular, situando-se no centro do reator, numa cota mais elevada que a cota da superfície da água. Essa diferença de nível é importante, pois impede eventuais entupimentos nas tubulações de distribuição. Assim:

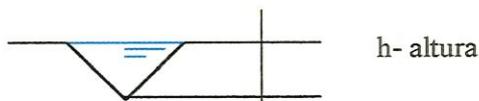
- cota da superfície da água no reator: 5,25m (a partir do fundo do reator);
- cota do fundo do sistema de distribuição do afluente: 5.55m

b) Dimensões da câmara de coleta do afluente:

Este elemento irá captar o afluente e distribuí-lo uniformemente à compartimentos da câmara de distribuição, através de vertedores triangulares. As dimensões dessa câmara são:

- diâmetro: 0.80m;
- altura: 0.65m (não foi descontada a altura do vertedor).

Para a estimativa da altura do nível d'água acima da base do vertedor (h) foi considerado:



- temperatura: 20°C;
- área por ponto de entrada de afluente: 2,09 m²;
- velocidade ascensional do líquido: 0,437m/h;

Com estes dados tem-se a vazão por área alimentada (Q) , dada na equação 4.7 :

$$Q = V_a \times A \quad (4.7)$$

onde:

V_a- velocidade ascensional do líquido

A= área por ponto de entrada

$$Q = 0,437 \times 2,09 = 0,914 \text{ m}^3/\text{h}$$

A altura da lâmina d'água acima da base do vertedor (h) é obtida utilizando a equação da vazão em vertedor triangular (equação 4.8).

$$Q = 1,34 h^{5/2} \quad (4.8)$$

$$h = 0.032 \text{ m} = 32 \text{ mm}$$

Prevendo uma vazão máxima de 10l/s (35,97m³/h) adotou-se:

$$h = 50 \text{ mm}$$

c) Dimensionamento da câmara de distribuição do afluente

A câmara de distribuição contém um número determinado de tubos de alimentação que irá conduzir o afluente para o fundo do reator, alimentando uma determinada área do reator (planta 03).

A área a ser alimentada no reator por cada ponto de distribuição varia de 2m² a 3m² (VON SPELLING, 1996). Utilizando vinte e quatro pontos de alimentação a área alimentada por ponto será (equação 4.9):

$$A_p = A / N = 50,265 / 24 = 2,09 \text{ m}^2 \quad (4.9)$$

A- área do reator;

N- número de pontos de alimentação (N= 24);

A_p- área do reator alimentada por ponto.

A vazão para cada ponto de alimentação (Q_a), deve ser uma fração da vazão total onde cada ponto tenha a mesma vazão. A vazão de cada ponto de descarga será então (equação 4.10):

$$Q_a = Q_{\text{média projeto}} / N = 5.76 / 24 = 0,24 \text{ l/s} \quad (4.10)$$

O diâmetro dessa tubulação deve ser tal que evite o arraste de bolhas de ar que prejudicam a atividade biológica do reator. Sendo assim, recomenda-se que a velocidade na parte vertical da tubulação seja menor ou igual a 0,2m/s. Desta forma, se for utilizado uma tubulação com diâmetro de 75mm tem-se:

$$V_{\text{tubo}} = 0.05 \text{ m/s}$$

Nas extremidades inferiores dos tubos de distribuição utilizam-se bocais de diâmetro de 50mm com o propósito de aumentar a velocidade na saída do tubo. Estes bocais estão a uma distância de 10 cm do fundo do reator (plantas 1, 2 e 3).

4.1.4.2- Separador de Fases

O separador de fases é apresentados nas plantas 06 e 07.

a) Tipo de separador de fases

Dentre os separadores de fases existentes, é utilizado aqui o separador de fases submerso (utilização de selo hídrico), ficando este à 25cm abaixo da lâmina d'água do reator.

Este tipo de separador, apresenta inúmeras vantagens em relação aos outros, principalmente no aspecto relativo à corrosão da calha de coleta de gás e também a inibição na liberação de gases com odores desagradáveis para o meio ambiente (parte dissolvidos no efluente).

Para controlar os odores desagradáveis, BARRIGA (1997) *apud* VON SPELLING (1997), cita que uma das alternativas a ser aplicada é colocar um elemento químico precipitante no selo hídrico (ex: FeS).

b) Localização

O separador de fases, composto por defletores e calhas de coleta de gás, está situado acima da zona de digestão, ficando à 3m da cota de piso do reator. Esses elementos ficam entre à parede do reator e o sistema de coleta do efluente (especificado adiante).

c) Material utilizado

Para o separador de fases podem ser utilizados três tipos de materiais: a argamassa armada, a fibra de vidro e o aço.

A argamassa armada ou concreto armado (pequenas espessuras), são materiais muito pesados, ficando difícil a colocação do separador no interior do reator. Além disso, a longo prazo, mesmo tendo um concreto ou argamassa de alta qualidade podem ocorrer vazamentos de gases, o que prejudica funcionamento do reator.

A fibra de vidro, é o material mais indicado para ficar em contato com ambientes agressivos e pode ser pré- moldado. Porém, o aço (chapa dobrada) pode ser também utilizado nesta estrutura, devido algumas vantagens sobre a fibra de vidro como a facilidade na dobra da peça, formando geometria que se deseja, e a facilidade na troca dessas peças se houver necessidade de manutenção.

O aço deve ser devidamente escolhido e tratado. Como se tem um ambiente corrosivo podem ser utilizadas chapas zincadas (ex: *galvanev*- CSN espessura máxima encontrada no mercado 2,26mm), pois estas, de acordo com PIRES (1998), apresentam um bom comportamento proporcionando uma vida útil de até 25 anos, dependendo da agressividade do meio e da espessura da camada de zinco presente na chapa.

Como complemento de proteção à corrosão, aumentando sua vida útil, GNECCO *apud* PIRES (1998) apresenta também, sugestão de proteção com pintura, conforme o meio ambiente. A proteção pode ser então:

- Agressividade: SO₂, NO, NO₂, CO₂ e H₂S;
- Tintas: Epoxi ou Epoximastic

d) Dimensionamento do separador de fases

Os parâmetros de dimensionamento adotados, tem por objetivo propiciar uma adequada separação das fases líquida, gasosa e sólida provenientes do tratamento. Esses parâmetros estão baseados em dados da literatura apresentados na revisão bibliográfica.

Verifica-se primeiramente o número de camadas necessárias para a separação adequada de fases no tratamento da água residuária, seguindo a formulação da equação 4.11.

$$A_{ab}/A = (N-1)/N \quad (4.11)$$

Onde:

A_{ab} = área das aberturas entre as calhas de coleta de gás;

A = área da superfície do reator;

N = número de camadas necessárias para o separador de fases

Verificando se 2 camadas são suficientes, tem-se:

$$A_{ab} = 3,0 \times 0,20 \times 12 = 7,20\text{m}^2;$$

$$A = 50,265\text{m}^2;$$

$$(N-1)/N = 7.20/50,265;$$

$N = 1,17$. Assim, 2 camadas são suficientes para este separador de fases.

Essas duas camadas podem ser divididas em dispositivo de coleta de gás e defletor.

e) Geometria do separador de fases:

A geometria deve ser tal que além de satisfazer parâmetros de projeto já estudados, encaixe perfeitamente no local destinado. A geometria do separador é apresentada na planta 12 e o seu posicionamento no interior do reator nas plantas 06 e 07.

A calha de coleta de gás apresenta as seguintes características:

- forma triangular;
- altura no lado apoiado na parede do reator: 1.50m;
- base no lado apoiado na parede do reator: 1.85m;
- altura no lado apoiado no sistema de coleta de afluente e efluente: 0.275m;
- base no lado apoiado no sistema de coleta de afluente e efluente: 0.34m
- declividade das paredes da calha de coleta de gás (α): 58°;

As características do defletor são (planta 12):

- forma: triangular;
- altura: 0.30m;
- base: 0,40m
- declividade das paredes do defletor: 56°;

A diferença de traspasse entre defletor e calha de coleta de gás é de dez centímetros ($D = 10\text{cm}$)

O gás formado no dispositivo de separação de fases é coletado através de um tubo e conduzido até à caixa de coleta de gás dos reatores. Esse sistema pode ser representado através da figura 41.

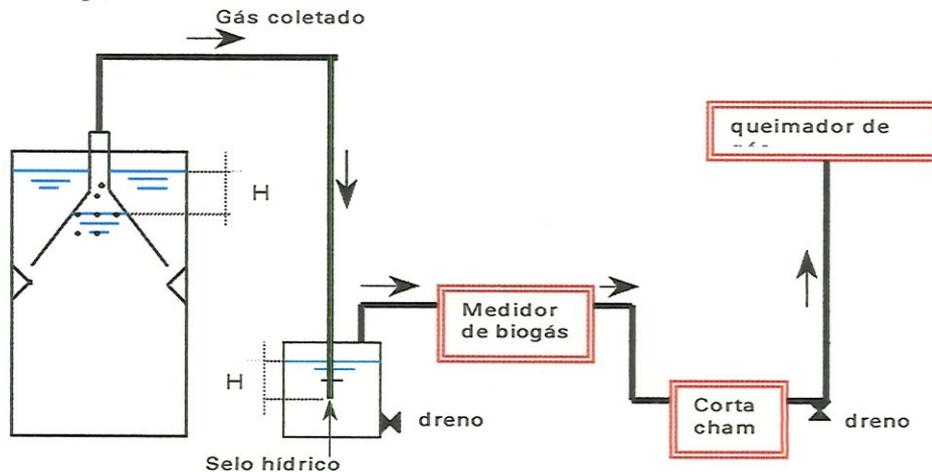


Figura 37- Sistema de coleta de gás

Para a determinação do diâmetro da tubulação de coleta de gás e da altura no separador de fases do gás aprisionado (H - figura 37), é necessário saber qual é a produção de gás metano esperada. Assim, necessita-se então obter as características do esgoto a ser tratado.

Como é estudado somente parâmetros quantitativos, não será calculada essa produção de gás. Apresenta-se em projeto, um diâmetro de tubulação de 75mm, para captar o gás formado no separador de fases e um tubo de 100mm que conduz este gás até a caixa de coleta.

Existem, também, tubos perfurados de PVC com diâmetro de 50mm, utilizados para distribuição de água dentro da calha de coleta de gás. Como no caso em questão a interface líquido e gás está abaixo do nível de água no reator, devido o separador de fases escolhido ser submerso, o gás deve passar por um selo hidráulico que determina a pressão do biogás acumulado (deve ser constante) e para isso é necessário retirar a água de condensação que pode se acumular na tubulação de gás e causar pressões altas na calha de coleta de gás (VAN HANDEL, 1994).

f) Verificação da velocidade do líquido no interior do reator

O dispositivo de separação de fases influencia na velocidade ascensional do líquido ao longo da altura do reator. Assim realiza-se aqui a verificação de tais velocidades.

A velocidade ascensional do líquido na zona de digestão (V_a) foi calculada anteriormente apresentando um valor inferior a 1m/h, que é recomendado ($V_a = 0,437\text{m/h}$).

A velocidade ascensional do líquido entre os elementos de coleta de gás ($V_{\text{máx}}$) para uma vazão média de 5,76l/s é:

$$V_{\text{máx}} = (A / A_{\text{ab}}) V_a;$$

$$V_{\text{máx}} = (50,265 / 7,20) 0,437$$

$$V_{\text{máx}} = 3,05\text{m/h}$$

Para uma vazão máxima prevista de 10l/s ($35,97\text{m}^3/\text{h}$)

$$V_a = 0,715\text{m/h}$$

$$V_{\text{máx}} = 5\text{m/h}.$$

VON SPELLING (1996) afirma que se velocidades maiores que 5m/h e 10m/h, para vazão média e vazão máxima respectivamente, pode ocorrer um significativo carreamento de sólidos para o compartimento de decantação. Para determinar a velocidade ascensional do líquido no nível de descarga do efluente (V_e) segue a equação 4.12:

$$V_e = (A / A_{\text{de}}) V_a \quad (4.12)$$

onde: A_{de} - área disponível no nível de descarga do efluente

Como o nível de descarga do efluente, está acima do separador de fases, a área A_{de} será a área do reator descontada da área do sistema de coleta de afluente e efluente. Assim:

$$A_{\text{de}} = 50,265 - 2,96 = 47,31\text{m}^2$$

Então:

$$V_e = (50,265 / 47,31) 0,437 = 0,464\text{m/h}$$

4.1.4.3- Dispositivo de coleta do efluente

O dispositivo de coleta do efluente (plantas 08 e 09), se compõe de um número de tubos de PVC com diâmetro de 100mm, perfurados longitudinalmente a cada 20cm de distância um do outro. Esses tubos, estão situados à 10cm abaixo da lâmina d'água do reator coletando toda a água tratada e conduzindo esta até uma calha.

Da calha de coleta do efluente, situada ao lado do compartimento de distribuição do afluente, este segue através de tubulação de PVC DN 150 para um pós- tratamento ou para o ambiente.

4.1.4.4- Estruturas periféricas

a) Pontos de amostragem do lodo

Os pontos de amostragem do lodo (planta 04), são importantes para avaliar o desempenho do reator UASB, decidir sobre a necessidade de se dar descarga de lodo em excesso e para evitar criação de vácuo no separador de fases.

No reator projetado, estes pontos se localizam ao longo da altura da zona de digestão do reator onde as amostras de lodo são coletadas por tubos de PVC de diâmetro de 50mm colocados em diferentes alturas (espaçamento 50cm), utilizando também registros de esfera.

b) Sistema de descarte do lodo

O lodo formado no interior do reator anaeróbio é composto de uma camada espessa, relativamente ativa situada no fundo e uma camada menos concentrada (menos ativa) na superfície.

Para a camada mais espessa deve ser previsto o descarte de lodo próximo ao fundo do reator (planta 05), pois a presença de silte e areia nesta região faz com que a manta de lodo apresente uma atividade biológica baixa .

Para a camada menos concentrada deve ser feito o descarte do lodo (planta 05), pois qualquer quantidade de lodo produzido a mais fatalmente será descarregado junto com a água tratada, resultando num efluente de baixa qualidade. Este segundo ponto de descarte está localizado numa altura de 1,40m acima do fundo do reator utilizando uma tubulação com diâmetro de 100mm.

O lodo descartado, segue para leito de secagem e a água proveniente do processo de desidratação retorna ao reator para ser tratada.

c) Caixa de coleta de gás

O dimensionamento deste elemento depende da altura (H) especificada na figura 41. Assim, essa estrutura é tratada separadamente, sem que se utilize elementos pré-moldados.

d) Passadiço

O passadiço é uma estrutura colocada ao redor do reator possibilitando a inspeção do sistema de coleta do afluente e efluente realizada pelo operador, bem como possíveis manutenções nesses sistemas e no separador de fases.

Esse elemento, por não estar em contato direto com esgoto doméstico, pode ser tratado separadamente utilizando até estrutura metálica. Assim, o passadiço não será calculado aqui.

4.1.5- Projeto hidráulico do reator anaeróbio tipo UASB

A seguir apresenta-se o *projeto hidráulico* do reator UASB para que se possa acompanhar o dimensionamento descrito nos itens anteriores.

O projeto está ordenado da seguinte forma:

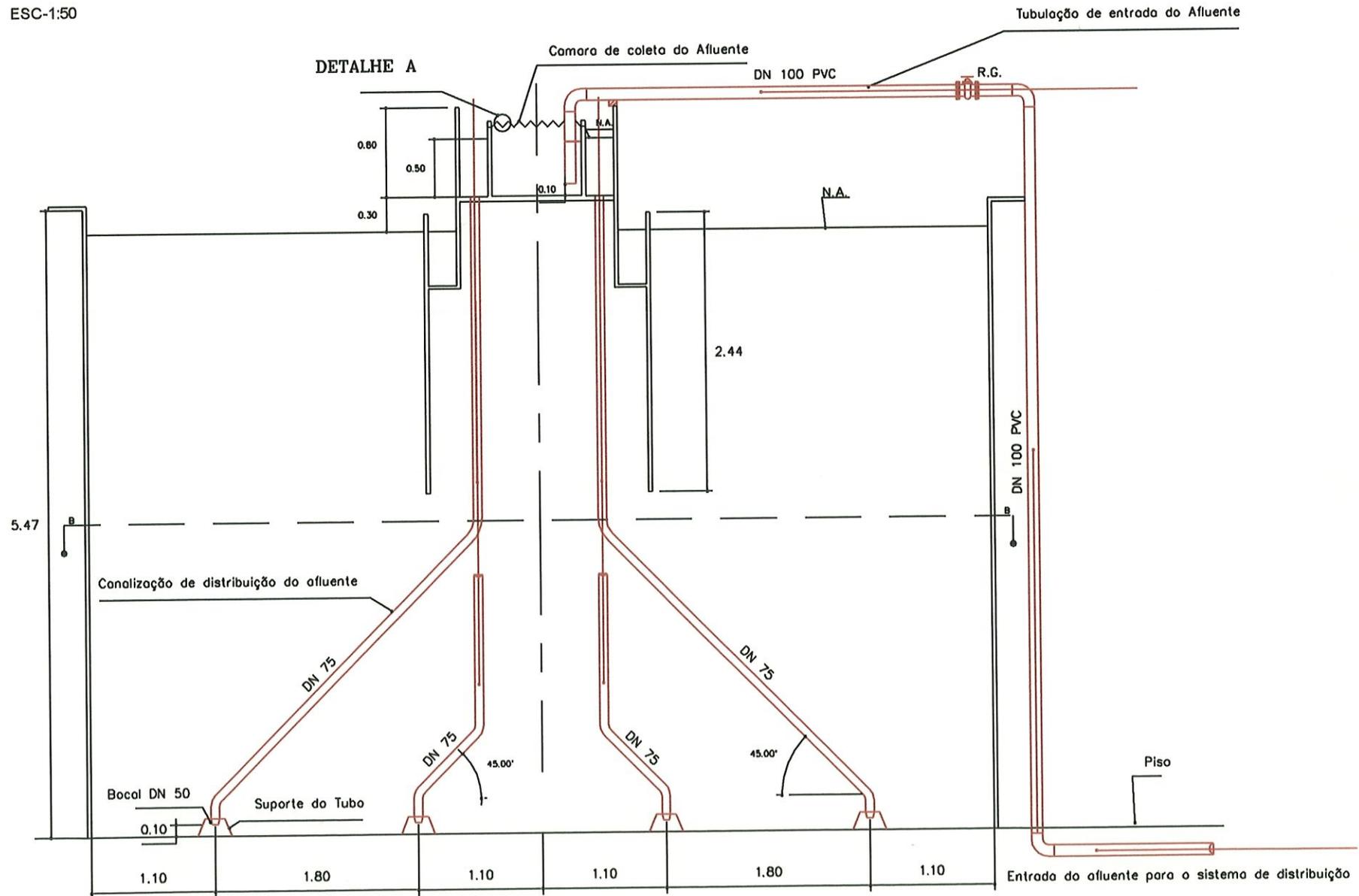
- Planta 01- Corte típico com o sistema de coleta e distribuição do afluente: escala 1:50;
- Planta 02- Vista superior do sistema de coleta e distribuição do afluente: escala 1:50;
- Planta 03- Detalhe da distribuição do afluente no fundo do reator e vista superior dos pontos de amostragem e descarte do lodo- escala 1:50;
- Planta 04- Detalhamento dos pontos de amostragem de lodo no reator- escala 1:50;
- Planta 05- Detalhamento dos pontos de descarte do lodo- escala 1:50;
- Planta 06- Corte típico com o sistema de coleta e distribuição do afluente e separadores de fases: escala 1:50;
- Planta 07- Vista superior do sistema de coleta e distribuição do afluente e separadores de fases: escala 1:50;
- Planta 08- Corte típico com o sistema de coleta de efluente: escala 1:50;
- Planta 09- Vista superior do sistema de coleta de efluente: escala 1:50;
- Planta 10- Corte típico do reator completo (inclusive coletor de gás): escala 1:50;
- Planta 11- Vista superior do reator completo (inclusive coletor de gás): escala 1:50;
- Planta 12- Detalhamento do separador de fases- escala 1:50;
- Planta 13- Detalhamento hidráulico: escala 1:0,5.

As dimensões dadas em projeto estão em metros (m).

**PROJETO HIDRÁULICO DO REATOR
ANAERÓBIO (UASB)**

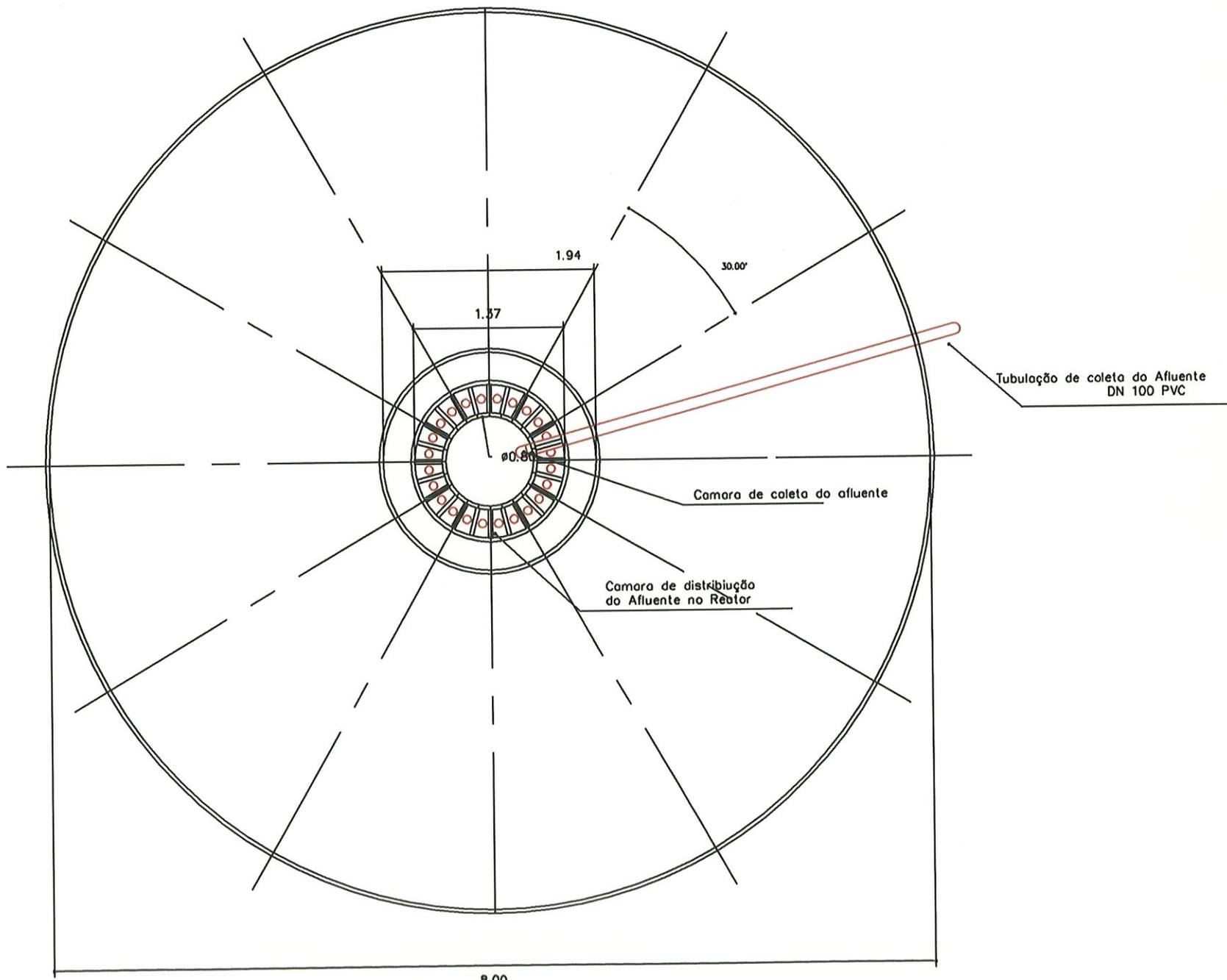
PLANTA 01- CORTE TÍPICO COM SISTEMA DE COLETA E DISTRIBUIÇÃO DO AFLUENTE

ESC-1:50



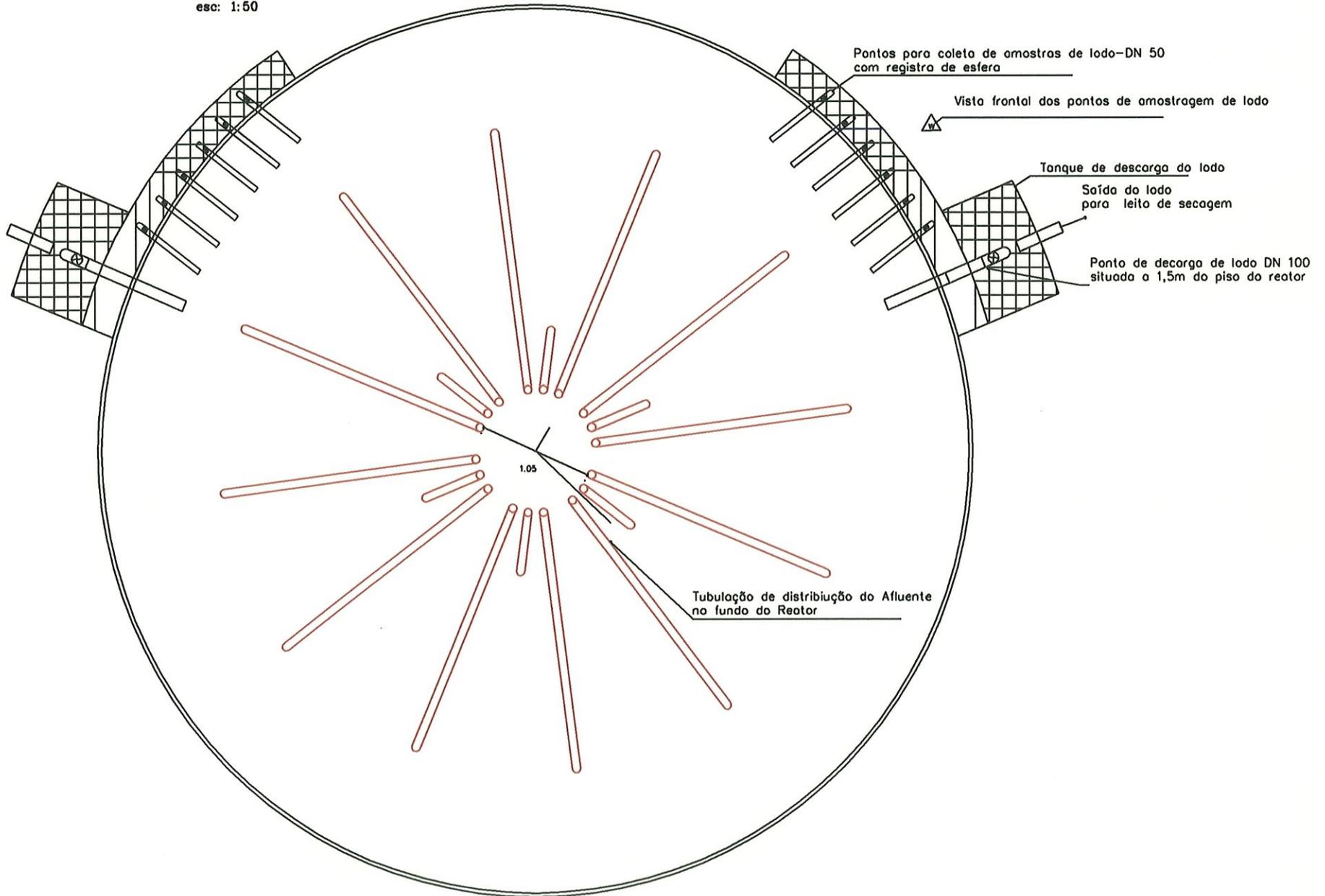
PLANTA 02- VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE COLETA E DISTRIBUIÇÃO DO AFLUENTE

ESC:1:50



PLANTA 03-DETALHE DA DISTRIBUIÇÃO DO AFLUENTE NO FUNDO DO REATOR
E VISTA SUPERIOR DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM E DESCARTE DO LODO

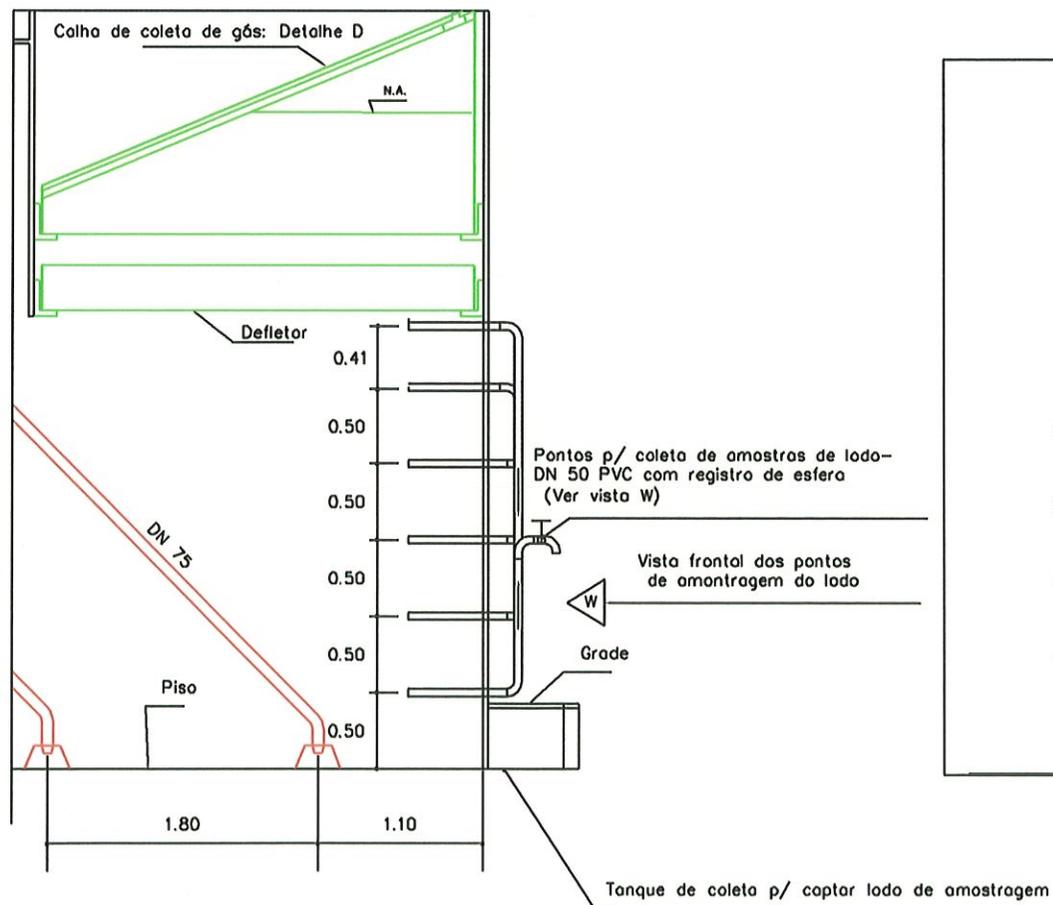
esc: 1:50



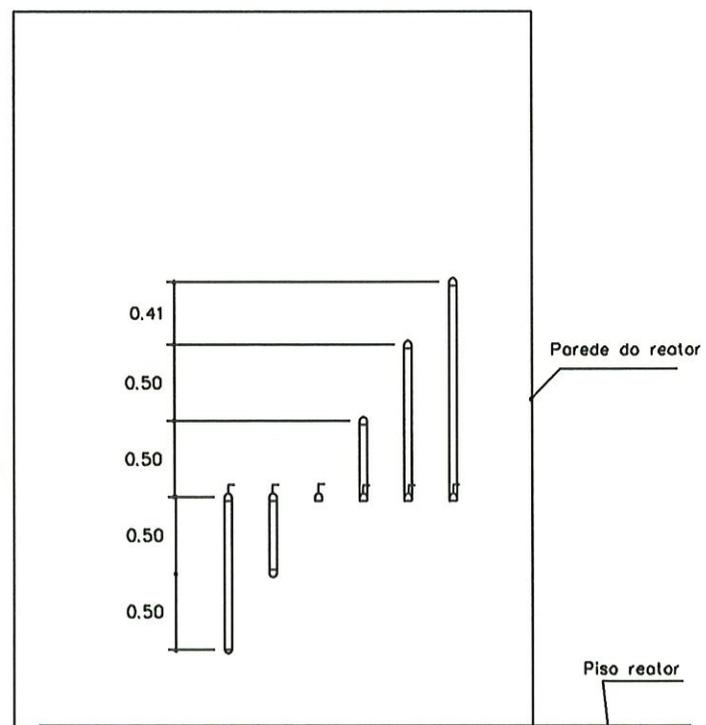
PLANTA 04- DETALHAMENTO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM DE LODO NO REATOR

