

Simulação Numérica de Reservatórios de Petróleo com Poços Horizontais



ensino de física
nas
universidades

patologias
generalizadas em
edifícios de múltiplos
andares

índice

ARTIGOS ORIGINAIS

SIMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE ÓLEO LEVE COM POÇO HORIZONTAL HIDRAULICAMENTE FRATURADO

Camila Lima Chung, Grazione de Souza, Helio Pedro Amaral Souto 1-16

TERRAFORMING THE ARAL SEA BASIN:

Geomorphological and Anthropogenic Foundations (first part)

Nilo Serpa 17-27

TERRAFORMING THE ARAL SEA BASIN:

Geomorphological and Anthropogenic Foundations (second part)

Nilo Serpa 28-38

A EXPERIMENTAÇÃO ALIADA À INTER/TRANSDISCIPLINARIDADE COMO ALTERNATIVA PARA O ENSINO DE FÍSICA NAS UNIVERSIDADES:

Uma Experiência nas Ciências Agrárias

Beatriz Lopes Pereira, Rayane Pereira Sodré, José Felipe Sousa de Almeida, Antônio Vinícius Corrêa Barbosa 39-47

PATOLOGIAS GENERALIZADAS E AVALIAÇÃO DA DEPRECIAÇÃO FÍSICA PELO MODELO ROSS-HEIDECKE MODIFICADO EM UM CONDOMÍNIO DE EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS ANDARES

Jorge Oliveira, João da Costa Pantoja, Aline M. C. Santoro 48-59

ARTIGOS DE REVISÃO

RESÍDUOS SÓLIDOS NA PRODUÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO

Gisele Alves Fernandes, Célio Honorato de Oliveira 60-67



Simulação de Reservatórios de Óleo Leve com Poço Horizontal Hidraulicamente Fraturado

Camila Lima Chung

Engenharia Mecânica, Instituto Politécnico, UERJ, Brasil.

Grazione de Souza

Departamento de Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, UERJ, Brasil.

Helio Pedro Amaral Souto

Departamento de Modelagem Computacional, Instituto Politécnico, UERJ, Brasil.

Abstract: Since the 1960s, because of the relevance to the oil industry, the numerical simulation of hydrocarbon reservoirs has received special attention and has been the subject of extensive studies. The main goal of computational modeling and the use of numerical methods for reservoir simulation is to allow better placement and control of wells, so that there is a optimized oil recovery. In this work, production of hydraulically fractured horizontal wells in light tight oil reservoirs will be studied. In this case, fractures do not form a continuous conductive network and can communicate hydraulically with only the horizontal producer well. In order to do that, a simulator for three-dimensional oil flow in reservoirs, suitable for applications in the field scale, already developed, using the Cartesian coordinate system and a finite difference approach, will be applied for the study of hydraulically fractured horizontal wells. Originally, this simulator and its grid refinement tools had been used only on the simulation of naturally fractured reservoirs. The nonlinear partial differential equation resulting from physical-mathematical modeling, written in terms of pressure, will be solved numerically after discretization and linearization using the Preconditioned Conjugate Gradient method. The main objective is to study the combined effects of hydraulic fractures and horizontal well on the wellbore pressure profile, considering different light tight oil production scenarios. Numerical simulations displayed the influence of important parameters on the well-reservoir system in study, such as fracture permeability and matrix porosity. A study of this type is relevant on the discussion of reservoir production strategies, helping on the decisions about a hydraulic fracturing operation in order to obtain economic viability for the hydrocarbons recovery project.

Keywords: reservoir simulation, light tight oil, horizontal well, hydraulic fracturing, finite differences method.

Corresponding author: Helio Pedro Amaral Souto, helio@iprj.uerj.br

Received: 10 May 2017 / Accepted: 04 July 2017 / Published: 27 Aug 2017 .

1 Introdução

Desde a década de 1960, devido à pertinência para a indústria petrolífera, a simulação numérica de reservatórios portadores de hidrocarbonetos vem recebendo uma atenção especial e tem sido alvo de amplos estudos. Do ponto de vista econômico, o conhecimento do comportamento do escoamento no reservatório durante a sua exploração é relevante, porque ele fornece dados que ajudam a estimar as características da produção de petróleo,

padrões de fluxo, pressão no poço e tempo de produção, por exemplo. O principal objetivo da modelagem computacional e do emprego de métodos numéricos, para a simulação de reservatórios de petróleo, é o de possibilitar um melhor posicionamento e controle dos poços, de forma que haja um aumento no fator de recuperação de hidrocarbonetos.

Dentre os problemas que suscitam um grande interesse encontra-se o fraturamento hidráulico em reservatórios com poços horizontais de produção. Esses dois elementos podem levar ao desenvolvimento de vários regimes de escoamento linear em reservatórios com poro-

sidade dupla [1]. Entender a influência desses dois mecanismos na produtividade dos reservatórios é crucial para a indústria do petróleo. Muitos autores têm estudado e desenvolvido modelos para a simulação de poços horizontais com fraturamento hidráulico, como por exemplo, [2], [3], [4], [5] e [6], incluindo a aplicação em reservatórios de baixa permeabilidade portadores de óleo leve ([7] e [8]).

1.1 Poço horizontal

A utilização de poços horizontais na exploração de reservatórios de petróleo é cada vez mais intensa. Devido à característica dos reservatórios possuírem pequena espessura e grande extensão, os poços horizontais tem diversas vantagens quando comparados aos poços verticais, especialmente por possuírem uma maior área de contato entre o poço e o reservatório.

Os poços horizontais são paralelos ao acamamento principal do reservatório (Fig. 1) e geralmente são utilizados em casos tais como: reservatórios inclinados, reservatórios depletados, formação com várias camadas e reservatórios nos quais técnicas convencionais tem baixo desempenho ou até mesmo falham. Alguns exemplos são os reservatórios de baixa espessura, com tendência à formação de cones de gás e/ou água, naturalmente fraturados, de baixa permeabilidade e alta anisotropia ou reservatórios com baixa eficiência de varrido [9].

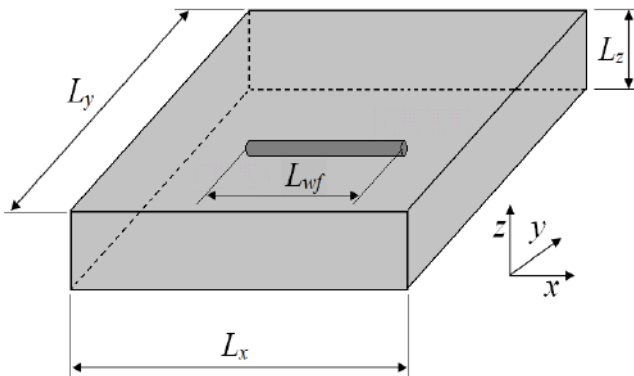


Figura 1: Ilustração de reservatório com poço de produção horizontal.

A variação da pressão por metro no poço horizontal é menor que no poço vertical, quando comparados para a mesma vazão de fluxo. Isso torna o poço horizontal mais atrativo em aplicações de recuperação de óleo e em situações onde a presença de um cone de água é um problema. Dessa forma, os poços horizontais são considerados excelentes ferramentas para a produção do reservatório. Com relação a aplicações de poços horizontais, geralmente considera-se duas categorias: resolução de problemas decorrentes das heterogeneidades do reservatório e resolução de problemas decorrentes das características do escoamento dos fluidos. Ambas aplicações podem estar presentes no mesmo sistema [10].

Destaca-se que a perfuração horizontal pode ser aplicada em qualquer fase de recuperação de um reservatório. Além disso, é sabido que os poços horizontais contribuem significativamente para o aumento da produtividade dos reservatórios com baixa permeabilidade, que podem não produzir sem o emprego de técnicas de estimulação como, por exemplo, o fraturamento hidráulico.

1.2 Fraturamento hidráulico

Em formações de baixa permeabilidade o emprego de estimulação é necessário, uma vez que o poço já tenha sido perfurado. O tipo mais comum de estimulação utilizado na indústria de óleo e gás é conhecido como fraturamento hidráulico ou fracking. Aplicando alta pressão por bombeamento de fluidos dentro do poço, são criados caminhos no reservatório por onde o óleo possa fluir para o poço [7].

A operação de fraturamento hidráulico consiste na aplicação de um diferencial de pressão, que provoca quebra da formação (fratura). Também há a injeção de um agente de sustentação (propantes). Esse agente de sustentação, que pode ser à base de areia ou outros compostos, evita o fechamento da fratura (devido às altas pressões existentes nesses tipos de reservatórios) após a retirada da pressão imposta pelo bombeamento dos fluidos. Desta forma, são criados caminhos preferenciais de elevada condutividade que facilitarão o escoamento dos fluidos do reservatório para o poço, ou vice-versa [11].

A permeabilidade em reservatórios convencionais é suficiente para que o fraturamento hidráulico não seja necessário para o aumento da taxa de produção. Por outro lado, a permeabilidade nos reservatórios não convencionais é geralmente baixa, de modo que as fraturas hidráulicas são criadas para permitir o aumento da produção economicamente viável de óleo e gás [7]. A Fig. 2 traz uma ilustração de um poço horizontal hidráulica-mente fraturado.

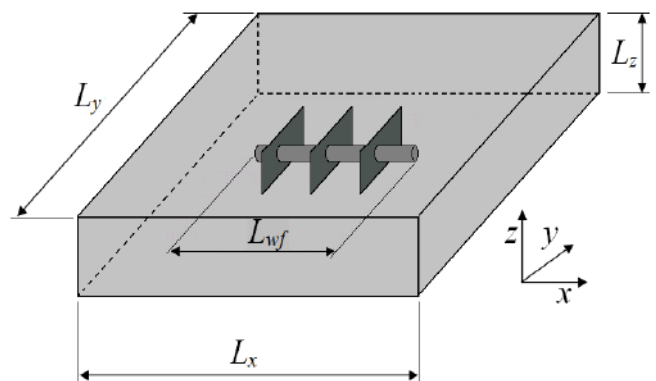


Figura 2: Ilustração de reservatório com poço de produção horizontal hidráulica-mente fraturado.

Raghavan et al. [12] apresentaram procedimentos de predição, incluindo uma solução semi-analítica, para determinar o desempenho de longo prazo da produção para poços horizontais interceptados por fraturas transversais. Os autores também demonstraram que existe um

grande potencial de melhoramento da produtividade do poço a partir da introdução do fraturamento hidráulico não uniforme do poço horizontal de produção, ou seja, algumas regiões não sofrem o fraturamento.

As principais diferenças entre a produtividade de reservatórios empregando o fraturamento hidráulico e poços horizontais e verticais foram estudadas por [13]. Os resultados mostraram que a produtividade pode ser aumentada em até cinco vezes quando um poço horizontal, longitudinalmente fraturado, é utilizado, ao invés de poços verticais hidraulicamente fraturados. As pesquisas consideraram os casos de produção a pressão e a vazão constantes.

No contexto de reservatórios de muito baixa permeabilidade, Bello e Wattenbarger [14] desenvolveram um modelo transiente para o fraturamento hidráulico multi-estágio de poços para formações de gás do tipo shale gas. Cinco regimes de escoamento foram identificados pelos autores:

1. Linear inicial, da rede de fraturas para o poço;
2. Linear transiente, através das fraturas e da matriz sólida;
3. Linear tardio para um reservatório infinito, também descrito como escoamento transiente linear na matriz para grandes reservatórios;
4. Linear tardio para reservatórios fechados, também conhecido como escoamento linear transiente na matriz sólida;
5. Dominado pelos efeitos de fronteira.

A solução em tempo real foi fornecida para cada um dos cinco regimes de escoamento.

2 Óleo leve

Com o crescimento do consumo energético em todo o mundo, os reservatórios convencionais que são considerados reservatórios de “fácil produção” não estão atendendo à demanda energética mundial, fazendo-se necessário a exploração de reservas não convencionais, que são caracterizadas por suas baixas permeabilidade e porosidade ou alta viscosidade [11], vide a Fig. 3. Uma das aplicações que vem ganhando grande destaque é a utilização de poços horizontais hidraulicamente fraturados em reservatórios de baixa permeabilidade portadores de óleo leve.

O óleo ainda no reservatório é formado por uma mistura de hidrocarbonetos. Comumente os hidrocarbonetos de cadeia mais longas (com mais de 70 átomos de carbono) são chamados de óleo pesado e os de cadeia mais curta (com cerca de 10 átomos de carbono) de óleo leve. Essa diferença de composição química, basicamente, depende dos processos iniciais de sua formação e do local do reservatório. O conhecimento sobre qual tipo de óleo está



Figura 3: Ilustração de recursos convencionais e não convencionais.

no reservatório é fundamental para o desenvolvimento de um projeto de recuperação.

O óleo bruto é classificado, em função de sua densidade de hidrocarbonetos e da sua capacidade de fluir, como: leve, médio, pesado e extrapesado. A escala usada para indicar a massa específica do óleo é o Grau API (API Gravity, em inglês) criada pelo American Petroleum Institute, calculado como

$$API = \left(\frac{141,5}{d_{60/60^\circ F}} \right) - 131,5, \quad (1)$$

onde $d_{60/60^\circ F}$ é a densidade do óleo a 60 graus Fahrenheit [7] com relação à água (na mesma temperatura). A escala API é medida em graus e permite definir o óleo como [15]:

1. Óleo leve: possui API maior que 30, constituído basicamente por alcanos, e uma porcentagem de 15 a 25% de cicloalcanos;
2. Óleo médio: possui API de 22 a 30. Além de alcanos, contém de 25 a 30% de hidrocarbonetos aromáticos;
3. Óleo pesado: possui API menor que 22 e é composto só de hidrocarbonetos aromáticos;
4. Óleo extrapesado: possui API menor que 10, é constituído de hidrocarbonetos de cadeia longa (superior ao pentano).

O óleo leve, denominado Light Tight Oil (LTO), é o óleo contido em formações de baixa permeabilidade, muitas vezes, folhelhos ou arenitos. O recurso (um recurso mineral é uma concentração ou ocorrência de material de interesse econômico intrínseco na superfície ou no interior da crosta terrestre) de LTO corresponde a um quarto do tamanho dos oil sands (mistura que ocorre naturalmente de areia, argila ou outros minerais, água e betume) e a duas vezes os recursos globais em águas profundas.

O objetivo deste trabalho consiste no uso do nosso simulador numérico de reservatórios, para o estudo da influência do emprego de poços horizontais hidraulicamente fraturados na determinação do campo de pressão

para o escoamento de um óleo leve, em formações de baixa permeabilidade, considerando os efeitos combinados das fraturas hidráulicas e do poço horizontal. Cabe salientar que a presença de não-linearidades contribui sobremaneira no comportamento das soluções obtidas e deve ser levada em consideração quando da escolha do método numérico a ser empregado. Por outro lado, a distribuição e o grau das heterogeneidades tem influência direta na determinação dos campos de pressão e de velocidade no meio poroso. O impacto das heterogeneidades também pode ser detectado no comportamento da pressão no poço de produção. Portanto, investiga-se os efeitos combinados das fraturas hidráulicas com o poço horizontal, considerando diferentes cenários de produção de óleo leve, no perfil da perda de pressão no poço produtor.

3 Modelagem de escoamentos em meios porosos

Em um reservatório, os fluidos presentes interagem entre si e com o reservatório portador de hidrocarbonetos. Esta interação depende das características dos fluidos envolvidos no processo, tais como a viscosidade e a massa específica e das características do meio, como a porosidade e a permeabilidade. Para se descrever o escoamento dos fluidos, ter o conhecimento dessas propriedades é essencial.

3.1 Propriedades do fluido

Revisa-se, agora, algumas propriedades de fluido incluídas na modelagem do escoamento monofásico em meios porosos. Primeiramente, considera-se a massa específica, que é a relação entre a massa de uma determinada substância e o volume ocupado por ela, que é definida para todo material como

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

onde m representa a massa da substância e V o volume por ela ocupado.

Uma outra propriedade relevante na modelagem do escoamento em meios porosos é a compressibilidade isotérmica do fluido,

$$c_o = - \left[\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial p} \right]_T = \left[\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial p} \right]_T. \quad (3)$$

sendo que p representa a pressão e T a temperatura.

A partir da compressibilidade do óleo, a seguinte equação para cálculo de ρ pode ser obtida [16]

$$\rho = \rho^0 [1 + c_o(p - p^0)] \quad (4)$$

onde ρ^0 é a massa específica medida na pressão de referência p^0 .

A medida do quão facilmente o fluido se deforma quando submetido à aplicação de um gradiente de pressão é denominada viscosidade, μ . A viscosidade de um fluido é função da pressão e da temperatura,

$$\mu = \mu(p, T). \quad (5)$$

Uma das formas utilizadas para o cálculo da viscosidade no caso de um fluido ligeiramente compressível é

$$\mu = \frac{\mu^0}{[1 + c_\mu(p - p^0)]} \quad (6)$$

onde μ^0 é a viscosidade medida na pressão de referência p^0 e c_μ é o coeficiente que mede a taxa de variação da viscosidade com a pressão.

Finalmente, introduz-se o fator-volume-formação, B ,

$$B = \frac{V(p, T)}{V_{sc}} = \frac{\rho_{sc}}{\rho}, \quad (7)$$

onde o subscrito sc indica as condições padrão e p e T são a pressão e a temperatura, respectivamente [17]. Considerando B^0 o fator-volume-formação medido na pressão de referência p^0 , para um fluido ligeiramente compressível é possível utilizar a relação [16]

$$B = \frac{B^0}{[1 + c_o(p - p^0)]}. \quad (8)$$

3.2 Propriedades da rocha

Inicia-se pela porosidade, a qual mede a capacidade de armazenamento de fluidos no reservatório. Ela é definida como sendo dada pela relação:

$$\phi = \frac{V_p}{V_t}, \quad (9)$$

onde ϕ é a porosidade, V_t o volume total e V_p o volume de vazios que também pode ser denominado de volume poroso [17].

Em uma rocha reservatório podem ser encontrados dois tipos de porosidade, as porosidades efetiva e total. A porosidade efetiva contempla apenas os poros interconectados [19]. Por outro lado, a porosidade total inclui os poros isolados e os interconectados. Para a Engenharia de Reservatórios, a porosidade efetiva é de maior interesse pois apenas poros interconectados permitem a percolação de fluidos através da rocha. A porosidade geralmente varia no espaço ao longo de uma formação rochosa e o reservatório é dito ser heterogêneo.