ESC: 1:50

Pontos de coleta de amostras de lodo



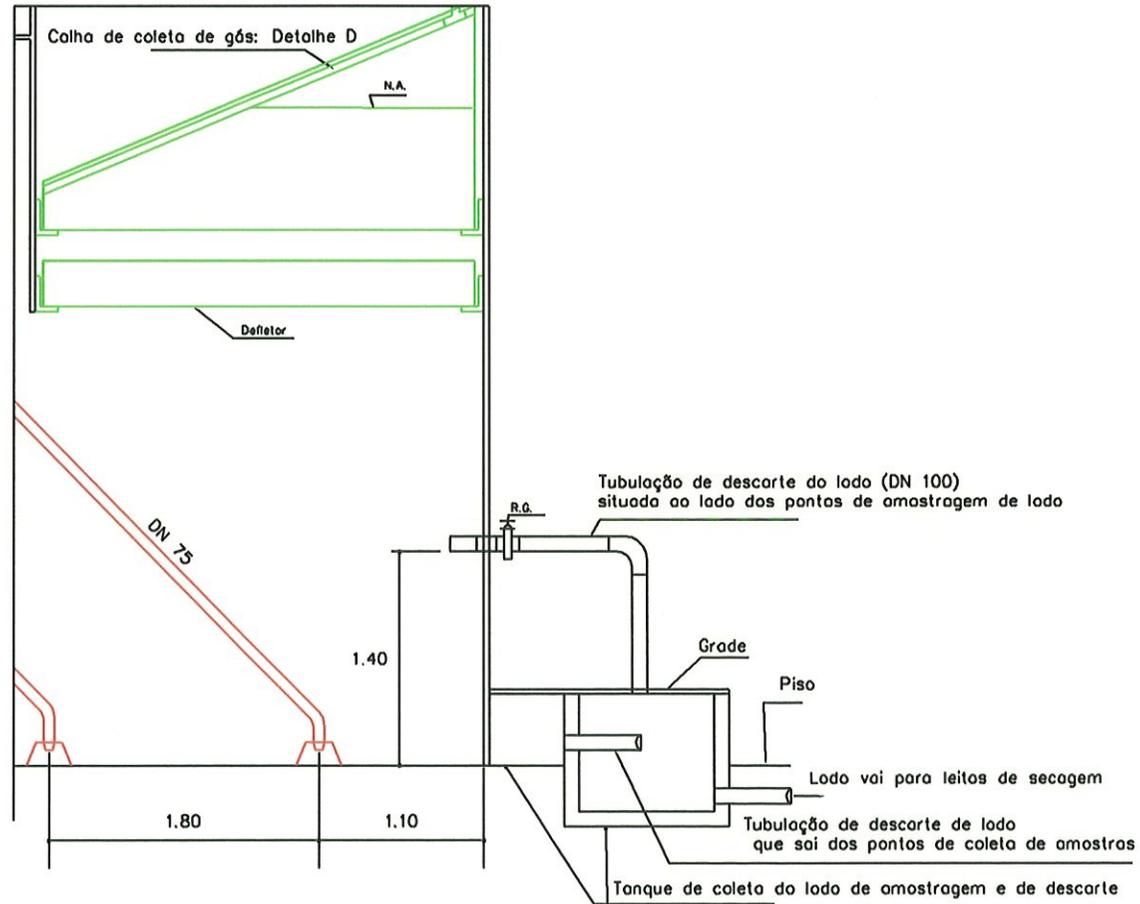
Vista frontal dos pontos de amostragem do lodo



Obs: Para um melhor entendimento de projeto estes pontos de amostragens não foi colocado no corte típico do reator

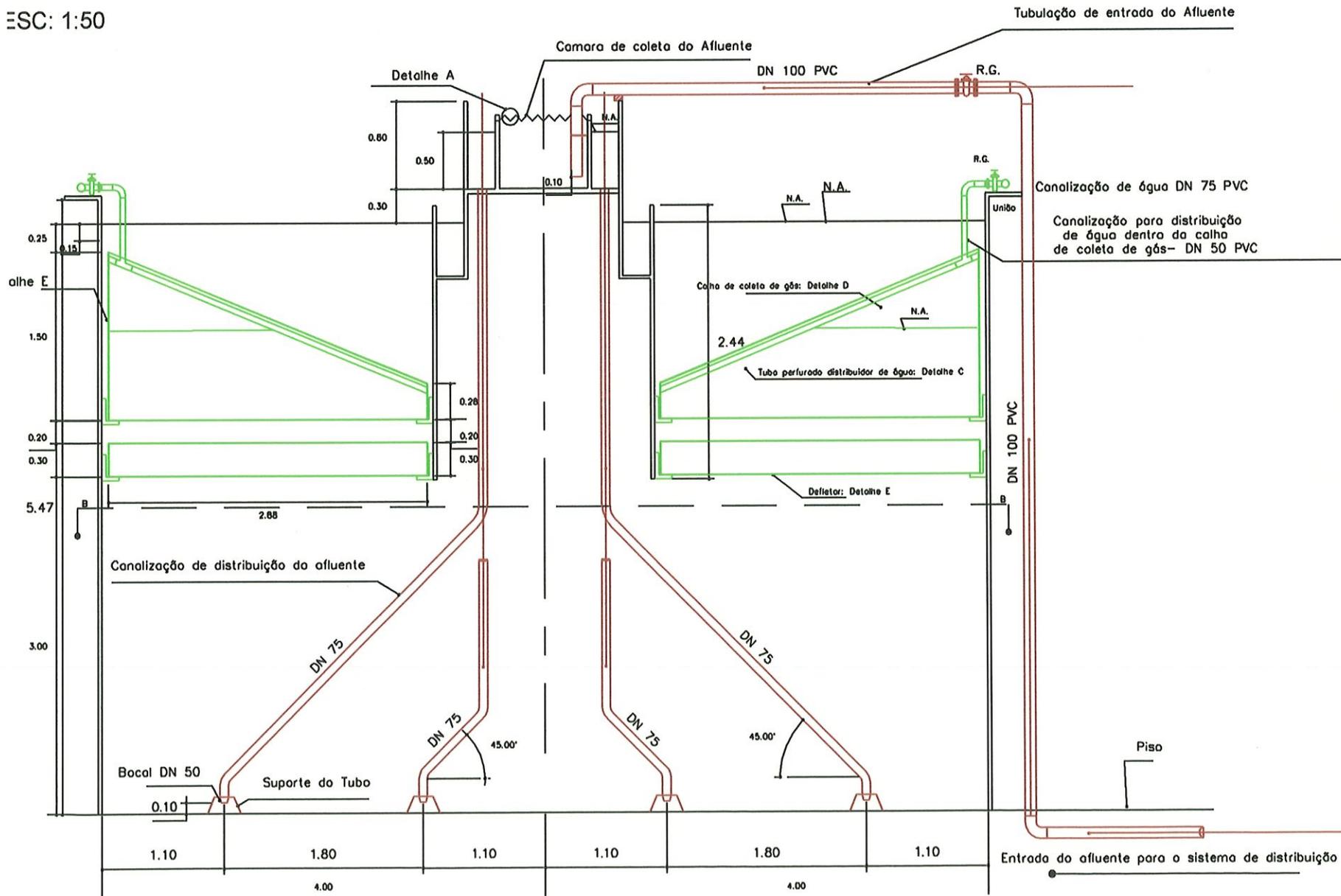
PLANTA 05- DETALHAMENTO DO PONTO DE DESCARTE DE LODO

ESC 1:50



Obs: Objetivo aqui é apresentar somente o ponto de descarga do lodo e não dimensionar o tanque de coleta do lodo

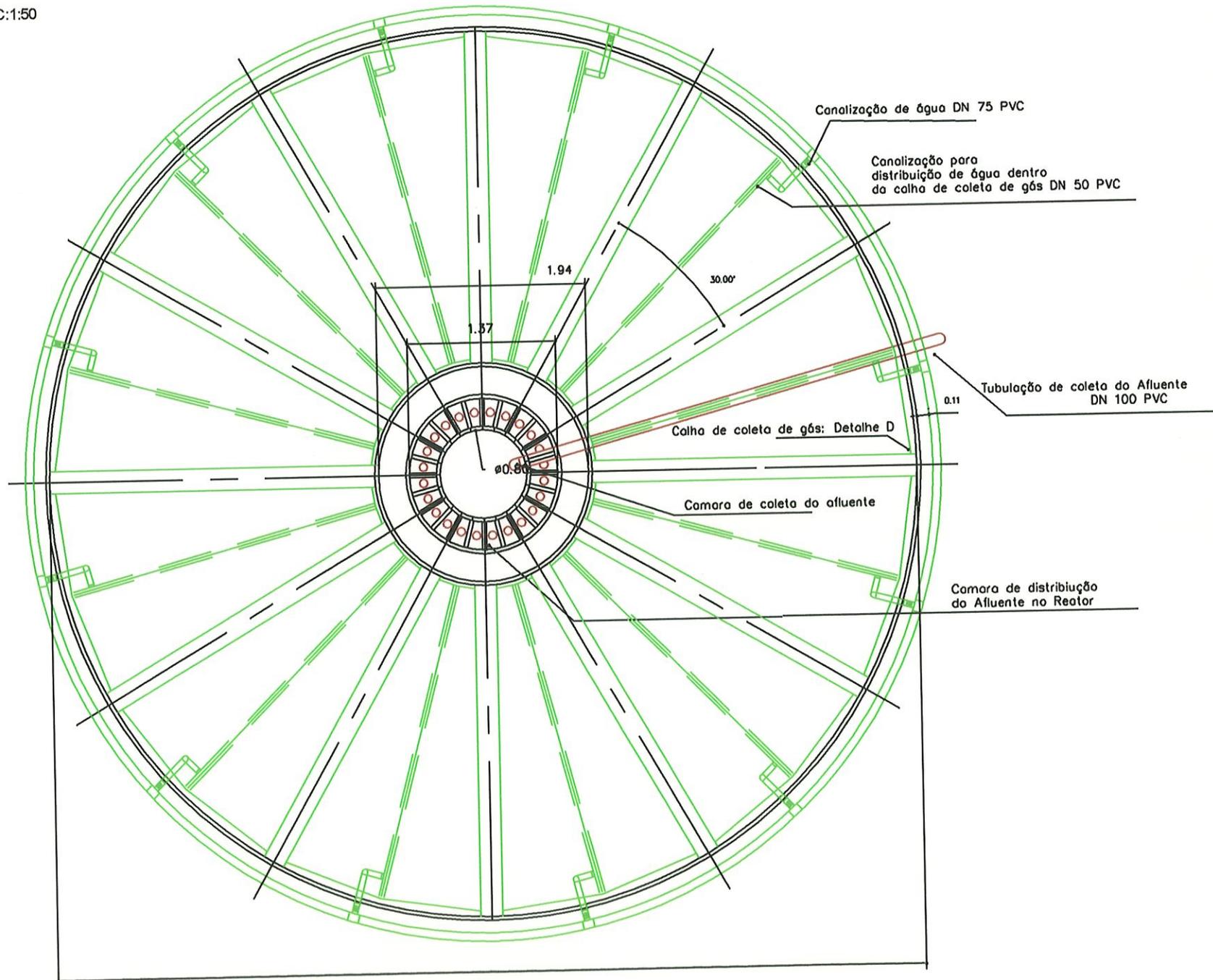
PLANTA 06: CORTE TÍPICO COM O SISTEMA DE COLETA / DISTRIBUIÇÃO DO AFLUENTE E SEPARADORES DE FASES
 ESC: 1:50



Proposta construtiva para reatores anaerobios do tipo UASB

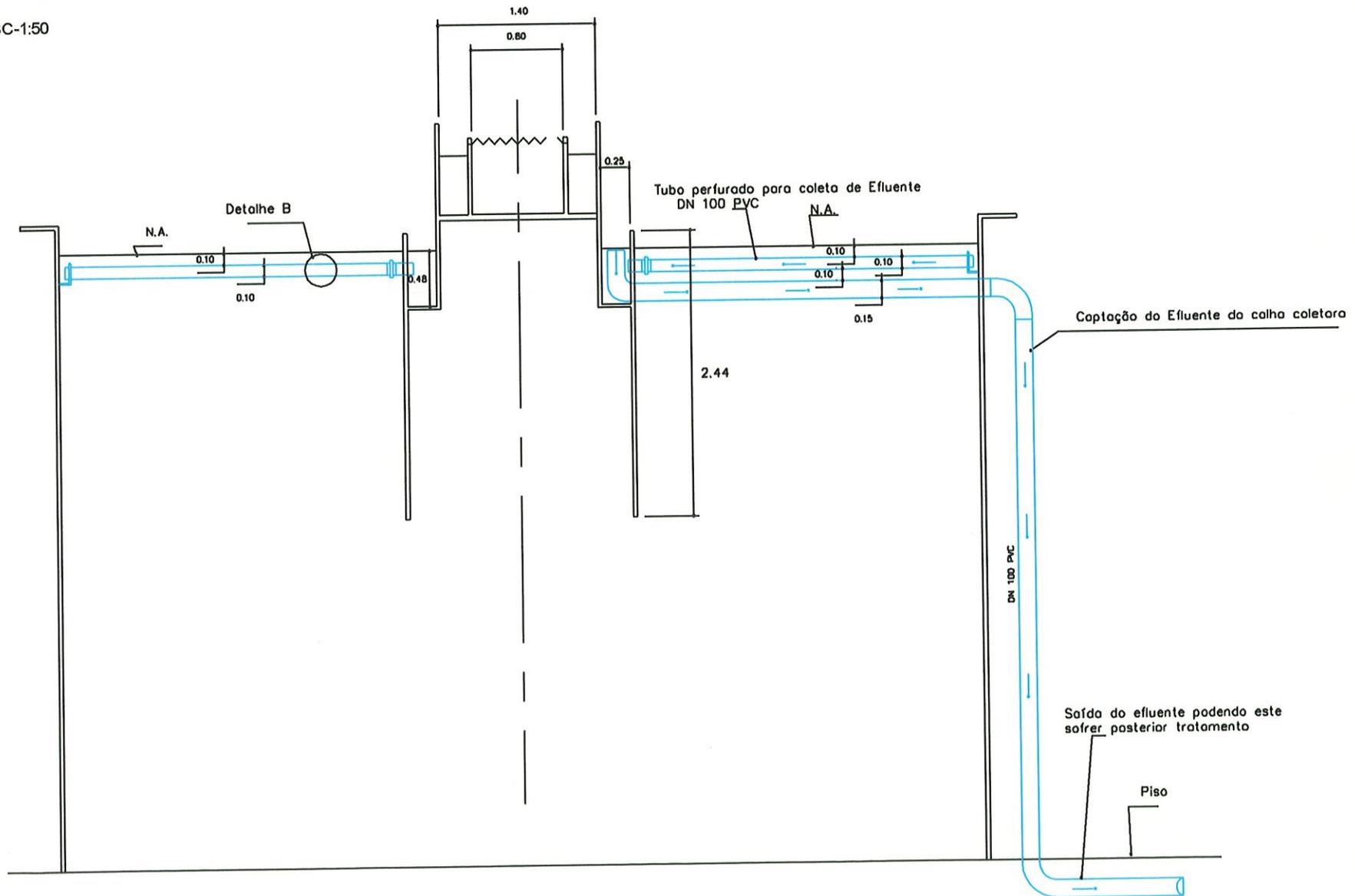
PLANTA 07- VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE COLETA/ DISTRIBUIÇÃO DO AFLUENTE E SEPARADORES DE FASES

ESC:1:50



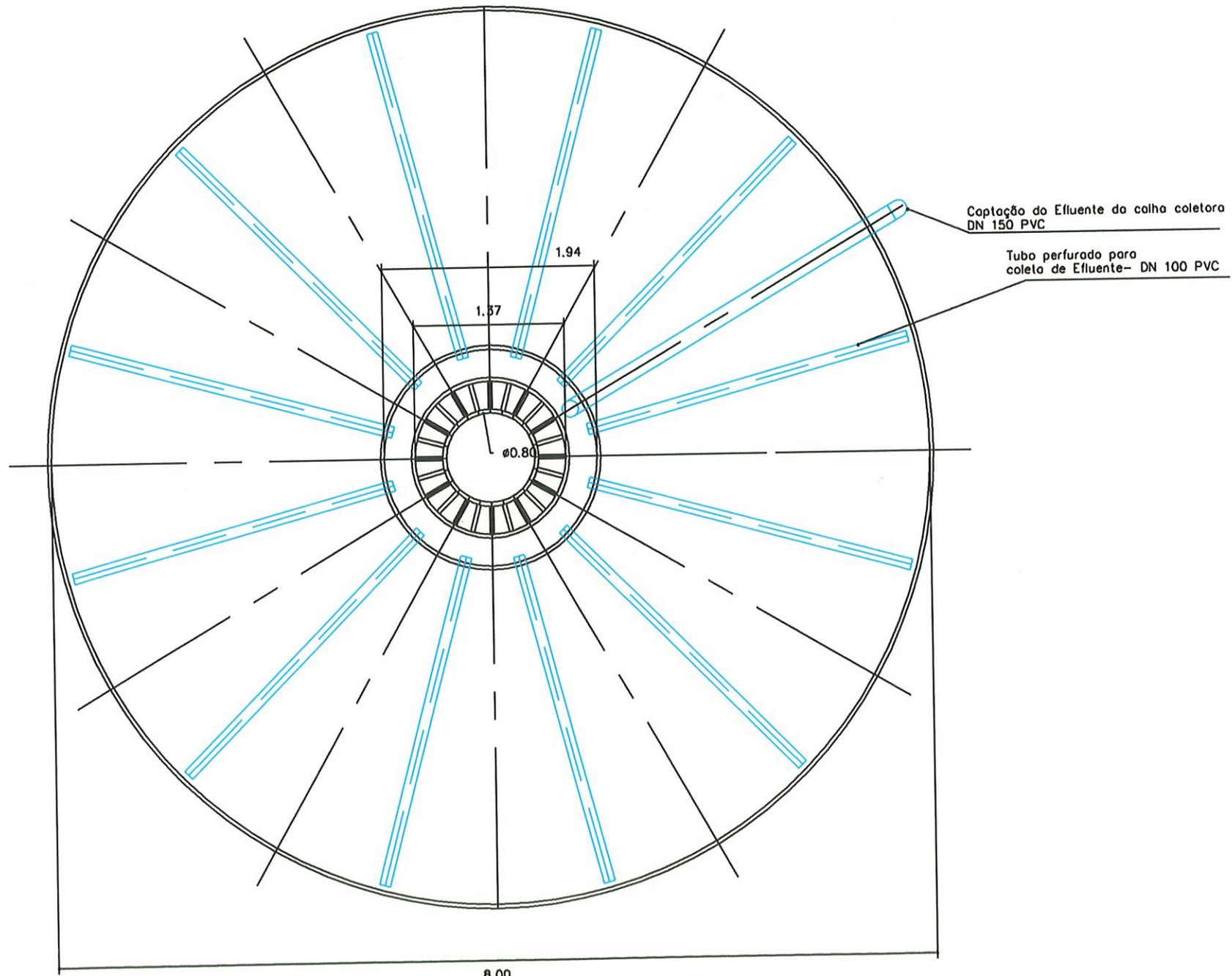
PLANTA 08- CORTE TÍPICO COM O SISTEMA DE COLETA DO EFLUENTE

ESC-1:50



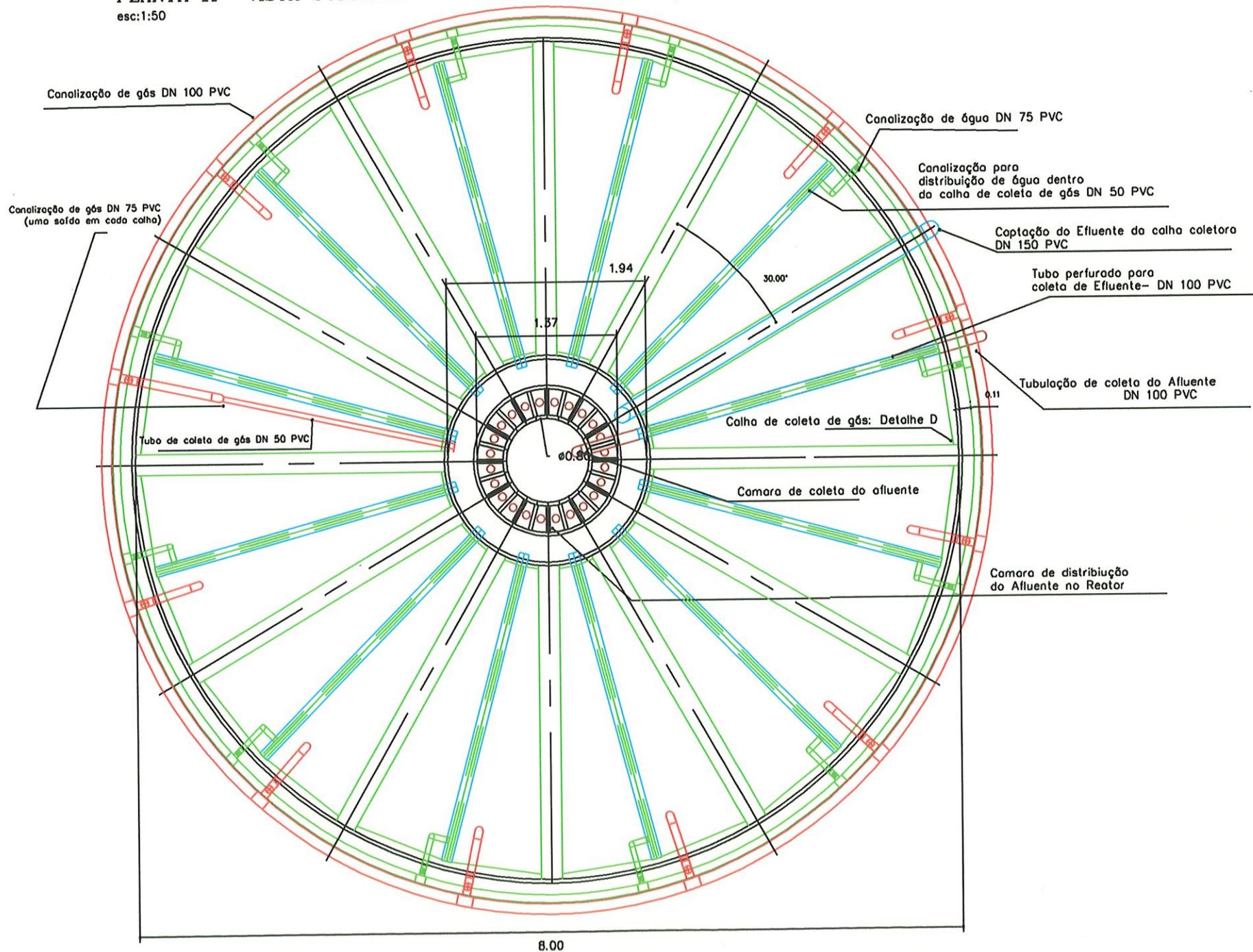
PLANTA 09- VISTA SUPERIOR DO SISTEMA DE COLETA DO EFLUENTE

ESC:1:50



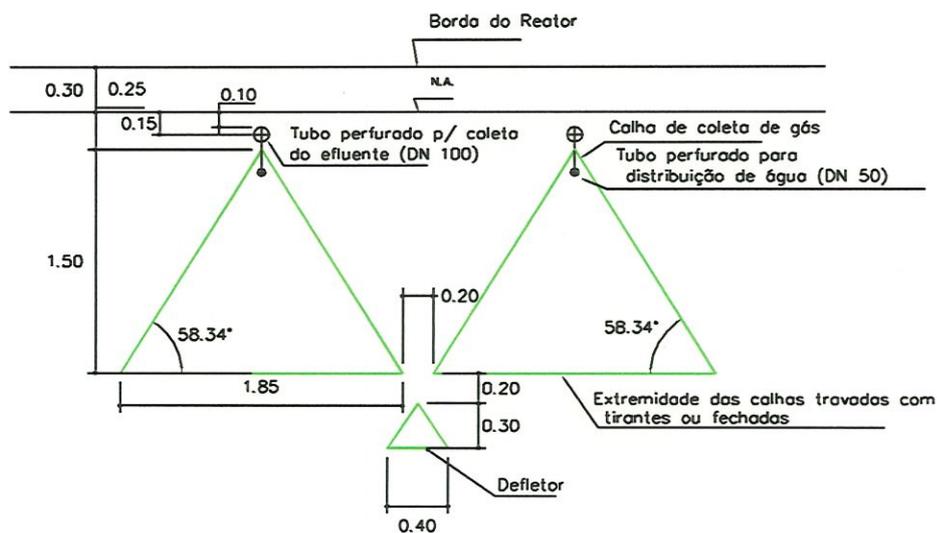
PLANTA 11- VISTA SUPERIOR DO REATOR COMPLETO (INCLUSIVE COLETOR DE GÁS)

esc:1:50

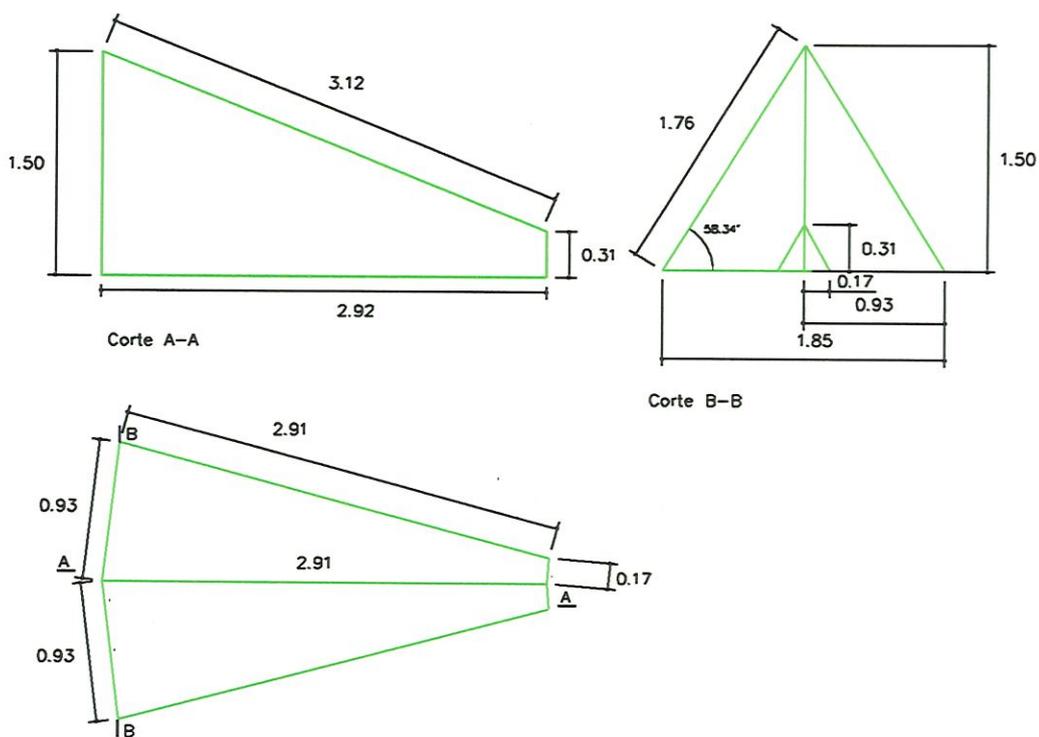


PLANTA 12- DETALHAMENTO DO SEPARADOR DE FASES

Detalhe E: Detalhe da posição do separador de fases

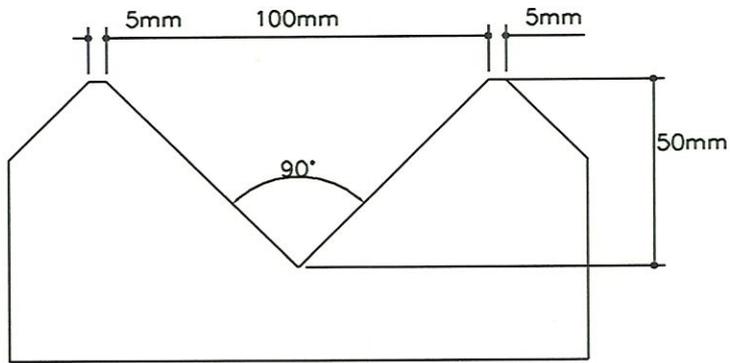


Detalhe D: Detalhe da calha de coleta de gás (Separador de Fases)



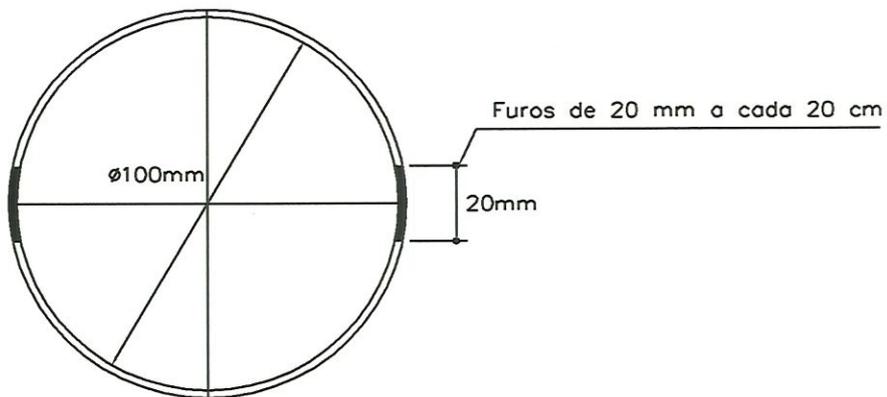
PLANTA 13- DETALHAMENTO HIDRÁULICO

DETALHE A



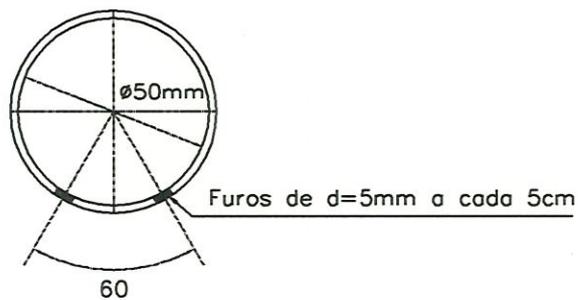
Detalhes dos vertedores triangulares da Câmara de coleta do afluente

DETALHE B



Detalhes do Tubo de Coleta do Efluente no Reator

DETALHE C



4.2- Projeto estrutural da proposta construtiva de reator anaeróbio (Tipo UASB)

Para o projeto estrutural do reator apresentam-se as hipóteses de cálculo, o dimensionamento e as ligações dos elementos que o compõem. Esta estrutura, de maneira geral, é dividida em: paredes, estrutura interna e base do reator.

4.2.1- Paredes do reator anaeróbio

4.2.1.1- Comportamento estrutural

Deseja-se criar uma superfície interna contínua para a parede do reator circular, onde as peças pré-moldadas sejam solidarizadas, dando origem a um tubo de parede fina. Para tanto, os elementos de parede pré-moldados são unidos através de emendas por traspasse (concreto ou argamassa moldado "in loco"). Os esforços para cascas cilíndricas com simetria axial geométrica e de carregamento são apresentados na figura 38:

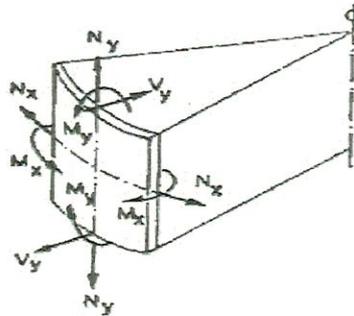


Figura 38-Esforços em cascas cilíndricas com simetria axial geométrica e de carregamento Fonte: HANAI (1977)

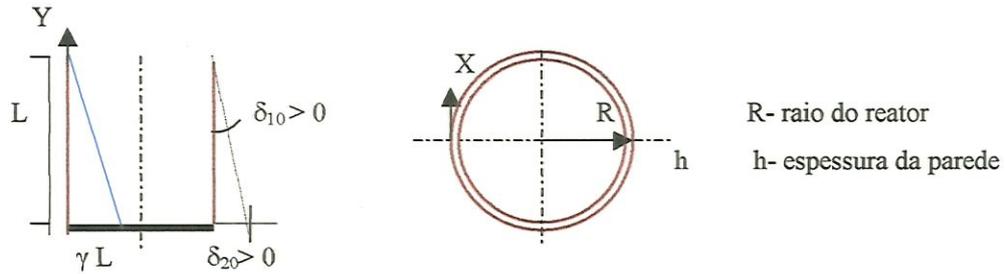
A casca cilíndrica, está perfeitamente engastada na borda inferior, através de um anel circular solidarizado à laje de fundo do reator. Esta vinculação de casca, na maioria dos casos, é diferente da membranal, acarretando o aparecimento das chamadas perturbações de borda. Esta perturbação causa um regime de flexão que pode se arrastar por toda a estrutura ou limitar-se à região das bordas, dependendo das características geométricas e mecânicas da casca.

Os esforços, que causam perturbações nas bordas das paredes, são determinados fazendo a compatibilidade dos deslocamentos, ou seja, aplica-se o "Processo dos Esforços" caracterizado pela casca em regime de membrana.

4.2.1.2- Expressões para cálculo de esforços e deslocamentos na parede

Para o cálculo dos esforços e deslocamentos na parede, são empregadas expressões levando em consideração esforços nas cascas em regime de membrana (indicados com índice "0") e esforços nas cascas em regime de flexão (indicados com índice "1").

a) Casca cilíndrica submetida à pressão hidrostática- (expressões 4.13 a 4.16)



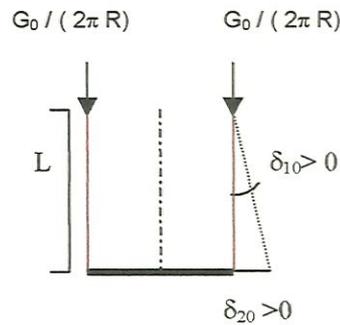
$$N_{y0} = N_{xy0} = 0 \quad (4.13)$$

$$N_{x0} = \gamma R (L - Y) \quad (4.14)$$

$$\delta_{10} = (\gamma R^2) / (E h) \quad (4.15)$$

$$\delta_{20} = (\gamma R^2 L) / (E h) \quad (4.16)$$

b) Casca cilíndrica submetida ao peso próprio e a peso de superestrutura



$$N_{x0} = N_{xy0} = 0 \quad (4.17)$$

$$N_{y0} = - (g y + G_0 / (2\pi R)) \quad (4.18)$$

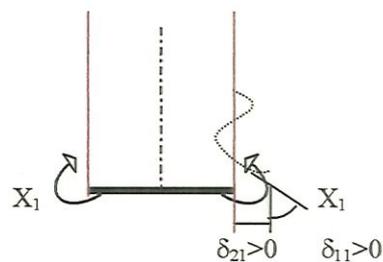
$$\delta_{10} = v g R / (E h) \quad (4.19)$$

$$\delta_{20} = v (g L R + G_0 / 2\pi) / (E h) \quad (4.20)$$

g = peso próprio da parede

G_0 = peso de superestrutura

c) Casca cilíndrica submetida a esforços aplicado na borda (flexão devido ao engaste na borda).



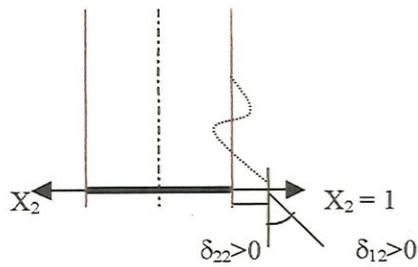
$$N_{y1} = N_{xy1} = 0 \quad (4.21)$$

$$N_{x1} = \frac{6(1 - \nu^2)}{R \lambda^3 h^2} (\lambda X_1 \psi_2 + X_2 \psi_3) \quad (4.22)$$

$$M_{y1} = (\lambda X_1 \psi_1 + X_2 \psi_4) \lambda^{-1} \quad (4.23)$$

$$M_{x1} = \nu M_{y1} \quad (4.24)$$

$$V_{y1} = - (2 \lambda X_1 \psi_4 - X_2 \psi_2) \quad (4.25)$$



$$\psi_1 = e^{-\lambda y} (\cos \lambda y + \sen \lambda y) \quad (4.26)$$

$$\psi_2 = e^{-\lambda y} (\cos \lambda y - \sen \lambda y) \quad (4.27)$$

$$\psi_3 = e^{-\lambda y} \cos \lambda y \quad (4.28)$$

$$\psi_4 = e^{-\lambda y} \sen \lambda y \quad (4.29)$$

$$\delta_{11} = (\lambda D_{cc})^{-1} \quad (4.30)$$

$$\delta_{22} = (2 \lambda^3 D_{cc})^{-1} \quad (4.31)$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = (2 \lambda^2 D_{cc})^{-1} \quad (4.32)$$

$$D_{cc} = \frac{E h^3}{12 (1 - \nu^2)} \quad (4.33) \quad \lambda = \frac{[3 (1 - \nu^2)]^{1/4}}{[R^2 h^2]^{1/4}} \quad (4.34)$$

4.2.1.3- Cálculo dos esforços solicitantes e deslocamentos na parede

Utilizando as expressões do item 2.1.2 os esforços que irão solicitar a estrutura são apresentados a seguir.

a) Cálculo dos esforços e deslocamentos na parede devidos à pressão hidrostática no interior do reator UASB

- Dados:

L- altura lâmina d'água = 5,25m;

γ - densidade do líquido = 1020 à 1040kg/ m³;

R- raio do reator = 4m;

h- espessura da parede (obtida através dos arranjos de armadura- figura 44) = 0,046m

h= 46mm;

- Esforços

$$N_{y0} = N_{xy0} = 0$$

$$N_{x0} = \gamma R (L - Y) = 1,04 \times 5,25 \times 4 = 21,84 \text{tf/ m} = 214 \text{kN/ m};$$

- Deslocamentos

$$\delta_{10} = (\gamma R^2) / (E h) = (1,04 \times 4^2) / (E \times 0,046) = 361,74 / E;$$

$$\delta_{20} = (\gamma R^2 L) / (E h) = (1,04 \times 4^2 \times 5,25) / (E \times 0,046) = 1899,13 / E.$$

b) Cálculo dos esforços e deslocamentos na parede devidos ao peso próprio e ao peso de superestrutura

$$N_{x0} = N_{xy0} = 0;$$

$$N_{y0} = -(0,10 \times 5,25 + 0,397) = -0,947 \text{ tf/m} = -9,28 \text{ kN/m};$$

$$\delta_{10} > 0 \quad \delta_{10} = 0,20 \times 0,10 \times 4 / (E \cdot 0,046) = 1,740 / E;$$

$$\delta_{20} = 0,20 \times (0,10 \times 5,25 \times 4 + 10/2\pi) / (E \cdot 0,046) = 16,05 / E$$

$$v = 0,20 \text{ (NBR 6118)}$$

$$g = 2,5 / (2 \pi \cdot 4) = 0,10 \text{ tf/m}^2$$

G_0 = peso dos separadores de fases + viga sobre a parede do reator para apoiar tubulações

$$G_0 = 0,397 \text{ tf/m} = 4,0 \text{ kN/m}$$

c) Casca cilíndrica submetida a esforços aplicados nas bordas (flexão devido engaste na borda)

A casca cilíndrica com a borda engastada, acarreta um regime de flexão caracterizado pelas perturbações na borda inferior, que são os esforços X_1 (momento fletor) e X_2 (esforço horizontal), com valores tais que os deslocamentos finais no pé da parede sejam nulos.

Estes valores (X_1 e X_2), são encontrados fazendo-se a compatibilidade de deslocamentos (expressões 4.35 e 4.36):

$$X_1 \delta_{11} + X_2 \delta_{12} + \delta_{10} = 0 \quad (4.35)$$

$$X_1 \delta_{21} + X_2 \delta_{22} + \delta_{20} = 0 \quad (4.36)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{[3(1 - 0,20^2)]^{1/4}}{[4^2 \times 0,046^2]^{1/4}} = 3,0369 \text{ m}^{-1}$$

$$D_{cc} = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} = \frac{E(0,046)^3}{12(1 - 0,20^2)} = 0,08449 \times 10^{-4} \times E$$

$$\delta_{11} = (\lambda D_{cc})^{-1} = (3,0369 \times 0,08449 \times 10^{-4} \times E)^{-1} = 38.971,62 / E$$

$$\delta_{22} = (2 \lambda^3 D_{cc})^{-1} = (2 \times 3,0369^3 \times 0,08449 \times 10^{-4} \times E)^{-1} = 2.112,87 / E$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = (2 \lambda^2 D_{cc})^{-1} = (2 \times 3,0369^2 \times 0,08449 \times 10^{-4} \times E)^{-1} = 6.416,58 / E$$

Substituindo os valores dos deslocamentos nas equações de compatibilidade (4.35 e 4.36) tem-se:

$$X_1 38 971,62 + X_2 6 416,58 + 361,74 = 0$$

$$X_1 6 416,58 + X_2 2 112,87 + 1899,13 = 0$$

$$X_1 = 0,277 \text{ tf} \cdot \text{m} / \text{m} = 2,72 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$X_2 = -1,741 \text{ tf} / \text{m} = -17,06 \text{ kN} / \text{m}$$

Substituindo os valores de X_1 e X_2 nas equações 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 são determinados os esforços solicitantes ao longo da altura da parede do reator que são (figura 39- item 4.2.1.2):

- Esforços e deslocamentos na parede devidos à pressão hidrostática no interior do reator UASB

$$N_{x0} = 214 \text{ kN} / \text{m}$$

- Esforços na parede devidos ao peso próprio e ao peso de superestrutura

$$N_{y0} = -9,8 \text{ kN} / \text{m}$$

- Esforços aplicados na borda (flexão devido engaste na borda)

Determinação dos esforços X_1 (momento fletor) e X_2 (força horizontal)

$$X_1 = M_y = 2,72 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

$$X_2 = V_y = -17,06 \text{ kN} / \text{m}$$

4.2.1.4- Dimensionamento da parede do reator UASB

a) Dados

Telas de aço soldadas padronizadas ou básicas de acordo com:

Normas: EB 565; MB 776 e EB3 da ABNT

Categoria do Aço: CA 60 $\Rightarrow 3 \text{ mm} \leq \phi \leq 10 \text{ mm}$

CA 50 $\Rightarrow \phi \geq 10 \text{ mm}$

Largura padronizada: 2,45m

Características do concreto de estudo para o dimensionamento

$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$

$f_{tk} = 0,06 f_{ck} + 0,7 = 3,7 \text{ MPa}$ (valor estimado de projeto NBR 6118)

Pintura de proteção: nenhuma

b) Esforços solicitantes (figura 39)

Esforço anelar máximo de tração devido à pressão hidrostática

$$N_{q\text{máx}} = 182 \text{ kN/m} \Rightarrow \text{considerando a pressão máxima à } 0,8\text{m do piso}$$

Momento fletor máximo devido à pressão da água, decorrente do engastamento da parede com a laje de fundo

$$M_{q\text{máx}} = 2,72 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

Força cortante máxima na parede devido à pressão da água na ligação com a laje de fundo

$$V_{q\text{máx}} = -17,06 \text{ kN} / \text{m}$$

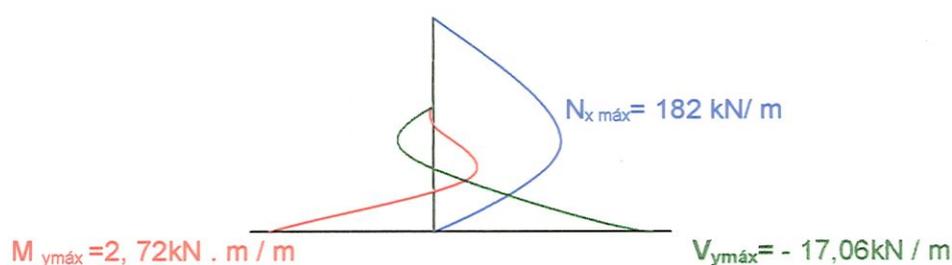


Figura 39 - Esforços solicitantes finais nas paredes do reator

c) Dimensionamento da armadura no Estádio III- Estado Limite Último – Solicitações Normais

- Esforço de tração nas paredes

$$N_{qd\text{máx}} = N_{q\text{máx}} \times \gamma_f = 182 \times 1,4 = 255 \text{ kN/m}$$

No Estado Limite Ultimo o f_{tk} é desconsiderado e a armadura para resistir ao esforço, considerando a categoria do aço: CA 60, será:

$$A_{sl} = N_{qd\text{máx}} / f_{yd} = 255 \times 10^{-3} / (600 / 1,15) = 4,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{m} = 4,9 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

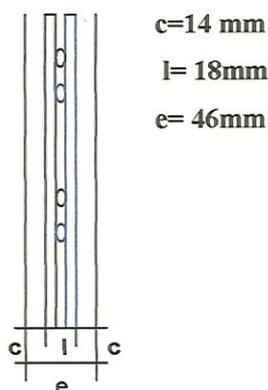
Para suportar este esforço de tração adota-se para cálculo duas telas de aço soldadas quadradas (espaçamento entre fios 10 cm) onde $\phi_{transversal} = \phi_{longitudinal} = 6\text{mm}$ e $A_{sl} = A_{st} = 2,83 \text{ cm}^2 / \text{m}$ cada, resultando num $A_{stotal} = 5,66 \text{ cm}^2 / \text{m}$

Com esta armadura faz-se então o arranjo de telas no interior da parede. Este arranjo irá depender do encaixe a ser feito entre os setores circulares pré moldados que irão formar a parede do reator, ou seja, da emenda entre os setores, que no caso de tela soldada será por traspasse.

Para os setores circulares pré- moldados, devido às emendas por traspasse verificam-se duas situações de arranjos de tela, determinando a espessura da parede do reator (figura 40).

Situação 1 (S1)

(2 telas justapostas)



Situação 2 (S2)

(2 telas distanciadas)

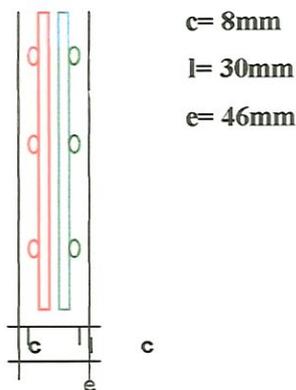


Figura 40- Arranjo das armaduras das paredes pré- moldadas

O valor corrente para adoção do cobrimento (c), normalmente é dado por $c=1,2\phi=7,2 \text{ mm}$; adotou-se $c=14 \text{ mm}$ (S1) e $c=8 \text{ mm}$ (S2). Estes valores estão em função do meio ambiente (formação de dióxido de carbono) e da qualidade do concreto.

Obs: Procura-se não emendar a tela no interior das peças pré- moldadas, utilizando os painéis na sua totalidade.

d) Verificação do esforço de flexão junto ao engastamento da parede com o anel inferior do reator

$$M_{qdm\acute{a}x} = M_{qm\acute{a}x} \times \gamma_c = 2,72 \times 1,4 = 3,81 \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}$$

Para a situação 1 e situação 2 ($d=2,6 \text{ cm}$). Assim, calculando-se K_c :

$$K_c = b d^2 / M_{qdm\acute{a}x} = 100 (2,6)^2 / 381 = 1,774 \text{ cm}^2 / \text{KN} \Rightarrow \beta_x = 0,22 \text{ (Dom 3)}$$

$$K_s = 0,021 \Rightarrow 0,022 = A_s d / M_{qdm\acute{a}x}$$

$$A_s = 0,022 \times 381 / 2,6 = 3,223 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Pode-se verificar que a tela utilizada para suportar esforços anelares de tração, não é suficiente para suportar os esforços de flexão no fundo do reator. Assim, na região próxima ao fundo são adicionadas por metro ao longo do perímetro do reator 3 barras de 6mm e 1,80m de altura.

e) Verificação do cisalhamento: Estado Limite Último : Solicitações tangenciais (NBR 6118)

- Esforço cortante máximo de cálculo

$$V_{qd\max} = V_{qm\max} \times \gamma_f = 17,06 \times 1,4 = 24 \text{ kN / m}$$

- Cálculo da tensão de referência

$$\tau_{wd} = V_{qd\max} / b_w d = 24 / (100 \times 2,6) = 0,0923 \text{ KN/cm}^2 = 0,923 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wu} = 0,5 \times 0,25 \times f_{cd} = 0,5 \times 0,25 \times (50 / 1,4) = 4,46 \text{ MPa}$$

$$\tau_{wd} \leq \tau_{wu} \leq 4,5 \text{ MPa}$$

Comparando essa tensão com o valor último para lajes sem armadura transversal tem-se:

$$\tau_{wu1} = \psi_4 \sqrt{f_{ck}}$$

$$\psi_4 = 0,12 \frac{\alpha k}{1 - (3d/l)} \quad (3d/l) = \text{muito pequeno}$$

Então:

$$\psi_4 = 0,12 \alpha k;$$

$$\alpha = 1 + 50\rho_1 = 1 + 50 \cdot 2,83 / (100 \times 2,6) = 1,544$$

$$k = 1,6 - d = 1,6 - 0,026 = 1,574$$

$$\alpha k = 1,544 \times 1,574 = 2,430$$

Como $\alpha k > 1,75$, de acordo com anexo da NBR 7197 toma-se $\alpha k = 1,75$. Então:

$$\tau_{wu1} = \psi_4 \sqrt{f_{ck}} = 0,12 \times 1,75 \sqrt{50} = 1,48 \text{ MPa}$$

Como

$$\tau_{wd} = 0,923 \text{ MPa} < \tau_{wu1} = 1,48 \text{ MPa}, \text{ não é necessária armadura transversal}$$

f) Verificação da abertura de fissuras

- Verificação no Estado Limite de Formação de Fissuras

A tensão máxima que ocorre na parede o reator é:

$$\sigma_{qm\max} = \frac{N_{qm\max}}{h b} = \frac{182}{100 \times 4,6} = 0,395 \text{ kN/cm}^2 = 3,9 \text{ MPa}$$

$$f_{tk} = 3,7 \text{ MPa}$$

Reduzindo o valor de f_{tk} devido ao efeito de retração do concreto tem-se:

$$f_{tk1} = 0,75 f_{tk} = 0,75 \times 3,7 = 2,77 \text{ MPa}$$

Como $\sigma_{q\text{máx}} > f_{tk1}$, pode-se verificar que irá ocorrer fissuras na região de esforço máximo de tração (0,8m do piso).

- Estado de fissuração inaceitável : $W_k \leq 0,1 \text{ mm}$

A NBR 6118 considera que a fissuração é nociva quando a abertura na superfície do concreto for maior que 0,1mm (para peças não protegidas em meio agressivo). Assim, esta será a limitação aqui considerada para a abertura de fissuras.

$$W_k = 1,658 w_m \text{ onde;}$$

w_k = abertura máxima das fissuras;

w_m = abertura média das fissuras;

$$W_m = s \cdot \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = s \cdot \varepsilon_{sm}$$

Es

Calculando s :

$$s = s_1 \quad \text{se } s_1 \geq e \quad e = \text{espaçamento entre fios transversais da tela} = 100 \text{ mm}$$

$$s = 1,8s_1 \quad \text{se } 1,8s_1 < e \quad s = \text{espaçamento entre fissuras}$$

$$s = e \quad \text{se } 1,8s_1 > e \text{ e } s_1 < e$$

$$\text{sendo } s_1 = 1,5 (c + \phi/2) + 0,16 (\phi / \rho_r):$$

s_1 = espaçamento de referência entre fissuras e c = cobrimento da armadura

$$\phi = 6 \text{ mm}$$

$$\rho_r = \text{taxa geométrica de armadura} = A_s / A_c = 5,66 \text{ cm}^2 / (100 \text{ cm} \times 4,6 \text{ cm}) = 0,012304$$

Substituindo os valores para a situação 1 de arranjo de armadura

$$c = 14 \text{ mm}$$

$$s_1 = 103,52 \text{ mm} > e \text{ então:}$$

$$s = 103,52 \text{ mm}$$

Calculando a deformação média da armadura mais tracionada da seção: $\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s}$

Es

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \frac{1}{E_s} (\sigma_s - f_{tk}) = \frac{1}{210000} (321,55 - 150,35) = 0,000815$$

Substituindo os valores:

$$W_m = s \cdot \varepsilon_{sm} = 103,52 \times 0,000815$$

$$W_m = 0,0843 \text{ mm}$$

$$w_k = 1,658 \quad w_m = 0,1399 \text{ mm}$$

Como $w_k = 0,1399 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm}$ procura-se reduzir a tensão e conseqüentemente a deformação na armadura, adicionando 8 ϕ 6 mm na região de máxima sollicitação.

Assim, aumenta-se a área de armadura para $A_s = 7,924 \text{ cm}^2$

$$\frac{\varepsilon_{sm}}{E_s} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \frac{1}{2\rho_r} (\sigma_s - f_{tk}) = \frac{1}{210000} (229,98 - 107,42) = 0,000583$$

$$w_k = 1,658 \times 103,52 \times 0,000403 = 0,0691 \text{ mm} < 0,1 \text{ mm (NBR 6118)}$$

Substituindo os valores para a situação 2 de arranjo de armadura

$$c = 8 \text{ mm}$$

$$s_1 = 94,52 \text{ mm} < e \text{ então:}$$

$$s = e = 100 \text{ mm}$$

Calculando a deformação média da armadura mais tracionada da seção: $\frac{\varepsilon_{sm}}{E_s} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s}$

$$\frac{\varepsilon_{sm}}{E_s} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \frac{1}{2\rho_r} (\sigma_s - f_{tk}) = \frac{1}{210000} (321,55 - 150,35) = 0,000815$$

Substituindo os valores:

$$w_m = s \cdot \varepsilon_{sm} = 100 \times 0,000815$$

$$w_m = 0,0815 \text{ mm}$$

$$w_k = 1,658 \quad w_m = 0,1351 \text{ mm}$$

Como $w_k = 0,1351 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm}$ procura-se reduzir a tensão e conseqüentemente a deformação na armadura, adicionando 8 ϕ 6 mm na região de máxima sollicitação.

Assim, aumenta-se a área de armadura para $A_s = 7,924 \text{ cm}^2$

$$\frac{\varepsilon_{sm}}{E_s} = \frac{\sigma_{sm}}{E_s} = \frac{1}{2\rho_r} (\sigma_s - f_{tk}) = \frac{1}{210000} (229,98 - 107,42) = 0,000583$$

$$w_k = 1,658 \times 100 \times 0,000403 = 0,0668 \text{ mm} < 0,1 \text{ mm (NBR 6118)}$$

4.2.1.5- Ligações dos elementos pré- moldados de parede

Para elementos pré- moldados de concreto, as ligações são consideradas problemáticas, pois interferem na produção, na execução e na montagem dos elementos, além de estarem intimamente ligadas ao comportamento da estrutura montada.

O CEB (1991) apresenta alguns princípios gerais sobre o projeto de ligações, que são:

- as ligações devem assegurar a rigidez e a estabilidade global da estrutura;
- devem ser levadas em conta as tolerâncias de fabricação e montagem;
- a ligação deve resistir às solicitações da análise da estrutura e nas partes do elemento pré- moldado, junto às ligações, deve ser prevista a transferência dos esforços;
- devem ser previstas acomodações da ligação, até ela atingir a sua capacidade.

A partir destes princípios, busca-se sempre reproduzir, através da ligação entre elementos pré- moldados, o comportamento das estruturas moldadas no local através da transmissão conveniente dos esforços.

Diversos trabalhos científicos e documentos referentes às ligações, podendo ser citados EL DEBS (1996), LEONHARDT & MONNING (1978), PCI (1988) e INSTITUTO BRASILEIRO DE TELAS SOLDADAS (IBTS), apresentam uma variedade de recursos para as ligações onde se utilizam elementos pré- moldados.

Baseando-se nestas publicações, pretende-se utilizar ligações que levem em consideração o tipo de vinculação, os esforços a serem transmitidos e o emprego de concreto no local.

a) Ligações entre paredes pré- moldadas (parede x parede)

Para o reator anaeróbio, a parede circular foi dividida em setores circulares de forma que haja o maior aproveitamento possível dos painéis de telas soldadas, ou seja, aproveitar ao máximo as dimensões da tela. Além disso, utiliza-se um número par (12) de setores circulares com arranjos de armaduras alternados para o encaixe entre essas peças, ou seja, setor circular com arranjo da situação 1 e setor circular com arranjo da situação 2 (vide figura 44).

No que diz respeito às emendas por traspasse de telas soldadas, o Instituto Brasileiro de Telas Soldadas (IBTS), recomenda que se deve emendar os painéis por simples sobreposição, onde os comprimentos dessas emendas possuem valores fixos que são:

- para armaduras principais utilizam-se a sobreposição de três malhas;
- para as armaduras de distribuição é utilizado para emenda por traspasse 1 malha.

Sendo assim, para o reator o traspasse das telas ligando paredes com arranjo das armaduras de **situação 1** com arranjo de armaduras de **situação 2** será (figura 41):

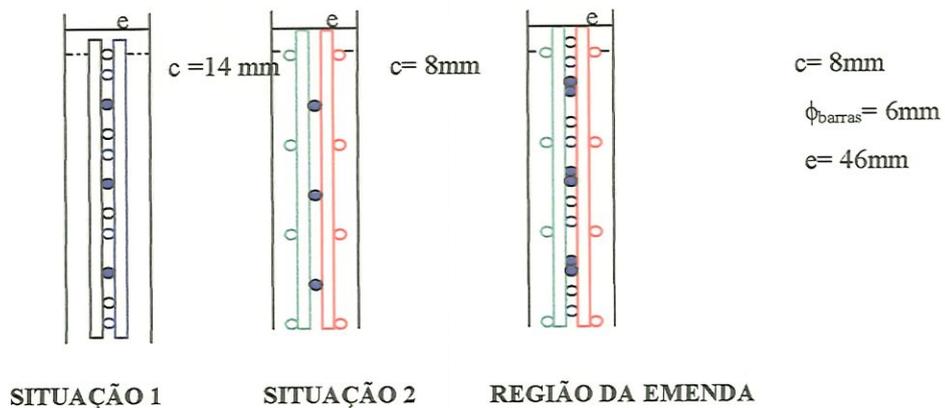


Figura 41- Arranjo das armaduras na região das emendas- Corte transversal

Legenda para a figura 45:

- = Tela quadrada soldada lado externo do reator (S1)
- = Tela quadrada soldada lado interno do reator (S1)
- = Tela quadrada soldada lado externo do reator (S2)
- = Tela quadrada soldada lado interno do reator (S2)
- = Barra de aço de 6mm colocada na direção longitudinal na região de maior solicitação de tração no reator

- Corte longitudinal da emenda na parede do reator ($\phi_{\text{barras}} = 6 \text{ mm}$)

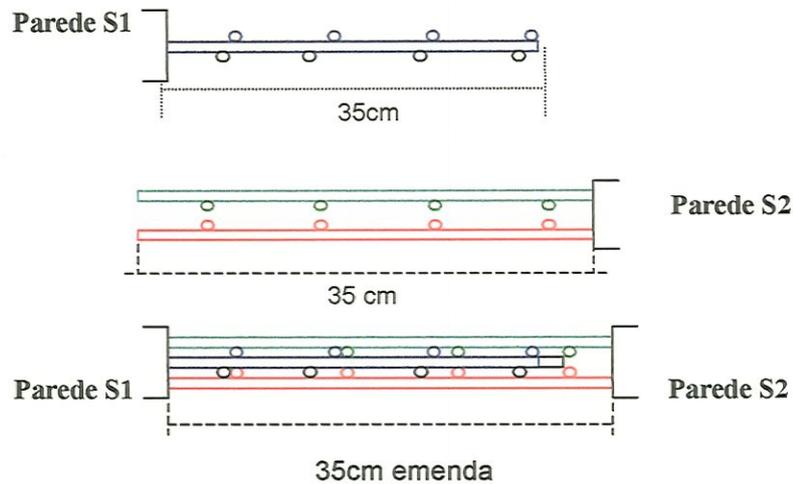


Figura 42- Arranjo das armaduras na região das emendas- Corte longitudinal

Legenda para a figura 42:

-  = Tela quadrada soldada lado externo do reator (S1)
-  = Tela quadrada soldada lado interno do reator (S1)
-  = Tela quadrada soldada lado externo do reator (S2)
-  = Tela quadrada soldada lado interno do reator (S2)
-  = Barras de aço transversais 6mm colocadas para resistir aos esforços (momentos) devido ao engaste da parede com o fundo do reator.

b) Ligação da parede com o fundo do reator

A ligação entre o setor de parede circular com o fundo do reator, é feita através de um anel inferior. Este anel faz a interligação da parede pré- moldada com a laje de fundo do reator (moldada “in loco”).