Vale destacar que, contudo, uma porosidade alta não é suficiente para caracterizar a potencialidade econômica de um reservatório, pois os fluidos do reservatório de petróleo contidos nos espaços dos poros das rochas tem que fluir para que então sejam produzidos ou trazidos para a superfície. Isto depende de uma propriedade da rocha, denotada por k , chamada de permeabilidade [18].

A permeabilidade pode variar em um mesmo ponto, em função da direção, e ao longo do meio poroso. Em muitas aplicações práticas é razoável considerar que a permeabilidade pode ser representada somente nas três direções principais em coordenadas cartesianas, x , y e z por k_x , k_y e k_z , respectivamente. O meio poroso é classificado como isotrópico se $k_x = k_y = k_z$ e se a permeabilidade apresenta variação segundo as direções espaciais é denominado de anisotrópico.

A compressibilidade da rocha é definida como sendo

$$c_\phi = \left[\frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial p} \right]. \quad (10)$$

A partir da compressibilidade da rocha pode-se escrever [16]

$$\phi = \phi^0 [1 + c_\phi(p - p^0)] \quad (11)$$

onde ϕ^0 é a porosidade medida na pressão de referência p^0 .

3.3 Equações fundamentais

As hipóteses utilizadas na derivação do modelo físico-matemático que descreve o escoamento no reservatório são:

1. O meio poroso é heterogêneo e anisotrópico;
2. A compressibilidade da rocha é pequena e constante;
3. O fluido é newtoniano;
4. Não ocorrem reações químicas;
5. O escoamento ocorre a baixas velocidades (efeitos inerciais não considerados);
6. O fluido tem uma composição constante;
7. O escoamento é monofásico e isotérmico;
8. Poço horizontal com condutividade infinita; e
9. Ausência de estocagem no poço.

3.3.1 Lei de Darcy

Tipicamente, a equação usada para descrever a conservação da quantidade de movimento no escoamento de fluidos em meios porosos é a lei de Darcy,

$$\mathbf{v} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} [\nabla p - \rho g \nabla D], \quad (12)$$

onde $\mathbf{v}$ é a velocidade superficial do fluido, $\mathbf{k}$ é o tensor de permeabilidades, D é a profundidade e g é a magnitude da aceleração da gravidade [17].

3.3.2 Equação de continuidade

A equação de conservação da massa é escrita em termos do fator-volume-formação B [17]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{v}}{B} \right) - \frac{q_m}{V_b \rho_{sc}} = 0, \quad (13)$$

onde q_m é o termo fonte, V_b é o volume total do volume de controle (rocha mais poros) e ρ_{sc} representa a massa específica em condições padrão.

3.3.3 Introdução das compressibilidades

Utilizando-se a regra da cadeia pode-se expandir o termo $\partial(\phi/B)/\partial t$ [16]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) &= \frac{1}{B} \frac{\partial \phi}{\partial p} \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{B} \right) \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= \left[\frac{1}{B} \frac{\partial \phi}{\partial p} + \phi \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{B} \right) \right] \frac{\partial p}{\partial t}. \end{aligned} \quad (14)$$

e, usando-se as Eqs. (8) e (11),

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) = \left(\frac{\phi c_o}{B^0} + \frac{\phi^0 c_\phi}{B} \right) \frac{\partial p}{\partial t}. \quad (15)$$

3.4 Equação da difusividade hidráulica

Substituindo-se a Eq. (7) e a Eq. (12) na Eq. (13), multiplicando-se por V_b , introduzindo-se $q_m = q_{sc} \rho_{sc}$ e utilizando-se a Eq. (15) para reescrever-se a derivada temporal, obtém-se uma equação diferencial parcial não-linear:

$$\Gamma \frac{\partial p}{\partial t} - V_b \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{k}}{B\mu} \nabla p \right) + \Gamma_G - q_{sc} = 0, \quad (16)$$

onde [16]

$$\Gamma = V_b \left(\frac{\phi c_o}{B^0} + \frac{\phi^0 c_\phi}{B} \right), \quad (17)$$

sendo que Γ_G inclui os efeitos gravitacionais.

O termo fonte q_{sc} é usado para introduzir-se a pressão do poço, p_{wf} , através da relação

$$q_{sc} = -J_w (p - p_{wf}), \quad (18)$$

onde J_w é o Índice de Produtividade (IP) [20].

Para resolver-se a Eq. (16) são necessárias condições inicial e de contorno apropriadas. Como condição inicial utiliza-se

$$p(x, y, z, t = 0) = p_{ini}(x, y, z), \quad (19)$$

onde a pressão inicial antes do reservatório ser perturbado pela produção/injeção é representada por p_{ini} .

As condições de contorno externas são as de fluxo nulo nas fronteiras

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{x=0, L_x} = \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_{y=0, L_y} = \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)_{z=0, L_z} = 0, \quad (20)$$

onde L_x , L_y e L_z são os respectivos comprimentos do reservatório nas direções x , y e z .

A condição de contorno interna é de vazão de produção prescrita. Para o acoplamento poço-reservatório linearizado, para um fluxo de fase única, é necessário uma equação específica para a determinação do fluxo, de modo a calcular-se o índice J_w e a pressão no poço será uma das incógnitas a serem determinadas. Neste trabalho, considera-se um poço horizontal, desprezando-se o atrito e os efeitos inerciais do escoamento dentro do poço. O fluxo total do poço, Q_{sc} , deve ser igual ao fluxo deixando o reservatório e atravessando toda a superfície do poço de produção em contato com o reservatório (q_{sc}).

3.5 Regimes de escoamento para um poço horizontal fraturado

Na caracterização dos regimes de escoamento, a utilização da derivada da pressão em função do tempo é matematicamente adequada, porque essa derivada representa diretamente um termo da equação de difusividade, que é a equação utilizada para a modelagem do comportamento da pressão transiente na análise de testes de pressão de poços [1]. A derivada é mais sensível a pequenas variações em fenômenos de interesse como no caso da variação da pressão em função do tempo [21].

Uma ferramenta importante na análise de testes de pressão é a utilização do gráfico diagnóstico (log-log). Nesse gráfico são apresentados a variação da pressão no poço e da sua derivada em função do tempo transcorrido, ou seja, a derivada de Bourdet [22]:

$$\Delta p = \frac{dp}{d \ln \Delta t} = \Delta t \frac{dp}{dt}. \quad (21)$$

Para melhor visualização dos resultados obtidos, também foi utilizado o gráfico especializado, ou seja, pressão no poço em função do logaritmo do tempo. O estudo da queda de pressão no poço e da sua derivada têm sido de grande importância na análise de testes de pressão. A introdução dos métodos das derivadas proporcionou um grande avanço na identificação dos regimes de escoamento que podem ocorrer para cada tipo de reservatório e melhorou significativamente o diagnóstico, de forma que estes gráficos são importantes ferramentas também para a simulação de reservatórios [23].

Com base nas características do óleo encontrado em formação de baixa permeabilidade, tight oil, e métodos de produção de reservatório, existem quatro configurações [24]:

1. Presença de poço horizontal;
2. Presença de poço horizontal hidráulicamente fraturado;
3. Estimulação de volume, em um único estágio, ao redor do poço horizontal hidráulicamente fraturado e
4. Estimulação de volume, em multi-estágios, ao redor do poço horizontal hidráulicamente fraturado.

Investiga-se, aqui, o escoamento em um reservatório com um poço horizontal hidráulicamente fraturado, o qual pode ser dividido em seis regimes de escoamento [24]:

1. Estocagem no poço;
2. Linear da fratura, no qual o escoamento do fluido é perpendicular à superfície da fratura;
3. Pseudo-radial da fratura. Quanto mais curto a metade do comprimento da fratura mais torna-se visível o escoamento pseudo-radial, para o mesmo espaçamento da fratura;

4. Linear do sistema; a interferência da fratura aparece e, em seguida, o fluido flui principalmente da zona exterior à zona interior do sistema do poço horizontal e das fraturas;
5. O sistema apresenta um escoamento radial; a pressão no sistema de multi-fraturas é quase como um todo destinada para possibilitar o fluxo pseudo-radial; e
6. Dominância dos efeitos da fronteira externa do reservatório.

4 Solução Numérica

A solução das equações que descrevem o escoamento de um fluido em meios porosos é fundamental para a compreensão do fenômeno estudado. Estas equações, conforme visto, são obtidas usando a hipótese de meio contínuo e os balanços de massa e da quantidade de movimento. No entanto, como no caso geral não é possível obter-se uma solução analítica, utiliza-se uma abordagem numérica, obtendo-se os valores da variável dependente (a pressão) em pontos discretos do domínio de resolução.

4.1 Discretização da equação de difusividade hidráulica

O método de discretização empregado neste trabalho é o método de diferenças finitas, usado no caso de uma malha de blocos centrados [16]. Uma representação esquemática de um domínio tridimensional discretizado pode ser vista na Fig. 4 para o sistema de coordenadas cartesianas. A solução numérica é obtida nos nós da malha computacional e o sistema algébrico de equações resultante do processo de discretização da EDP é resolvido por um método iterativo, que no caso deste trabalho será o método dos Gradientes Conjugados Pré-condicionado.

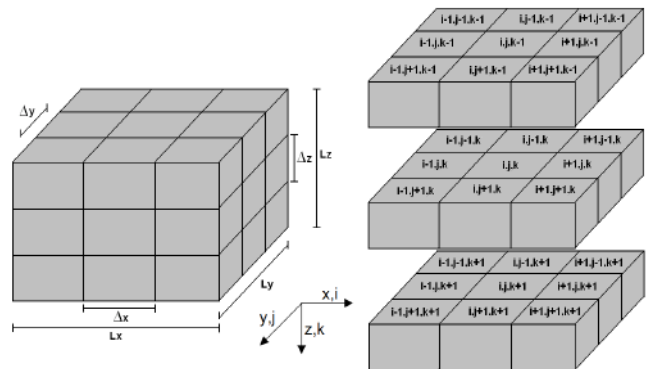


Figura 4: Representação de um domínio tridimensional discretizado.

Substituindo-se a Eq. (18) na Eq. (16), para um problema tridimensional, pode-se obter a Equação de Difusividade Hidráulica na forma

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{A_x k_x}{\mu B} \right) \frac{\partial p}{\partial x} \right] \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\frac{A_y k_y}{\mu B} \right) \frac{\partial p}{\partial y} \right] \Delta y \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(\frac{A_z k_z}{\mu B} \right) \frac{\partial p}{\partial z} \right] \Delta z = \Gamma \frac{\partial p}{\partial t} + \Gamma_G + J_w (p - p_{wf}), \end{aligned} \quad (22)$$

onde $V_b = \Delta x \Delta y \Delta z$, $A_x = \Delta y \Delta z$, $A_y = \Delta x \Delta z$ e $A_z = \Delta x \Delta y$.

Introduzindo-se as novas variáveis

$$T'_x \equiv \frac{A_x k_x}{\mu B}, \quad T'_y \equiv \frac{A_y k_y}{\mu B} \quad \text{e} \quad T'_z \equiv \frac{A_z k_z}{\mu B}, \quad (23)$$

a Eq. (22) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(T'_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) \Delta x + \frac{\partial}{\partial y} \left(T'_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) \Delta y + \frac{\partial}{\partial z} \left(T'_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) \Delta z \\ & = \Gamma \frac{\partial p}{\partial t} + \Gamma_G + J_w (p - p_{wf}). \end{aligned} \quad (24)$$

Considerando-se um arranjo de malha computacional como o apresentado na Fig. 4 obtém-se [16]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(T'_x \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i,j,k}^{n+1} & \cong \frac{1}{\Delta x_{i,j,k}} \left[\left(T'_x \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j,k} \right. \\ & \left. - \left(T'_x \frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j,k} \right]^{n+1}, \end{aligned} \quad (25)$$

onde $\Delta x_{i,j,k}$ é o espaçamento da malha na direção x , $n+1$ representa o nível temporal em que as pressões são calculadas (n indica o nível de tempo em que a pressão é conhecida). Em seguida, a fim de aproximar-se as derivadas espaciais, considera-se inicialmente o problema da discretização na direção x do espaço. Os nós $i-1/2$ e $i+1/2$ representam as faces laterais da célula e o nó i o seu centro, de forma que

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \cong \frac{p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x_{i+\frac{1}{2},j,k}} \quad (26)$$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)_{i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \cong \frac{p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x_{i-\frac{1}{2},j,k}} \quad (27)$$

onde $\Delta x_{i\pm 1/2,j,k}$ é a distância entre os centros das células representadas por i e $i\pm 1$. Analogamente, é possível obter-se aproximações para as derivadas nas direções y e z .

A transmissibilidade na direção x pode ser introduzida como

$$T_{x,i\pm\frac{1}{2},j,k}^{n+1} = \left(\frac{A_x k_x}{\mu B \Delta x} \right)_{i\pm\frac{1}{2},j,k}^{n+1}, \quad (28)$$

onde é utilizada uma média harmônica para determinar-se a transmissibilidade em $i\pm 1/2, j, k$ a partir dos valores conhecidos em i, j, k e $i\pm 1, j, k$. Similarmente, expressões podem ser determinadas para as transmissibilidades nas direções y e z .

Finalmente, utilizando-se uma formulação totalmente implícita no tempo, é possível obter-se a forma final discretizada da Eq. (22)

$$\begin{aligned} & T_{x,i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1} (p_{i+1,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}) - T_{x,i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i-1,j,k}^{n+1}) \\ & + T_{y,i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1} (p_{i,j+1,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}) - T_{y,i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j-1,k}^{n+1}) \\ & + T_{z,i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1} (p_{i,j,k+1}^{n+1} - p_{i,j,k}^{n+1}) - T_{z,i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k-1}^{n+1}) \\ & = \Gamma_{i,j,k}^{n+1} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^n) + (\Gamma_G)_{i,j,k}^{n+1} \\ & + J_{w,i,j,k}^{n+1} (p_{i,j,k}^{n+1} - p_{wf,i,j,k}^{n+1}). \end{aligned} \quad (29)$$

onde foi utilizada uma aproximação de Euler recuada no tempo

$$\left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)_{i,j,k}^{n+1} \cong \frac{p_{i,j,k}^{n+1} - p_{i,j,k}^n}{\Delta t}. \quad (30)$$

4.2 Refinamento de malha

Um refinamento de malha é usado para uma melhor representação da região ao redor do poço horizontal. Por exemplo, para um poço perpendicular ao plano yz , o espaçamento da malha na direção y , $\Delta y_{i,j,k}$, e na direção z , $\Delta z_{i,j,k}$, são menores perto das células onde está presente o poço horizontal. Considerando-se os índices i, j e k , conforme apresentado na Fig 4, utilizados na discretização, a Fig. 5 exibe uma representação do refinamento de malha em torno da localização do poço horizontal. Δy_w e Δz_w são escolhidos para as células onde o poço é colocado. Para as outras células, $\Delta y_{i,j,k}$ e $\Delta z_{i,j,k}$ são pequenos perto do poço, e eles aumentam a uma determinada taxa, conforme as células estejam mais distantes do poço horizontal.

Uma progressão logarítmica é utilizada no refinamento da malha. Por exemplo, para uma fratura colocada no plano yz , as larguras da malha na direção x , $\Delta x_{i,j,k}$, são menores perto das células utilizadas para modelar a fratura, como representado na Fig. 6. Dentro de uma célula original, um conjunto de pequenos blocos é adicionado a fim de representar a fratura e criar uma região de transição.

Tomando-se como exemplo uma fratura colocada no plano yz , uma constante ΔU_x é definida como [25]

$$\Delta U_x = \frac{2}{(n_{CX} - 1)} \ln \left(\frac{x_{max}}{x_{min}} \right), \quad (31)$$

e o espaçamento das células ao longo da direção x , na região de transição, é determinado por

$$\Delta x_{I\pm i,j,k} = x_{ini} \left[e^{i\Delta U_x} - e^{(i-1)\Delta U_x} \right], \quad (32)$$

para $i = 1, 2, \dots, (n_{CX} - 1)/2$, onde I indica um plano yz em que há uma fratura, $\Delta x_{I,j,k}$ é a espessura da fratura, n_{CX} é o número (ímpar) de camadas refinadas na direção x e x_{min} e x_{max} são as posições inicial e final da região de transição, respectivamente. Cada fratura é rodeada por duas regiões refinadas ao longo da direção

x e x_{min} é escolhido como sendo metade da espessura da fratura, h_f , enquanto x_{max} é a metade da largura da célula original na direção x .

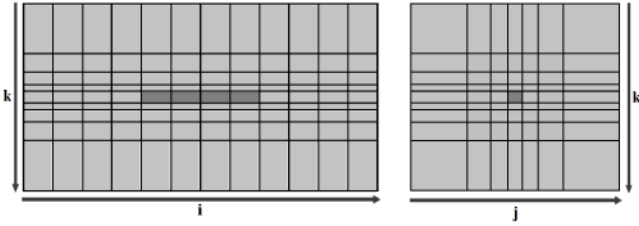


Figura 5: Malha refinada para representação de poço horizontal perpendicular ao plano yz . À esquerda o plano xz ; à direita o plano yz ; e, em cor cinza escuro, as células pelas quais passa o poço horizontal.

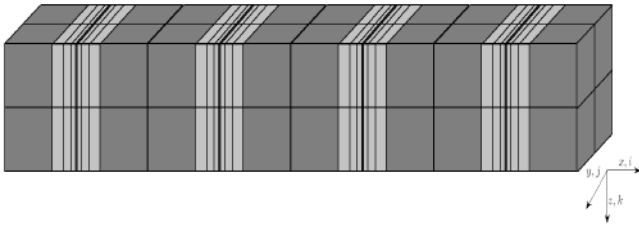


Figura 6: Ilustração do refinamento de malha para melhor representação do escoamento na região das fraturas.

4.3 Linearização do sistema de equações algébricas não-lineares

Escrito para cada célula, a Eq. (29) conduz a um conjunto de equações algébricas não-lineares em termos da incógnita pressão. Para utilizar-se técnicas de solução de sistemas de equações lineares, tem-se que linearizar as equações algébricas. Considerando-se a aplicação de uma iteração de Picard, para os termos da transmissibilidade [26], introduz-se a aproximação

$$T_{x,i\pm\frac{1}{2},j,k}^{n+1} \cong T_{x,i\pm\frac{1}{2},j,k}^{n+1,v} = \left(\frac{A_x k}{\mu B \Delta x} \right)^{n+1,v}_{i\pm\frac{1}{2},j,k}, \quad (33)$$

de modo que a Eq. (29) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned} & T_{x,i+\frac{1}{2},j,k}^{n+1,v} \left(p_{i+1,j,k}^{n+1,v+1} - p_{i,j,k}^{n+1,v+1} \right) \\ & - T_{x,i-\frac{1}{2},j,k}^{n+1,v} \left(p_{i,j,k}^{n+1,v+1} - p_{i-1,j,k}^{n+1,v+1} \right) \\ & + T_{y,i,j+\frac{1}{2},k}^{n+1,v} \left(p_{i,j+1,k}^{n+1,v+1} - p_{i,j,k}^{n+1,v+1} \right) \\ & - T_{y,i,j-\frac{1}{2},k}^{n+1,v} \left(p_{i,j,k}^{n+1,v+1} - p_{i,j-1,k}^{n+1,v+1} \right) \\ & + T_{z,i,j,k+\frac{1}{2}}^{n+1,v} \left(p_{i,j,k+1}^{n+1,v+1} - p_{i,j,k}^{n+1,v+1} \right) \\ & - T_{z,i,j,k-\frac{1}{2}}^{n+1,v} \left(p_{i,j,k}^{n+1,v+1} - p_{i,j,k-1}^{n+1,v+1} \right) \\ & = \Gamma_{i,j,k}^{n+1,v} \left(p_{i,j,k}^{n+1,v+1} - p_{i,j,k}^n \right) + (\Gamma_G)_{i,j,k}^{n+1} \\ & + J_{w,i,j,k}^{n+1,v} \left(p_{i,j,k}^{n+1,v+1} - p_{wf,i,j,k}^{n+1,v+1} \right), \end{aligned} \quad (34)$$

onde os níveis de iteração são indicados por v (valores conhecidos) e $v+1$ (valores desconhecidos). O mesmo procedimento é utilizado para o termos $\Gamma_{i,j,k}$ e J_w .

Para descrever-se o acoplamento poço-reservatório também lineariza-se o termo J_w . Aqui, apenas poços horizontais são considerados, negligenciando-se as perdas de carga e os efeitos inerciais dentro do poço. A taxa de fluxo total do poço, Q_{sc} , deve ser igual à soma do fluxo de óleo oriundo de todas as células em contato com o poço, portanto,

$$Q_{sc} = - \sum_{i=W1}^{i=W2} J_{w,i,j,k}^{n+1,v} \left[p_{i,j,k}^{n+1,v+1} - (p_{wf})_{i,j,k}^{n+1,v+1} \right]. \quad (35)$$

para um poço atravessando várias camadas ao longo da direção x , para células representadas por $W1, j, k$ (inicial) a $W2, j, k$ (final). A posição de referência, em $W1, j, k$, é escolhida a fim de calcular-se a pressão do poço.

Para J_w utiliza-se [27]

$$J_{w,i,j,k}^{n+1,v} = \left\{ \frac{2\pi \sqrt{k_z k_y}}{\mu B} \frac{\Delta x}{\left[1 - (r_w/r_{eq})^2 \right] \ln(r_{eq}/r_w)} \right\}_{i,j,k} \quad (36)$$

onde

$$r_{eq} = \sqrt{\frac{\Delta z \Delta y}{\pi}} \exp(-0,5), \quad (37)$$

com r_{eq} sendo o raio equivalente [28] e r_w é o raio do poço.

4.4 Metodologia de resolução do sistema linear

O sistema linear oriundo da linearização das equações algébricas não-lineares tem em geral, como característica, a esparsidade da matriz de coeficientes e a numerosa quantidade de incógnitas. Devido ao porte do sistema, é necessária uma grande quantidade de memória e velocidade de processamento para a sua resolução. O método dos Gradientes Conjugados Pré-condicionado, com um pré-condicionador de Jacobi [16], foi empregado com essa finalidade.

5 Resultados

Esta seção é dedicada à apresentação dos resultados e dos comentários acerca das simulações realizadas, em conformidade com a estratégia de solução numérica já discutida e empregando-se o simulador previamente introduzido. Em todos os casos testados considera-se que o poço produtor horizontal está posicionado paralelamente ao eixo x . O poço horizontal recebe fluido vindo do reservatório em todo o seu comprimento, em uma completação de poço aberto.

O simulador utilizado para realizar este trabalho foi escrito em linguagem C e as simulações foram feitas em um computador DELL PowerEdge T620 com sistema operacional Linux OpenSuse 13.1:

1. Máquina de arquitetura 64 bits;
2. Processador Intel Xeon E5-2620 com 2 GHz e 12 núcleos.

5.1 Simulação de poço horizontal

A Tabela 1 traz os parâmetros utilizados na construção de um caso padrão de simulação. A menos quando explicitamente dito, os dados apresentados nessa tabela são os usados em todas as simulações deste trabalho.

Fazendo-se uma simulação numérica com esses parâmetros são determinados os campos espaciais de pressão. O refinamento local da malha foi utilizado no estudo de poços horizontais fraturados hidraulicamente, em conjunto com a técnica de acoplamento poço-reservatório proposta neste trabalho. Uma regra logarítmica foi considerada para a geração da malha refinada, nas regiões contendo as fraturas, considerando-se o poço posicionado paralelamente ao eixo x .

A Tabela 2 mostra os números de células empregadas na geração de quatro diferentes malhas para o estudo de convergência numérica, considerando as simulações envolvendo o poço horizontal sem as fraturas hidráulicas, onde n_x , n_y e n_z são, respectivamente, os números de células usadas para representar o reservatório nas direções x , y e z . O termo n_w representa o número de células na direção x pelas quais o poço horizontal passa no reservatório. Também em relação às células por onde passa o poço, os valores Δy_w e Δz_w são as arestas das células que contém o poço, respectivamente, nas direções y e z .

Tabela 2 Malhas para o estudo de refinamento em poço horizontal.

Malha	n_x	n_y	n_z	n_w	$\Delta y_w = \Delta z_w (ft)$
1	12	13	5	4	50
2	24	25	9	8	25
3	48	49	17	16	12,5
4	96	97	33	32	6,25

As Figs. 7 e 8 mostram os resultados para o estudo de refinamento de malha onde os resultados obtidos foram para uma célula. Observa-se que conforme a malha é refinada as soluções numéricas tendem a ficar cada vez mais próximas umas das outras. A exceção ocorre em um trecho inicial da simulação, no qual ocorre um efeito conhecido na literatura como “artefato numérico”, que está associado à técnica de acoplamento poço-reservatório utilizada, baseada na hipótese do regime permanente. Também é possível notar que para as duas malhas mais refinadas há uma significativa concordância dos resultados, com exceção da região de influência do artefato numérico [27], destacando-se que o efeito do artefato é mais significativo somente para tempos muito curtos.

A pressão no poço horizontal foi calculada seguindo uma técnica do tipo raio equivalente de Peaceman [28]. Os resultados obtidos mostram que o artefato numérico influencia nos resultados obtidos para a pressão, nos tempos iniciais de simulação, e eles são caracterizados por

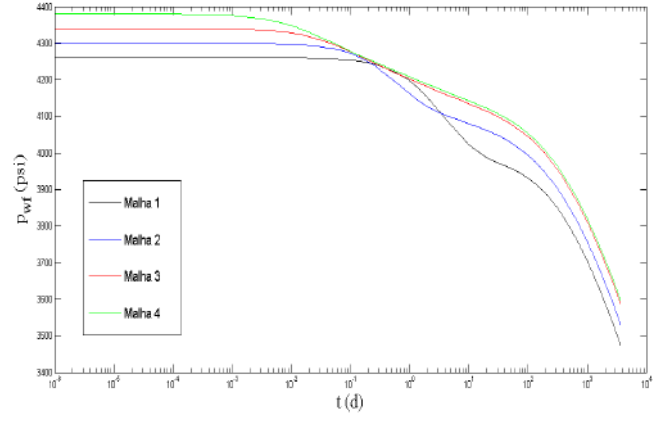


Figura 7: Resultado do refinamento de malha (gráfico especializado).

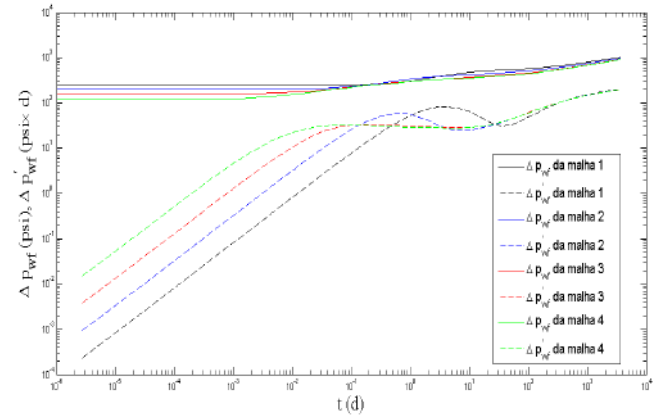


Figura 8: Resultado do refinamento de malha (gráfico diagnóstico).

um patamar no gráfico especializado e com reflexos na derivada presente nos gráficos diagnósticos. O tempo de ocorrência do artefato e a sua magnitude são funções da permeabilidade, sendo que quanto menor for a permeabilidade (e também para uma maior viscosidade) maior será sua duração e magnitude. Fora da região associada ao artefato, os comportamentos estão qualitativamente de acordo com a física associada ao problema. Então, neste trabalho, a fim de tratar-se especificamente do objetivo proposto, as análises irão se restringir às regiões de 10^{-2} dia em diante, em função dessa incorreção numérica [28].

5.2 Simulação de poço horizontal hidraulicamente fraturado

O caso padrão estudado, no que diz respeito à malha computacional utilizada, foi o correspondente à malha 3, ou seja, 48 células na direção x , com a inclusão de 4 fraturas hidráulicas, distribuídas conforme mostrado na Fig. 9. Na determinação da influência das fraturas, na pressão do poço produtor, foram realizados testes com um poço horizontal com e sem fratura, Figs. 10, 11, 12 e 13. Por outro lado, a importância do número de fraturas (n_f) e da posição espacial das fraturas (p_i , $i =$

Tabela 1 Parâmetros para o caso padrão.

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de células na direção x	48	-
Número de células na direção y	49	-
Número de células na direção z	17	-
Tolerância: método iterativo	1×10^{-7}	psi
Razão de crescimento do passo de tempo	1,5	-
Tempo de simulação	3.650	dia
Passo de tempo inicial	1×10^{-6}	dia
Passo de tempo final	30	dia
Vazão de óleo	-200	STB/dia
Permeabilidade em x	2×10^{-4}	Darcy
Permeabilidade em y	2×10^{-4}	Darcy
Permeabilidade em z	5×10^{-5}	Darcy
Porosidade inicial	0,1	adimensional
Porosidade de referência	0,1	adimensional
Compressibilidade da rocha	1×10^{-5}	psi ⁻¹
Pressão de referência	4.500	psi
Pressão inicial do fluido	4.500	psi
Massa específica do fluido na pressão de referência	52,4	kg/m ³
Viscosidade do fluido	0,8	cp
Compressibilidade do fluido	4×10^{-6}	psi ⁻¹
Fator-volume-formação na pressão de referência	1	RB/STB
Comprimento total na direção x	12.000	ft
Comprimento total na direção y	12.000	ft
Comprimento total na direção z	250	ft
Comprimento do poço	4.000	ft

Tabela 3 Número de fraturas e suas respectivas posições.

Caso	n_f	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
Caso 1	2	1.625 ft	2.375 ft	-	-	-	-
Caso 2	4	1.125 ft	1.625 ft	2.375 ft	2.875 ft	-	-
Caso 3	6	625 ft	1.125 ft	1.625 ft	2.375 ft	2.875 ft	3.375 ft

1, 2, ..., 6) (vide a Tabela 3) podem ser observados na Fig. 14.

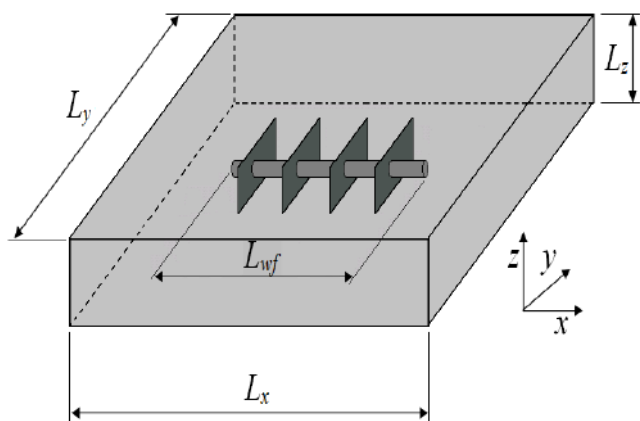


Figura 9: Representação de um poço horizontal com 4 fraturas.

Nas Figs. 10 e 11 pode-se notar claramente a influência da presença das fraturas em relação à simulação com um poço horizontal não fraturado. A queda de pressão do poço com fraturas foi menor do que a queda de pressão do poço sem fraturas, ou seja, um comportamento já esperado. Quanto menos a pressão no poço cair, uma vez que a resistência ao escoamento será menor nas fraturas, melhores são as condições em termos da preservação da energia natural do reservatório. Ele produzirá durante um tempo maior na recuperação primária, o que pode ser extremamente relevante na tomada de decisão sobre o uso futuro de técnicas de recuperação secundária.

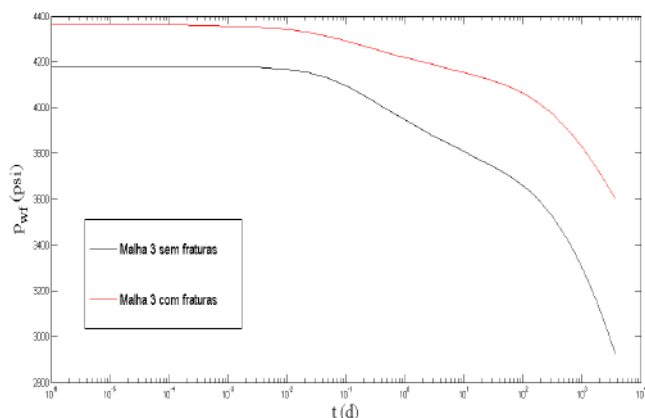


Figura 10: Resultado para o estudo de um poço horizontal com e sem fraturas (gráfico especializado).

Os campos de pressão para um período de 10 dias, considerando-se os casos do poço horizontal e o do poço horizontal hidraulicamente fraturado, podem ser vistos, respectivamente, nas Figs. 12 e 13. Os dois campos de pressão foram determinados para a camada central de células na direção z , na qual estão as fraturas hidráulicas. Pode-se notar o efeito das fraturas na mudança da forma da superfície de pressão, quando compara-se os

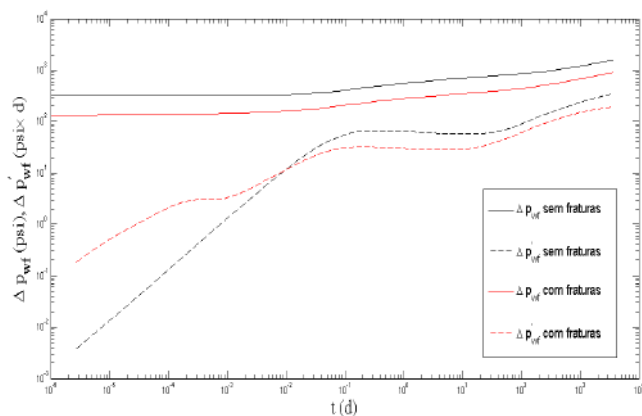


Figura 11: Resultado para o estudo de um poço horizontal com e sem fraturas (gráfico diagnóstico).

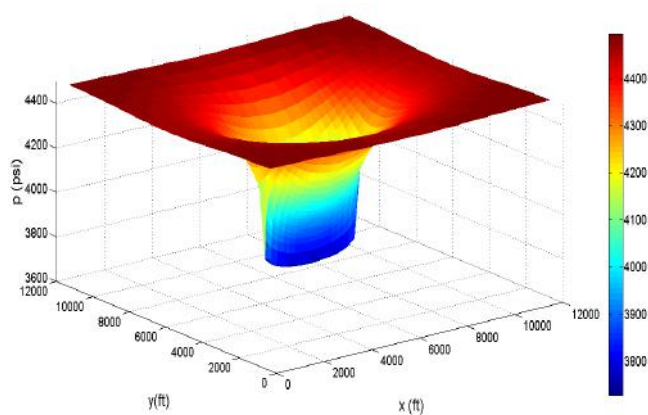


Figura 12: Resultado para o estudo de um poço horizontal sem fraturas.

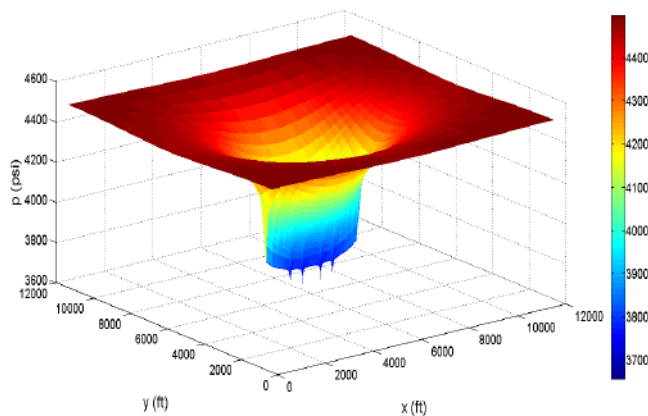


Figura 13: Resultado para o estudo de um poço horizontal com fraturas.

dois campos. Além disso, os valores numéricos são diferentes de forma que valores mínimos de pressão ocorrem nas fraturas (Fig. 13), mas as demais células possuem pressões mais elevadas do que no caso sem fraturamento, de forma que a energia do reservatório foi melhor preservada.