Um esquema dessa ligação é apresentada na figura 43.

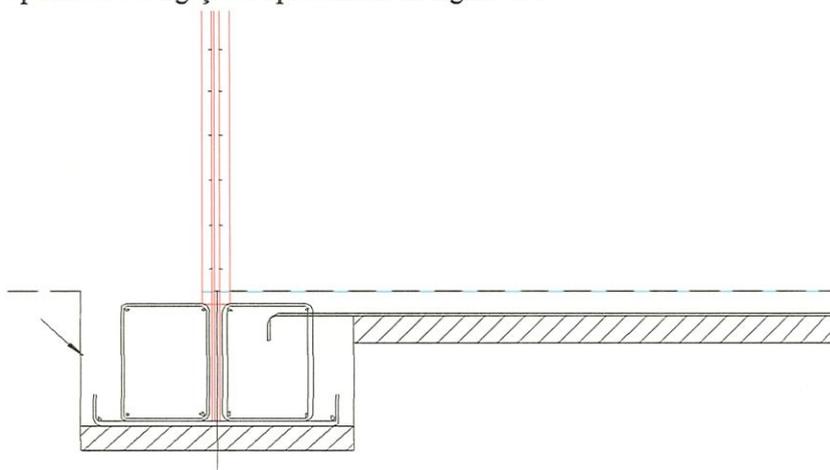


Figura 43- Ligação entre parede pré- moldada com o fundo do reator

4.2.2- A estrutura interna do reator anaeróbio de manta de lodo

A estrutura interna do reator é formada por: câmara de coleta de afluente, câmara de distribuição de afluente e câmara de coleta do efluente. A disposição desses elementos é de grande importância, já que estes são responsáveis pela captação e distribuição da água residuária para o fundo do reator, pelo posicionamento correto dos separadores de fases e pela captação da água tratada (efluente). Assim, o projeto e a execução dessa estrutura, merece grande atenção.

4.2.2.1- Dimensionamento dos elementos que compõem a estrutura interna do reator

A divisão dos elementos pré-moldados foram concebidos para que se tenha um sistema de montagem simplificado (capítulo 5). Estes elementos são apresentados na figura 44:

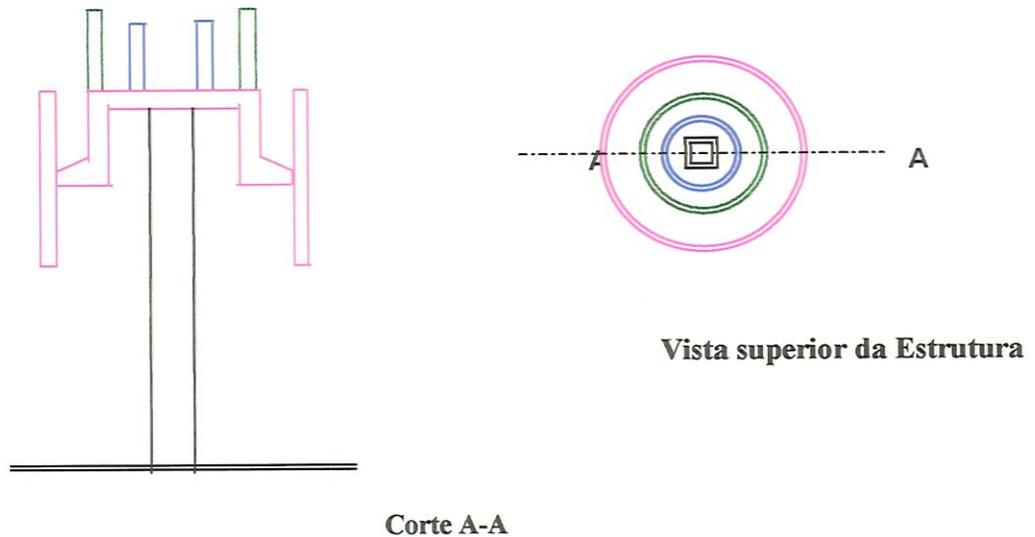


Figura 44- Corte transversal e vista superior da estrutura localizada no interior do reator

Legenda (figura 44):

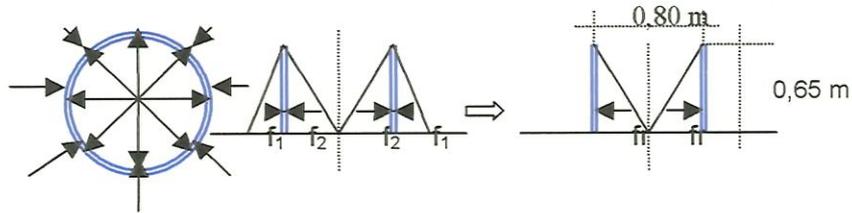
- Câmara de coleta do afluente;
- Câmara de distribuição de afluente;
- Câmara de coleta de efluente
- Pilar Central (moldado “in loco” fazendo parte da base do reator).

a) Câmara de coleta e câmara de distribuição do afluente.

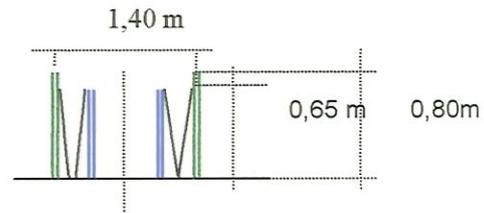
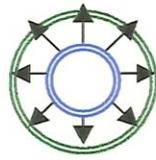
Para ambos os sistemas, é considerado, como hipótese de cálculo, um tubo de parede fina engastada na laje através de pinos e massa epóxi

O cálculo dos esforços é realizado de forma semelhante ao cálculo da parede do reator. Assim, só serão apresentados os dados e os resultados obtidos.

- As ações atuantes nas câmaras de coleta e distribuição respectivamente são:



Obs: Estes cálculos são realizados para a situação onde somente o esforço f_2 está atuando, por ser a sollicitação mais desfavorável que a força resultante.



- Esforços solicitantes (tabela 28)

TABELA 28- Esforços solicitantes nas câmaras de coleta e distribuição do afluyente

	Câmara coletora	Câmara distribuidora
- Esforço anelar *	$N_{qmáx} = f_2 = 2,7 \text{ kN/m}$ $N_{qdmáx} = 3,78 \text{ kN/m}$	$N_{qmáx} = 0,845 \text{ kN/m}$ $N_{qdmáx} = 1,183 \text{ kN/m}$
- Momento Fletor *	$M_{qmáx} = 0,0207 \text{ kN.m/m}$ $M_{qdmáx} = 0,029 \text{ kN.m/m}$	$M_{qmáx} = 0,0065 \text{ kN.m/m}$ $M_{qdmáx} = 0,008 \text{ kN.m/m}$
- Força cortante na ligação parede com a laje de fundo	$V_{qmáx} = 0,5 \text{ kN/m}$ $V_{qdmáx} = 0,7 \text{ kN/m}$	$V_{qmáx(\text{tubo } 2)} = 0,21 \text{ kN/m}$ $V_{qdmáx} = 0,28 \text{ kN/m}$

*Esforços devidos à pressão da água

- Cálculo da armadura

O dimensionamento da armadura é realizado para o Estado Limite Último-Sollicitações Normais (Estádio III), cujos dados são:

Telas de aço soldadas padronizadas de acordo com normalização citada anteriormente;

Aço CA 60;

Características do concreto:

$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$;

$f_{tk} = 3,1 \text{ MPa}$;

Pintura de proteção: nenhuma

A armadura para o esforço anelar respectivamente será:

$$A_{st} = (3,78 \times 10^{-3}) / (600 / 1,15) = 0,0725 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{m} = 0,0725 \text{cm}^2/\text{m}$$

$$A_{st} = (1,183 \times 10^{-3}) / (600 / 1,15) = 0,0227 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{m} = 0,0227 \text{cm}^2/\text{m}$$

A dimensão mínima de tela padronizada é a EQ 98 - tela soldada quadrada com fios de 2,5 mm de diâmetro, espaçados nas duas direções 50 mm e com 0,98 cm²/ m. Esta tela é suficiente para suportar o esforço anelar para as duas câmaras. Entretanto, ambas estão inseridas num ambiente agressivo, o cobrimento adotado para a armadura é de 8 mm, que somando-se aos diâmetros dos fios adotados dá uma espessura de peça de 21 mm. Neste aspecto a NBR 11173 recomenda a utilização de 2 telas em peças com espessuras acima de 20 mm, para o controle da fissuração. Assim, para este tubo utilizam-se 2 telas soldadas EQ 98 justapostas, com 1,96cm²/ m.

Para a armadura para flexão, junto ao engastamento da parede com a laje de fundo (câmara de coleta de efluente), verifica-se que a sollicitação devidos a esses esforços é muito pequena, podendo neste caso fazer com que os próprios pinos de fixação utilizados entre as câmaras e a laje suportem tais esforços.

- Verificação do cisalhamento para a câmara coletora de afluente- ELU- Sollicitações tangenciais

$$V_{qdm\acute{a}x} = 0,7 \text{kN/m};$$

$$\tau_{wd} = 0,028 \text{MPa} \quad \text{e} \quad \tau_{wu} = 3,571 \text{MPa}$$

$$\tau_{wd} \leq \tau_{wu} \leq 4,5 \text{MPa}$$

Comparando com o valor último para lajes sem armadura transversal tem-se:

$$\tau_{wul} = 1,33 \text{MPa}$$

$$\tau_{wd} \leq \tau_{wul} = 1,33 \text{MPa}; \text{ não é necessária armadura transversal.}$$

O esforço cortante aplicado na câmara de distribuição, é menor que aqueles aplicados na câmara de coleta. Assim, pode-se dizer que não é necessária a utilização de armadura transversal.

- Verificação da abertura de fissuras

Para o estado limite de formação de fissuras na câmara de coleta do afluente tem-se:

$$\sigma_{qm\acute{a}x} = N_{qm\acute{a}x} / (h \cdot b) = 0,145 \text{MPa}$$

$f_{tk} = 3,1\text{MPa}$. Reduzindo o valor de f_{tk} devido ao efeito de retração do concreto tem-se:

$$f_{tkl} = 0,75 f_{tk} = 2,32\text{MPa}.$$

Como $\sigma_{q\text{máx}} < f_{tkl}$ provavelmente as fissuras na região de esforço máximo irão ser menores que o estado de fissuração permitido. Este fato ocorre também para a câmara de distribuição de afluente.

Fazendo a verificação do estado de fissuração inaceitável para as duas câmaras tem-se, respectivamente:

$$w_k = 1,658 w_m = 0,0097\text{mm} < 0,1\text{mm} \text{ (NBR 6118)}.$$

$$w_k = 1,658 w_m = 0,002\text{mm} < 0,1\text{mm} \text{ (NBR 6118)}.$$

b) Sistema de coleta da água tratada (efluente)

O sistema de coleta de efluente é composto por duas peças pré-moldadas, solidarizadas entre si através de parafusos e massa epóxi. As ações atuantes nesses elementos são apresentadas na figura 45:

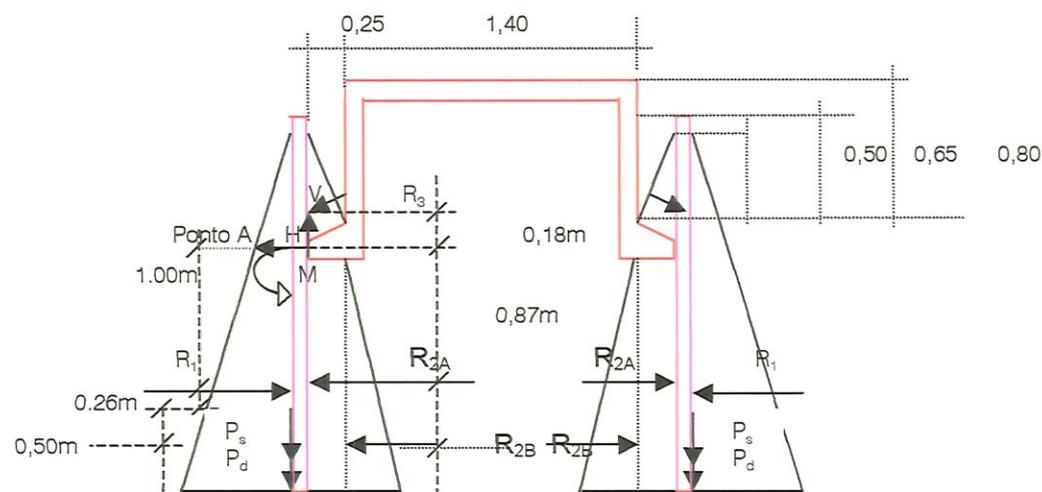


Figura 45- Ações atuantes na câmara de coleta do efluente

Legenda (figura 49) onde:

— Peça 1

$$R_1 = 27,25\text{kN/m};$$

$$R_{2A} = 9,95\text{kN/m};$$

$$R_{2B} = 15,73\text{kN/m};$$

$$R_3 = 1,125\text{kN/m};$$

— Peça 2

$$P_p \text{ (peso próprio do tubo)} = 1,586\text{kN/m};$$

$$P_d \text{ (peso do defletor)} = 0,0745\text{kN/m};$$

$$P_s \text{ (peso do separador de fases)} = 0,120\text{kN/m};$$

$$\gamma_{\text{água}} = 1,04\text{t/m}^3;$$

- Peça 1

A peça 1 é considerada um tubo de parede fina engastada na peça 2 através de parafusos e massa epóxi.

Fazendo a somatória de forças no ponto A (ponto de vinculação) tem-se:

Esforço horizontal máximo devido pressão da água

$$N_{qm\acute{a}x} = 0,329 \text{ kN/m} \qquad N_{qdm\acute{a}x} = 0,329 \times 1,4 = 0,46 \text{ kN/m}$$

Momento Fletor máximo devido engaste

$$M_{qm\acute{a}x} = 0,072 \text{ kN.m/m} \qquad M_{qdm\acute{a}x} = 0,072 \times 1,4 = 0,1 \text{ kN.m/m}$$

Esforço vertical máximo na ligação entre as peças

$$V_{qm\acute{a}x} = 2 \text{ kN/m} \qquad V_{qdm\acute{a}x} = 0,2 \times 1,4 = 0,28 \text{ kN/m}$$

Para tais esforços é realizado o dimensionamento da armadura no Estado Limite Último- Solicitações Normais (Estádio III), onde os dados para esta peça são:

Telas de aço soldadas padronizadas

Aço CA 60

Características do concreto:

$$f_{ck} = 50 \text{ MPa}$$

$$f_{tk} = 3,1 \text{ MPa}$$

Pintura de proteção: nenhuma

A armadura para o esforço horizontal (anelar) é dada por:

$$A_{st} = (0,46 \times 10^{-3}) / (600 / 1,15) = 0,0088 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m} = 0,0088 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Neste caso, aplica-se a recomendação da NBR 11173 de 2 telas em peças com espessuras acima de 20 mm, para o controle da fissuração. Assim, utiliza-se 2 telas soldadas EQ 98 justapostas, com $1,96 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Para suportar a flexão máxima que ocorre na peça 1 devido ao engastamento, a armadura necessária será:

$$K_c = b d^2 / M_d = 100 \times 1,6^2 / 10 = 25,60 \text{ cm}^2/\text{kN};$$

$$C-50 \Rightarrow K_s = 0,019 \Rightarrow A_s = 0,30 \text{ cm}^2;$$

As telas e parafusos utilizados são suficientes para resistir a esse esforço de flexão.

Da mesma forma que para os itens anteriores, verifica-se que $\tau_{wd} \leq \tau_{wu}$, ($V_{dm\acute{a}x} = 0,46 \text{ kN/m}$), não sendo necessária a colocação de armadura transversal.

Para o Estado Limite de Formação de Fissuras tem-se que:

$$\sigma_{q_{\max}} = N_{q_{\max}} / (hb) = 0,018 \text{MPa}$$

$f_{tk} = 3,1 \text{MPa}$. Reduzindo o valor de f_{tk} devido ao efeito de retração do concreto tem-se:

$$f_{tk1} = 0,75 f_{tk} = 2,32 \text{MPa}.$$

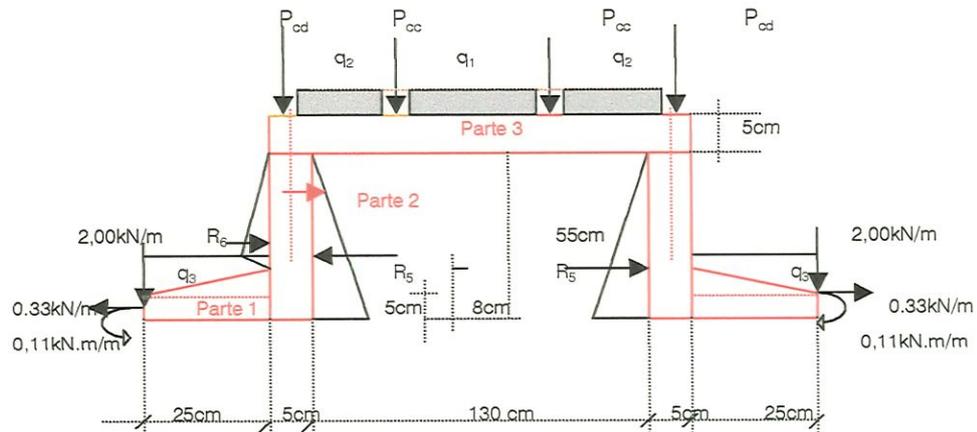
Assim, como $\sigma_{q_{\max}} < f_{tk1}$ provavelmente as fissuras na região de esforço máximo irão ser menores que o estado de fissuração permitido.

Para o caso do Estado de fissuração inaceitável encontra-se:

$$w_k = 1,658 \quad w_m = 0,0012 \text{mm} < 0,1 \text{mm} \text{ (NBR 6118)}$$

- Peça 2

Esta peça é engastada no pilar através de parafusos e massa epóxi. A seguir apresentam-se as ações atuantes nesta estrutura:



Onde:

$$P_{cc} \text{ (câmara de coleta de afluente)} = 0,405 \text{ kN/m}$$

$$P_{cd} \text{ (câmara de distribuição de afluente)} = 0,50 \text{ kN/m}$$

$$q_1 \text{ (peso da água)} = 6,76 \text{ kN/m}^2$$

$$q_2 \text{ (peso da água)} = 5,20 \text{ kN/m}^2$$

$$q_3 \text{ (peso da água)} = 2,5 \text{ kN/m}^2$$

$$R_5 \text{ (resultante do peso da água)} = 1,573 \text{ kN/m}$$

$$R_6 \text{ (resultante do peso da água)} = 0,65 \text{ kN/m}$$

$$\gamma_{\text{água}} = 1,04 \text{ t/m}^3;$$

Para o cálculo dos esforços e disposição da armadura da peça 2, esta foi dividida em três partes (vide figura acima), sendo elas:

- Parte 1- Laje em forma de coroa de círculo engastado na parte 2



A armadura para o momento radial máximo será:

$$M_{\text{máx radial}} = 0,79 \times 1,4 = 1,12 \text{ kN.m/m};$$

$$K_c = b d^2 / M_{\text{máx radial}} = 100 \times 3,2^2 / 112 = 9,14 \text{ cm}^2/\text{kN}$$

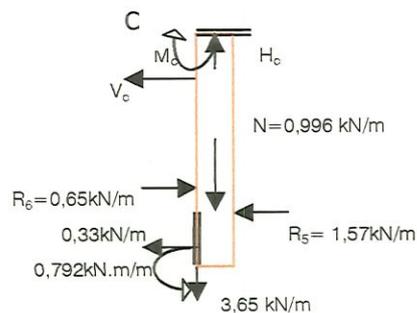
$$C 40 \Rightarrow K_s = 0.019 \text{ (domínio 2)} \Rightarrow A_s = 0,84 \text{ cm}^2/\text{m} \Rightarrow 8 \text{ fios de 4mm por metro}$$

$$A_{s\text{efetivo}} = 1 \text{ cm}^2/\text{m};$$

A armadura para o momento tangencial máximo será 4 fios de 4mm ao longo da circunferência externa da laje em forma de coroa e círculo, tendo:

$$M_{\text{máx tang}} = 0,08 \times 1,4 = 0,11 \text{ kN.m/m};$$

- Parte 2- Tubo de parede fina engastada na parte 3



Realizando a somatória das forças em x e y, bem como o momento em C, tem-se:

$$H_c = 4,65 \text{ kN/m} \quad V_c = 1,77 \text{ kN/m} \quad M_c = 0,412 \text{ kN.m/m}$$

O dimensionamento da armadura no Estado Limite Último- é feito utilizando os seguintes dados:

Telas de aço soldadas padronizadas

Aço CA 60

Características do concreto : $f_{ctk} = 40 \text{ MPa}$ e $f_{tk} = 3,7 \text{ MPa}$

Pintura de proteção: nenhuma

O cálculo da armadura para esforço horizontal máximo na parede devido à pressão da água, supondo somente R_5

$$N_{q\text{máx}} = 2,20 \text{ kN/m}$$

$$A_s = \frac{2,20 \times 10^{-3}}{0,0422} = 0,0422 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m} = 0,0422 \text{ cm}^2/\text{m}$$

(600/1,15)

Serão utilizadas duas telas EQ 98 distanciadas para que seja possível a colocação de armadura para suportar momentos na região de engaste, ficando o $A_{s\text{efetivo}} = 1,96 \text{ cm}^2/\text{m}$

A armadura para suportar momento fletor máximo no engaste entre parte 2 e 3 será:

$$M_{q\text{máx}} = 0,412 \times 1,4 = 0,576 \text{ kN.m/m}$$

$$K_c = b d^2 / M = 100 \times 4,075^2 / 57,6 = 28,83 \Rightarrow K_s = 0,019 \text{ (domínio 2)}$$

$$A_s = 0,27 \text{ cm}^2/\text{m};$$

A tela colocada externamente à parede para suportar esforço anelar serve para suportar este momento no engaste, devendo para isso serem dobradas as armaduras transversais dessa parede.

A armadura para suportar tração no engaste será:

$$H_c = 4,65 \text{ kN/m}$$

$$T_{\text{máx}} = 6,51 \text{ kN/m}$$

$$A_s = 0,125 \text{ cm}^2/\text{m}.$$

A tela EQ98 é suficiente para suportar tal solicitação ficando $A_{s\text{efetivo}} = 0,98 \text{ cm}^2/\text{m}$.

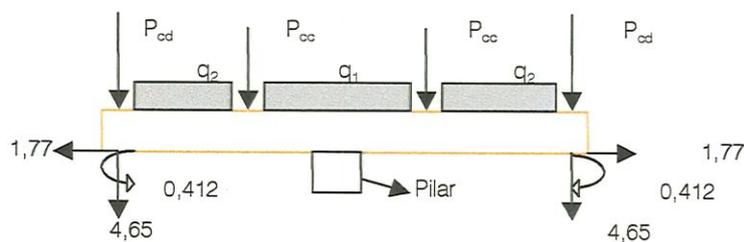
Para o cisalhamento ($V_{d\text{máx}} = 1,77 \times 1,4 = 2,48 \text{ kN/m}$), verifica-se que $\tau_{wd} \leq \tau_{wu}$, fazendo com que não seja necessária colocação de armadura transversal.

Verificando o Estado Limite de formação de fissuras tem-se:

$$\sigma_{q\text{máx}} = N_{q\text{máx}} / (hb) = 0,044 \text{ MPa}$$

Este valor é menor que o valor de f_{tk} reduzido devido à efeito de retração do concreto. Portanto, como $\sigma_{q\text{máx}} < f_{tk1}$ provavelmente as fissuras na região de esforço máximo irão ser menores que o estado de fissuração permitido.

- Parte 3- Laje Cogumelo circular engastada no pilar



Os dados utilizados para o dimensionamento da armadura desta peça será:

Telas de aço soldadas CA 60 padronizadas;

Características do concreto: $f_{ck}= 40\text{MPa}$ e $f_{tk}= 3,1\text{MPa}$;

Pintura de proteção nenhuma.

Os esforços solicitantes de cálculo serão

$$M_{qdm\acute{a}x} = 3,59 \times 1,4 = 5,02\text{kN. m/m} \quad \text{e} \quad V_{qdm\acute{a}x} = 10,10 \times 1,4 = 14,14\text{kN/m.}$$

Realizando o dimensionamento da armadura no Estado Limite Último- Solicitações Normais (Estádio III)tem-se:

- Armadura longitudinal e transversal da laje: Flexão máxima

$$K_c = b d^2 / M_d = 3,67\text{cm}^2/\text{kN}; \quad d = 4,2\text{cm}$$

$$C-40 \Rightarrow K_s = 0.020 \Rightarrow A_s = 2,39\text{cm}^2;$$

Utilizando tela soldada tem-se 2 telas EQ196 (fios com 5mm de diâmetro e espaçamento 10cm) com $A_{sefetivo} = 3,92\text{cm}^2/\text{m}$. Coloca-se também para estas telas armadura de proteção de borda

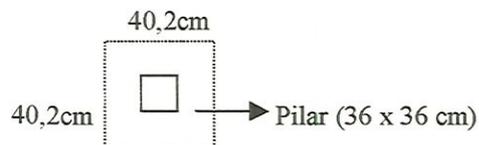
Para esta laje é feita a verificação da punção onde:

Carga sobre o Pilar ($N_{qm\acute{a}x}$)= 24,22kN / m;

$$N_{qdm\acute{a}x} = 24,22 \times 1,4 = 33,91\text{kN / m}$$

Fazendo o Cálculo da tensão de referência tem-se:

- Perímetro de contorno (u) do pilar quadrado:



$$u = 160, \text{ cm}$$

$$\tau_{wd} = N_{qdm\acute{a}x} / u d = 33,91 / (1,61 \times 0,042) = 502\text{kN/m}^2$$

$$\tau_{wu} = 0,63 \sqrt{f_{cd}} = 3,76\text{MPa} = 3760\text{kN/m}^2$$

$$\tau_{wu}/2 = 1882 > \tau_{wd} = 502\text{kN/m}^2$$

Neste caso, não é necessário armar a laje à punção

Verificando a abertura de fissuras no estado limite de formação de fissuras:

$$\sigma_{qm\acute{a}x} = \frac{N_{qm\acute{a}x}}{h b} = 0,081\text{kN/ cm}^2$$

h b

$$f_{tk} = 3,7\text{MPa}$$

$$f_{tkl} = 0,75 f_{tk} = 0,75 \times 3,7 = 2,77\text{MPa}$$

Como $\sigma_{q\text{máx}} < f_{tk1}$, pode-se verificar que não irá ocorrer fissuras na região de esforço máximo de tração.

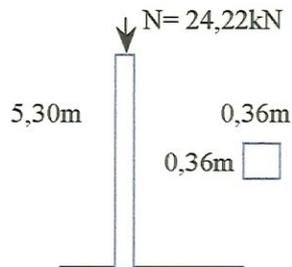
Para a verificação no estado de fissuração inaceitável ($W_k \leq 0,1\text{mm}$) obtém-se:

$$w_m = s \cdot \varepsilon_{sm} = 0,0513$$

$$w_k = 1,658 w_m = 0,08\text{mm} < 0,1\text{mm}.$$

c) Pilar Central

Para o pilar, a sua moldagem pode ser feita “in loco” juntamente com a base do reator ou pré moldado. Esta estrutura, vai determinar o posicionamento correto do separador de fases e dos elementos que fazem parte da estrutura interna. As características geométricas para este pilar é dada a seguir:



Índice de esbeltez

$$\lambda = l_e/i = (5,30 \times 2) / (36/\sqrt{12}) = 102 \Rightarrow \text{Pilar esbelto}$$

- Cálculo do pilar esbelto considerando a fluência. A carga de longa duração é dada por:

$$F_g = \gamma_n(N_{gk} + \Psi_2 N_{qk}) = 1,1 (0,95 \times 24,22) = 25,31\text{kN};$$

- Excentricidade de primeira ordem da carga que produz fluência (F_g)

$$e_{1g} = e_i + e_a = 2,0\text{cm} \quad (e_i = 0 \text{ devido consideração de compressão centrada});$$

- Módulo de deformação longitudinal do concreto (E_c)

$$E_c = 0,9 \times 6600 \sqrt{f_{ck}} + 3,5 = 4137\text{kN/cm}^2$$

- Carga de flambagem de EULER

$$F_E = 10 E_c (I_i^2 / l_e^2) = 5630\text{kN}$$

- Excentricidade suplementar

$$e_c = e_{1g} \left\{ \exp\left(\frac{\phi F_g}{F_E - F_g} - 1\right) \right\} \Rightarrow \phi = 2 \Rightarrow e_c = 0,74 \text{ cm}.$$

$$F_E - F_g$$

- Dimensionamento em função das excentricidades de cálculo:

$$N_d = 1,4 \times 24,22 = 39,91\text{kN};$$

$$L_e/h_x = (530 \times 2) / 36 = 29,44 ;$$

$$e_{dx} = e_{ax} + e_{cx} = 2 + 0,74 = 2,74\text{cm};$$

$$f_{cd} = 3,21\text{kN/cm}^2;$$

$$A_c = 36 \times 36 = 1296 \text{ cm}^2;$$

$$f_{yd} = 43,5 \text{ kN/cm}^2;$$

Empregando os diagramas de iteração 5-3 e 5-5 do CEB Boletim 103, verifica-se que deve ser utilizada a taxa de armadura mínima apresentada pela NB1 de 0,8%. Assim as armaduras longitudinais são 16 fios de 10mm e as transversais são fios de 6,3mm a cada 12cm.