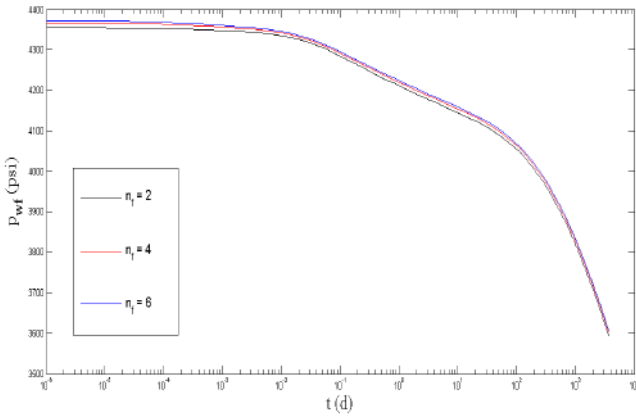


Figura 14: Resultado da variação de número de fraturas (gráfico especializado).

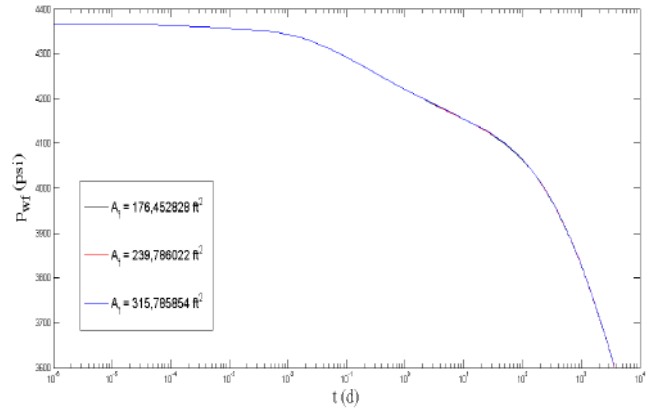


Figura 16: Resultado da variação da área da fratura (gráfico especializado).

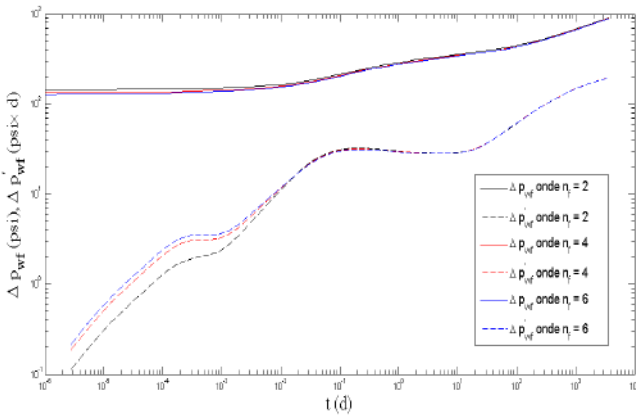


Figura 15: Resultado da variação de número de fraturas (gráfico diagnóstico).

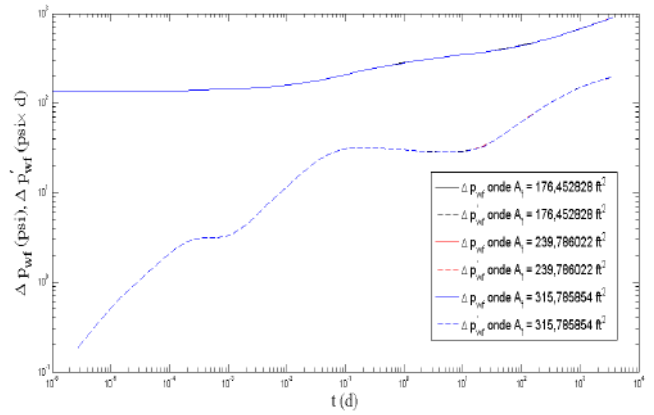


Figura 17: Resultado da variação da área da fratura (gráfico diagnóstico).

Por se encontrarem na região do poço, a influência das fraturas ocorre no começo do escoamento e geram uma maior diferença nos resultados na região do artefato numérico, pois é quando começa a produção. A variação do número de fraturas, n_f , é importante porque quanto mais fraturas um poço tiver maior será a existência de caminhos preferenciais ao escoamento (vide as Figs. 14 e 15). Porém, não se pode desconsiderar o fato de que quanto mais fraturas um poço possuir, mais caro será o seu custo de produção.

Constata-se, a partir dos resultados já obtidos, que não foram identificados todos os regimes de escoamento presentes no trabalho de Wang et al. [24]. Primeiramente, deve-se destacar que o regime de estocagem no poço foi modelado nas soluções de Wang et al. [24], o que não foi feito nas simulações numéricas deste trabalho (onde há somente a presença de estocagem numérica associada ao artefato ligado ao modelo de acoplamento poço-reservatório). Além disso, é importante ressaltar que os regimes de escoamento previstos para um poço horizontal não ocorrem, necessariamente, para todos os sistemas poço-reservatório. De fato, na prática são poucos os casos nos quais há a presença de todos os regimes de escoamento e com uma identificação clara (às vezes al-

guns regimes ocorrem, mas em um período curto demais para que a sua representação no gráfico seja nítida).

Finalmente, deve-se notar que o tempo de produção precisa ser longo o bastante para que apareçam os efeitos de fronteira, que no caso de reservatórios de baixa permeabilidade portadores de óleo pode superar a escala de anos para que os regimes mais tardios estejam todos presentes.

A fim de se obter mais resultados, para a análise das fraturas em um poço horizontal, foram considerados diferentes valores para as propriedades das fraturas e da matriz (reservatório).

A variável estudada nos testes apresentados nas Figs. 16 e 17 foi a área da fratura, A_f . Houve alguma influência nos resultados em consequência da variação das áreas, porém o efeito não foi significativo para os valores testados.

Por outro lado, como pode ser observado nas Figs. 18 e 19, o comportamento dos resultados em função da variação da espessura da fratura, h_f , foi apreciável e percebido ao longo da simulação, com destaque para a região onde começa o escoamento (onde existe o artefato numérico).

Estudos foram realizados, mantida constante a razão de anisotropia, multiplicando-se os valores das permea-

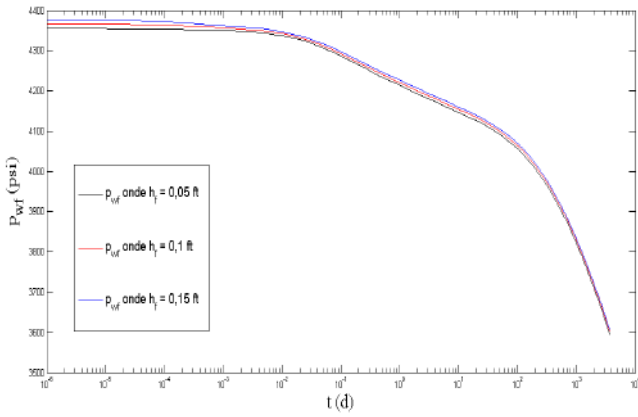


Figura 18: Resultado da variação da espessura da fratura (gráfico especializado).

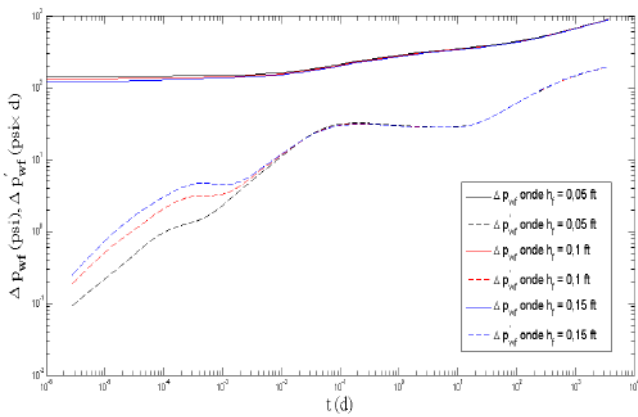


Figura 19: Resultado da variação da espessura da fratura (gráfico diagnóstico).

bilidades por um determinado fator. Para os testes com a variação da permeabilidade da matriz, k_m , manteve-se o mesmo valor da permeabilidade da fratura, k_f . Em se tratando da variação da permeabilidade da fratura, a permeabilidade da matriz foi mantida fixa.

Sabendo-se que a permeabilidade mede a capacidade do fluido de escoar no meio poroso, pode-se observar pelos gráficos das Figs. 20 e 21 que há uma maior influência da fratura nos instantes iniciais da produção no poço.

Como pode ser visto nas Figs. 22 e 23, quanto maior a permeabilidade da matriz menos tempo dura o efeito do artefato numérico e menores são as quedas de pressão.

Agora, olhando-se para o gráfico da Fig. 23, fica clara a influência da permeabilidade da matriz ao longo de toda a simulação. Quanto maior a permeabilidade do reservatório, mais cedo ocorrem os efeitos da fronteira em decorrência do aumento na condutividade hidráulica do sistema (CHS), dada por:

$$CHS = \frac{k}{\phi\mu(c_o + c_\phi)}. \quad (38)$$

Simulações variando os valores das porosidades da fratura e da matriz, ϕ_f e ϕ_m respectivamente, também foram realizadas. Com o emprego de diferentes valores para a porosidade da fratura observa-se (vide as Figs. 24

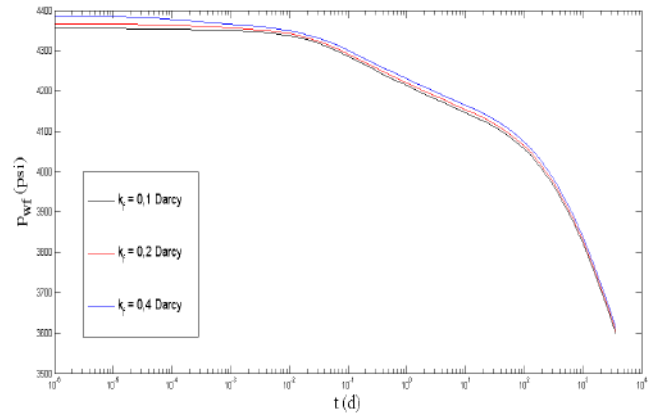


Figura 20: Resultado da variação da permeabilidade da fratura (gráfico especializado).

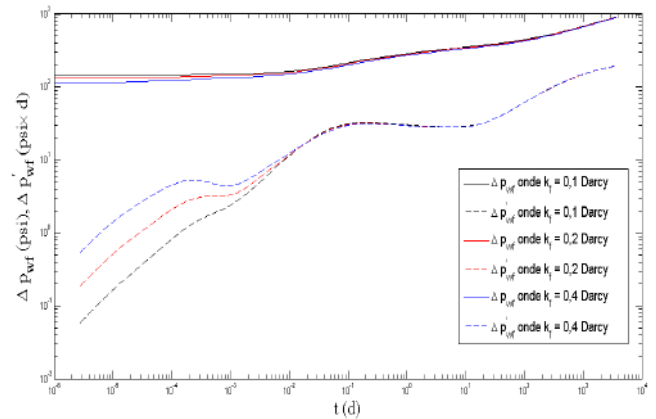


Figura 21: Resultado da variação da permeabilidade da fratura (gráfico diagnóstico).

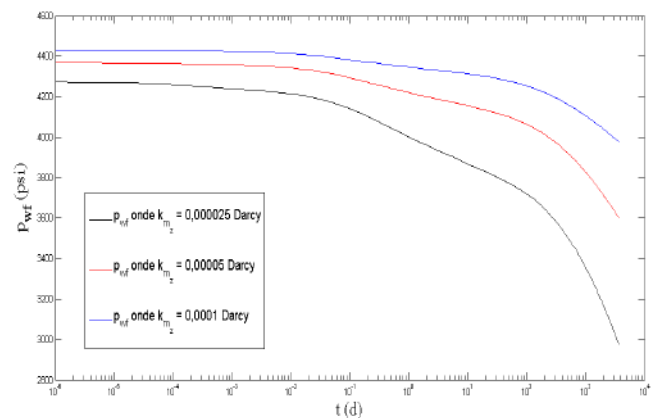


Figura 22: Resultado da variação da permeabilidade da matriz (gráfico especializado).

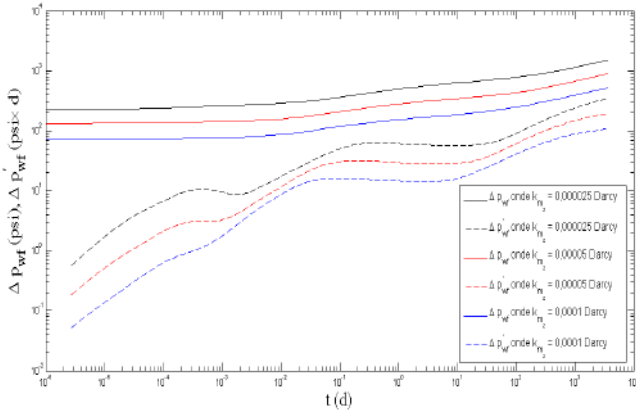


Figura 23: Resultado da variação da permeabilidade da matriz (gráfico diagnóstico).

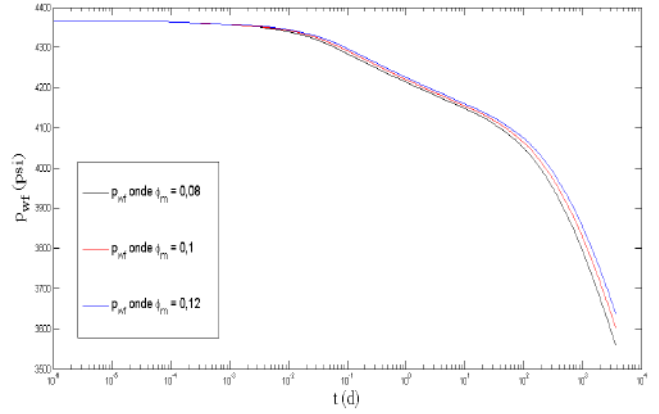


Figura 26: Resultado da variação da porosidade matriz (gráfico especializado).

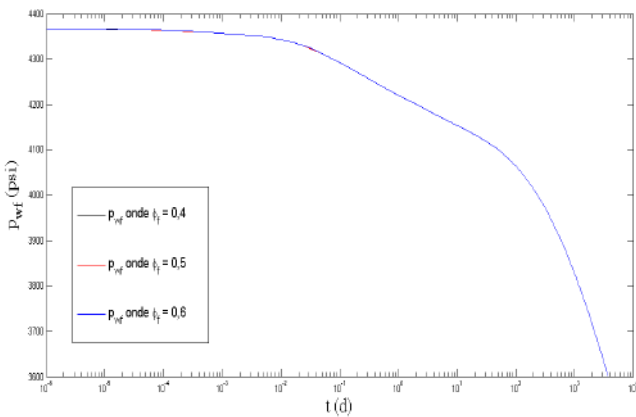


Figura 24: Resultado da variação da porosidade da fratura (gráfico especializado).

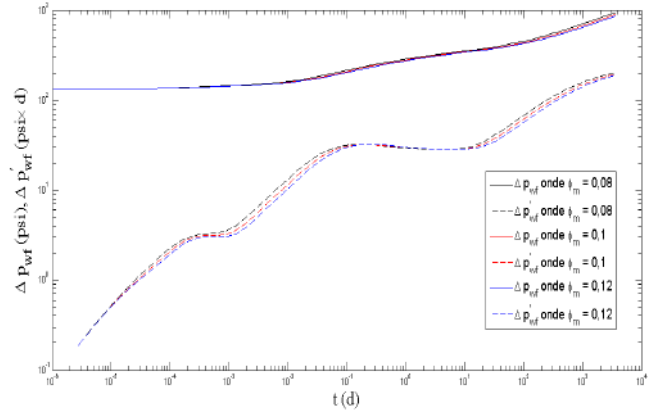


Figura 27: Resultado da variação da porosidade matriz (gráfico diagnóstico).

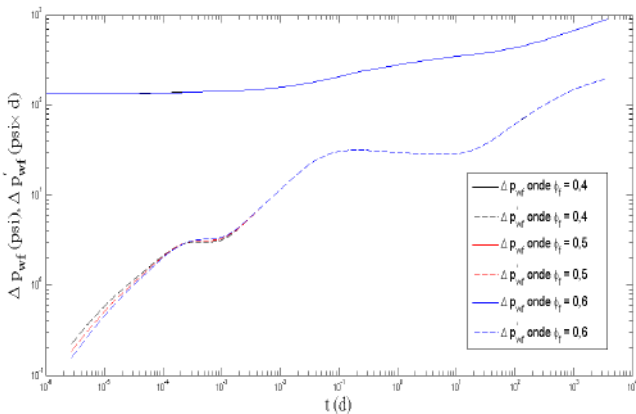


Figura 25: Resultado da variação da porosidade da fratura (gráfico diagnóstico).

e 25) que há uma maior influência desta propriedade na região onde também ocorre o artefato numérico. Para tempos curtos, as diferentes capacidades de armazenamento dadas pelas diferentes porosidades deixam de ter uma grande influência.

Nas Figs. 26 e 27, observa-se uma maior diferença no comportamento em quase toda a duração da simulação

(alterou-se uma propriedade que diz respeito a todo o reservatório).

Três diferentes viscosidades do óleo foram utilizadas em mais um conjunto de simulações numéricas (Figs. 28 e 29). Quanto menor a viscosidade menor a duração do efeito do artefato numérico associado ao cálculo do raio equivalente. É notória a influência da viscosidade em toda a simulação.

Os resultados obtidos indicam que o simulador obteve resultados promissores para o estudo de reservatórios com poço horizontal hidráulicamente fraturado, em meios porosos representados em coordenadas cartesianas, para a técnica de solução numérica adotada neste trabalho, sendo que melhores resultados poderão ser determinados com a substituição futura da técnica de acoplamento poço-reservatório, eliminando-se o artefato numérico.

6 Conclusões

Neste trabalho estudou-se a produção de óleo leve, a partir de um reservatório de baixa permeabilidade, empregando-se um poço horizontal hidráulicamente fraturado. Um simulador numérico de reservatórios, apro-

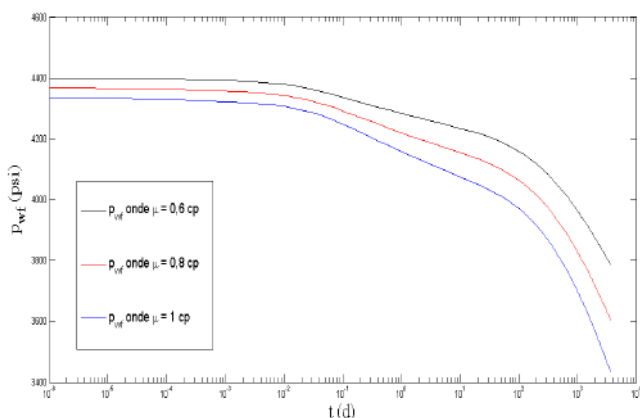


Figura 28: Resultado da variação da viscosidade do óleo (gráfico especializado).

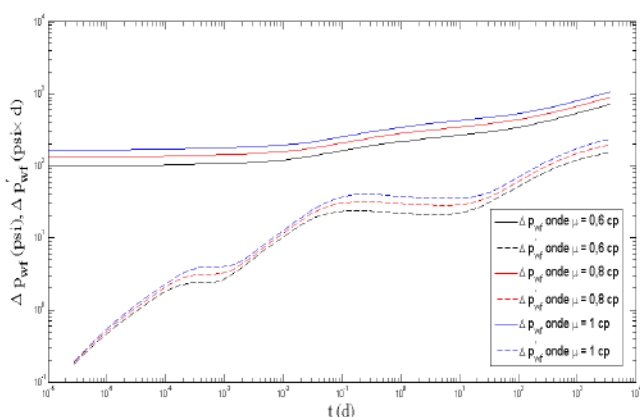


Figura 29: Resultado da variação da viscosidade do óleo (gráfico diagnóstico).

prizado para aplicações na escala de campo, empregando o sistema de coordenadas cartesianas e uma abordagem clássica do tipo diferenças finitas, foi utilizado nesse estudo. Anteriormente, este simulador e suas opções de refinamento de malha tinham sido aplicadas apenas para escoamentos em reservatórios naturalmente fraturados com poços verticais. A equação diferencial parcial não-linear resultante do processo de discretização, escrita em termos da pressão, foi resolvida numericamente, após linearização, usando o método iterativo dos Gradientes Conjugados Pré-condicionado. O objetivo principal deste trabalho foi o estudo dos efeitos combinados das fraturas hidráulicas com o poço horizontal, considerando-se diferentes cenários de produção de óleo leve, no perfil da perda de pressão no poço produtor.

Deve-se ressaltar que o estudo da simulação numérica do sistema de produção de óleo leve em formações de baixa permeabilidade, ou Light Tight Oil, merece destaque no contexto de reservas não convencionais. De fato, mesmo nos dias atuais, o mundo ainda possui uma dependência com relação ao uso dos combustíveis fósseis, principalmente do petróleo. Como este cenário ainda perdurará nas próximas décadas, ao que tudo indica, torna-se importante o desenvolvimento de novas técnicas de exploração e de produção de hidrocarbonetos, de modo que

o processo possa ser otimizado. Os reservatórios convencionais que são considerados reservatórios de “fácil produção” não estavam atendendo, até pouco tempo atrás, à demanda energética mundial, fazendo-se necessário a exploração de reservas não convencionais que são caracterizadas por sua baixas permeabilidade e porosidade ou alta viscosidade.

Os resultados obtidos destacam a influência do artefato numérico nos tempos iniciais, quando também são importantes os efeitos das fraturas hidráulicas no acoplamento poço-reservatório. Pelo que pôde ser observado, o tempo de ocorrência do artefato e a sua magnitude são funções da permeabilidade, sendo que quanto menor for a permeabilidade (e para uma maior viscosidade) maior será a sua duração e magnitude. Os resultados comprovaram a viabilidade da técnica do fraturamento hidráulico, no sentido de reduzir-se a queda de pressão no reservatório (preservando, desta forma, a energia natural da jazida). Esse fato é relevante na definição de quando se deve aplicar os métodos de recuperação secundária. Além disso, em alguns casos, vazões minimamente viáveis economicamente só são atingidas através do fraturamento hidráulico. Ressalta-se que há uma análise de custo-benefício a ser feita, na qual as simulações numéricas são de grande valia: discutir o custo de se obter um dado número de fraturas com dadas permeabilidade e porosidade, em relação ao quanto de energia será preservada. Neste sentido, a distribuição das fraturas ao longo do poço horizontal também é um parâmetro relevante a ser considerado e estudado.

7 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o suporte financeiro fornecido pelo CNPq.



Referências

- [1] Bourdet, D. (2002). Well Test Analysis: the Use of Advanced Interpretation Models. Handbook of Petroleum Exploration and Production 3. Elsevier, Amsterdam.
- [2] Tan, T. (2011). Bakken Shale Oil Production Trends. Dissertação de mestrado, Texas A& M University, Texas.
- [3] Dongyan, F., Yao, J., Sun, H., Zeng, H., and Wang, W. (2015). A composite model of hydraulic fractured horizontal well with stimulated reservoir volume in tight oil & gas reservoir. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 115–123.
- [4] Ali, J. A., Siddiqui, S., and Dehghanpour, H. (2013). Analyzing the production data of fractured horizontal wells by a linear triple porosity model: Development of analysis equations. Journal of Petroleum Science and Engineering, 117–128.

- [5] Wang, H., Liao, X., Lu, N., Cai, Z., Liao, C., and Dou, X. (2013). A study on development effect of horizontal well with srw in unconventional tight oil reservoir. *Journal of the Energy Institute*, 117–128.
- [6] Chaohua, G., X., J., W., M., and Ruizhong, J. (2015). Experimental study and numerical simulation of hydraulic fracturing tight sandstone reservoirs. Elsevier, 334–344.
- [7] Zhang, K. (2014). Potential Technical Solutions to Recover Tight Oil. *Dissertação de mestrado*, Norwegian University of Science and Technology, Calgary.
- [8] Wendong, W., Shahvali, M., and Yuliang, S. (2015). A semi-analytical fractal model for production from tight oil reservoirs with hydraulically fractured horizontal wells. *Fuel - Elsevier*, 158, 613–618.
- [9] Zhao, L. (1994). Horizontal Well Simulation with Local Grid Refinement. Ph.D. thesis, Texas A & M University.
- [10] Prado, R. P. S. (2003). Comparação Entre Estratégias de Produção Utilizando Poços Verticais e Horizontais. *Dissertação de mestrado*, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [11] Bessa Jr., F. P. (2014). Análise da Recuperação em Reservatórios de Gás com Baixa Permeabilidade (Tight Gas) Através do Fraturamento Hidráulico. *Dissertação de mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- [12] Raghavan, R. S., Chen, C. C., and Agarwal, B. (1994). Analysis of horizontal wells intercepted by multiple fractures. In *Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, 1994, Midland, TX. *Proceedings of the Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*, Midland, TX: SPE.
- [13] Valko, P. and Economides, M. J. (1996). Performance of fractured horizontal wells in high-permeability reservoirs. In *Paper SPE 31149 presented at the Society of Petroleum Engineers International Symposium Annual on Formation Damage Control*, Lafayette, LA.
- [14] Bello, R. O. and Wattenbarger, R. (2008). Rate transient analysis in naturally fractured shale gas reservoirs. In *Gas Technology Symposium Joint Conference*, 2008, Calgary, Canada. *CIPC/SPE Annual Gas Technology Symposium Joint Conference*, Calgary, Canada: CIPC/SPE.
- [15] Thomas, J. E. (2004). Fundamentos de Engenharia de Petróleo. *Handbook of Petroleum Exploration and Production 3*. Interciência, Rio de Janeiro.
- [16] Ertekin, T., Abou-Kassem, J. H., and King, G. R. (2001). Basic Applied Reservoir Simulation. *SPE Textbook Series 7*. Society of Petroleum Engineers, Richardson.
- [17] Rosa, A. J., Carvalho, R. S., and Xavier, J. A. D. (2006). Engenharia de Reservatórios de Petróleo. Interciência, Rio de Janeiro, Brasil.
- [18] Dandekar, A. Y. (2013). Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties. CRC Press, USA.
- [19] Tiab, D. and Donaldson, E. C. (2004). Petrophysics, Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties. Gulf Professional Publishing, Burlington, USA, second edition.
- [20] Dumkwu, F. A., Islam, A. W., and Carlon, E. S. (2012). Review of well models and assessment of their impacts on numerical reservoir simulation performance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, (82-83), 174–186.
- [21] Bourdet, D., Ayoub, J. A., and Pirard, Y. M. (1989). Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE Formation Evaluation*, 293–302.
- [22] Bourdet, D. P., Whittle, T. M., Douglas, A. A., and Pirard, Y. M. (1983). A new set of type cruves simplifies well test analysis. *World Oil*, 95–106.
- [23] Camargo, C. (1993). Comportamento Transiente de Pressão em Poços Horizontais. *Dissertação de mestrado*, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [24] Wang, H., Liao, X., and Zhao, X. (2014). Study of tight oil reservoir flow regimes in different treated horizontal well. *Journal of the Energy Institute*, 200–201.
- [25] Amaral Souto, H. P. and de Souza, G. (2014). Numerical reservoir simulation of naturally fractured reservoirs. In *Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, 35., 2014, Fortaleza. *Proceedings of the XXXV Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Fortaleza.
- [26] Nick, H. M. et al. (2013). Reactive dispersive contaminant transport in coastal aquifers: Numerical simulation of a reactive henry problem. *Journal of Contaminant Hydrology*, 145, 90–104.
- [27] Al-Mohannadi, N. (2004). Simulation of Horizontal Well Tests. Ph.D. thesis, Colorado School of Mines, Golden, USA.
- [28] Peaceman, D. W. (1983). Interpretation of well-block pressures in numerical reservoir simulation with non-square grid blocks and anisotropic permeability. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(3), 531–543.

Terraforming the Aral Sea Basin

Geomorphological and Anthropogenic Foundations (first part)

Nilo Sylvio Costa Serpa
Faculdades ICESP, Brasília - DF, Brasil

Received: 20 May 2017 / Accepted: 02 July 2017 / Published: 27 Aug 2017.

Abstract: This paper presents a study on ancient geographic maps of Central Asia in order to collect indications of geomorphological oscillations in the Aral Sea basin that consubstantiate the proposal of terraforming the region, currently dominated by a desert named *Aralkum*. The research was carried out on maps of renowned authors, following a chronology that began in the 16th century. The total information collected, including those of the actual situation, was organized in two parts, the first called "The Pre-Soviet Aral Sea" with the maps, the second called "The Post-Soviet Aral Sea" illustrated by high-quality NASA photos. Theoretical considerations about thermodynamic phenomena and thermal devices were organized from a perspective of control engineering. The concept of entropy was addressed as a keystone of the technical proposal for monitoring the region, if partially restored.

Keywords : Terraforming, Aral Sea, Aralkum, OTEC Device, Thermodynamics, Entropy.

*My eyes are tired
Of this hopelessness
Seeing all my drying breasts
Covered with salty crystal grains
My ears are clogged with broken dreams.*

Michael Flores Caasi

Introduction

Present work intends to deepen the geomorphological foundations of the proposal to terraforming degraded regions of the Earth, especially the Aral Sea region, presented in previous article. Although the analysis of the natural and anthropogenic oscillations of the Aral basin has been done by a few authors, I have not found a geo-analysis illustrated by a sequence of maps, how far were my research on this issue. Now, a terraforming project shall be more feasible the more the knowledge of the facts that have altered the landscape over the centuries, and, thus, attesting the possibility of induced transformations. Then, I believe that an interesting contribution to consecrate a complete study as a historical subsidy of geomorphological events, whether of natural or anthropogenic origin, comes from the evolution of the geographic mapping of Central Asia. This analysis has to be very careful. For example, a nineteenth-century map showing the Aral Sea, exhibiting the conquests of Alexander the Great, does not mean that in the time of Alexander the Aral was there. If the goal was to show the conquered territories, perhaps the map author would not mind doing it on an updated map. Additional care must be taken with regard to the accuracy of the maps. Although the detailing is admirable from the eighteenth century, one cannot forget the imperfections arising from technological and observational limitations. Therefore, the geographic "comparative anatomy" that I intend to conduct also takes into account the geological and geomorphological analyzes already established on the region of the present Aralkum.



II PART: THE PRE-SOVIET ARAL SEA

By pre-Soviet period I understand all the time prior to Stalin's delusions. It may seem disproportionate, but I believe that, with the exception of the Mongol devastation, nothing really compares to what Stalinism has created in Central Asia.

1 Generalities on the Aral Basin and Central Asia

The Aral Sea has perhaps been one of the greatest targets of environmental scientific research during the last decades ([1], [3], [4], [5], [9], [14], [16]). I do not intend to repeat what is already well known. On the contrary, I shall concentrate in consolidating my thesis on the terraforming of degraded regions from a geographic-geomorphological documentary analysis, improving some ideas presented previously.

The Aral Sea, as a terminal lake with no outfalls, is subject to strong evaporation during the hot summers of Central Asia. We may say that it is hydrologically a self-contained lake, since in normal conditions of water volume there are no outflows to external water bodies. Therefore, if there is no constant inflow of water from the two great rivers that fill the lake, the Amu Darya and the Syr Darya, both supplying the lake from the mountainous regions of Tajikistan, Kyrgyzstan, and Afghanistan, the Aral simply disappears. This is what happened throughout the history, whenever the water supply was interrupted by anthropogenic actions or climate changes.

In scale of hundreds and thousand years, the unstable climate of Central Asia led some researchers to define arid and pluvial phases in the region, doing estimations of drains of paleochannels on the ancient Amu Darya, Syr Darya and Uzboy. Judging by what we have today in terms of historical records, the Aral Sea is known as a salt lake from the ancient world, having received different denominations (*Oxiana Palus*, *Lacus Aral*, *Lacus Chorasnia*, *Buhayrat Khwarazm*, *Sine More*), as we shall have opportunity to verify in the maps. In weighing accuracy features, roughly its shape seems to have changed over the time, judging by periods when it does not appear on the maps, suggesting precisely an oscillation in the flow of the tributary rivers as anthropogenic interventions occurred. The Amu Darya (sometimes Red River), the major affluent river, was known by the Greeks as the *Oxus*. This river contributes to the Aral Sea with a flow between two and three times greater than the flow of the Syr Darya. The Syr Darya is the second major affluent river of the basin, named by the Greeks the *Jaxartes* (Pearl River). The Arabs called it the *Sayhun* or *Sihun*. The Syr

Darya has only one flood season, because there are not enough glaciers in the Tien Shan mountain system to produce a significant second flood season. Of course, climate changes across the globe have dramatically altered these proportions. The region between the Amu Darya and the Syr Darya has been known as *Transoxiana*, a Latin term certainly created to refer to the region beyond the *Oxus* for those who headed from the Caspian, or, by extension, the region beyond the *Oxiana Palus*. (this is even more confirmed from the Arabs, who called the region north of the Amu Darya *Mawaran-nahr*, that is, "the land beyond the river").

At the end of the first half of the last century, and until 1960, the annual water balance of the Aral Sea used to be around 9 km³ from precipitation and 55 km³ from river flow, having a full accounting for water surface evaporation around 64 km³, with average salt percentage of 10-11%. From then on, the amount of water due to the flow of the Amu Darya and Sir Darya rivers has decayed alarmingly to the present almost complete desertification state of the basin. It is not worth here to extend this subject, practically exhausted by so many authors. The main thing is to document that the geomorphologic and geographic evidences bring indication of a seasonality of the Aral throughout the ages, whether by anthropogenic events or by natural events. From both cases we can extract information and insights that show us how to monitor a possible anthropogenic new Aral Sea, capable of bringing environmental balance to this so desolate region.

1.1 Central Asia at the 16th and 17th centuries

I started with the *Orbis Ptolomæi* from the 1541 edition (Figure 1), and the famous first 1570 edition of the Ortelius's *Orbis Terrarum* (Figure 2), considered the former world map in a standard Atlas, with a deformed Caspian Sea named *Mar de Bachu* and two eastern rivers reaching it, certainly the *Oxus* and the *Jaxartes* according to the *Orbis Ptolomæi*. Further DeWitt' *Magna Tartaria*, 1680, of the Mongol Empire, confirms this reading with more precision (Figure 3), but introduces a suggestive small "salt" lake, the *Saluna Lacus*, probably an embryonic Aral sea. I repeat here that the absence of the Aral Sea in some maps does not necessarily means the inexistence of the lake at the time of the Mongol empire, or even before. However, this absence seems symptomatic of a plausible drying phase, since already in 1873 Tissandier [15] and Reclus [11] warned about the strangeness caused by the inexistence of references to the Aral Sea in ancient maps, when it was known that the Greeks were aware of the Bactriana and the Sogdiana ([15], [11]). In addition, Marco Polo, Tissandier continues, "makes no mention of this inland sea"[15]. In view of these observations, Tissandier concluded



Fig. 1. *Orbis Ptolomæi*, 1541 (private collection fragment).



Fig. 2. Ortelius's *Orbis Terrarum*, 1570 (private collection fragment).

that "It is probable that the Aral Sea was desiccated at these times because the *Orus* had been thrown into the Caspian for some centuries. According to these facts, the Aral should be regarded as an intermittent sheet of water which would have been dried several times in the course of the historical period, and which would soon dry up if the Russians take back from the Amu Darya the bed through which it has already poured its water"[15], as if anticipating the final tragedy.



Fig. 3. DeWitt's *Magna Tartaria*, 1680 (private collection fragment).

1.2 Central Asia at the 18th century

Several maps of this century present contradictory information and oscillate in quality, mainly because they depended on expeditions to be updated, so that many were edited before the information was made public. So, I tried to select those which, by degree of detail, mirrored the real geographical knowledge of the academic community. They are, in general, consistent with the main points discussed here.

In the 18th century, Lake Aral was already well documented in the major global charts, as shown in Figures 4, 5, 6 and 7. In these maps it is possible to see a clear evolution in the form and dimensions of the lake. Since the contour of the Caspian Sea was presented with a reasonable approximation to the current shore line, we can rule out a question of imprecision regarding the contour of the Aral Sea, and it is very probable this was really its approximate shape at that times. The representation of two *Oxus* alternative courses towards the Caspian Sea is noteworthy mainly in the Santini Map, 1778, of Persia, Arabia and Turkey (Figure 7). From this map, it is understood that the main stream of the *Oxus* flowed into the Aral.