4.2.2.2- Arranjo das armaduras da estrutura interna

a) Arranjo de armadura das câmaras de coleta e distribuição do afluente e câmara de coleta de efluente (peça 1).

Para as câmaras, utiliza-se telas soldadas EQ98, onde o diâmetro dos fios é de 2,5mm espaçados 5cm. A disposição destas telas é dada na figura 46:

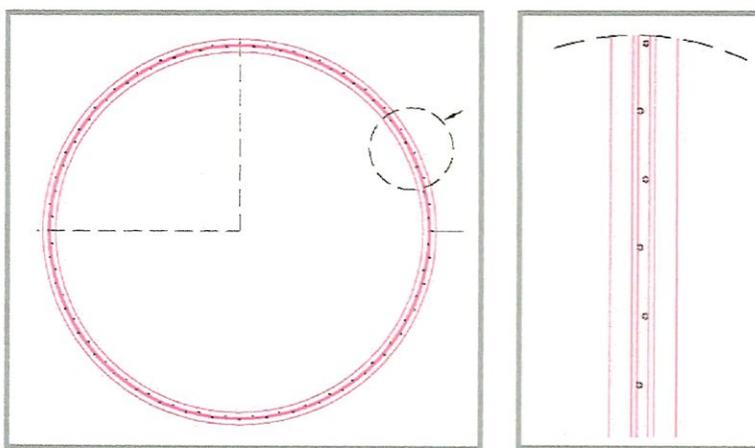


Figura 46- Disposição das telas nas câmaras de coleta e distribuição do afluente e na câmara de coleta de efluente(peça 1) - Vista superior e corte transversal

b) Arranjo de armadura da câmara de coleta do efluente (peça 2).

Como visto anteriormente, a peça 2 foi dividida em três partes. Assim, mostra-se a seguir o detalhamento deste elemento na figura 47.

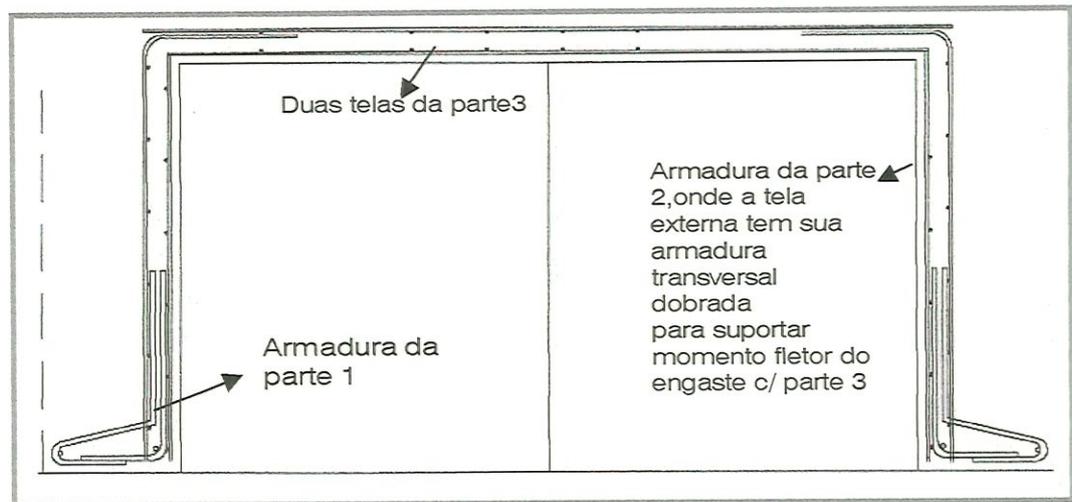


Figura 47- Arranjo das armaduras do coletor de efluente (peça2) –Corte transversal

4.2.2.3- Ligações entre os elementos pré- moldados da estrutura interna

As câmaras de coleta e distribuição do afluente serão fixadas na peça 2 do coletor de efluente, através de parafusos e massa epóxi. A mesma ligação é utilizada entre o pilar central e a peça 2 como mostra a figura 48.

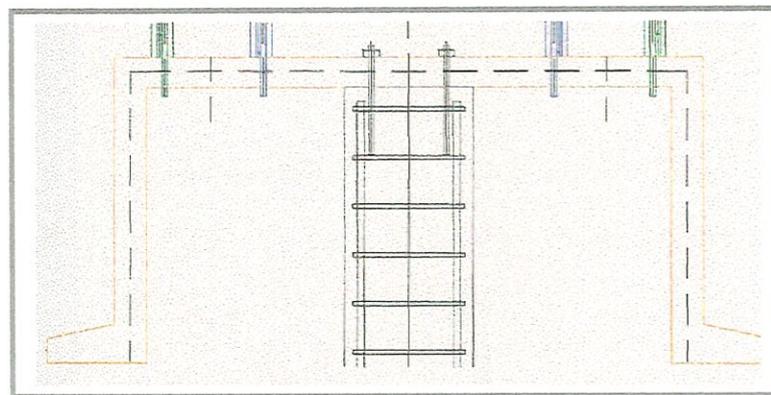


Figura 48- Ligação da Câmara de coleta do efluente com o pilar central e com as câmaras de coleta de afluente.

A ligação entre as peças 1 e 2 é feita através de parafusos e massa epóxi (figura 49).

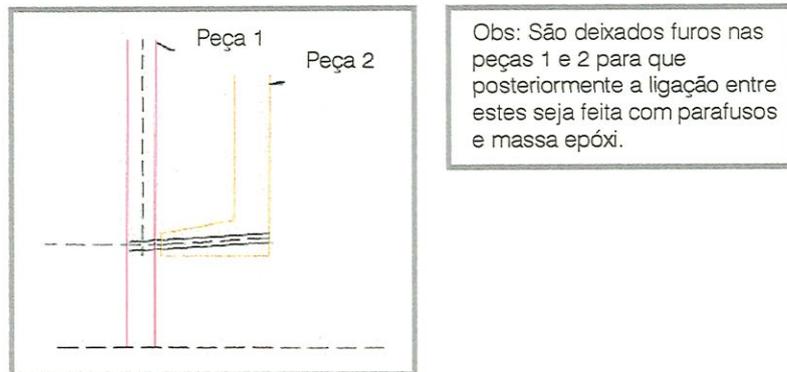


Figura 49- Ligações entre as peças 1 e 2 da câmara de coleta do efluente–Corte transversal

4.3- A base do reator anaeróbio

A base do reator, que receberá as peças pré- moldadas, é composta pela fundação do pilar central, pela laje de fundo e pela base do anel circular.

Esta base depende das condições do terreno e topografia local. Por isso, para cada local onde for instalado o reator, deverá ser realizado um projeto específico, onde sejam fornecidas ao projetista, todas as solicitações provenientes da estrutura do reator e os encaixes que deverão ser previstos.

a) Laje de fundo

Como o reator proposto é colocado ao nível do solo, a laje de fundação é flexível dependendo somente se o solo é rígido ou flexível para a adoção de algumas hipóteses de cálculo.

Assim, as ações nesta laje de fundo para que seja realizado o dimensionamento de acordo com a qualidade do solo local é dado na figura 50.

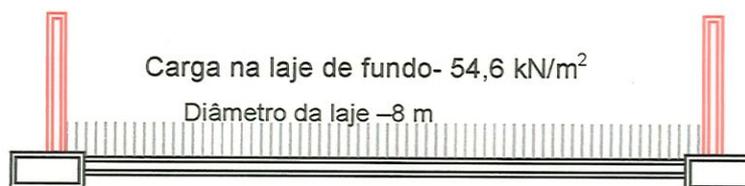


Figura 50- Carga na laje de fundo

b) Fundação para o pilar central

Para o pilar pré- moldado é necessário executar o cálice de fundação que pode ter paredes rugosas ou lisas conforme a figura 51 . O cálculo para esta estrutura é feito de acordo com a NBR 9062

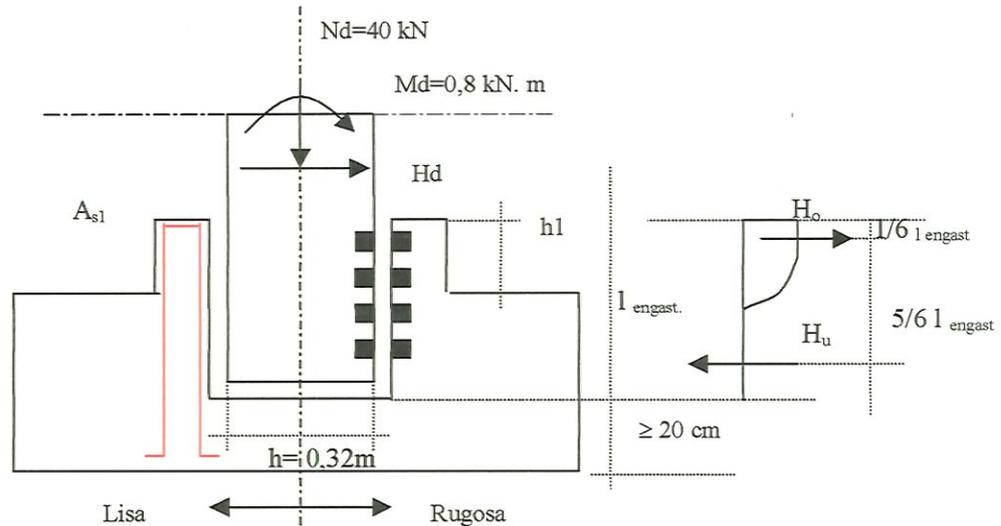


Figura 51- Cálice de fundação para o pilar central pré-moldado

A transmissão da carga vertical ao cálice de fundação quando se utiliza as paredes rugosas é total , sendo o elemento de fundação considerado monolítico. Para as paredes lisas a carga vertical transmitida pela interface é de $0,7 N_d$, desde que exista armadura de suspensão.

Quando houver predominância de cargas verticais permanentes de até 300 kN, como é o caso, permite-se considerar as paredes como rugosas. Assim, o cálice de fundação para o pilar pré- moldado terá as seguintes expressões para o calculo de sua armadura:

$$H_{od} = (6/5) \{M_d/l_{engast} + 1,20 H_d\};$$

$$H_{ud} = (6/5) \{M_d/l_{engast} + 0,20 H_d\} \text{ onde:}$$

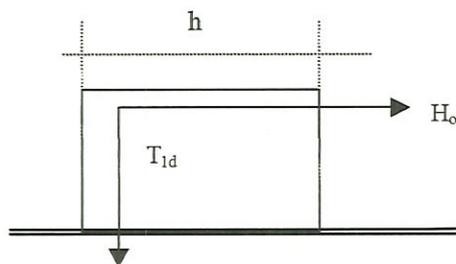
$$l_{engast} = 1,2 h \text{ (} l_{engast} \text{ deve ser maior que 40 cm- NBR 9062).}$$

A armadura de suspensão, em forma de estribos horizontais será:

$$A_{s2} = H_{od} / f_{yd}$$

A armadura principal da parede lateral (carga de $H_o/2$ em cada parede) será:

$$A_{s1} = T_{1d} / f_{yd}$$



Se o pilar for moldado no local, juntamente com a base do reator, a fundação isolada pode ser, o bloco, a sapata, bloco de coroamento de estaca radier para pilares isolados. Esta escolha depende da qualidade do solo da região e do projetista.

4.4- Considerações finais sobre o projeto estrutural e os materiais utilizados no reator

A partir dos estudos de materiais apresentados no capítulo 3, é possível determinar o concreto e/ou as argamassas (com adição de sílica ativa em sua composição), a serem utilizados.

Essa escolha vai depender da dimensão máxima característica do agregado, devendo seguir os seguintes parâmetros (HELENE & TERZIAN, 1992):

$D_{m\acute{a}x} \leq 1/3$ da espessura da laje;

$D_{m\acute{a}x} \leq 1/4$ da distância entre as faces das fôrmas;

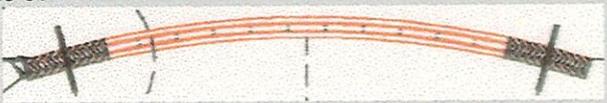
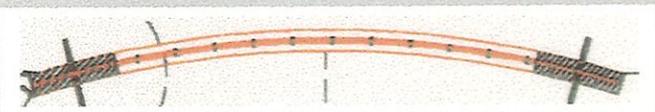
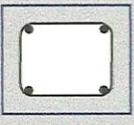
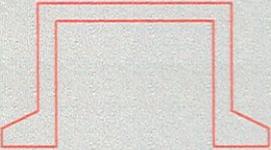
$D_{m\acute{a}x} \leq 0,8$ do espaçamento entre as armaduras horizontais;

$D_{m\acute{a}x} \leq 1,2$ do espaçamento entre as armaduras verticais;

$D_{m\acute{a}x} \leq 1/4$ do diâmetro da tubulação de bombeamento do concreto.

Para os elementos pré-moldados do reator o diâmetro máximo do agregado a ser utilizado é apresentado na tabela 29.

TABELA 29 - Dimensão máxima do agregado para cada elemento pré-moldado do reator

Peça Estrutural (Seção transversal e características geométricas)	Diâmetro máximo do agregado
<p>Parede S1</p>  <p>Espessura da peça- 4,6cm Espaçamento entre armaduras verticais- 6mm Espaçamento entre armaduras horizontais- 10 cm</p>	7,2 mm
<p>Parede S2</p>  <p>Espessura da peça- 4,6cm Espaçamento entre armaduras horizontais- 10 cm Armadura- 2 telas justapostas</p>	11,5 mm
<p>Pilar Central</p>  <p>Distância entre faces das fôrmas- 36 cm 36cm Espaço entre armaduras verticais-8,5cm Espaçamento entre armaduras horizontais-8,5cm</p> <p>36cm</p>	6,8 cm
<p>Peça 2 da câmara de coleta do efluente</p>  <p>Espessura da peça- 5cm Espaçamento armaduras verticais 14mm Espaçamento armaduras horizontais 10cm</p>	12,5mm
<p>Câmaras de coleta e distribuição de afluente e peça 1 da câmara de coleta de efluente.</p>  <p>Espessura da peça- 26mm Armadura-2Telas de 5 x 5 cm e fios de2,5mm diâmetro</p>	6,5mm

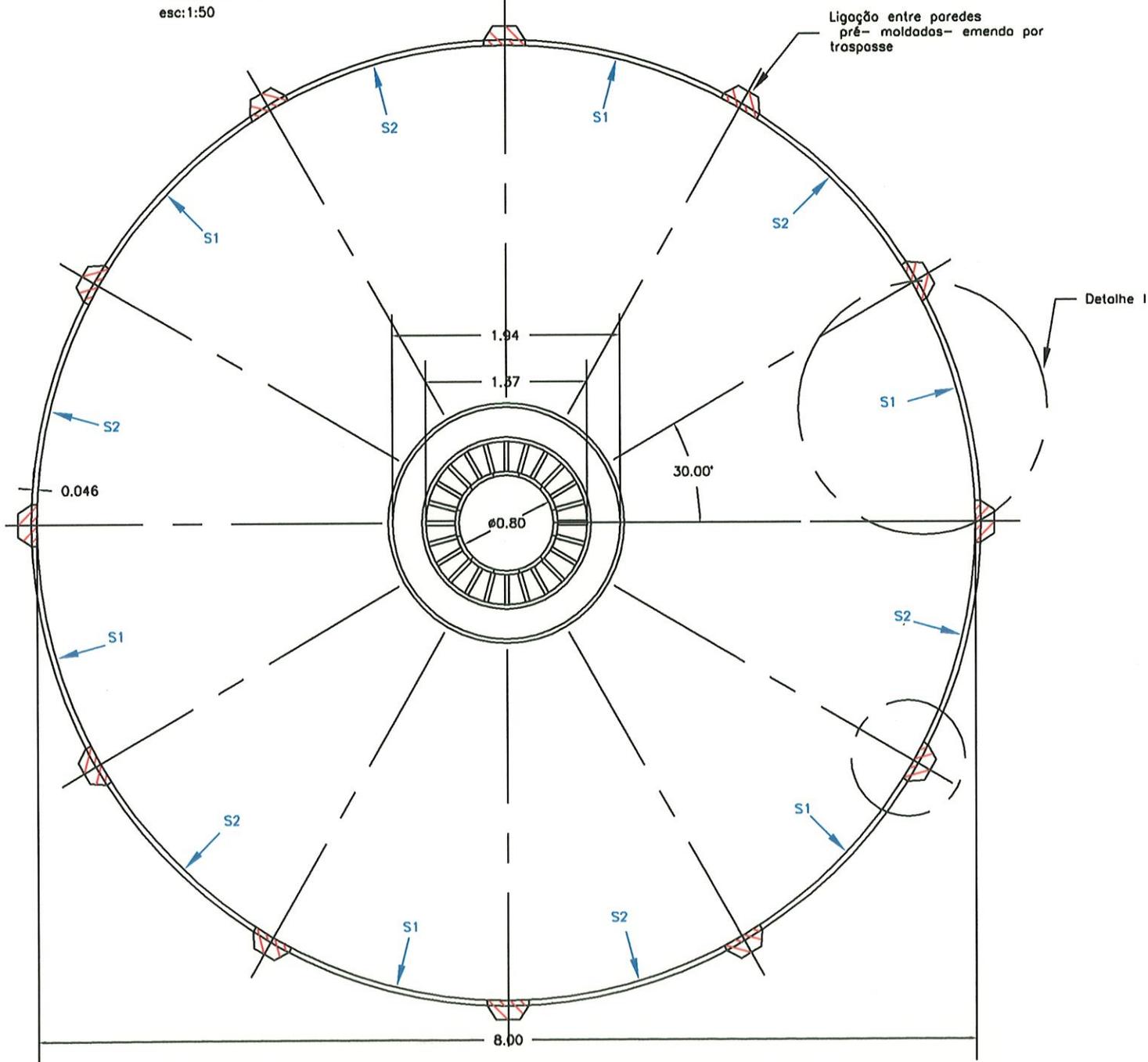
Complementando o dimensionamento da estrutura do reator UASB (projeto estrutural) apresenta-se, para um melhor entendimento, o detalhamento, em escala, das paredes pré-moldadas na seguinte ordem:

- PLANTA 14- Vista superior do reator UASB pré-moldado- esc 1:50;
- PLANTA 15- Corte típico do reator UASB pré-moldado- esc 1:50;
- PLANTA 16- Detalhe 01-Dimensões dos setores de parede- vista superior-esc 1:30;
- PLANTA 17- Arranjo de armadura das paredes pré-moldadas- Corte transversal esc 1:30;
- PLANTA 18- Arranjo de armadura das paredes pré-moldadas- Corte longitudinal esc 1:25;
- PLANTA 19- Arranjo de armadura na região da emenda entre paredes pré-moldadas- Corte transversal e longitudinal esc 1:25.

**PROJETO ESTRUTURAL DAS PAREDES
PRÉ-MOLDADAS DO REATOR ANAERÓBIO (UASB)**

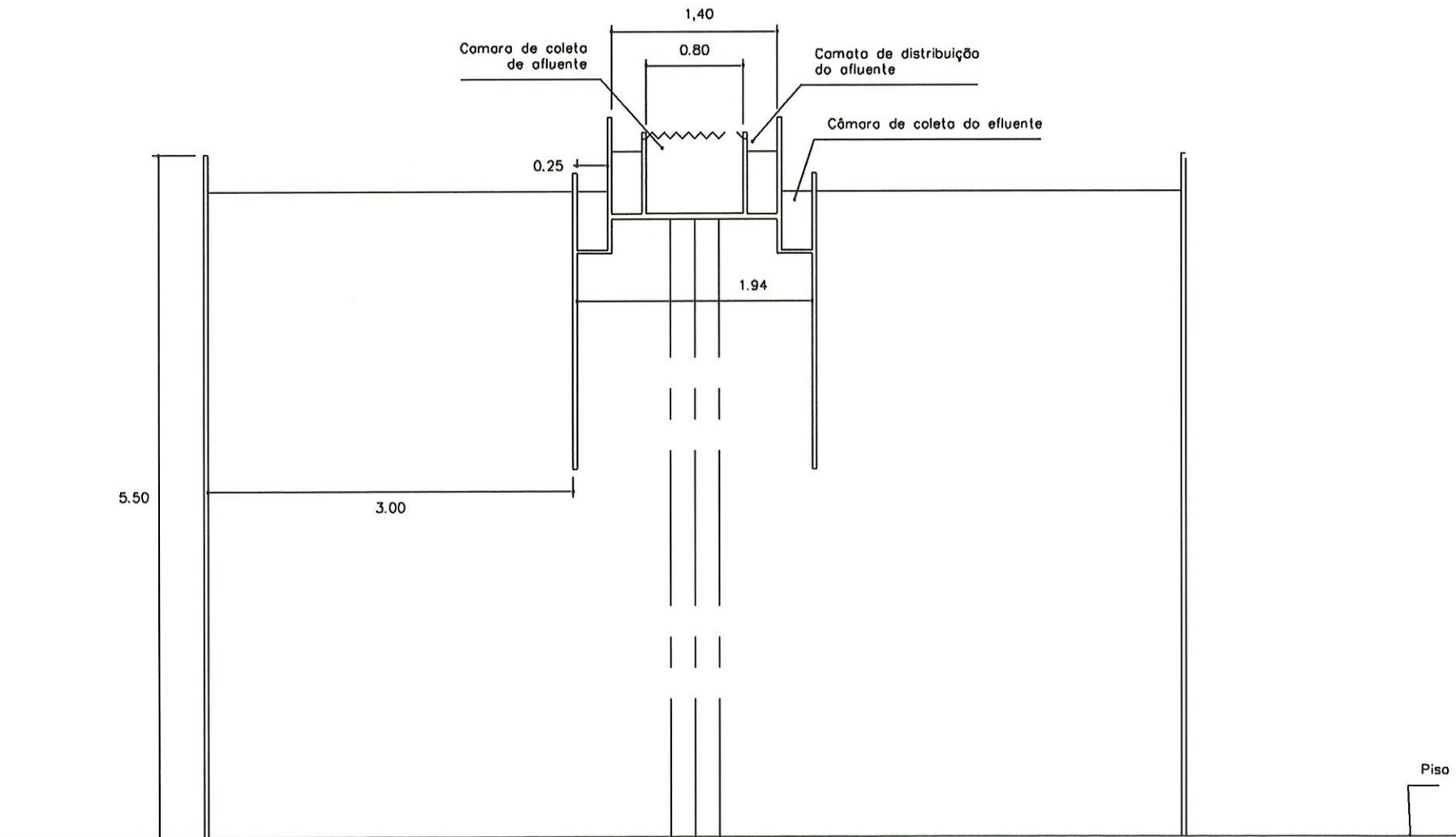
PLANTA 14- VISTA SUPERIOR DO REATOR UASB PRÉ-MOLDADO

esc: 1:50



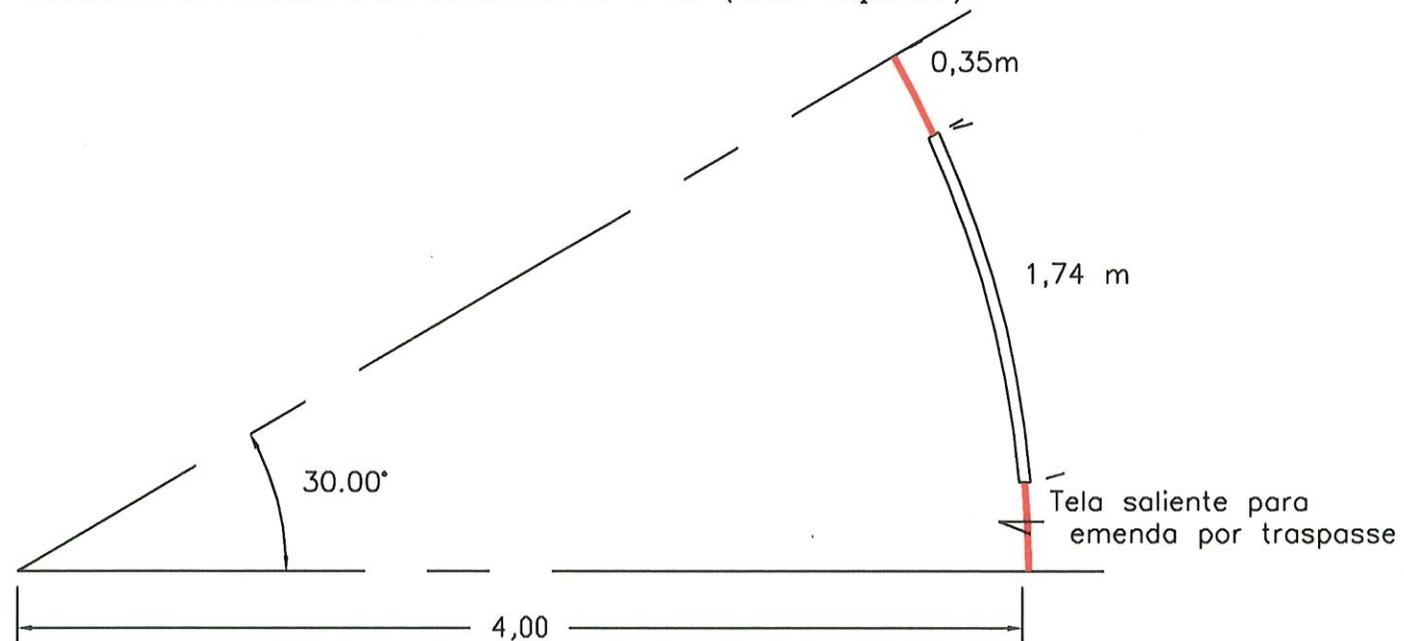
PLANTA 15- CORTE TÍPICO DO REATOR UASB

esc 1:50



PLANTA 16- DETALHE I: PAREDE PRÉ MOLDADA S1 e S2 (vista superior)

esc: 1:30



Comprimento do arco= 2,094 m

Comprimento para traspasse de telas=0,35m

Comprimento da peça pré- moldada= 1,74m

Espessura da peça pré moldada= 46mm

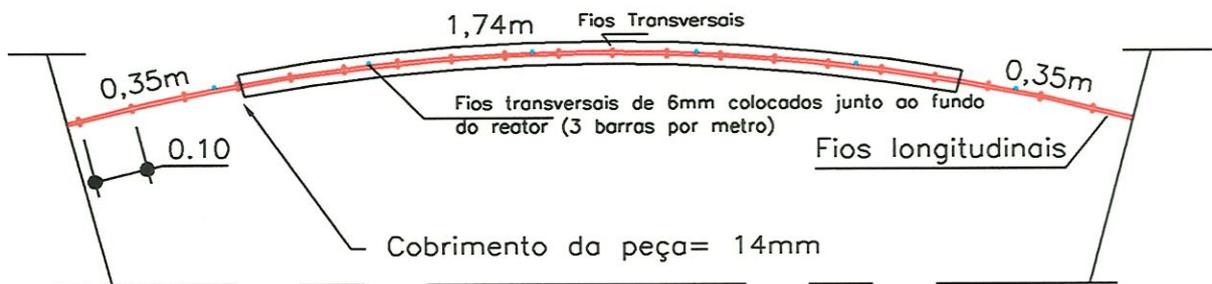
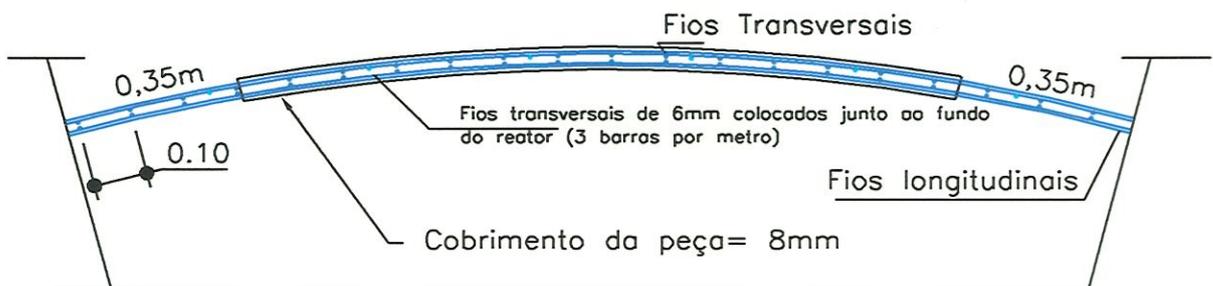
Comprimento de corda do setor de parede= 2,0578m

Flecha do setor de parede= 0,1363m

PLANTA 17- ARRANJO DE ARMADURA DAS PAREDES PRÉ-MOLDADAS

corte transversal

esc: 1:30

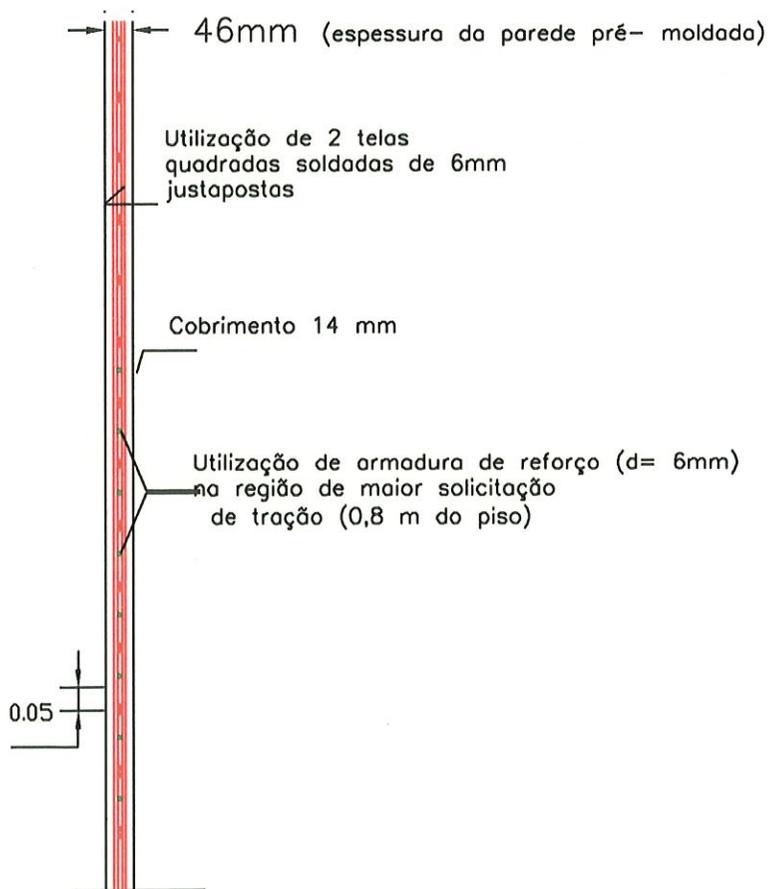
ARRANJO DE ARMADURA PARA A SITUAÇÃO 1 (S1): Duas telas justapostas
diâmetro dos fios - 6mm (vista superior)**ARRANJO DE ARMADURA PARA A SITUAÇÃO 2 (S2): 2 telas distanciadas**
diâmetro dos fios- 6mm (vista superior)