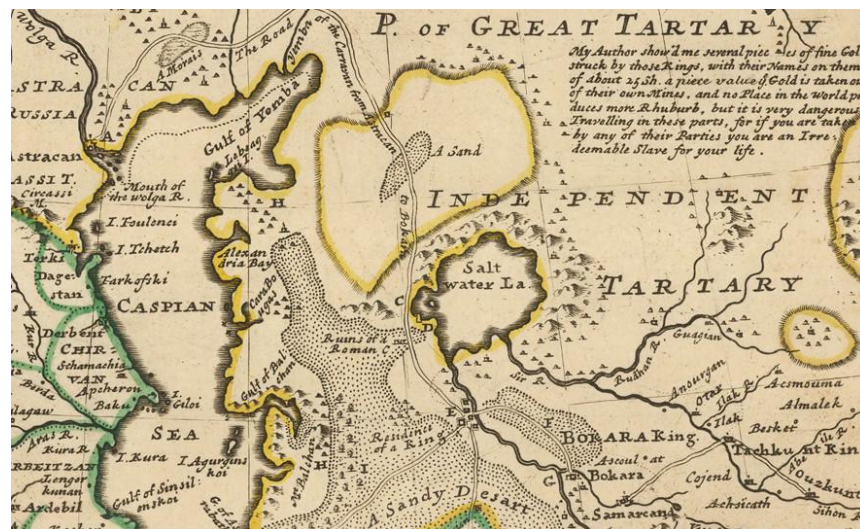


Fig. 4. Herman Moll's Independent Tartary, 1728 (private collection).

1.3 Central Asia at the 19th century

From the nineteenth century, the great maps already showed in definitive a large Aral Sea (while at first with little precision of form), as well as the principal courses of the two major rivers of the basin. To give no more than one example, on the beautiful map of John Thomson, edited in 1817, one clearly reads "Antient Course of the Amu Daria" (Figure 8), showing that not only was this course well known, but also the real course at that time. Among many wise men, this century knew the foresight of Gaston Tissandier and the genius of Élisée Reclus, both with important legacies for the understanding of the Earth.



Fig. 5. Johann Homann's Aral, 1743 (private collection fragment).
Compare this map with the previous one.



Fig. 6. Priest Robert de Vaugondy's Central Asia, 1749 (private collection fragment).



Fig. 7. Santini's map, 1778 (private collection fragment).



Fig. 8. John Thomson's Tartary, 1817 (private collection fragment).



References

1. Badescu, V., and Cathcart, R. 2011. "Aral Sea Partial Restoration. I. A Caspian Water Importation Macroproject." *Int. J. Environment and Waste Management* 7 (1; 2).
2. Engels, W., and Zabihian, F. 2014. "Principle and Preliminary Calculation of Ocean Thermal Energy Conversion." ASEE 2014 Zone I Conference, Bridgeport, USA.
3. Ferguson, R. 2004. *The Devil and the Disappearing Sea*. Vancouver: Raincoast Books, 2004.
4. Glantz, M. 2004. *Creeping Environmental Problems and Sustainable Development in the Aral Sea Basin*. Cambridge University Press, Cape Town.
5. Issanova, G., Abuduwaili, J., Galayeva, O., Semenov, O., Bazarbayeva, T. 2015. "Aeolian Transportation of Sand and Dust in the Aral Sea Region." *Int. J. Environ. Sci. Technol* 12, 3213-3224.
6. Izhitskiy, A., Zavialov, P., Sapozhnikov, P., et al. 2016. "État Actuel de la Mer d'Aral: Caractéristiques Physiques et Biologiques Divergentes des Bassins Résiduels." *Scientific Reports* 6: 23906.
7. Lavenda, B. 2010. *A New Perspective on Thermodynamics*. Heidelberg: Springer, 2010.
8. Masutani, S., and Takahashi, P. 2001. "Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)." Academic Press, 1993-1999.
9. Micklin, P. (Chief Editor), Aladin, N. (Associate Editor), and Plotnikov, I. (Associate Editor) 2014. *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake*. Springer, Heidelberg.
10. Moran, M., Shapiro, H., Munson, B., DeWitt, D. 2003. *Introduction to Thermal Systems Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
11. Reclus, E. 1873. "Note Relative a l'Histoire de la Mer d'Aral." *Bulletin de la Société de Géographie* 6, 113-118.
12. Serpa, N.: Sur l'Entropie Contrôlée des Systèmes [...]. Ph.D. Thesis, L'Université Libre des Sciences de L'Homme de Paris, Sorbonne, 127p (2014).
13. Serpa, N. 2017. "Des Mémoires Turkestans: la Terraformage du Bassin de la Mer d'Aral et la Guerre Silencieuse pour l'Eau." *Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada* 2(1), 21-36.
14. Sorrel, P., Popescu, S.-M., Klotz, S., Suc, J.-P., Oberhänsli, H. 2007. "Climate Variability in the Aral Sea Basin (Central Asia) During the Late Holocene Based on Vegetation Changes." *Quaternary Research* 67, 357-370.
15. Tissandier, G. 1873. "Expéditions Scientifiques de Khiva l'Amou-Daria et la Mer d'Aral." *La Nature – Revue des Sciences* 1-26, 378-380.
16. Zmijewski, K., and Becker, R. 2014. "Estimating the Effects of Anthropogenic Modification on Water Balance in the Aral Sea Watershed Using GRACE: 2003-12." *Earth Interactions* 18(3), 1-16.

Terraforming the Aral Sea Basin

Geomorphological and Anthropogenic Foundations (second part)

Nilo Sylvio Costa Serpa
Faculdades ICESP, Brasília - DF, Brasil

Received: 20 May 2017 / Accepted: 02 July 2017 / Published: 27 Aug 2017.

PART: THE POST-SOVIET ARAL SEA

During the second half of the twenty century, the vanishing of the Aral Sea was an ongoing reality. The primitivism of the irrigation system had the signature of an imminent catastrophe. In 2003-2004, Rob Ferguson just observed that "the Karakum canal was still sucking up a quarter of the Amu Darya's water"[3]. The old soviet irrigation scheme was incredibly inefficient and never underwent an updating.

The results of the Soviet insanity are well known. Figure 1 shows the appearance of the Aral Sea in 2002, already in phase of intense dryness. Lastly, Figure 2 shows an agonizing scenario from that once prosperous region.

But the post-Soviet Aral Sea, or what is left of it, now exists in a completely different technological context, which includes advanced scientific theories and techniques to be employed for good, as well as for evil, unfortunately. The expanded civil engineering for geoengineering, allied to others such as materials engineering, thermal systems engineering, and control engineering now enable us to make modifications on natural landscapes that were once impossible.

In view of the above discussed, the endorheic nature of the Aral basin seems to present a history of natural and anthropogenic transformations compatible with a proposal of regeneration via geoengineering. The main



Fig. 1. Aral Sea in 2002 (source: NASA Gateway to Astronaut Photography)..

geoengineering proposal was presented by Badescu and Cathcart [1], the most plausible among those that have been discussed since the middle of the last century. This proposal, roughly speaking, based on the construction of pipelines between the Caspian Sea and the Aral Sea, was supplemented with concepts related to the idea of terraforming the Earth itself, developed in my recent work on the Aral Sea basin [13]. At this point, I would like to discuss theoretical aspects of control engineering and thermal systems engineering, trying to contribute to a partial recovery plan for the Aral Sea environment.

1 thermodynamical device for observation and control of the anthropogenic Aral Sea

An appreciation of the present conditions of the Aral, or rather Aralkum desert, allows us to say that the partial recovery of the old lake goes against an important conjuncture of irreversible processes, since critical morphological changes and progressive salinization have led to a profound and hardly reversible alteration of the biological system of the sea [6]. In addition to



Fig. 2. The last view of the eastern Aral in 2012. (source: NASA Gateway to Astronaut Photography)..

the massive environmental depreciation that occurred in the last 80-100 years, it must be taken into account that the endorheic condition of the Aral and its intense exposure to evaporation constitute a fragile ecosystem to be necessarily monitored under any recovery circumstances. Although it is possible to use simple control devices such as monitoring of water levels, control of salinity and water quality against pollutants, the issue becomes more complex due to the climatic extremes of the region and the albedo related to the vegetal cover of the cotton plantations. From a thermodynamic point of view, the observation of the entropy rates in our anthropogenic Aral Sea, at least theoretically, would be a useful scientific instrument for understanding the geophysical dynamics of this lake, having in mind some relation involving volume, pressure, entropy and temperature. The key to this observation may lie in the implementation of a closed cycle OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) device only for measurements from the differences between the temperature at the sea surface and the temperature in the depths (for a better understanding of the general principles of thermodynamics, please see the references [7], [10] and [12]).

As we know, OTEC devices generate electricity indirectly from solar energy by establishing a thermodynamic cycle, since an expressive portion of the solar radiation is retained by the surface layers of the seas. The surface heating and the gradual cooling of the water towards the bottom create a kind of thermal potential difference between the surface and the lower levels. Thus, it is possible to establish a level of environmental equilibrium of the lake as a function of the net power generated by the turbine put into operation by the expansion of the ammonia vaporized by the thermal transfer from the sea water heated by the sun. Of course, this is not about producing electricity for consumption but, rather, an electrical marker of entropy monitoring. Nevertheless, Micklin reported ancient measurements of temperatures related to a significant thermocline in the deep Western Basin of the Large Sea, ranging from summer surface temperatures around 24°C to deep temperatures of 2°C - 6°C below 30 meters. Such temperatures would be sufficient in a new partial Aral even for the establishment of experimental stations for electricity generation or for desalination tests [9].

The decrease in water volume in the Aral Sea is closely linked to the following factors:

1. intense evaporation;
2. massive water losses of tributary rivers due to unsustainable irrigation techniques;
3. climate change caused by greenhouse gases.

The OTEC measuring device translates the difference in volume in terms of the reduction of the thermal potential difference, which consequently produces less power from the generating turbine.

1.1 Theoretical approach on the thermodynamics of the OTEC engine

In a recent work [12], I have deduced a thermodynamic equation especially designed for situations in which vigilance over system degradation, that is, the change in the volume of matter with respect to entropy variation, is a priority. I will make an explanation adapted to the present context, starting from the very reasonable hypothesis that our OTEC of measurement is able to mirror in a small scale what happens in the external environment. Although OTEC devices implemented under the Carnot cycle are unfeasible, by theoretical circumstances the intrinsic absolute efficiency of Rankine cycle and Carnot cycle compared are approximately equal. Also, however OTEC engines are well described by Rankine cycles, the efficiency bound of any thermal engine is ever defined by the theoretical Carnot cycle. Lastly, it is good to stress that OTEC technology is still a subject of

many studies before it becomes truly viable in large scale; our device is only a kind of sensor for entropic analysis, not intended to the production of usable electrical energy.

The description of heat exchanges via entropy variation presented below is valid for any thermodynamic system. In thermal systems engineering, it is clear that heat exchanges are closely related to four main variables: S (entropy), V (volume), T (temperature) and $\mathcal{P}$ (pressure). From the entropy equation we can write

$$TdS = dQ; \quad (1)$$

$$TdS = dE + \mathcal{P}dV. \quad (2)$$

If we establish the differential relation between the thermal energy and the couple $(\mathcal{P}, S)$ we do

$$\frac{\partial E}{\partial \mathcal{P}} = T \frac{\partial S}{\partial \mathcal{P}} - \mathcal{P} \frac{\partial V}{\partial \mathcal{P}}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial S} = T \frac{\partial S}{\partial S} - \mathcal{P} \frac{\partial V}{\partial S}. \quad (4)$$

Again differentiating these expressions,

$$\frac{\partial^2 E}{\partial \mathcal{P} \partial S} = \frac{\partial T}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial \mathcal{P}} + T \frac{\partial^2 S}{\partial \mathcal{P} \partial S} - \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial S} \frac{\partial V}{\partial \mathcal{P}} - \mathcal{P} \frac{\partial^2 V}{\partial \mathcal{P} \partial S}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 E}{\partial S \partial \mathcal{P}} = \frac{\partial T}{\partial \mathcal{P}} \frac{\partial S}{\partial S} + T \frac{\partial^2 S}{\partial S \partial \mathcal{P}} - \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial S} \frac{\partial V}{\partial S} - \mathcal{P} \frac{\partial^2 V}{\partial S \partial \mathcal{P}}. \quad (6)$$

Since the order of differentiation does not matter, we have

$$\frac{\partial T}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial \mathcal{P}} - \frac{\partial \mathcal{P}}{\partial S} \frac{\partial V}{\partial \mathcal{P}} = \frac{\partial T}{\partial \mathcal{P}} - \frac{\partial V}{\partial S}. \quad (7)$$

Assuming that $\mathcal{P}$ and S are jointly parametrized, that is,

$$\left(\frac{\partial S}{\partial \mathcal{P}} \right)_S = \left(\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial S} \right)_\mathcal{P} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial V}{\partial S} = \frac{\partial T}{\partial \mathcal{P}},$$

which is one of Maxwell's thermodynamic equations. Similar results are obtained by exchanging pairs of quantities to obtain the remaining equations. The equation (8) establishes a linking key for the control of the variation of the entropy, since it associates the variations of pressure, temperature and volume.



My research on the intrinsic relation between the variables S , $\mathcal{P}$, T and V led me to write a general equation of the second order, namely

$$\tilde{c} \frac{\partial^2 V}{\partial \mathcal{P} \partial S} = -\frac{1}{\mathcal{P}} \frac{\partial T}{\partial \mathcal{P}}, \quad (9)$$

with $\tilde{c}$ constant. By replacing equation (8),

$$\tilde{c} \frac{\partial^2 V}{\partial \mathcal{P} \partial S} = -\frac{1}{\mathcal{P}} \frac{\partial V}{\partial S}. \quad (10)$$

Since the order of differentiation does not matter,

$$\tilde{c} \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{\partial V}{\partial \mathcal{P}} \right) = -\frac{1}{\mathcal{P}} \frac{\partial V}{\partial S}. \quad (11)$$

The obtaining of primitives on both sides by anti-differentials, with $\mathcal{P}$ parametrized ($(\partial \mathcal{P} / \partial S)_{\mathcal{P}} = 0$), leads to

$$\tilde{c} \frac{\partial V}{\partial \mathcal{P}} = -\frac{V}{\mathcal{P}}. \quad (12)$$

This equation (It is obvious that for $\tilde{c} = 1$, we fall back into the situation of a perfect gas) can be organized in the form

$$\tilde{c} \frac{\partial V}{V} = -\frac{\partial \mathcal{P}}{\mathcal{P}}, \quad (13)$$

whose integration provides

$$\tilde{c} \ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{\mathcal{P}_1}{\mathcal{P}_2}. \quad (14)$$

From this we obtain

$$\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\tilde{c}} = \frac{\mathcal{P}_1}{\mathcal{P}_2}. \quad (15)$$

This expression holds for polytropic processes [12]. Depending on the value of $\tilde{c}$, the process can be isobaric, isochoric, isothermal or isentropic. For the isentropic case, provided that $\tilde{c}$ is constant, it follows that

$$\mathcal{P} V^{\tilde{c}} = \text{const.}, \quad (16)$$

known as the Poisson adiabatic equation, with $\tilde{c}$ being called the isentropic coefficient.

Although the equation (9) has been presented as an axiom, it follows from the application of the state equation of Grüneisen (as we know, although not much in the literature, the Grüneisen parameter has both



a microscopic and a macroscopic definition, the first, referring to the vibrational frequencies of atoms in a given material, and the latter, referring to the thermodynamic properties such as thermal capacity and thermal expansion) [7] in the energy conservation equation (2), so that we have partials

$$T\partial S = \partial E + \tilde{c}\left(\frac{E}{V}\right)\partial V. \quad (17)$$

Then we call P the fraction E/V , whence

$$T\partial S = \partial E + \tilde{c}P\partial V. \quad (18)$$

Dividing all terms by ∂P , we have

$$\frac{\partial E}{\partial P} = T\frac{\partial S}{\partial P} - \tilde{c}P\frac{\partial V}{\partial P}. \quad (19)$$

Given that

$$\frac{\partial E}{\partial S} = T, \quad (20)$$

it follows

$$\frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial E}{\partial S} \right) - \frac{\partial T}{\partial P} = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(T\frac{\partial S}{\partial P} - \tilde{c}P\frac{\partial V}{\partial P} \right) - \frac{\partial T}{\partial P} = 0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial T}{\partial S} \frac{\partial S}{\partial P} + T\frac{\partial^2 S}{\partial S \partial P} - \tilde{c}\frac{\partial P}{\partial S} \frac{\partial V}{\partial P} - \tilde{c}P\frac{\partial^2 V}{\partial S \partial P} - \frac{\partial T}{\partial P} = 0. \quad (23)$$

With the parameterization of P with respect to S ,

$$\tilde{c}\frac{\partial^2 V}{\partial S \partial P} = -\frac{1}{P}\frac{\partial T}{\partial P}. \quad (24)$$

Now, if the Aral level varies significantly - and therefore its volume - this shall have a direct reflection on the temperature gradient (there shall be less temperature variation between the surface layers and the reference ground). According Carnot's principle, the maximum theoretical energy conversion efficiency of a cyclic heat transfer engine varies with the difference between the temperatures at which the heat transfer occurs. Equation (24) shows the internal dynamics of cyclic heat transfer devices as the OTEC engine in focus (this kind of thermodynamic engine was detailed in references ([2], [8]), in this case considering the volume of an adjustable proportion mixture of amonia to be vaporized and expanded by thermal input from warm sea water, in a continuous loop, where the saturated vapor do work through the turbine before being condensed by the cold sea water. It is important to note that closed-cycle OTEC power systems operate at high pressures,



and that irreversibilities occur in heat exchangers when thermal energy is transferred over a large temperature difference. Such irreversibilities mirror entropy change rates. The parameter $\tilde{c} > 0$ is in the last analysis the adiabatic coefficient of the adiabatic relation (16). It also corresponds to the polytropic index n , when it's the case. Since a typical Carnot machine operates under an efficiency evaluated as

$$\eta_t = 1 - \frac{T_{II}}{T_I}, \quad (25)$$

where T_I is the input temperature and T_{II} is the output temperature, this clearly leads us to write that, for the OTEC heat engine in question, the efficiency could not exceed the maximum value, that is

$$\eta_t \leq 1 - \frac{T_{II}}{T_I}. \quad (26)$$

For a reversible cycle process we can have $\Delta S_{global} = 0$, otherwise $\Delta S_{global} > 0$. The logical way to establish an asymptotic relation between the heat engine efficiency and the Carnot machine efficiency is to introduce the irreversible coefficient φ , due to the irreversible events during human processes. So expression (26) can be rewritten as

$$\eta_t \leq \frac{1}{\varphi} \left(1 - \frac{T_{II}}{T_I} \right). \quad (27)$$

While most of the actual processes (natural and human) in the Aral basin are irreversible, φ can only asymptotically approach unit with the minimization of irreversible events. Thereby, the more φ is closer to 1, the less is the number of irreversible processes and the entropy variation ΔS . In other words, the number of configuration states of the system is just reduced as the processes assume only the states organized by the temperature gradient. Lastly, an example of processes that increase the rate of variation of environmental entropy is the wind transport of salts from the exposed seabed, which has drastically reduced agricultural productivity.

1.2 The interaction of the OTEC engine with the environment

Whereas the entropy of a dynamical system always tends to grow in the direction of time, it is reasonable to assume that control actions only decelerate the advancement of entropy. Thus, it is appropriate to talk about the variation of entropy. Looking at presented engine, the total variation in the generation of entropy may be written as

$$\delta S_{tot} = \delta S_{int} + \delta S_{ext} \quad (28)$$



However, in my opinion, if what matters is the rates of change of the entropy, and if the entropy has the same direction as the arrow of time, then it is convenient to establish a Lagrange function as

$$\mathfrak{L} = \delta Q_{int} \dot{f}(H) + f(H) \frac{\delta Q_{ext}}{\tau_{ref}}, \quad (29)$$

where $f(H)$ is a generalized coordinate given by the Heaviside function of time interval

$$f(H) = (\tau - \tau_0)H(\tau - \tau_0), \dot{f}(H) = H(\tau - \tau_0).$$

In Macaulay kets, this Lagrangian form assumes

$$\mathfrak{L} = \delta Q_{int} \langle \tau - \tau_0 \rangle^0 + \langle \tau - \tau_0 \rangle^1 \frac{\delta Q_{ext}}{\tau_{ref}}. \quad (30)$$

I have called this Lagrangian "ergodetic", meaning that it refers to the thermal energy evolving along short intervals. The second term refers to the effects of the external supply of thermal energy concentrated in a given time interval over a reference period. For $\tau < \tau_0$, the Lagrangian vanishes according to kets rules. In other words, there is no thermal energy going through the past, which is the same thing to say that entropy ever points to the future. Now, let us take Euler-Lagrange differential equation for a non-dissipative situation,

$$\frac{d}{d\tau} \left(\frac{\partial \mathfrak{L}}{\partial \dot{f}(H)} \right) - \frac{\partial \mathfrak{L}}{\partial f(H)} = 0. \quad (31)$$

This implies that

$$\frac{d}{d\tau} (\delta Q_{int}) - \frac{\delta Q_{ext}}{\tau_{ref}} = 0 \therefore \quad (32)$$

$$\boxed{\delta \dot{Q}_{int} = \frac{\delta Q_{ext}}{\tau_{ref}}}. \quad (33)$$

A symmetry of this type must be pursued and serves as an equilibrium model to be imitated by control devices, establishing real links between equipments and external environment. The introduction of the H function as generalized coordinate aims to establish small time intervals along which the variation of entropy appears as an evolutionary signature, since $\delta Q = T\delta S$; moreover, to null the Lagrangian from any instant to the past. Thus, entropy seen as a quantity associated with the energy failure of the system, must be tied, by its very definition, to the time arrow, never pointed to a time before the instant of observation. In its one-way temporal bond with energy, it is a trace of system's evolution. Therefore, the proposed physical



ergodic Lagrangean avoids any mathematical abstractionism that seeks to symmetrize the concept of entropy.

Finally, all the theory presented above needs to be considered in the control algorithms to operate the OTEC station.

2 Conclusion

In view of the succinct history of the transformations in the Aral Sea basin during the last centuries, with the appearance and disappearance of canals, destructions and reconstructions of ancient empires, one can conclude that, with all the available technology in the 21st century, it is possible to induce a partial restoration of the old Aral, being exclusively a question of State policies. The water retention experience in Northern Aral is a modest example of how simple engineering can yield acceptable results. Water disputes in Central Asia certainly need to be settled by mutual agreement between the countries that depend on the region's major rivers, a necessary understanding that will need to be repeated many times in different parts of the globe if mankind has plans to stay here any longer time than it seems we will indeed.

3 Acknowledgments

I would like to thank my dear friend Richard Brook Cathcart for the good suggestions and indispensable contribution to the realization of this work.



*To Nice Chaves Costa
in memoriam.*

References

1. Badescu, V., and Cathcart, R. 2011. "Aral Sea Partial Restoration. I. A Caspian Water Importation Macroproject." *Int. J. Environment and Waste Management* 7 (1; 2).
2. Engels, W., and Zabihian, F. 2014. "Principle and Preliminary Calculation of Ocean Thermal Energy Conversion." ASEE 2014 Zone I Conference, Bridgeport, USA.
3. Ferguson, R. 2004. *The Devil and the Disappearing Sea*. Vancouver: Raincoast Books, 2004.
4. Glantz, M. 2004. *Creeping Environmental Problems and Sustainable Development in the Aral Sea Basin*. Cambridge University Press, Cape Town.
5. Issanova, G., Abuduwaili, J., Galayeva, O., Semenov, O., Bazarbayeva, T. 2015. "Aeolian Transportation of Sand and Dust in the Aral Sea Region." *Int. J. Environ. Sci. Technol* 12, 3213-3224.
6. Izhitskiy, A., Zavialov, P., Sapozhnikov, P., et al. 2016. "État Actuel de la Mer d'Aral: Caractéristiques Physiques et Biologiques Divergentes des Bassins Résiduels." *Scientific Reports* 6: 23906.
7. Lavenda, B. 2010. *A New Perspective on Thermodynamics*. Heidelberg: Springer, 2010.
8. Masutani, S., and Takahashi, P. 2001. "Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)." Academic Press, 1993-1999.
9. Micklin, P. (Chief Editor), Aladin, N. (Associate Editor), and Plotnikov, I. (Associate Editor) 2014. *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake*. Springer, Heidelberg.
10. Moran, M., Shapiro, H., Munson, B., DeWitt, D. 2003. *Introduction to Thermal Systems Engineering*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
11. Reclus, E. 1873. "Note Relative a l'Histoire de la Mer d'Aral." *Bulletin de la Société de Géographie* 6, 113-118.
12. Serpa, N.: Sur l'Entropie Contrôlée des Systèmes [...]. Ph.D. Thesis, L'Université Libre des Sciences de L'Homme de Paris, Sorbonne, 127p (2014).
13. Serpa, N. 2017. "Des Mémoires Turkestans: la Terraformage du Bassin de la Mer d'Aral et la Guerre Silencieuse pour l'Eau." *Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada* 2(1), 21-36.
14. Sorrel, P., Popescu, S.-M., Klotz, S., Suc, J.-P., Oberhänsli, H. 2007. "Climate Variability in the Aral Sea Basin (Central Asia) During the Late Holocene Based on Vegetation Changes." *Quaternary Research* 67, 357-370.
15. Tissandier, G. 1873. "Expéditions Scientifiques de Khiva l'Amou-Daria et la Mer d'Aral." *La Nature – Revue des Sciences* 1-26, 378-380.
16. Zmijewski, K., and Becker, R. 2014. "Estimating the Effects of Anthropogenic Modification on Water Balance in the Aral Sea Watershed Using GRACE: 2003-12." *Earth Interactions* 18(3), 1-16.



A Experimentação Aliada à Inter/Transdisciplinaridade como Alternativa para o Ensino de Física nas Universidades: uma Experiência nas Ciências Agrárias

Beatriz Lopes Pereira, engenheira sanitária e ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém-PA, Brasil

Rayane Pereira Sodré, discente em engenharia ambiental e energias renováveis
Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém-PA, Brasil

José Felipe Sousa de Almeida, físico teórico e membro da Academia de Ciências do Pará (ACP)
Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém-PA, Brasil

Antônio Vinícius Corrêa Barbosa, geofísico e engenheiro civil
Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Belém-PA, Brasil

Received: 04 Feb 2017 _____ / Accepted: 12 Apr 2017 _____ / Published: 27 Aug 2017 _____.

Abstract: This work presents an inter / transdisciplinary proposal for the teaching of Physics in the universities, focusing on agricultural science courses. The objective is to help students of these courses to understand the applicability and importance of this discipline in their academic and professional lives. For this purpose, a laboratory experiment was carried out, with the participation of students and teachers, in order to measure the electrical conductivity of a soil sample and to interpret the results from the point of view of physical science and soil science.

Key words: Experimental activity, interdisciplinarity, educational laboratory, teaching Physics.

1. Introdução

Associar o conteúdo ministrado em aulas Física ao contexto de sua atuação profissional é uma das

Autor correspondente: Beatriz Lopes Pereira, discente em agronomia. Possui graduação em engenharia sanitária e ambiental, áreas de pesquisa: meio ambiente e sustentabilidade, agricultura de precisão. E-mail: pereiralopes89@gmail.com

dificuldades encontradas por muitos estudantes do ensino superior. De fato, diante de um paradigma educacional que tende a desconectar as disciplinas, apresentando-as de forma isolada, o aluno traz, desde o ensino básico, esta dificuldade em relacionar diferentes saberes, chegando ao ensino superior com uma visão limitada, fragmentada do conhecimento – herança da teoria reducionista cartesiana, um dos pilares da ciência ocidental, a qual sugere particionar os problemas em quantas parcelas sejam possíveis e necessárias, para

melhor resolvê-los [1] –, cujo resultado é o desinteresse dos estudantes por determinadas disciplinas, nomeadamente as disciplinas da área de exatas como a Física.

Essa postura de desinteresse pelo estudo da Física encontra a sua origem no método tradicional de ensino-aprendizagem, no qual o professor preocupa-se demasiadamente com a resolução de problemas, levando o aluno a decorar fórmulas e resolver equações de forma mecânica, preenchendo seu caderno de informações, mas sem conseguir construir a ponte entre essas informações e o mundo que o cerca. Além disso, muitos professores ainda optam pela aula expositiva, onde o diálogo entre professor e aluno tem um lugar menor; onde o aluno não tem papel ativo na construção do conhecimento [2-4]. O ensino fragmentado prejudica a formação do espírito científico do estudante [5], bem como a sua autonomia, senso crítico e desenvolvimento intelectual, fatores essenciais para o bom desempenho profissional do formado [6]. Assim, frente a esse modelo de ensino individualista e descontextualizado da realidade do discente, é necessário que as universidades optem por um método alternativo para o ensino de física; o que pode ser alcançado através de aulas experimentais de caráter interdisciplinar.

A experimentação associa a teoria à prática, favorecendo um melhor entendimento das leis e conceitos da Física, enquanto que, a interdisciplinaridade, permite relacionar a Física a outras disciplinas, objetivando produzir novos conhecimentos e solucionar problemas de modo global e abrangente [6]. Nesta perspectiva, professor e aluno podem até mesmo ultrapassar o horizonte interdisciplinar, chegando a transdisciplinaridade, onde as fronteiras entre as disciplinas são transpassadas, construindo-se um novo conhecimento, que se baseia no que está ao mesmo tempo entre, através e além das disciplinas [7-9].

Quando vinculadas, experimentação e inter/transdisciplinaridade configuram-se como uma importante ferramenta no processo de ensino – aprendizagem de Física nas universidades, possibilitando ao aluno encontrar o significado e a relevância dessa disciplina, no seu curso, em sua vida profissional e em seu cotidiano; e um dos espaços mais utilizados pelos professores para essa finalidade experimental, é o laboratório didático de Física [10]. Para Marineli e Pacca (2006), o laboratório didático é fundamental para o aprendizado de Física, e oferece grandes vantagens para tal, como, por exemplo, a maior interação entre professor e aluno, e entre os próprios alunos, que, nessas circunstâncias, tendem a despertar em si, o interesse pela pesquisa em ciências [11]; podendo ainda “discutir diferentes pontos de vista, propor estratégias de ação, manipular instrumentos, formular hipóteses, prever resultados, confrontar previsões com resultados experimentais, etc.” [11]. Assim, pode-se criar um ambiente favorável para que o aluno tenha motivação e interesse pelo estudo da Física, bem como pelas demais disciplinas envolvidas na atividade.

Neste cenário, estão incluídos alunos de diversas áreas, como é o caso das ciências agrárias. De um modo geral, neste setor, a grade curricular é moldada tendo como base os saberes biológicos, sobre tudo o estudo de plantas e animais. Por esta razão, pode parecer ao aluno, em um primeiro momento, que os tópicos de Física não possuem grande envolvimento neste contexto, especialmente quando o assunto é voltado para o tema eletricidade. Porém, essa associação é possível, o estudo da eletricidade está inserido, por exemplo, em um dos principais ramos de abrangência das ciências agrárias, a agricultura de precisão.

A agricultura de precisão é uma técnica agrícola que considera como ponto de partida para a tomada de decisões no sistema produtivo, o estudo das variações espaciais e temporais das propriedades físicas e

químicas do solo; como umidade, salinidade, textura, teor de matéria orgânica, entre outras. Uma maneira simples e econômica de identificar essas variações em uma área produtiva é através da mensuração da condutividade elétrica do solo, uma vez que, as referidas propriedades do solo, influenciam diretamente este parâmetro [12-13].

Diante do exposto, este trabalho apresenta um experimento inter/transdisciplinar, realizado no laboratório de Física da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), integrando os saberes da ciência física e da ciência do solo, para o estudo da condutividade elétrica de uma amostra de solo. O objetivo é revelar a alunos de ciências agrárias um dos muitos empregos da Física nos cursos em que estão inseridos, além de facilitar a compreensão e despertar o interesse dos estudantes pelos assuntos aqui tratados.

2. Metodologia

2-1. Participantes

Todas as etapas do trabalho contaram com a participação ativa de alunos de iniciação científica dos cursos de agronomia e engenharia ambiental e energias renováveis, sempre acompanhados de perto pelos professores, para orientarem e incentivarem as atividades. Embora o presente trabalho esteja direcionado a alunos dos cursos de ciências agrárias, área que não engloba o curso de engenharia ambiental, as áreas de ciências agrárias e ciências ambientais são totalmente complementares: as soluções para as questões concernentes a cada área, necessitam da troca de conhecimento entre elas. Além disso, ambas as áreas contemplam o estudo da ciência física e da ciência do solo.

2-2. Instalação e condução do experimento

Para a realização do experimento foi coletada uma amostra de solo, em novembro de 2014, em uma área

descampada, próxima a uma área de floresta, nas dependências da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no município de Belém-PA, nas coordenadas geográficas $1^{\circ} 27' 33.26''$ de latitude sul e $48^{\circ} 26' 13.26''$ de longitude oeste, sobre um solo classificado como Latossolo Amarelo, textura média [14]. O clima do município é tropical chuvoso, do tipo Afi, da classificação de Koeppen, com amplitude térmica anual reduzida e precipitação média mensal superior a 60 mm. Considerando-se a classificação de Thorthwaite, o clima é do tipo B4A'r, apresentando alta umidade e pequena deficiência hídrica [15]. Os procedimentos para coleta, preparo da amostra de solo e mensuração de sua condutividade elétrica, apresentados a seguir, tiveram por base a metodologia descrita na referência [16].

Primeiramente, coletou-se uma amostra de solo em formato cúbico, medindo $0,70 \times 0,50 \times 0,40 \text{ m}^3$, cortando-se o solo e esculpindo-o para atingir as dimensões desejadas — processo indicado para solos relativamente consistentes. Após a coleta, cobriu-se a amostra com uma tela e também com uma camada de parafina, armazenando-a, em seguida, em uma caixa de madeira. Esses procedimentos ajudam a preservar a consistência e umidade original da amostra, de forma que esta represente, o mais fiel possível, as características naturais da área investigada.

No Laboratório de Sistemas Ciberfísicos da UFRA a amostra foi preparada com os recursos necessários para a condução do experimento: placas metálicas, chaves de fenda e conectores. Assim, conforme, a figura 1, as placas metálicas foram posicionadas no interior da caixa, em contato com as faces de menor área da amostra ($0,2 \text{ m}^2$), e, sobre elas, foram acoplados os conectores. Uma vez que a finalidade das placas é a transmissão da corrente elétrica para a amostra, tomou-se o cuidado de escolher placas cujas dimensões cobrissem toda a área de contato com a amostra, a fim de se obter a melhor distribuição possível da corrente elétrica no solo. Com

relação às chaves de fenda, utilizadas como eletrodos de medição de tensão, essas foram alinhadas na parte central da amostra, a uma distância de 0,25 m uma da outra. Também foram utilizados no experimento um osciloscópio e um aparelho multíteste.



Figura 1 -Amostra de solo preparada com os recursos necessários para a medição de sua condutividade elétrica.

Com a amostra devidamente equipada, o próximo passo para a determinação de sua condutividade elétrica, é a injeção de corrente elétrica no solo. Para tal, foi montado um circuito elétrico associando-se aos conectores um gerador de sinais de frequência variável e um resistor shunt, como pode ser observado na figura 2.

Neste trabalho, utilizou-se como gerador de sinais o software livre Audacity®, programando-o para operar entre 20 valores de frequência, contidos na faixa do espectro que vai de 100 Hz até 2kHz. Assim, com o circuito em funcionamento, alimentado pelo gerador de sinais, foram mensurados os valores de corrente e tensão, correspondentes aos valores de frequência escolhidos.

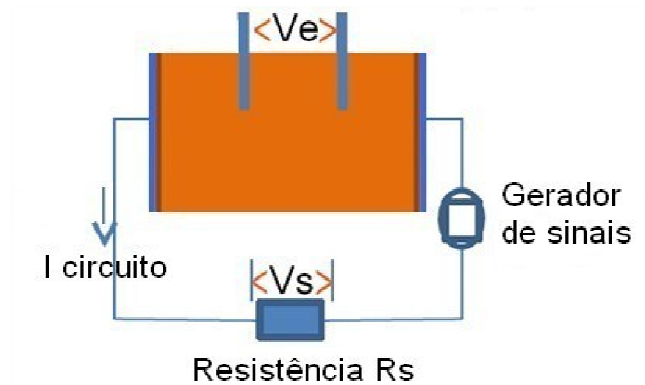


Figura 2 -Representação esquemática do circuito elétrico montado para o experimento.