Obs: Deve-se colocar espaçadores de argamassa para que as telas fiquem distanciadas

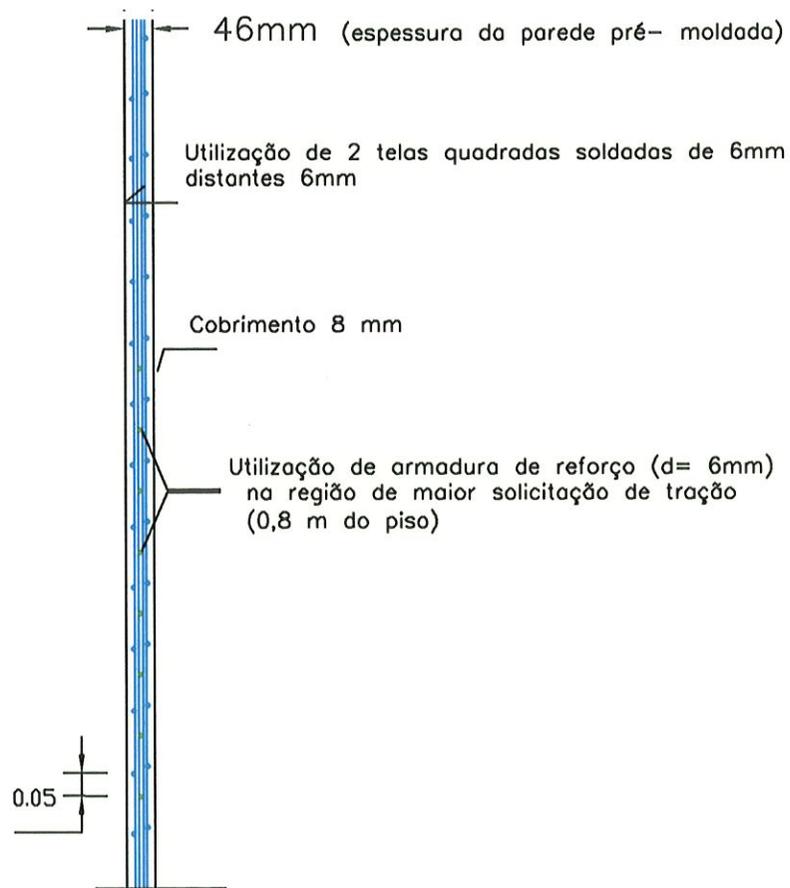
PLANTA 18- ARRANJO DE ARMADURA DAS PAREDES PRÉ-MOLDADAS (corte longitudinal)

esc:1:25

ARRANJO DE ARMADURA S1

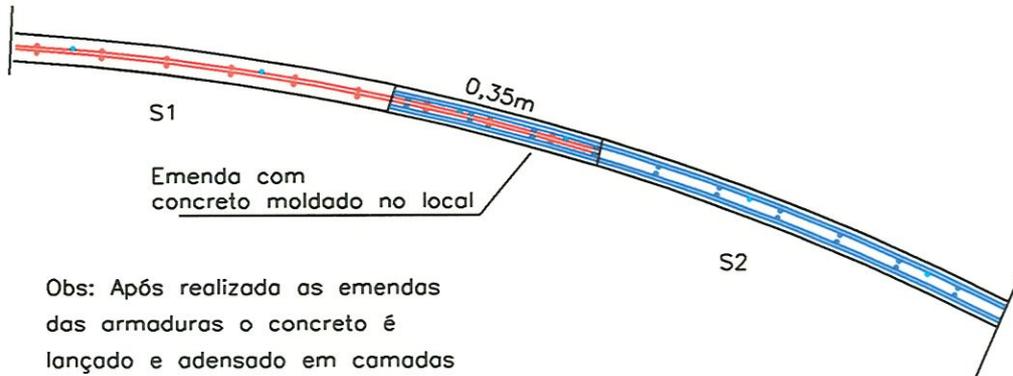


PAREDE ARRANJO DE ARMADURA S2



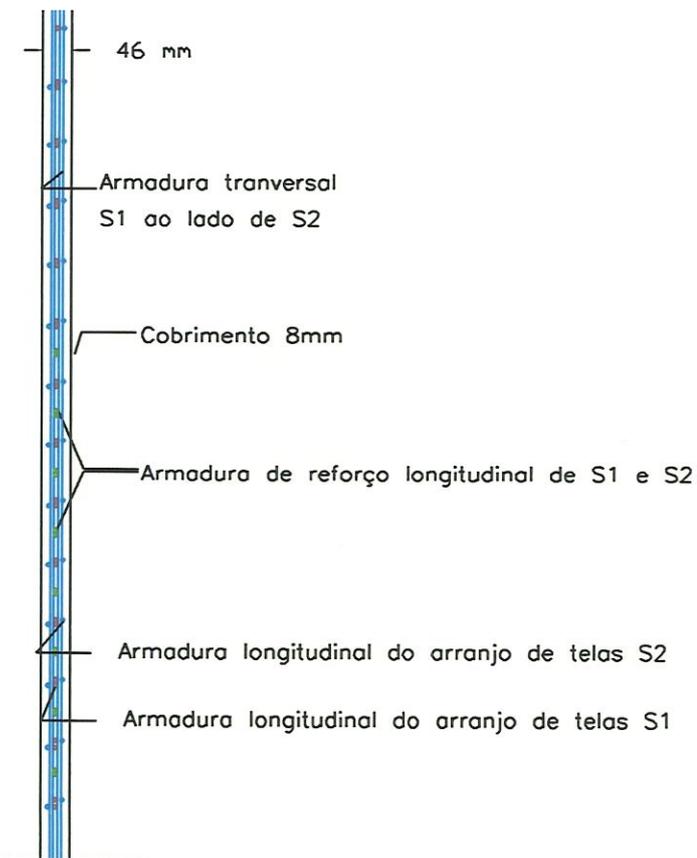
PLANTA 19- ARRANJO DAS ARMADURAS NA REGIÃO DA EMENDA ENTRE PAREDES PRÉ-MOLDADAS
Corte transversal

esc: 1:25



Obs: Após realizada as emendas das armaduras o concreto é lançado e adensado em camadas de 25cm

Corte longitudinal



CAPÍTULO 5- A utilização de um modelo reduzido para a avaliação do reator anaeróbio proposto

Introdução

A utilização de modelos para análise experimental das estruturas, apresentou grande desenvolvimento a partir da Segunda Guerra Mundial, sendo na década de sessenta o marco da introdução de modelos em microconcreto capazes de representar efetivamente o comportamento das peças de concreto armado, já que até então utilizavam-se outros materiais que prejudicavam o entendimento dos fenômenos envolvidos.

A análise em modelos, visa três propósitos:

- colaborar com as realizações profissionais por meio de ensaios diretos em projetos estruturais específicos e não usuais;
- estabelecer critérios de projeto, aprimorando normas e otimização de modelos teóricos;
- permitir a demonstração de comportamentos estruturais conhecidos.

Assim, na tentativa de compreender o comportamento da estrutura do reator anaeróbio, utiliza-se como meio de conhecimento, a elaboração de um modelo. Para tanto, busca-se discutir quais as vantagens de se utilizar como “ferramenta” científica um modelo, verificar quais as condições básicas a serem observadas para sua efetuação, executar o modelo propriamente dito e finalmente realizar a avaliação estrutural através de sua instrumentação.

5.1- Modelos e protótipos: Definições

Existe uma certa confusão em relação aos termos modelos e protótipos, sendo conveniente apresentar o significado de cada um destes, para melhores esclarecimentos.

HOLANDA (1989) define:” *Modelo*: conjunto de hipóteses sobre a estrutura ou o comportamento de um sistema físico, pelo qual se procuram explicar ou prever, dentro de uma teoria científica, as propriedades do sistema.” e “*Protótipo*: primeiro tipo ou exemplar, original, modelo”

Com essa definição, verifica-se que o protótipo pode ou não ser o modelo. Se o protótipo é o próprio modelo, sobre ele é lançado o conjunto de hipóteses citado acima. Caso contrário, o protótipo será o exemplar do qual se retira o modelo para estudar tais hipóteses.

Do ponto de vista físico, se analisarmos a definição, os termos *modelo* e *protótipo*, parecem ser “a priori” de fácil determinação. No entanto, alguns autores designam esses termos de forma diferente ou mesmo acrescentam a eles alguns conceitos.

Algumas definições que podem ser citadas são:

“Um modelo de uma estrutura, é uma reprodução geralmente em escala menor do que a unidade, constituída pelos mesmos materiais ou por materiais diferentes dos da estrutura original, com características tais que pelo seu comportamento se pode deduzir o do protótipo. Essa reprodução pode (...) não ser geometricamente semelhante ao protótipo”(ROCHA, 1952).

“Um modelo é a representação física, geralmente em escala reduzida, de uma estrutura ou parte dela” (ACI Committee 444- Models of concrete structures, 1972).

Fazendo uma abordagem mais ampla que a anterior, HOUSSE & ARNOULD (1971) descrevem que o modelo, podendo ou não ser o próprio protótipo, devem ser definidos a partir do fenômeno que se quer analisar e avaliar, podendo lançar mão de modelos físicos e/ou matemáticos. A figura mostra os diferentes modelos que se pode concernir :



Figura 52 - Tipos de modelos que se pode concernir- fonte: HOUSSE & ARNOULD (1971)

O modelo ou protótipo, do ponto de vista das formas, dos materiais e das solicitações que lhe aplicam, é a imagem mais fiel da construção do que as hipóteses de qualquer cálculo (ROCHA, 1952). Além disso, fornece ao engenheiro projetista uma ferramenta de grande rigor científico, que permite em seus projetos de estruturas de construção, abrir espaço entre os seus limitados conhecimentos no campo da mecânica e atuar em uma área mais ampla das estruturas de construção fisicamente possíveis (HOSSDORF, 1972).

5.2- Classificação dos modelos

Os modelos, segundo MARTINS (1990), podem ser classificados de acordo com as respostas que se esperam obter com sua utilização. As quatro classes de modelo são:

- *modelos elásticos*: esses modelos, embora tenham semelhança geométrica com o protótipo, são confeccionados com um material elástico e homogêneo diferente do material do protótipo. São utilizados para estudar a faixa de comportamento elástico do protótipo e não até a ruptura;
- *modelos indiretos*: trata-se de um tipo especial de modelo elástico que permite obter linhas de influência de reações de apoio e esforços internos solicitantes. Neste caso não existe necessariamente a semelhança física com o protótipo e as cargas. Atualmente esses modelos são pouco utilizados.
- *modelos diretos*: são modelos que apresentam semelhança geométrica com o protótipo e as cargas aplicadas guardam correspondência entre si. As tensões, deformações e deslocamentos obtidos no modelo são considerados como representativos do estado do protótipo, na mesma condição de carga.
- *modelos reais*: são modelos diretos, onde o material do modelo guarda semelhança física com o material do protótipo. Desta forma, podem mostrar o comportamento do protótipo para todos os carregamentos possíveis.

5.3- Condições de semelhança

Para que um modelo físico possa representar um protótipo, isto é, para que os resultados obtidos com o modelo possam ser estendidos ao protótipo, é preciso que haja semelhança entre essas duas estruturas. Para isso, deverão ser conhecidos os denominados fatores de escala que podem ser escritos da seguinte forma:

$$\text{Medida do protótipo } (M_p) = \text{Medida no modelo } (M_m) \times \text{fator de escala } (S)$$

De acordo com PREECE & DAVIS (1964) *apud* MARTINS (1990), os fatores de escalas são obtidos por meio das leis de semelhança, levando em conta as leis da Mecânica das estruturas (equilíbrios, deformações e tensões) utilizadas em problemas estáticos ou levando em conta o método da análise dimensional, que é utilizado quando se tem o fator tempo para ser considerado.

Como este trabalho não visa um estudo minucioso da teoria da semelhança, realiza-se uma abordagem dos fatores de escala considerando as leis da Mecânica das estruturas, ou seja, determinar o fator de escala dos comprimentos, dos deslocamentos e das tensões

5.3.1- Fator de escala dos comprimentos (S_L)

Para assegurar a semelhança completa do comportamento entre o protótipo e o modelo, eles devem ser geometricamente semelhantes (formas idênticas). O fator de escala dos comprimentos (S_L), indicará a proporção de tamanho entre as partes homólogas da seguinte forma (expressão 5.1):

$$L_p \text{ (comprimentos no protótipo)} = S_L \times L_m \text{ (comprimentos no modelo)} \quad (5.1)$$

De maneira análoga as relações entre áreas e volumes entre modelo e protótipo serão (expressões 5.2 e 5.3):

$$A_p \text{ (área do protótipo)} = S_L^2 \times A_m \text{ (área do modelo)} \quad (5.2);$$

$$V_p \text{ (Volume do protótipo)} = S_L^3 \times V_m \text{ (volume do modelo)}. \quad (5.3)$$

3.2- Fator da escala das deformações (S_ϵ)

A relação entre as deformações de partes homólogas do protótipo e do modelo será (expressão 5.4):

$$\epsilon_p \text{ (deformação no protótipo)} = \epsilon_m \text{ (deformação no modelo)} \times S_\epsilon \quad (5.4)$$

Se Δl_p for a variação de comprimento de um determinado trecho (L_p) do protótipo, então:

$$\epsilon_p = \Delta l_p / L_p \text{ e analogamente } \epsilon_m = \Delta l_m / L_m. \text{ Assim,}$$

$$\Delta l_p / L_p = S_\epsilon \times (\Delta l_m / L_m)$$

$$S_\epsilon = L_m / L_p \times (\Delta l_p / \Delta l_m) = (1/S_L) \times S_L = 1.$$

Por outro lado, os deslocamentos (δ), de pontos homólogos, obedecerão à relação da expressão 5.5:

$$\delta_p = S_L \times \delta_m \quad (5.5)$$

5.3.3- Fator de escala das tensões (S_σ)

A relação entre tensões, em pontos homólogos do modelo com o reator, é dada por (expressão 5.6):

$$\sigma_p = \sigma_m \times S_\sigma \quad (5.6)$$

O fator de escala das tensões (S_σ) pode assumir qualquer valor. Se considerarmos o fator de escala das tensões diferente do fator de escala dos comprimentos, algumas grandezas importantes poderão ser obtidas como força, momento, força por unidade de comprimento, pressão e densidade (expressões 5.7 a 5.11).

- Força (F)

$$F_p = \sigma_p \times A_p = \sigma_m \times S_\sigma \times S_L^2 \times A_m;$$

$$F_m = \sigma_m \times A_m$$

$$F_p / F_m = S_\sigma \times S_L^2 \quad (5.7)$$

- Momentos (M)

$$M_p = F_p \times L_p = \sigma_m \times S_\sigma \times S_L^2 \times A_m \times S_L \times L_m;$$

$$M_m = F_m \times L_m = \sigma_m \times A_m \times L_m;$$

$$M_p / M_m = S_\sigma \times S_L^3 \quad (5.8)$$

- Força por unidade de comprimento (p)

$$p_p = F_p / L_p = (\sigma_m \times S_\sigma \times S_L^2 \times A_m) / (S_L \times L_m) = S_\sigma \times S_L \times \sigma_m \times (A_m / L_m)$$

$$p_m = F_m / L_m = \sigma_m \times (A_m / L_m);$$

$$p_p / p_m = S_\sigma \times S_L \quad (5.9)$$

- Pressão (q)

A pressão é uma força por unidade de área. Assim, ele obedece a mesma relação das tensões ou seja:

$$q_p / q_m = S_\sigma \quad (5.10)$$

- Densidade (μ)

A densidade é dada por:

$$\mu_p = P_p/V_p = (\sigma_m \times S_\sigma \times S_L^2 \times A_m) / (S_L^3 \times V_m);$$

$$\mu_m = P_m/V_m = (\sigma_m \times A_m) / V_m;$$

$$\mu_p / \mu_m = S_\sigma / S_L. \quad (5.11)$$

Para os casos de modelos reais, onde o material do modelo guarda semelhança física com o material do protótipo, o fator de escala de tensões será um ($S_\sigma = 1$).

5.3.4- A escolha da escala

A escala próxima da unidade tem a vantagem de reproduzir no modelo as características do protótipo com toda a fidelidade. Porém, no caso de estruturas de grandes dimensões isso é inviável. Por isso, ao fixar a escala mínima para o modelo é necessário ter em conta que (ROCHA, 1952):

- as peças de menores dimensões a reproduzir no modelo, as quais não devem ser tão pequenas que seja difícil sua construção e observação;
- a precisão com que se pode realizar o sistema de aplicação de cargas ou de outras solicitações;
- a precisão, dimensões e modo de colocação da aparelhagem.

Para obedecer os requisitos citados acima optou-se para o modelo do reator anaeróbio, a utilização de uma escala três vezes menor que o protótipo, (1:3,0). Essa escala também foi adotada de maneira a permitir que se utilize o material pesquisado (argamassas e concretos), já que de acordo com NETH (1971) e TAYLOR (1972), perturbações observadas em modelos com escala até 1:4 não são apreciáveis. Outras escalas deverão levar em conta as propriedades dos materiais.

A seguir apresentam-se as dimensões estruturais do protótipo e do modelo (figuras 53 e 54), onde pode-se observar que no modelo as paredes não tem a rigidez proporcional ao protótipo, devido à taxa de armadura utilizada.

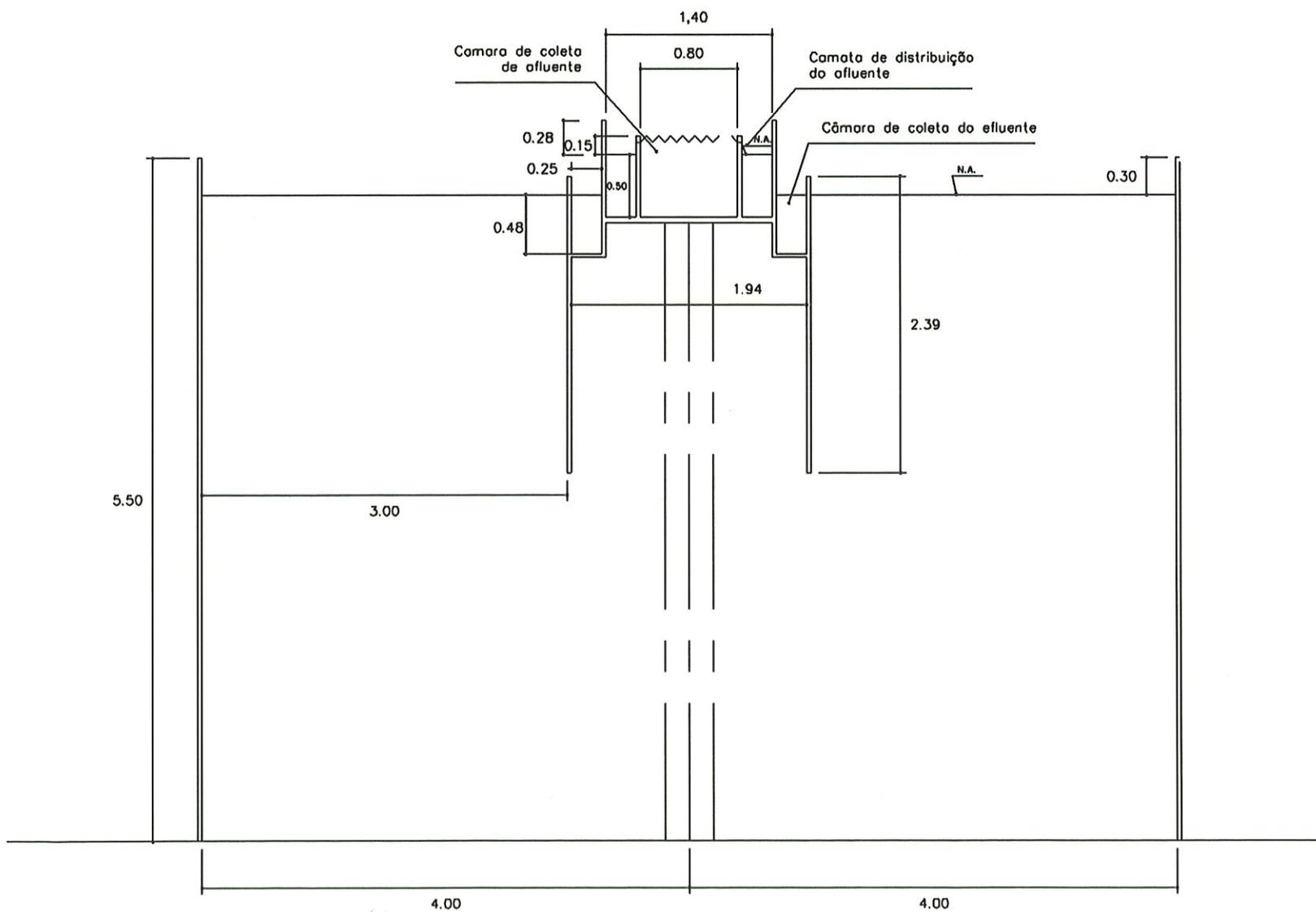


Figura 53- Dimensões da estrutura do protótipo

5.4- Execução do modelo de reator anaeróbio: Processo de produção das peças pré- moldadas e montagem da estrutura.

O modelo de reator anaeróbio a ser avaliado estruturalmente, é dividido em base, parede e estrutura interna, onde as duas últimas partes são compostas por elementos pré- moldados. A seguir apresentam-se as etapas de execução das peças pré- moldadas e a seqüência de montagem utilizada.

5.4.1- Parede do reator anaeróbio

A parede do reator, é composta por doze setores circulares pré-moldados que se alternam, no que diz respeito à disposição de armadura interna, em setores circulares com arranjo de armadura S1 e arranjo de armadura S2, conforme descrição feita do protótipo (capítulo 4- item 4.2.1.5).

Para a execução desses elementos pré-moldados, foi projetada uma fôrma unilateral contendo sarrafos para a fixação dos limites da peça e um “carrinho” para o controle da espessura e cobertura de armadura. A concepção da fôrma adotada para o modelo é apresentada na figura 55.

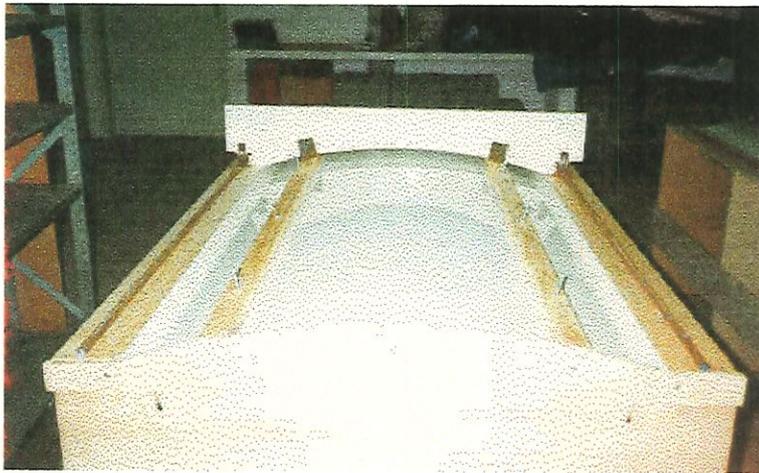


Figura 55- Fôrma unilateral utilizada para execução dos setores de paredes pré-moldados

O processo de produção dos setores de paredes consiste basicamente em cortar e posicionar as telas de aço sobre a fôrma, lançar, adensar e curar o concreto. Para um melhor entendimento, apresenta-se a execução desses elementos através das ilustrações e descrições das figuras 56 e 57.

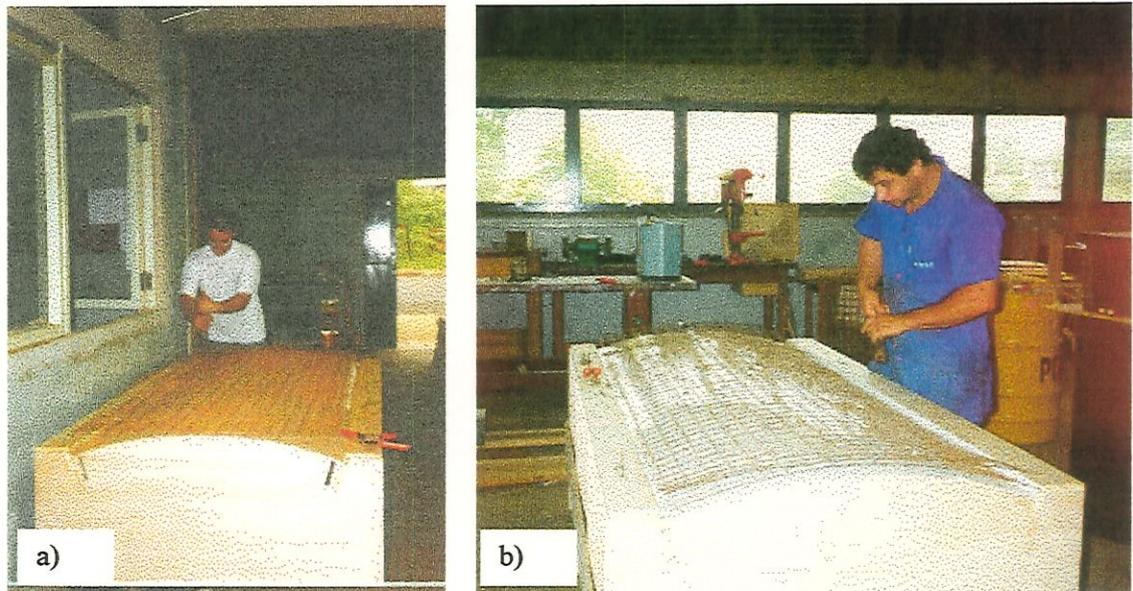


Figura 56- Corte da armadura (a) e colocação dos espaçadores (b) dos setores circulares que formam a parede do modelo do reator.

Após montagem e fixação da armadura na fôrma, o concreto é lançado, adensado (vibradores) e dado acabamento, não deixando de utilizar o carrinho gabarito. O controle de mistura neste caso é rigoroso, pois o concreto mantém a trabalhabilidade por aproximadamente 30 minutos entre o lançamento e o término do adensamento (figura 61).



Figura 57- Lançamento (a), adensamento (b) e acabamento (c) dos setores de parede pré-moldados

Para cada peça é efetuada uma cura úmida, até que a peça atinja resistência suficiente para desmoldagem (acima de 10 MPa), em torno de 24 horas para cura normal (figura 58) e aproximadamente quatro horas para cura a vapor.



Figura 58- Processo inicial de cura dos setores de parede pré-moldados

Após a desmoldagem, a cura úmida é continuada utilizando-se estopa constantemente umedecida, por pelo menos sete dias.

Durante a moldagem dos elementos, é realizado um acompanhamento de evolução de resistência mecânica do concreto estudado, já que utiliza-se a sílica ativa para a melhoria das suas propriedades. Dentre os traços de concreto estudados utilizou-se a mistura 1:1,8: 1,2 (1:3,0) confeccionado com o cimento CPV- ARI-RS. Este concreto obedece aos parâmetros descritos na tabela 30.

TABELA 30 - Parâmetros fixados para o concreto utilizado nas paredes pré moldadas

Parâmetros	Valor fixado
Índice de Consistência para a moldagem (Ensaio de acordo com NBR 7215)	Concreto K= 240 ± 10mm
Relação água/ cimento (NBR 1259)	a/c ≤ 0.45
Aditivo	1,8%
Sílica ativa	10%

O desenvolvimento de resistência mecânica do concreto utilizado é apresentado na figura 59 , onde verifica-se que aos 28 dias a resistência a compressão está próxima dos 60MPa. Cabe salientar que para cada setor pré- moldado executado, retirou-se uma amostra de 24 corpos de prova a serem ensaiados nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias

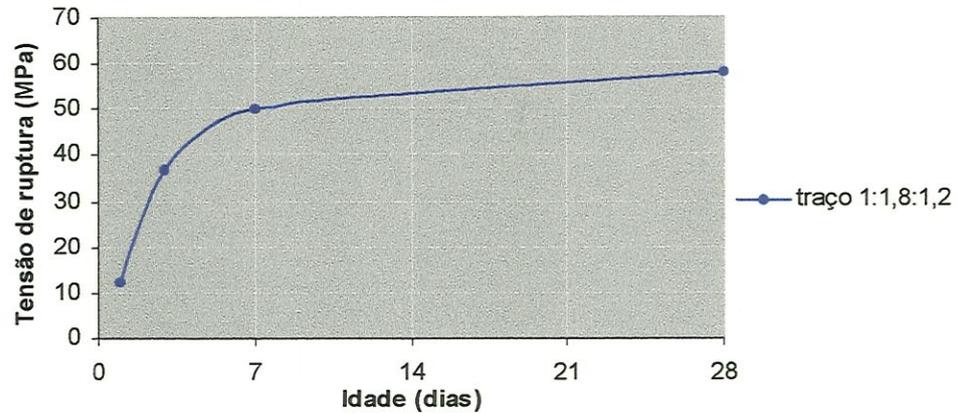


Figura 59 - Avaliação de resistência mecânica dos setores de parede pré-moldados.

5.4.2- Estrutura interna do reator anaeróbio

Os elementos pré- moldados que formam a estrutura interna do modelo do reator, são a câmara de coleta de afluente, a câmara de distribuição do afluente e a câmara de coleta do efluente. A seguir, apresenta-se o processo de moldagem para cada uma das peças.

5.4.2.1- Processo de produção das câmaras de coleta e distribuição do afluente

Para a execução das câmaras de coleta e distribuição do afluente, foram utilizadas fôrmas metálicas com dispositivos que facilitem a desmoldagem da peça (cantoneiras e parafusos).

No interior das fôrmas são colocadas a armadura (tela soldada) e em seguida realiza-se a moldagem das peças propriamente ditas, onde foi prevista a colocação de pinos para o encaixe dessas câmaras na câmara de coleta do efluente e o adensamento da argamassa (1:2,5) foi feito com o uso da mesa vibratória.

A cura desses elementos é efetuada conforme descrição apresentada para os setores de parede (item 5.3.1) .

A seguir são apresentadas ilustrações do processo de produção das câmaras de coleta e distribuição do afluente (figuras 60, 61, 62 e 63)



Figura 60 - Fôrmas metálicas utilizadas para as câmaras de coleta e distribuição do afluente respectivamente

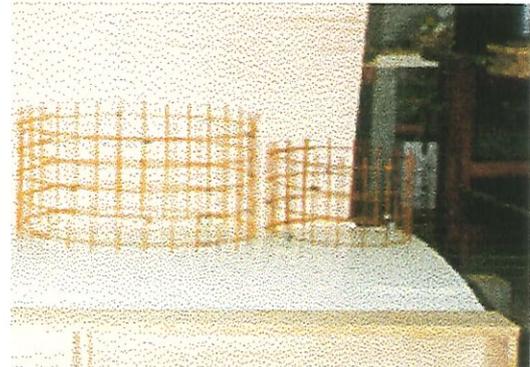


Figura 61- Detalhe da armadura das câmaras de coleta e distribuição do afluente

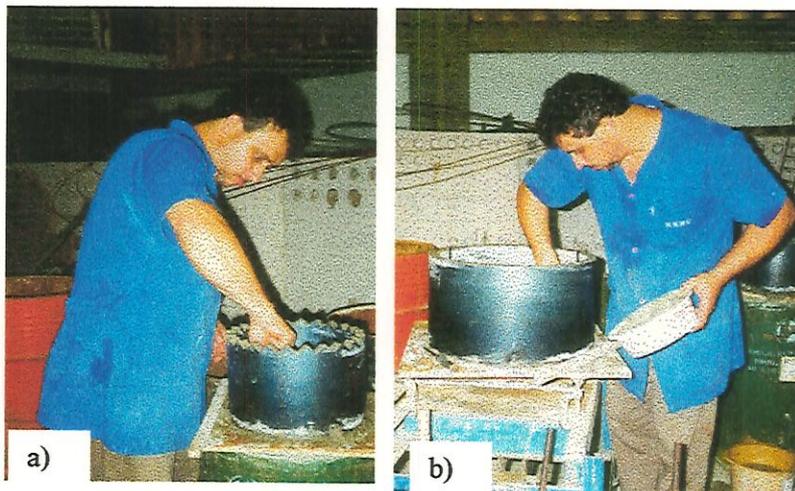


Figura 62- Lançamento e adensamento da argamassa das câmaras de coleta e distribuição do afluente (a e b)

Figura 63- Câmaras de coleta e distribuição do afluente após desmoldagem.



5.4.2.2- Processo de produção da câmara de coleta do efluente

A câmara de coleta do efluente é formada por duas peças pré-moldadas, denominadas de peça 1 e peça 2, solidarizadas entre si por parafusos e massa epóxi.

A execução dessas peças seguem as etapas descritas para as paredes, ou seja, são confeccionadas as fôrmas (metálicas), colocada a armadura e em seguida é feito o lançamento, o adensamento (mesa vibratória) e a cura úmida, levando-se em consideração um controle rigoroso da mistura. A seguir apresenta-se, através das figuras 64 a 69 as etapas de execução dos elementos pré-moldados.

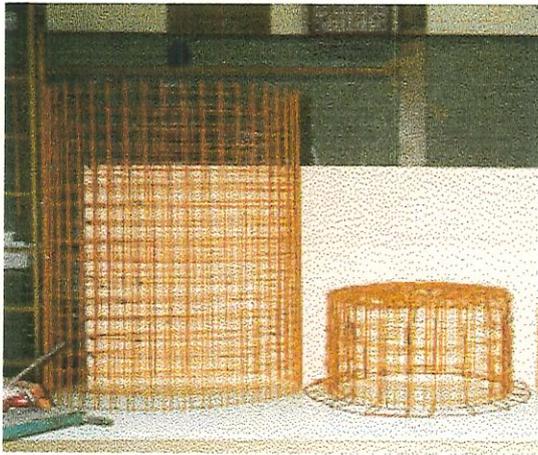


Figura 64 - Detalhe da armadura para as peças pré-moldadas 1 e 2

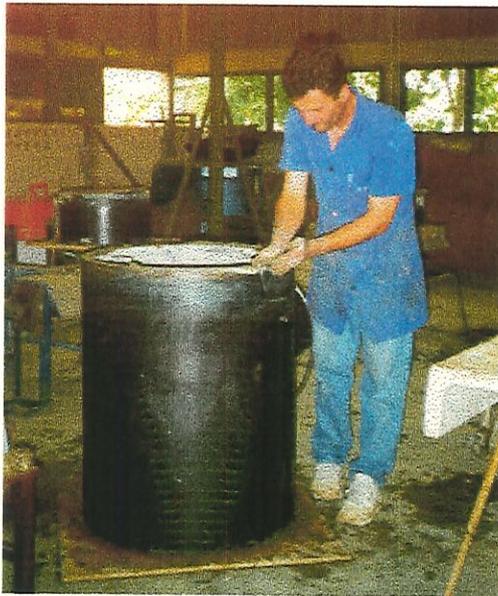


Figura 65- Detalhe da moldagem da peça 1, na qual foi utilizada fôrma metálica .

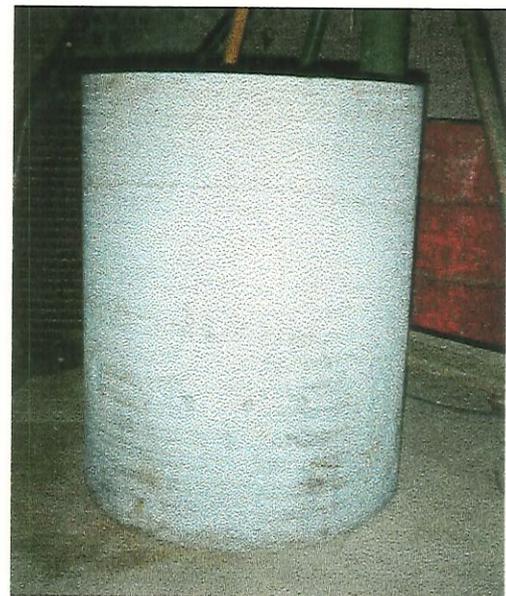


Figura 66- Detalhe da peça 1 após desmoldagem



Figura 67- Detalhe fôrma, da armadura e marcação dos pinos de solidarização da peça 2



Figura 68 - Vista superior da peça 2 observando todas as previsões de furos para encaixes de pinos chumbadores e tubulações

As duas peças são solidarizadas através da introdução de parafusos e resina epoxi, formando a câmara de coleta de efluente (figura 69).



Figura 69- Detalhes da fixação das peças 1 e 2 que formam a câmara de coleta do efluente

5.4.2.3- O material utilizado na execução dos elementos que formam a estrutura interna do modelo

Apesar dos elementos da estrutura interna não serem avaliados estruturalmente, foi realizado um acompanhamento da evolução de resistência mecânica da argamassa utilizada (traço 1:2,5) nessas peças. Os parâmetros fixados para as argamassas são apresentados na tabela 31.

TABELA 31- Parâmetros fixados para a argamassa utilizada na estrutura interna do modelo do reator tipo UASB

Parâmetros	Valor fixado
Índice de Consistência para a moldagem (Ensaio de acordo com NBR 7215)	Argamassa para câmaras de coleta e distribuição do afluyente $K= 190 \pm 10\text{mm}$ Argamassa para câmara de coleta de efluente $K= 230 \pm 10\text{mm}$
Relação água/ cimento (NBR 1259)	$a/c \leq 0.45$
Aditivo	1,4%

O acompanhamento de desenvolvimento de resistência mecânica da argamassa utilizada é apresentada na figura 70.

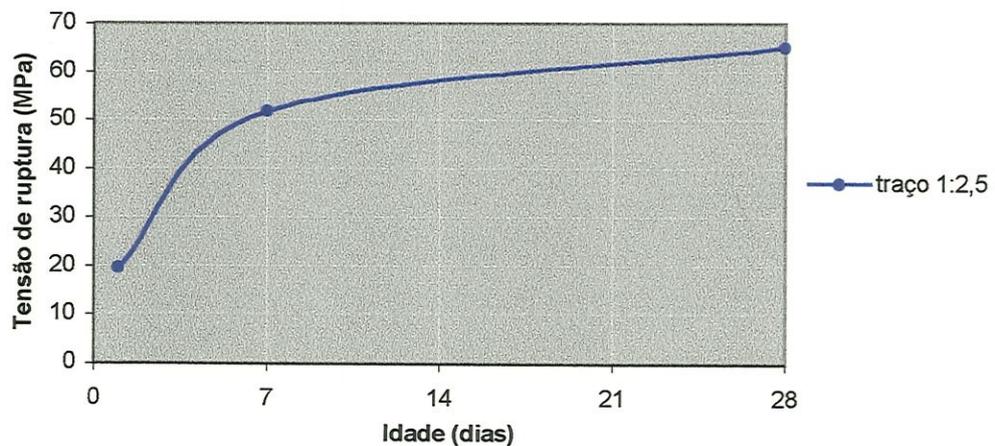


Figura 70 - Resistência à compressão axial da argamassa utilizada nos elementos que compõem a estrutura interna do modelo de reator.

Verifica-se que para as argamassas com sílica ativa as resistências obtidas foram superiores a 60MPa, podendo considerar este material como sendo de alta resistência.

5.4.3- O processo de montagem do modelo de reator anaeróbio

A seqüência de montagem da estrutura do modelo do reator, consiste basicamente em realizar as seguintes etapas:

- construir a base do reator (moldada "in loco");
- colocar as paredes pré-moldadas sobre o anel da base;
- executar as emendas;
- fazer o içamento da câmara de coleta do efluente e fixá-la sobre o pilar central;
- fixar a câmara de coleta e distribuição do afluente sobre a câmara de coleta do efluente.

Seguindo essas etapas apresentam-se, através de ilustrações (figuras 71 a 81), a seqüência de montagem do modelo.



Figura 71- Escavação da sapata, do anel e da laje de fundo.

Figura 72- Pilar central (moldado "in loco") após desmoldagem

Obs: Na cabeça do Pilar estão os parafusos, onde será encaixada a câmara de coleta de efluente. O $f_{c7} = 47,6 \text{ MPa}$





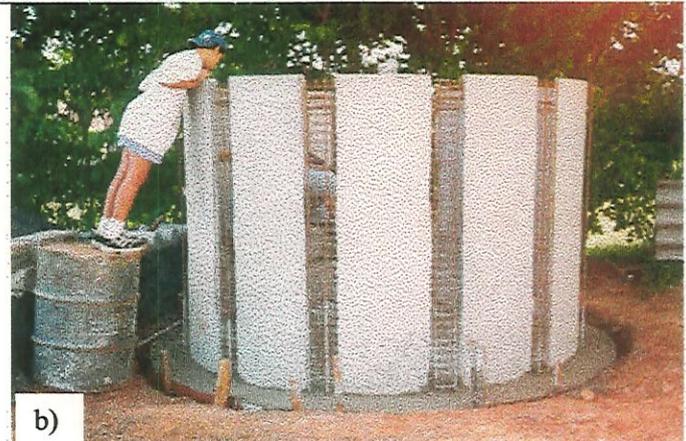
Figura 73 - Início da montagem dos setores de parede pré-moldados sobre o anel de fundação, utilizando um gabarito metálico para manter o posicionamento correto dos elementos.

Obs: No pilar central ainda está sendo realizada a cura.

Figura 74 - Detalhe da armadura da laje de fundo e anel do modelo e finalização da colocação dos setores de parede pré-moldados

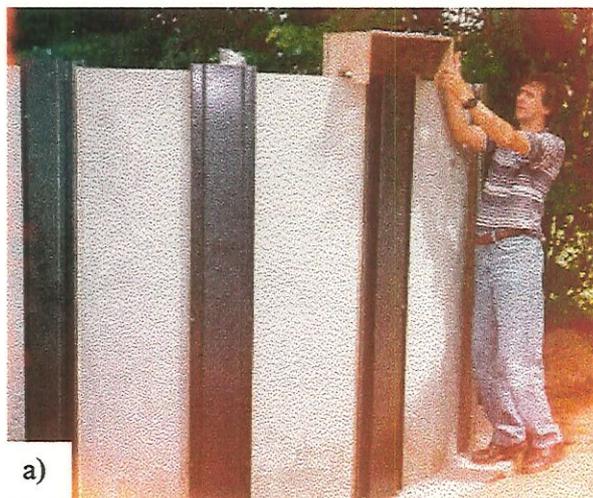


a)



b)

Figura 75 - a) Concretagem da laje de fundo e anel do modelo. b) Finalização da base do modelo



a)



b)

Figura 76- a) Colocação de fôrmas(metálicas) na ligação entre setores pré-moldados. b) Concretagem das emendas com auxílio de um funil.

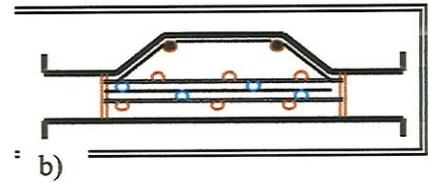
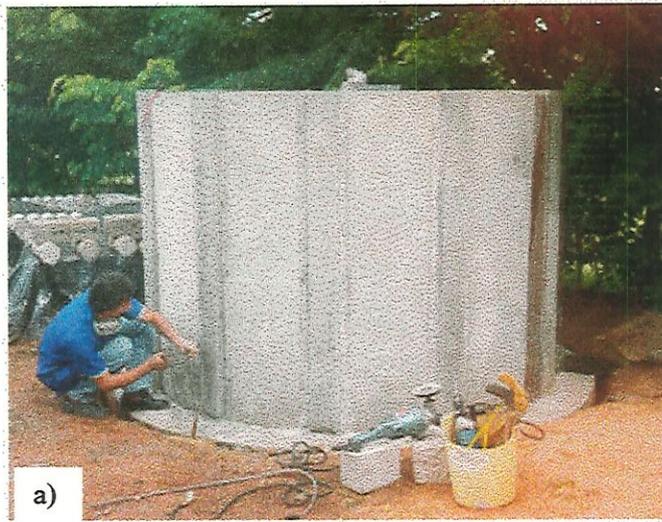


Figura 77 - a) Finalização da ligação entre os setores de parede pré-moldados.

b) Esquema adotado para as emendas- vista superior.

Obs: O índice de consistência utilizado para o concreto foi $k=255 \text{ mm}$



Figura 78- a) A câmara de coleta do efluente é içada com auxílio de um caminhão munke. b) Detalhe do encaixe da câmara de coleta do efluente sobre o pilar central (parafusos).

Figura 79 - Colocação da câmara de coleta do afluente sobre a câmara de coleta do efluente





Figura 80 - Colocação da câmara de distribuição do afluente sobre a câmara de coleta do efluente

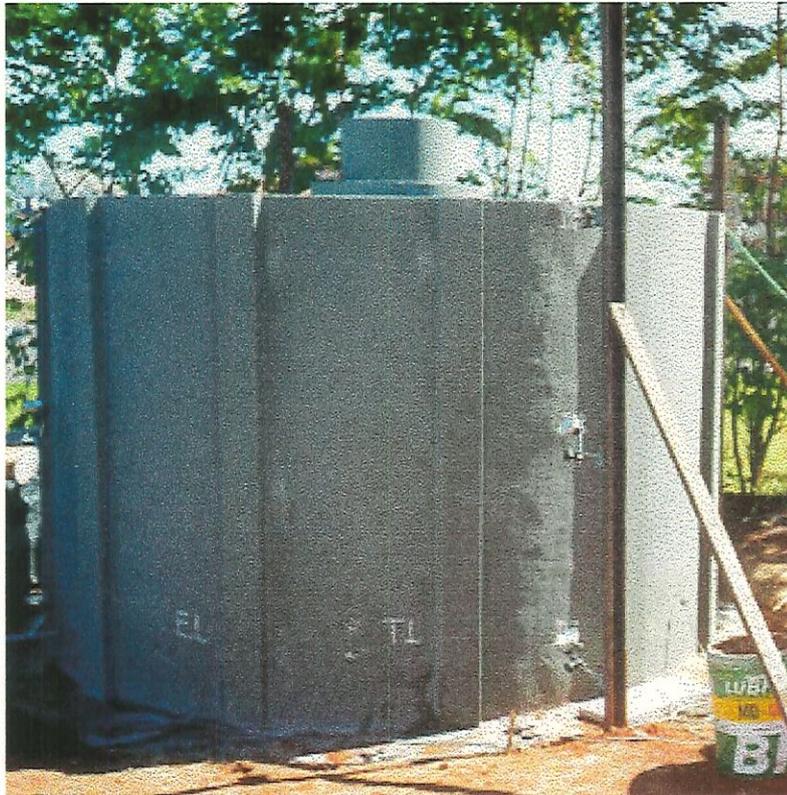


Figura 81 -Estrutura final do modelo de reator anaeróbio montada.

Após montagem final da estrutura do reator o modelo é preparado para se submeter a avaliação estrutural através de instrumentação.

5.5- Análise experimental do modelo de reator anaeróbio

5.5.1- Aplicação e descrição dos instrumentos de medição utilizados no ensaio estrutural do modelo

Para o ensaio estrutural do modelo, os instrumentos de medição utilizados foram o defletômetro e o extensômetro elétrico de resistência.

Os defletômetros, utilizados para medir deslocamentos, foram instalados em quatro paredes do modelo, sendo colocados ao longo de cada uma delas, três aparelhos com auxílio de hastes metálicas e fixadores magnéticos. As características dos defletômetros utilizados são: resolução de 0,01mm e deslocamento máximo de 50mm.

Para medir a deformação no concreto foram utilizados dois tensotast, onde um deles colocado em parede pré- moldada com arranjo de armadura S1 e outro colocado em parede com arranjo de armadura S2. Estes aparelhos, foram fixados para medir deformações onde o esforço de tração é máximo (0,28m do piso).

Os extensômetros elétricos de resistência do tipo KSC-5-C1-11, foram colocados em dois setores circulares de parede, com arranjos de armadura S1 e S2 respectivamente, para a determinação das deformações provocadas nas paredes durante o carregamento da estrutura. Estes extensômetros estão localizados na região de maior sollicitação, previamente determinada no cálculo estrutural do modelo (0,28m do piso).

Para compensar os efeitos indesejáveis da variação de temperatura durante o carregamento da estrutura, utiliza-se, juntamente com os extensômetros das paredes, um extensômetro compensador, que é colocado em uma placa executada com o mesmo material e espessura da parede. Cabe salientar que após o extensômetro ter sido colado e curado, se procede um teste das suas condições elétricas , com auxílio de um ohmímetro.

Todos os extensômetros são conectados, através de fios, a um terminal de leitura direta de deformação (indicador analógico).com canais independentes de medida.

A seguir, apresentam-se nas figuras 82 e 83 o posicionamento dos instrumentos de medição utilizados no modelo de reator.

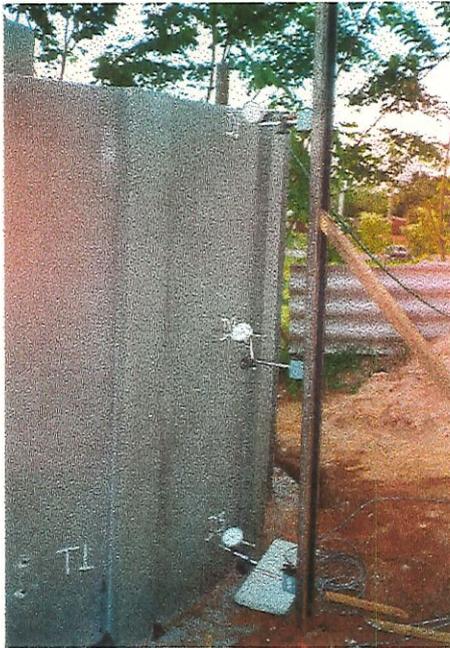


Figura 82- Detalhe da colocação dos defletômetros em uma das paredes do reator com o auxílio de haste metálica e fixadores magnéticos.

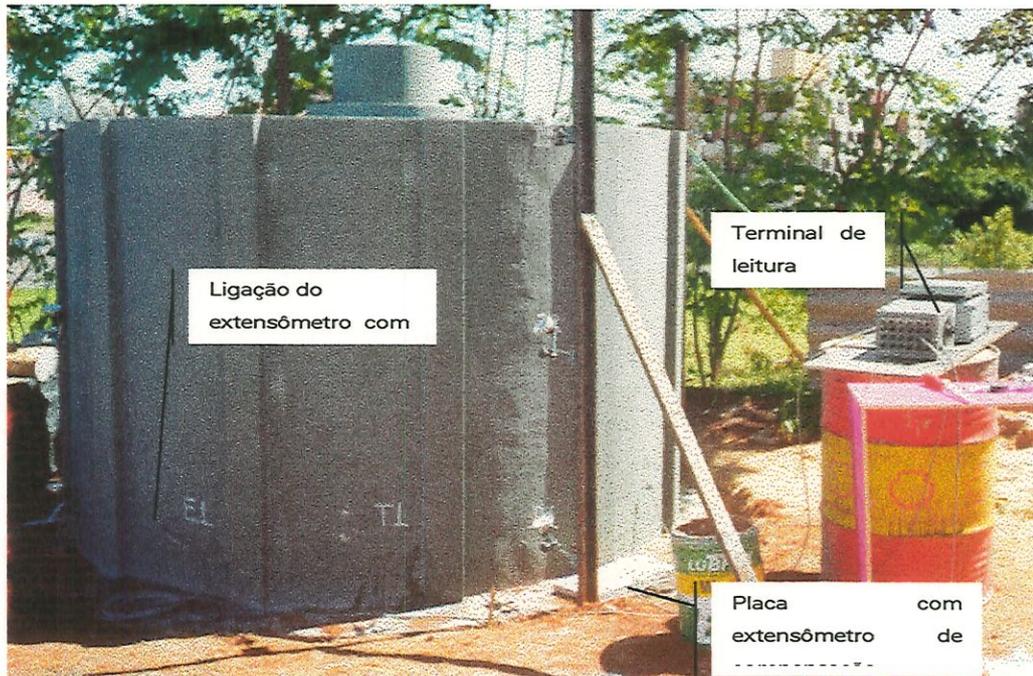


Figura 83 - Posicionamento do extensômetro elétrico de resistência e do extensômetro de compensação, ambos ligados ao terminal de leitura direta de deformação.

5.5.2- A aplicação do carregamento no modelo de reator anaeróbio

Para o ensaio estrutural do reator, o carregamento foi dividido em dez etapas, onde em cada uma delas realizou-se o lançamento de mil litros de água, com auxílio de um caminhão “pipa” e marcadores de nível para o controle de descarga da água (figura 84).

Após atingir o último carregamento (décimo), mais cinco leituras de deslocamentos e deformações foram feitas em todos os instrumentos de medição. O acompanhamento das deformações e deslocamentos medidos é apresentado no item 5.5.3.



Figura 84 - Detalhe de uma das etapas do ensaio de carregamento do modelo

5.5.3- Apresentação dos resultados

Os resultados apresentados a seguir, envolvem o acompanhamento das medições realizadas em cada etapa de carregamento e as curvas carga x flecha do protótipo calculada a partir dos ensaios com o modelo, utilizando para tanto as relações de semelhanças de uma estrutura estática.

5.5.3.1- Acompanhamento e avaliações das tensões, deformações e deslocamentos nas paredes do reator, durante as etapas de carregamento do modelo

Os defletômetros utilizados para o acompanhamento dos deslocamentos ao longo das paredes do modelo, foram colocados em três alturas diferentes, contadas a partir do piso, isto é, nas cotas 0,28m; 1,04m e 1,80m. Para um melhor entendimento a figura 89 apresenta o posicionamento desses defletômetros em quatro setores de paredes opostas entre si duas a duas.

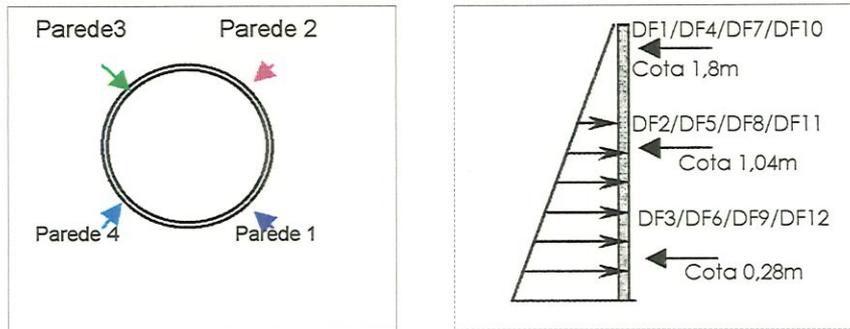


Figura 85- Esquema do posicionamento dos defletômetros na estrutura do reator.

As paredes 1 e 3 são opostas e idênticas, apresentando o mesmo arranjo de armadura (arranjo S1- telas justapostas). Os resultados dos deslocamentos medidos nas dez etapas de carregamento, ao longo da altura de cada setor de parede pré- moldado, são apresentados nas figuras 86e 87.

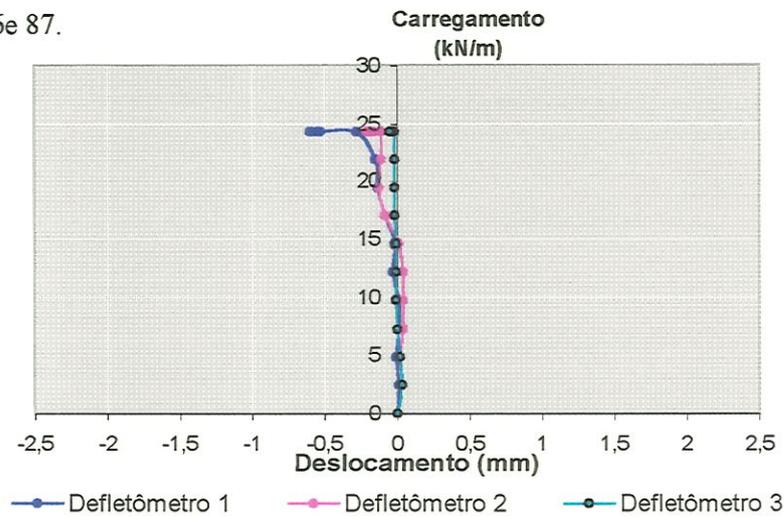


Figura 86- Deslocamentos na parede 1 durante o carregamento

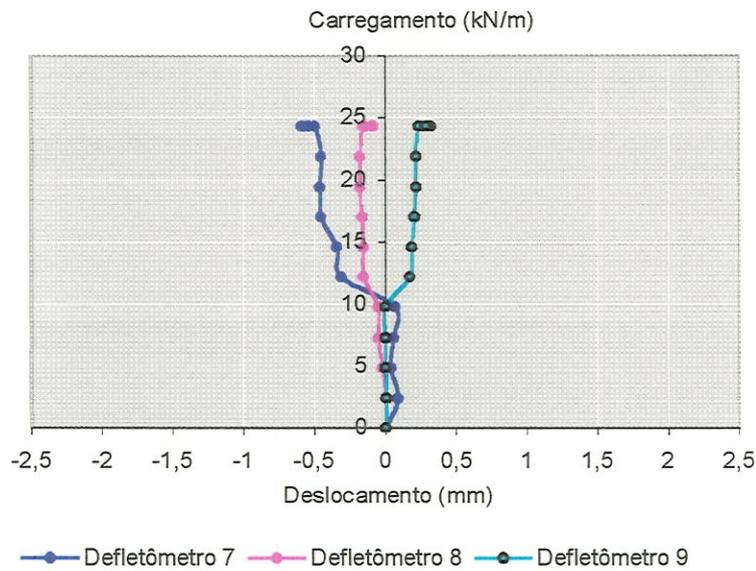


Figura 87- Deslocamentos na parede 3 durante o carregamento

Verifica-se para a parede 1 (figura 86), que devido ao engaste na borda inferior, em cada etapa de carregamento, quanto mais distante do piso o defletômetro estiver posicionado maior será o deslocamento.

Para a parede 3, o mesmo ocorre somente a partir do quinto carregamento, conforme detectado para os defletômetros 7 e 8. O defletômetro 9, parece não seguir o mesmo comportamento do defletômetro 3, entretanto, cabe ressaltar que considerando a influência da temperatura o deslocamento de ambos estão próximos de zero.

As paredes 2 e 4, também são opostas e idênticas, apresentando o mesmo arranjo de armadura (arranjo S2- telas distanciadas). Os resultados dos deslocamentos medidos em cada etapa de carregamento são apresentados nas figuras 88 e 89.

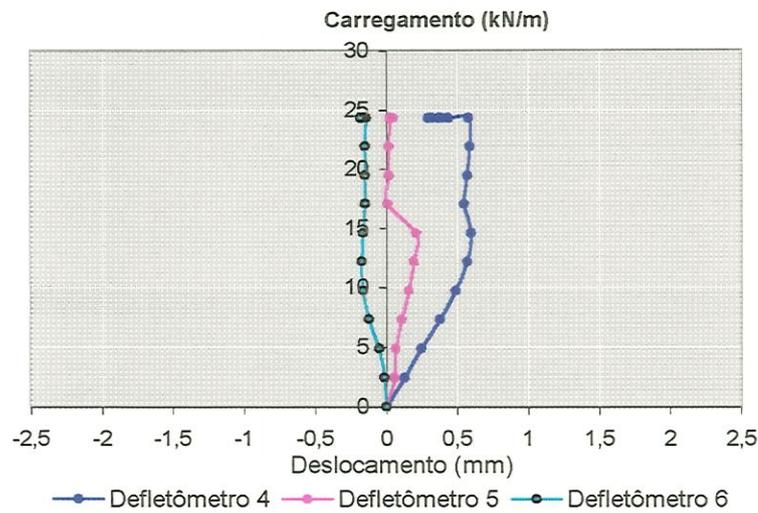


Figura 88 - Deslocamentos na parede 2 durante o carregamento

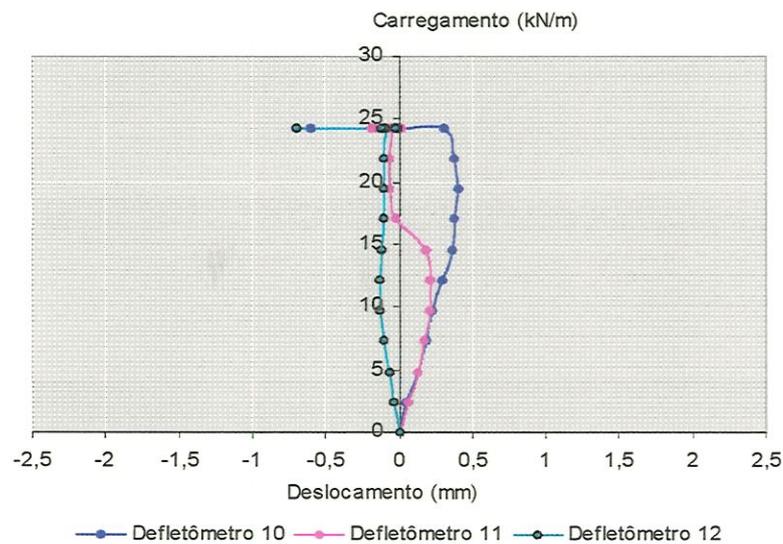


Figura 89 - Deslocamentos na parede 4 durante o carregamento

Comparando os resultados das paredes 2 e 4, verifica-se que os deslocamentos medidos durante o carregamento, são semelhantes, mostrando ambas o mesmo comportamento. O máximo deslocamento, no sentido de aumentar o diâmetro do reator, está por volta de 0,5mm. Este valor é relativamente baixo considerando a influência da temperatura sobre a estrutura durante o ensaio.

Comparando as figuras 86 e 87 com as figuras 88 e 89, nas cotas 1,04 e 1,8m, os resultados dos ensaios das paredes 1 e 3 mostram uma tendência da seção transversal do reator diminuir de diâmetro, enquanto que os resultados das paredes 2 e 4, mostram uma tendência da seção transversal aumentar o diâmetro. Este fato possivelmente está associado a alguns dos seguintes fatores: diferença no arranjo de armadura das paredes, rigidez da base não é infinita com aparecimento de um regime de flexão, acomodação da estrutura sobre o solo e variação de temperatura.

Após a última etapa de carregamento da estrutura, foram realizadas mais cinco leituras de deslocamentos das paredes, a cada uma hora aproximadamente. Estes resultados são importantes, pois possibilitam a comparação dos deslocamentos medidos com os deslocamentos teóricos do modelo como mostra a figura 90.

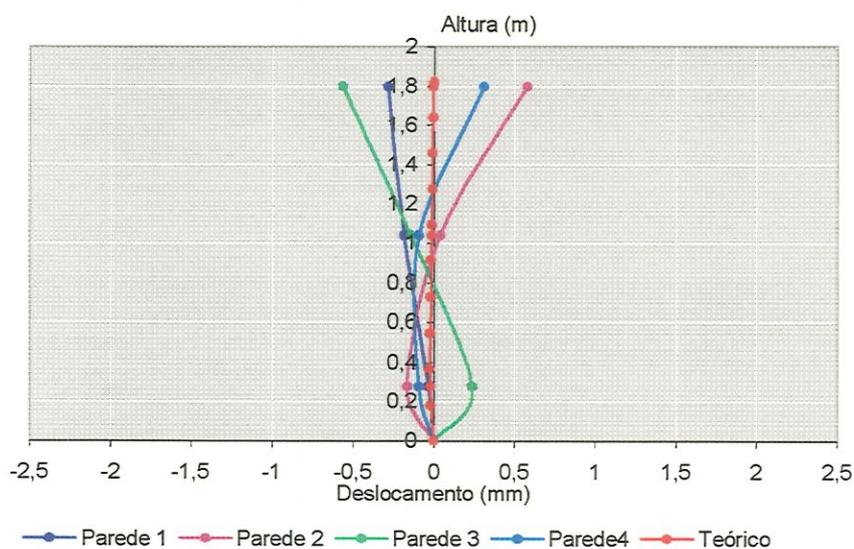


Figura 90- Deslocamentos medido e teórico nas paredes para o último carregamento

Verifica-se que as paredes 1 e 3 (reator diminui de diâmetro) e as paredes 2 e 4 apresentam (reator aumenta de diâmetro) entre si, deslocamentos semelhantes para o último carregamento.

Comparando os deslocamentos medidos com o deslocamento teórico, as diferenças observadas foram pequenas se levar em consideração que o modelo foi executado

intencionalmente sobre um solo sem preparação (sobre aterro) e a instrumentação feita ao ar livre (fatores como vento e temperatura influenciam os resultados). Assim é possível estender estes resultados ao protótipo.

Além dos deslocamentos, foram realizadas medidas de deformação da armadura no ponto de maior solicitação de pressão hidrostática (0,28m do piso). A figura 91 apresenta os valores de tensão e deformação na armadura das paredes S1 e S2.

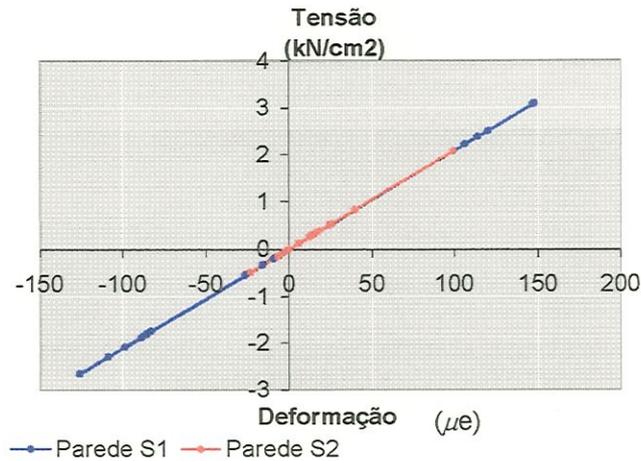


Figura 91 – Acompanhamento da deformação da armadura durante carregamento

Observa-se que a deformação da armadura da parede S2 é menor que a deformação na parede S1. Esta situação ocorre devido a diferença no arranjo de armadura entre as paredes e ao posicionamento do extensômetro da parede S2 estar entre as telas.

Como admite-se a solidariedade perfeita entre os materiais concreto e aço, a deformação do aço, para as tensões de compressão, é limitada pelo encurtamento do concreto não superior a $3,5\%$. Para as tensões de tração a deformação no aço é limitada em $2,07\%$ no aço classe A e 2% no aço de classe B.

Assim, verifica-se na figura 91, que os valores de tensão e deformação medidas na armadura, estão no trecho de linearidade não atingindo o aço o seu escoamento.

A seguir, apresenta-se o figura 92 de carregamento x deslocamento do protótipo, obtidos a partir dos resultados experimentais com o modelo. Os valores de deformação medidos no modelo não podem ser estendidos ao protótipo pois a taxa de armadura e a rigidez do modelo não se associa em escala com o protótipo.

Como o modelo e o protótipo foram calculados no estado limite último, mantendo as hipóteses de cálculo nessas condições, possivelmente o diagrama tensão e deformação das armadura do protótipo se comportará conforme o diagrama tensão x deformação da armadura do modelo, ou seja, os valores de deformação não irão superar os limites para o

escoamento do aço e ruptura do concreto (permanecendo nos limites de proporcionalidade da curva tensão x deformação da armadura).

5.5.3.2- Curva carregamento x deslocamento do protótipo, calculada a partir dos ensaios com o modelo-

A partir dos resultados experimentais medidos para o último carregamento do modelo, é possível, utilizando as leis de semelhança, obter as cargas e deslocamentos das paredes do protótipo em pontos homólogos ao modelo.

Os deslocamentos das paredes do protótipo obedecerão ao seguinte fator de escala em pontos homólogos ao modelo:

$$\delta_{tpH} / \delta_{tph} = S_L \text{ onde:}$$

- δ_{tpH} - deslocamento teórico do protótipo numa altura H, homóloga ao modelo;
- δ_{tph} - deslocamento teórico do modelo numa altura h;
- S_L - fator de escala de deslocamento a uma determinada altura da parede.

A expressão geral, aplicada ao modelo e ao protótipo, que descreve os deslocamentos que ocorrem ao longo da parede no último carregamento, para se obter o fator de escala S_L será:

$$\delta = (e^{-\lambda y} / 2\lambda^3 D_{cc}) [\lambda X_1 (\cos \lambda y - \text{sen} \lambda y) + (-X_2 \cos \lambda y)] \text{ (Capítulo 4- item 4.2.2)}$$

As cargas podem ser encontradas teoricamente, porém sofrem as devidas correções devido à densidade da água (1000 kg/m^3 - utilizada em ensaio) ser diferente da densidade do esgoto doméstico (1020 a 1040 kg/m^3). Além disso, o fator de escala encontrado leva em consideração a rigidez, o módulo de deformação do concreto e a taxa de armadura das peças do modelo e do protótipo.

A seguir apresenta-se a curva carga x deslocamento no protótipo a partir dos resultados experimentais obtidos com o modelo (figura 92).

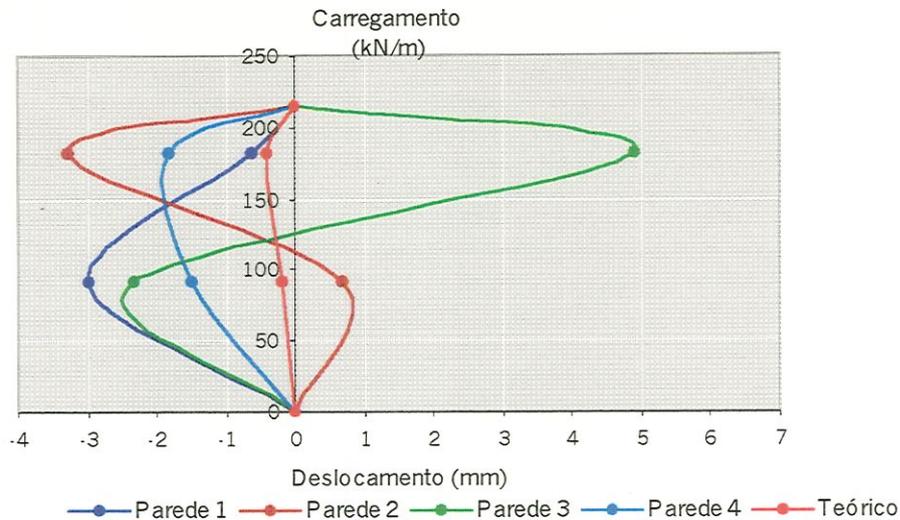


Figura 92 - Curva carga x deslocamento no protótipo a partir do ensaio com o modelo

Obs: As alturas no protótipo homólogas ao modelo são respectivamente, em relação ao piso (cota zero): 0,84m; 3,12m e 5,40 m.

Comparando os deslocamentos das paredes do protótipo, obtidos a partir de dados experimentais, com o deslocamento teórico, as paredes 1 e 4 são as que mais se aproximam dos valores teóricos, apresentando deslocamentos menores que três milímetros.

Apesar das “*distorções*” nas paredes 2 e 3, é possível comparar os deslocamentos que podem aparecer no protótipo em setores de parede com arranjo de armadura diferentes, ou seja, a parede 1 constituída por duas telas justapostas apresenta deslocamento máximo de 3mm e a parede 4 com telas distanciadas apresenta deslocamento máximo de 2mm. Este fato está de acordo com as deformações medidas na armadura da parede S1 e S2, isto é, a deformação na armadura das paredes com telas distanciadas foi menor que as deformações medidas nas telas justapostas.

5.6- Considerações finais

A execução modelo do reator ilustra de forma satisfatória o protótipo proposto, onde os resultados obtidos com os materiais vem confirmar as possibilidades de se construir uma estrutura com características de resistência e durabilidade. No que se refere á instrumentação, os resultados obtidos não foram conclusivos, mas indica um comportamento estrutural satisfatório do reator.

Apesar da técnica de produção utilizada para as peças pré- moldadas do modelo do reator satisfazer aos objetivos de avaliação de desempenho e utilização dos materiais estudados, é necessário que se realize um estudo aprofundado da forma de industrialização do reator, aprimorando e facilitando cada vez mais a sua execução e montagem, de maneira a usufruir na totalidade os benefícios que a técnica da pré-moldagem oferece.

CAPÍTULO 6- Conclusões e prosseguimento da pesquisa

De maneira geral, dentro das políticas habitacionais existentes em grande parte dos municípios brasileiros, dificilmente está inserido um plano de saneamento que vise tratar a água residuária (esgoto doméstico) gerada pela população.

Algumas medidas vem sendo tomadas como o surgimento das ISO 14000 e 9002. Além disso, em determinadas cidades (ex: Ribeirão Preto), através de lei municipal, é obrigatório, quando da abertura de novos loteamentos, apresentar um projeto que, integrado ao de infra estrutura urbana, vise tratar o a água residuária (esgoto) da comunidade local.

Essas medidas com certeza são um avanço para a melhora significativa da qualidade de vida de uma sociedade. Entretanto, não são suficientes visto que, o número de loteamentos clandestinos vem crescendo em ritmo assustador e de forma desordenada, fazendo com que o poder público tenha de interferir posteriormente para o fornecimento de uma infra-estrutura urbana como abastecimento de água, luz, asfalto e o recolhimento de esgoto.

Este fato, traz a necessidade de se discutir politicamente investimentos efetivos do setor público na área de saneamento básico; e tecnicamente tecnologias que visem a simplicidade como forma de viabilização de implantação de algum tipo de tratamento ao esgoto doméstico, iniciando um processo de gerenciamento racional da água utilizada pela população.

No que diz respeito ao aspecto operacional e de tratamento, o reator UASB vem apresentando resultados satisfatórios, chegando a ser totalmente recuperada se for realizado um pós tratamento. Todavia, se for instalado somente o reator UASB, a água que estará sendo levada para as grandes estações de tratamento de esgoto(ETEs) ou até mesmo para os rios, chegará tratada a um nível de 70% a 80%, significando uma melhora qualitativa das águas de corpos receptores.

Neste sentido a proposta construtiva, pode agilizar o processo de recuperação das águas residuárias domésticas, já que os resultados obtidos com os estudos de materiais e com o modelo reduzido foram plenamente satisfatórios.

Os concretos e argamassas de alto desempenho, ao serem aplicados em elementos estruturais delgados, puderam alcançar a máxima potencialidade quando aliados à tecnologia da pré- moldagem, onde se tem um controle rigoroso desde a escolha e proporcionamento dos materiais até sua aplicação e cura., com a garantia de durabilidade e resistência que são imprescindíveis para este tipo de estrutura.

Para aumentar as possibilidades de implantação do reator anaeróbio, a padronização do projeto e a industrialização dos componentes pré-moldados de argamassa ou concreto armado, que compõem o reator, são fatores preponderantes para a sua viabilização, sendo fundamental uma mão de obra especializada, um controle rigoroso da produção em todos os aspectos (elementos perfeitos com materiais convenientemente escolhidos, com controle de espessuras da peça e cobrimento de armadura, adensados e curados adequadamente).

Isto posto, algumas vantagens técnicas apresentadas pela proposta construtiva, são:

- a padronização do projeto e das peças pré-moldadas do reator, agilizam o gerenciamento e a coordenação dessas obras;
- a industrialização dos componentes de concreto- armado e/ou argamassa armada de alto desempenho, permitem a produção em série com qualidade e garantia, através do processo de execução adotado e controle de fabricação;
- as altas resistências em pequenas idades, proporcionadas por concretos e argamassas de alto desempenho, fazem com que a desforma dos elementos pré-moldados seja mais rápida., permitindo uma maior reutilização de fôrmas e a montagem de reatores em menor espaço de tempo;
- a estrutura do reator apresenta durabilidade adequada, com a vida útil estimada em torno de 45 anos (se não considerar manutenção periódica), pois as peças de concreto e/ou argamassa armada, são dimensionadas e executadas considerando não só a resistência mecânica, mas principalmente a esbeltez da mesma e as condições de exposição ao meio ambiente;
- o espaço necessário para aplicar esse sistema de tratamento é relativamente pequeno, podendo se utilizar vários módulos de 264m³(três mil habitantes) dependendo da população a ser atendida;

- as pequenas espessuras (26mm a 46mm) permitem maior leveza das peças com economia de materiais e conseqüentemente, facilidade de transporte e montagem (maior rapidez).

O sistema construtivo proposto, também pode ser economicamente viável, considerando uma série de variáveis que influenciam diretamente na composição de custo total das obras, tais como:

- o custo de fabricação das peças é minimizado em função das pequenas espessuras e simplicidade técnica construtiva;
- o custo de transporte é reduzido, devido a leveza das peças;
- apesar da base do reator, pilar central e determinadas ligações, serem moldados “in loco” o custo de execução do reator é reduzido devido a quantidade de escoramento e a pequena taxa de fôrmas utilizadas no local de montagem;
- considerando a utilização de cura acelerada (a vapor), visto que a resistência e durabilidade das peças não são prejudicadas apesar das perdas de resistência apresentadas em ensaios mostrados no capítulo 3, o custo da peça pré- moldada diminui consideravelmente em virtude da alta reutilização das fôrmas e acelerado processo de produção na indústria de pré-moldados;

Considerando-se todos esses aspectos relativos ao custo, quando da composição do preço total da obra, computados os custos de fabricação, transporte e montagem dos componentes de concreto e ou argamassa armada e custo de manutenção, obtém-se uma economia expressiva desse reator em relação a forma tradicional e artesanal de construção, mesmo tratando-se de uma obra de médio porte.

Algumas sugestões como perspectiva de prosseguimento da pesquisa são:

- aperfeiçoar a técnica de pré-moldagem dos elementos de concreto armado que compõem o reator, incluindo o projeto de ligações, de modo a proporcionar maior praticidade e economia na execução da obra;
- buscar novas soluções, relativas à forma do reator, que facilitem as ligações estruturais entre os elementos pré-moldados, visto que estas ligações demandaram cerca de 90% do tempo de montagem do reator proposto;
- estudar uma adequada relação altura/diâmetro para o reator, que faça com que o tratamento, devido essa alteração física, melhore sua eficiência. Atualmente,

existe grandes variações para a recomendação, principalmente, da altura do reator;

- estudar a possibilidade de se fazer separadores de fases pré- moldados de concreto armado (delgados), que apresentem características de impermeabilidade e durabilidade satisfatórias, em alternativa ao aço e à fibra de vidro usualmente adotados;
- pré-moldar outros elementos que fazem parte do sistema de tratamento de esgoto doméstico como a caixa de areia, a calha Parshall e a câmara de gás. Fazendo analogia com uma fábrica, cada um desses elementos é responsável por uma parte da produção de uma água tratada, podendo-se obter então um sistema de tratamento pré-moldado completo;
- estudar concretos com outras composições e adições (sílica ativa da casca de arroz ou de ligas de ferro- silício). Neste caso, principalmente, a sílica da casca de arroz*, vem apresentando expectativas de resistência mecânica em torno de 200MPa e altíssima durabilidade, já que a fase de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) formada com essa adição apresenta qualidades superiores a fase C-S- H formada no cimento.
- testar outros tipos de efluentes (tratamento utilizando o UASB) e afluentes, do ponto de vista de agressividade destes ao concreto (deterioração) e a partir dos resultados obtidos, estudar os materiais mais adequados para cada caso;
- executar o reator anaeróbio proposto em escala real e coloca-lo em operação (projeto piloto), a fim de calibrar a tecnologia e as características geométricas do mesmo;
- verificar o impacto da inserção desta estrutura (dentro de uma política habitacional) na melhoria efetiva da qualidade de vida da população atendida abordando alguns aspectos como a despoluição, a saúde e a reação da comunidade atendida.

As sugestões relacionadas para o aperfeiçoamento da proposta construtiva que envolve técnica de execução, especificação de materiais e eficiência hidráulica proporcionada fisicamente para o reator, indicam o muito a se desenvolver em relação ao

* Estudos realizados por grupo de pesquisa coordenado por LIBORIO J. na LCC-EESC-USP



tema. Todavia, ao final deste trabalho, espera-se ter contribuído para o desenvolvimento da tecnologia de construção de reatores UASB e motivar a realização de outros estudos referentes à linha de pesquisa apresentada.

Referências Bibliográficas

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE- ACI COMMITTEE 350.** “Concrete sanitary engineering structures”. In ACI Manual of Concrete Practice- Part.4-1983.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE- ACI COMMITTEE 444..** “Models of concrete structures: State- of -the- art”. In ACI -1979 (revisado em 1984).
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE- ACI COMMITTEE 515..** “ Guide for the protection of concrete against chemical attack by means of coatings and other corrosion resistant materials”. In ACI Journal, 63 (12): December 1966.
- AITICIN P.C. & NEVILLE A.M..** “Concreto de Elevado Desempenho: 120 MPa sem Mistério”. Revista Técnica, n.19, p29- 33, nov/dez 1995.
- ALMEIDA, I.R..** “Superplastificantes, microssilica e durabilidade dos concretos”. Revista Técnica, n.24, p30- 33, set/out 1996.
- ARAIN, E.** “Estudo sobre aplicabilidade de reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo no tratamento de efluentes de fecularia”. Escola de Engenharia de São Carlos- Tese de mestrado: Departamento de hidráulica e Saneamento, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS .**”Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado”. NBR-9062. Rio de Janeiro, 1985.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS .** “Elaboração de projetos de elevatórias e emissários de esgotos sanitários”. Rio de Janeiro: ABNT, 1975.39p.(P-NB-569/75).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** “Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário”. Rio de Janeiro: ABNT(NB-570/90), 1990.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** “Projeto e execução de obras de concreto armado”. Rio de Janeiro: ABNT.(NBR- 6118/78), 1978.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** "Projeto e execução de estruturas de concreto pré- moldado". Rio de Janeiro: ABNT, NBR-9062.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** "Projeto e execução de argamassa armada". Rio de Janeiro: ABNT, NBR-11173.
- BAUER, L. A. F.** "Materiais de construção". Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 3ª ed. Rio de Janeiro, 1987.
- BRAZ DE MELO, A.** "Estudo da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica na produção de elementos pré- moldados". Dissertação apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo - EESC-USP- 1996
- CAMPOS, J.R.** "Desenvolvimento de Reatores: Uso de outros tipos de reatores anaeróbios para efluentes líquidos"- Encontro de Especialistas em Digestão Anaeróbia, 199_.
- CARNEIRO, F.L.** "Análise dimensional e teoria da semelhança e dos modelos físicos"- Brasil -1993.
- CARRASCO, K.I.A.** "Balanço de massa e energia. Aplicação ao tratamento de esgotos sanitários com reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) a temperatura de 20°C". Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos - USP. São Carlos, São Paulo, novembro de 1993.
- CHERNICHARO, C.A.L.** "Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores anaeróbios". Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental- DESA UFMG, v.5, 1997.
- CINCOTTO, M.A.-** "Águas agressivas ao concreto: Mecanismos de deterioração"- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-Notas de aula, 1997.
- COUTINHO, A. S.** "Fabrico e propriedades do betão". Laboratório Nacional de Engenharia Civil- LENEC. Lisboa, 1988.
- CUNHA, R. D. A.** "Dosagem de microconcretos para elementos estruturais de pequena espessura". Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, EESC- USP, 1991.
- DAL MOLIN, D.C.C.** "Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos Concretos de Alta Resistência, com e sem adição de microsilica"- Tese de doutorado apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- São Paulo- junho de 1995.

- DEHOUSSE, N.M. & ARNOULD, R.** "*Les modeles reduits de structures en génie civil*". Paris- 1971.
- EL DEBS, M.K.** "*Contribuição ao emprego de pré- moldados de concreto em infraestrutura urbana e em estradas*". Tese de Livre Docência apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo EESC- USP, agosto de 1991
- EL DEBS, M.K.** "*Emprego de pré- moldados de concreto*". Material didático apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos- EESC- USP/ Departamento de Estruturas ,1996 (Notas de aula).
- FORESTI, E.** "*Processos e operações em tratamento de resíduos*". Escola de Engenharia de São Carlos- EESC- USP/ Departamento de Hidráulica e Saneamento- 1996. (Notas de aula).
- FURNAS-** "*Concretos: massa, estrutural, projetado e compactado a rolo- Ensaio e Propriedades*"- Equipe de Furnas- Laboratório de Concreto. Editora Pini- 1997.
- GASI, T.M.T.** "*Opções para tratamento de esgotos de pequenas comunidades*". São Paulo -CETESB, 1988.
- HANAI, J.B.** "*Construções de argamassa armada: Fundamentos tecnológicos para projeto e execução*". São Paulo- Editora PINI ,1992.
- HANAI, J.B.** "*Projeto estrutural e dimensionamento de argamassa armada com telas soldadas*". São Paulo- IBTS –1990.
- HANAI, J.B.** "*Reservatórios com parede ondulada*". Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos- USP- Departamento de Estruturas ,1981.
- HELENE, P.R.L.** "*Vida útil das estruturas*". *Revista Técnica*, n.17, p28- 31, jul/ago de 1995.
- HELENE, P.R.L.** "*Corrosão em armaduras para concreto armado*". Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo.- Ed. Pini, 1986.
- HELENE, P.R.L & FIGUEIREDO E.P.** "*Assim caminha a corrosão*". *Revista Técnica*, n.10, p28- 33, mai/jun , 1994.
- HELENE, P.R.L. & TERZIAN, P.** "*Dosagem e controle dos concretos de cimento Portland*" - São Paulo - PINI - 1994.
- HOLANDA, A.B.** "*Novo dicionário da língua portuguesa*". - Brasil- 1986.

- HOSSDORF,H.** "*Modelos reducidos- método de calculo*"- Madrid -1972.
- IBTS** "*Telas soldadas para argamassa armada* ". Publicação apresentada pelo Instituto Brasileiro de Telas Soldadas- São Paulo- 1990.
- IBTS** "*Telas soldadas padronizadas* ". Catálogo apresentada pelo Instituto Brasileiro de Telas Soldadas-São Paulo, 1990.
- IMNHOF,K. & INMHOFF K.R.** "*Manual de tratamento de água residuárias*". São Paulo: Edgard Blücher, 1986.
- LEONHARDT,F & MONNING,E;** "*Construções de concreto: Princípios básicos sobre a armação de estruturas de concreto armado* "Editora Interciência Ltda- Vol.3, 1978.
- LETTINGA, et & ZEEMAN, G. & REBAC, S.** "*Anaerobic wastewater treatment- Seminário Internacional - Tendências no tratamento simplificado de águas residuárias*" . Minas Gerais – Brasil . Anais 6 a 8 de março de 1996
- LIBORIO, J.B.L. & BRÁZ DE MELO, A.** – "*Cura térmica acelerada (vapor) sob pressão atmosférica de argamassas estruturais*" - FAPESP - Relatórios I, II, III, IV, V - Proc.FAPESP 92/1472-5 -1995. Trabalho não divulgado
- LIBORIO, J.B.L. & BRÁZ DE MELO, A.& MARELLI,L.M.&RODRIGUES,R.** "*Estudo da produção de painéis pré-moldados de argamassa armada de vedações, lajes de piso e forro, executados mediante cura à vapor*". Relatório Técnico apresentado a FAPESP Proc. 92-1472-5, 1995 - Não divulgado.
- LIBORIO, J.B.L. & TEZUKA, Y.** "*Especificação para concreto armado em contato com esgoto doméstico*". Seminário apresentado no Departamento de Construção Civil da Escola Politécnica- USP- .São Paulo:, junho, 1987.
- MARTINS,A.R.** "*Técnicas experimentais para aplicação de modelos de microconcreto*". Tese de doutorado apresentada a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo- São Paulo, 1990.
- MARTINS,J.A.** "*Sistema de esgotos sanitários*". USP- Faculdade de Saúde Pública- São Paulo- CETESB 1973.
- MENDONÇA,S.P.** "*Lagoas de estabilização e aeradas mecanicamente: novos conceitos*". João Pessoa: UEPb, 1990.
- METCALF & EDDY.** "*Wastewater engineering: treatment, disposal, reuse*". McGraw-Hill, 920p -1979.

- RAMACHANDRAN, V. S.** "Concrete admixtures handbook - properties, science and technology". In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON. Seminário sobre Produção de Concreto C-7. São Paulo: IBRACON, 17 p, 1983..
- ROCHA, M.** "Dimensionamento experimental das estruturas". Laboratório Nacional de Engenharia Civil- LENEC. Lisboa, 1952.
- ROCHA, S.** "Desempenho medido na prática". Revista Técnica. n.29, p14- 17, 1997.
- SOBRAL, H.S.** "Durabilidade dos concretos". Estudo técnico da Associação Brasileira de Cimento Portland n.43. São Paulo, julho 1990.
- TAYLOR, H.P.J.-** "Shear strenght of large beams".Journal of the structural Division- ASCE- Vol.98 n° st 11- 1972.
- TORII, K. & KAUAMURA,M.** "Effects of fly ash and silica fume on the resistance of mortar to sulfuric acid and sulfate attack". Revista Cement & Concrete Composites, n.2, vol 24, p361-370,1994.
- TORRES, P.** "Desempenho de um reator anaeróbico de manta de lodo (UASB) de bancada no tratamento de substrato sintético simulando esgotos sanitários". Tese de mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 1992.
- VAN HAANDEL, A.C. & LETTINGA, G.** "Tratamento anaeróbico de esgotos: Um manual para regiões de clima quente" 1994.
- VIEIRA, S.** "Experiencia e perspectiva do tratamento anaeróbico de esgotos sanitários no Brasil"III Taller y Seminario Latino Americano- "Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales",Montevideo- Uruguai- 25-28 de octubre 1994.
- WILDER, C.R. & SPEARS, R.E.** "Concrete for sanitary engineering structures". Concrete International: Design Constrution, V.3, p.29- 34. April 1981.
- WILDSHUT, L.** "Aspectos específicos del diseño de un reator para tratamiento anaeróbico de aguas residuales". In : CURSO: "Crítérios de diseño para sistemas de tratamiento anaerobico UASB. Exemplos praticos a nivel nacional e regional". Cali- Colombia: 1989b, p 92-102.

- METHA, P.K. & MONTEIRO P.J.M.** "Concreto: estrutura, propriedades e materiais". Projeto de divulgação tecnológica CIMINAS/ HOLDERCHEM. Empresas do grupo "Holderbank". São Paulo, Pini, novembro 1994
- MOLICA JR.** "O uso da tela soldada no combate à fissuração". Trabalho desenvolvido para o Instituto Brasileiro de telas soldadas,. EPUSP- 1979
- NETH, V.W.** "Models studies on punching of reinforced concrete flat slabs at edge columns". Msc Thesis, Queens University- Kingston- 1971.
- NEVILLE, A.M.** "Propriedades do concreto". Tradução de Salvador Eugênio Giammusso. São Paulo, Pini, 1982.
- NOYOLA, A.R.** "Criterios de diseno y escalado de reactores anaeróbios (México). III Taller y Seminario Latino Americano- "Tratamiento anaerobio de aguas residuales", Montevideo- Uruguai- 25-28 de octubre 1994.
- OLIVA, L. C.H. V.** "Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) –protótipo: desempenho e respostas dinâmicas as sobrecargas hidráulicas". Tese de doutorado apresentado a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo- 1997.
- OLLIVIER, J.P.** "Durability of concrete"- Boletim técnico apresentado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1988.
- PALERMO, G.** "Durabilidade e estanqueidade". Revista Técnica, n.18, p32- 36, set/out 1995.
- PAULON, A.V.** "Interface entre pasta de cimento e agregado: A influência na durabilidade dos concretos". Revista Técnica, n.25, p29- 31, nov/dez 1996.
- PEREIRA, J. P. A. C. & ROCCIA, J. A.** "Concreto de Alto Desempenho: Propriedades, produção e aplicações"- Trabalho apresentado na disciplina SAP 817 - Patologia das construções I –Escola de Engenharia de São Carlos, 1995.
- PINHEIRO, L.M.** "Concreto armado: Tabelas e ábacos". Publicação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, março 1993.
- PIRES, L.P.** "Aço: subsídios para seu conhecimento e aplicação na arquitetura". Dissertação de mestrado apresentada a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo- 1998.