Os fenômenos físicos que ocorrem durante o funcionamento do circuito elétrico, representado pela figura 2, são descritos matematicamente pelas equações 1, 2, 3 e 4 [17], abaixo listadas da seguinte maneira:

$$I_{circuito} = \frac{V_s}{R_s} \quad (1)$$

$$|Y_{solo}| = \frac{I_{circuito}}{V_e} \quad (2)$$

$$G = \text{Real}\{Y_{solo}\} = \frac{\sigma A}{d} \rightarrow \sigma = G \frac{d}{A} \quad (3)$$

$$B = \text{Imag}\{Y_{solo}\} = \frac{\omega \epsilon A}{d} \rightarrow \omega \epsilon = B \frac{d}{A} \quad (4)$$

onde Y trata da admitância (S) medida em cada frequência; d é a distância (m) entre os eletrodos; A , é a área de seção transversal (m^2) da amostra de solo. A expressão $G=\text{Re}(Y)$ corresponde à condutância (S) e $B=\text{Im}(Y)$ à susceptância (S); σ representa a condutividade elétrica do solo ($mS.m^{-1}$); e $\omega\epsilon$, o produto da frequência angular (ω) pela permissividade elétrica (ϵ). A tensão entre os eletrodos (V_e) e a corrente injetada no circuito (V_s/R_s), para cada frequência, foram medidas com o aparelho multíteste e com o osciloscópio, respectivamente.

Finalmente, os valores de condutividade elétrica da amostra solo, em resposta aos diferentes valores de frequência, foram obtidos, substituindo-se na equação 3, os valores geométricos da amostra e os valores da admitância, calculados pela equação 2.

3. Resultados e discussão

3-1. Análise da amostra de solo

A variação da condutividade elétrica do solo, em função da frequência, e seu comportamento na amostra de solo, são apresentados no gráfico da Figura 3, gerado no programa MATLAB®.

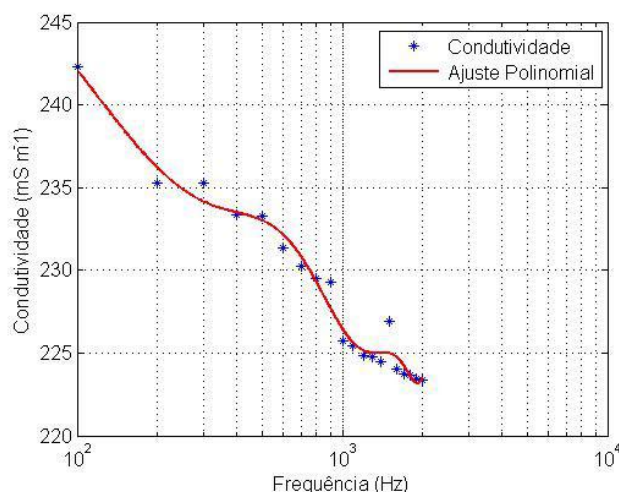


Figura 3 - Condutividade elétrica da amostra de solo em função da frequência.

Nele observa-se que os valores de condutividade elétrica diminuem com o aumento da frequência, variando entre 0,242 e 0,223 mS.m⁻¹, ao longo de todo o experimento. Valores semelhantes foram encontrados por Portela (2000) [18], que também realizou estudos da condutividade elétrica em solo amazônico, e dentro da faixa de frequência utilizada neste trabalho, alcançando valores que variaram entre 0 e 0,220 mS.m⁻¹.

Segundo Rocha (2007), em baixas frequências – menores que 1MHz –, a condutividade elétrica do solo ocorre, basicamente, de forma eletrolítica, ou seja, se dá em função dos íons dissolvidos em solução no solo, uma vez que, são esses íons, que conferem à água a capacidade de conduzir corrente elétrica [17]. Logo, quanto maior a concentração iônica da solução do solo, maior será a sua condutividade elétrica. Todo este processo é fortemente influenciado pelas características físico-químicas do solo, nomeadamente a umidade e a presença de íons no solo. Outras características importantes que podem ser citadas são a temperatura, tamanho dos grãos do solo e a composição química do mesmo, por estarem diretamente relacionadas com as duas primeiras.

Os íons, que compõem a solução do solo, são os nutrientes que as plantas absorvem através de suas raízes. Por esta razão, segundo Verma *et al.* (2015), a condutividade elétrica do solo é uma medida capaz de indicar a quantidade de nutrientes disponível no solo, ou seja, a sua fertilidade [19]. Os autores ainda apontam que, de um modo geral, a faixa ideal de condutividade elétrica, que caracteriza um solo saudável, está entre 20mS.m⁻¹ e 120mS.m⁻¹. Valores abaixo de 20mS.m⁻¹ indicam solos com baixa quantidade de nutrientes disponíveis para as plantas, podendo indicar até mesmo um solo estéril. Enquanto que, valores acima de 120mS.m⁻¹, podem indicar solos salinizados, seja por ação natural ou antrópica.

Assim, com base no exposto, e tendo em vista que a coleta de amostra foi realizada em novembro, período de verão amazônico, e mês de menor precipitação na cidade de Belém [20], pode-se afirmar que, os valores de condutividade elétrica encontrados neste trabalho, e apresentados no gráfico (Figura 3), além de refletirem condições de baixa umidade, também indicam uma provável deficiência nutricional no solo estudado.

De fato, as referidas deficiências são comumente encontradas em solos de regiões tropicais, pois, em

função de seus fatores de formação, nomeadamente temperatura e pluviosidade, possuem predomínio de minerais de baixa atividade química, como a argila caulinita, por exemplo [21]; condição que lhes confere reduzida capacidade de retenção de água, bem como pobreza em macro e micronutrientes e baixa capacidade de troca de cátions (CTC). A CTC representa a quantidade total de cátions que um solo pode adsorver na superfície de seus colóides, na forma trocável, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , H^+ , Al^{3+} . Quando em condições de baixa CTC, como nos solos amazônicos, esses cátions estão susceptíveis à lixiviação e escoamento superficial, levando à perda desses nutrientes e, conseqüentemente, ao empobrecimento do solo [22-23].

Nesse contexto, a matéria orgânica configura-se como um constituinte de grande importância para os solos da Amazônia e demais solos de regiões tropicais, pois auxilia na melhora das propriedades e processos que ocorrem nesses solos, contribuindo, por exemplo, com cerca de 80% do valor total da CTC, melhorando assim a retenção e disponibilidade de nutrientes, além de aumentar a capacidade de retenção de água, por influenciar positivamente na porosidade e estrutura do solo, entre outras propriedades [24].

Outra característica importante da matéria orgânica é a sua distribuição no solo, que pode variar tanto verticalmente quanto horizontalmente, em função de fatores edafoclimáticos e também de intervenções antrópicas [24]. É à luz dessa característica que se pode explicar o próximo ponto a ser observado no gráfico (Figura 3): o decréscimo dos valores de condutividade elétrica ao longo do experimento, refletido na curva de comportamento decrescente do gráfico.

Conforme mencionado anteriormente, os fatores condicionantes para o eficiente fluxo de corrente elétrica em solos de ambientes tropicais – umidade e teor de íons nutrientes –, são influenciados de forma decisiva pela matéria orgânica. Isso posto, é possível

afirmar que, a variação na distribuição da matéria orgânica desses solos, exercerá forte influência sobre os valores de condutividade elétrica neles mensurados.

Alcântara *et al.* (2013) e Valente (2010) realizaram medidas de condutividade elétrica nas profundidades de 0,0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m ([25], [26]) e, como no presente trabalho, também obtiveram valores de condutividade elétrica decrescentes em seus resultados: os maiores valores foram encontrados na camada superficial de 0,0 a 0,20 m, em relação a camada de 0,20 a 0,40 m. Os primeiros, justificaram o fato afirmando que, nas camadas mais superficiais há maior concentração de matéria orgânica e nutrientes. Já o segundo, justificou os resultados obtidos afirmando que, nas primeiras camadas do solo, há maior variação das propriedades físicas e químicas do solo, o que inclui o teor de matéria orgânica. Outrossim, Tognon *et al.* (1998) analisaram 78 perfis de latossolo amarelo na Amazônia — o mesmo tipo de solo avaliado no presente trabalho — e constataram que, nas camadas superficiais desses solos, o acúmulo de matéria orgânica é muito mais expressivo, em relação às camadas mais profundas [27].

Assim, considerando-se os trabalhos dos autores supracitados, têm-se um indicativo de que o comportamento decrescente do gráfico (Figura 3) reflete o decréscimo da umidade e/ou da quantidade de nutrientes no solo em estudo, acompanhando o decréscimo no teor de matéria orgânica no mesmo.

Pretende-se complementar os resultados deste trabalho, realizando-se os procedimentos experimentais anteriormente descritos, no período de inverno amazônico, a fim de se comparar com os resultados preliminares obtidos no período de verão; e, também, a partir de análises físico-químicas do solo; deste modo, almeja-se obter, de forma mais aprofundada, a caracterização eletromagnética do solo avaliado no presente estudo; sendo esta, mais uma

ferramenta didática que poderá contribuir para o aprendizado prático dos alunos participantes, no que se refere à interpretação de uma análise de solo, podendo-se discutir os diversos conceitos físicos e químicos envolvidos nesse processo. Pretende-se ainda, com esta futura análise, identificar, entre os fatores apontados neste trabalho, o que apresenta maior influência sobre os valores de condutividade elétrica do solo em estudo.

3-2. Contribuições do experimento.

Utilizar um experimento laboratorial para a medição da condutividade elétrica do solo, como via de transição entre os fenômenos físicos relacionados à eletricidade e às ciências agrárias, proporcionou aos alunos envolvidos neste trabalho, e também aos professores, uma maneira instigante e dinâmica de aprender e ensinar os referidos assuntos, respectivamente.

Os alunos ainda puderam aprender a manusear os diferentes equipamentos utilizados nas medições, bem como os softwares empregados na obtenção e análise de dados, agregando assim conhecimentos importantes que poderão facilitar suas atividades acadêmicas e profissionais.

O experimento também abre possibilidades para o desenvolvimento de materiais didáticos para uso dos estudantes, abordando a questão interdisciplinar. Entre os exemplos que podem ser discutidos durante estas práticas estão: o estudo da condutividade elétrica e assuntos a ela relacionados, como a eletrostática e circuitos elétricos, por exemplo; aspectos físicos, químicos e biológicos do solo, e análise de sua capacidade produtiva; além de conceitos de estatística.

Outro ponto a ser discutido é a equação (4), utilizada para a determinação da permissividade elétrica (ϵ). Embora este parâmetro não tenha aplicabilidade no experimento relatado neste trabalho,

seu uso para fins interdisciplinares é igualmente possível. A permissividade elétrica, por ser um parâmetro do solo variável com a frequência, é utilizado em estudos de propagação de descargas atmosféricas, cálculos para o dimensionamento de sistemas de aterramento elétrico, etc. Por tanto, pode-se sugerir o estudo da permissividade voltado a área da engenharia e da Física, podendo-se utilizar para tal, um gerador de sinais para simulações em campo ou laboratório.

4. Conclusão

Este artigo abordou uma proposta inter/transdisciplinar para aprimorar o ensino de Física nas universidades, tendo como foco os cursos da área de ciências agrárias. Buscou-se, com o experimento aqui descrito, não apenas melhorar o aprendizado, contextualizando os conceitos físicos aos saberes que integram os cursos, mas também estimular os alunos a ressignificar esta disciplina — comumente vista por eles como um obstáculo desde o ensino médio — encarando-a como um importante instrumento para a vida acadêmica e profissional, e também para expandir o entendimento sobre o mundo que os cerca.

Além de estudantes das ciências agrárias, a prática contou com a participação de estudantes de engenharia ambiental, o que contribuiu de forma significativa, não apenas para a elaboração do trabalho, como também para a construção do conhecimento dos discentes, a partir da troca de saberes. Este envolvimento fortalece a importância da interdisciplinaridade como mecanismo que possibilita o compartilhamento de experiências e enriquecimento mútuo entre diferentes áreas.

A atividade apresentou resultados positivos: os alunos demonstraram seriedade, interesse e envolvimento em todas as etapas do experimento, além de compreensão dos assuntos aqui discutidos, constatada durante a interpretação dos resultados,

questionamentos, e pelos debates entre professores e alunos. Pôde-se notar também que os alunos buscavam ajudar-se mutuamente, no decorrer do experimento, auxiliando assim a equilibrar os diferentes níveis de dificuldade de cada um, frente a atividade proposta; o que demonstra o papel do laboratório didático não apenas como indispensável no processo de ensino-aprendizagem, mas também no desenvolvimento da habilidade de ensinar e aprender dos alunos.

Assinale-se ainda que, no desenrolar do experimento e construção do presente artigo, ficou claro para professores e alunos a forte interdependência entre as disciplinas abordadas, cujos saberes dialogaram perfeitamente para tratar do tema proposto para a aula em laboratório – a condutividade elétrica do solo. Deste modo, o referido tema revelou-se, de fato, um tema transversal, ou seja, o tema foi capaz de ultrapassar as fronteiras epistemológicas entre a ciência física e a ciência do solo, gerando conhecimentos que permeiam ambas as disciplinas. Assim, espera-se que este trabalho contribua para a pesquisa e discussão acerca da articulação das ciências exatas às demais áreas do conhecimento, via experimentação, como forma de estimular muitos estudantes a superarem sua aversão a disciplinas como Física e Matemática.

Ademais, sugere-se que as universidades estimulem didáticas como estas. Para tanto, além da necessidade de repensar os tradicionais métodos de ensino, retirando o aluno da condição de mero receptor de informações, é indispensável o investimento em infraestrutura e tecnologia.



Referências

- [1] Descartes R., “Discurso do método”, Martin Fontes (2001).
- [2] Favarão N., Araújo C., Importância da interdisciplinaridade no ensino superior. *EDUCERE – Revista da Educação*, v. 4, n. 2, p.103–115 (2004).
- [3] Moraes J., Silva Junior R., Experimentos didáticos no ensino de física com foco na aprendizagem significativa. *Aprendizagem Significativa em Revista/Meaningful Learning Review*, v. 4, n. 3, p. 61-67 (2014).
- [4] Silva R., Silva S., Souza L., Ruivo M., Comportamento granulométrico de um latossolo amarelo sob diferentes ecossistemas, Belém/PA. 67ª Reunião Anual da SBPC, São Paulo-SP, Brasil (2015).
- [5] Gerhard A., Rocha Filho J., A fragmentação dos saberes na educação científica escolar na percepção de professores de uma escola de ensino médio. *Investigações em Ensino de Ciências*, v.17, n.1, p. 125-145 (2012).
- [6] Peleias I., Mendonça J., Slomski V., Fazenda, I., Interdisciplinaridade no ensino superior: análise da percepção de professores de controladoria em cursos de ciências contábeis na cidade de São Paulo. *Avaliação*, v, 16, n. 3, p. 499-532 (2011).
- [7] Guedes C., Machado J., Brito M., Brito S., Machado V., Importância das aplicações da transdisciplinaridade na educação humana. *Revista Graduando*, v. 1, n. 1, p. 21-32 (2010).
- [8] Nicolescu B., Um novo tipo de conhecimento – transdisciplinaridade. M. Mello, V. Barros, e A. Sommerman (Eds.), Unesco e Triom (2000).
- [9] Santos, A., Complexidade e transdisciplinaridade em educação: cinco princípios para resgatar o elo perdido. *Revista Brasileira de Educação*, v. 13, n. 37, p. 71-83 (2008)
- [10] Rosa W., Concepções teórico-metodológicas no laboratório didático de física na universidade de Passo Fundo. *Revista Ensaio*, v. 5, n. 2, p. 13-27 (2003).
- [11] Marineli F., Pacca J., Uma interpretação para dificuldades enfrentadas pelos estudantes em um laboratório de Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, p. 497-505 (2006).
- [12] Molin J., Amaral L., Colaço A., “Agricultura de precisão”, Oficina de Textos (2015).
- [13] Rabello L., Yanamassu R., Torre Neto A., Molin J., Luchiarini Junior A., Simões M., Sistema de medida de condutividade elétrica do solo adaptado a um implemento agrícola (subsolador). Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão, Piracicaba-SP, Brasil (2008).
- [14] Silva R., Silva S., Souza L., Ruivo M., Comportamento granulométrico de um latossolo amarelo sob diferentes ecossistemas, Belém/PA. 67ª Reunião Anual da SBPC, São Paulo-SP, Brasil (2015).
- [15] Costa A., Mattos A., Variações sazonais da ilha de calor urbana na cidade de Belem – PA. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro-RJ, Brasil (2000).

- [16] Portela C., Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. Proceedings IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle-WA, EUA (1999).
- [17] Rocha P., “Introdução à modelagem de sistemas de aterramento”, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 89 p (2007).
- [18] Portela C., Grounding Requirement to Assure People and Equipment Safety Against Lightning. Proceedings IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington-DC, EUA (2000).
- [19] Verma J., Sharma A., K P., To evaluate the values of electrical conductivity and growth parameters of apple saplings in nursery fields. *International Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, v. 4, n. 3, p. 321-332 (2015).
- [20] Mendes D., Suporte meteorológico de superfície para o monitoramento de precipitação na Amazônia. X Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília-DF, Brasil (1998).
- [21] Primavesi A., “Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais”, Nobel (2002).
- [22] Ronquim C., Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Disponível em <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/882598/1/BPD8.pdf>>. Acesso em 15 Abr 2017
- [23] Vale Junior J., Souza M., Nascimento P., Cruz D., Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. *Revista Agro@mbiente Online*, v. 5, n. 2, p. 158-165 (2011).
- [24] Madari B., Cunha T., Novotny E., Milori D., Martin Neto L., Benites V., Coelho M., Santos, G., Matéria orgânica dos solos antrópicos da Amazônia (terra preta de índio): suas características e papel na sustentabilidade da fertilidade do solo. W. Teixeira, D. Kern, B. Madari, H. Lima, e W. Woods (Ed.), Embrapa Amazônia Ocidental (2009).
- [25] Alcântara G., Reis E., Queiroz D., Produtividade de culturas correlacionada com condutividade elétrica aparente de um solo sob plantio direto. *Revista Agrotecnologia*, v. 3, n. 2, p. 62-72 (2013)
- [26] Valente D., “Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão”, Tese de doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 120 p (2010).
- [27] Tognon A., Demattê J., Demattê J., Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da floresta amazônica e dos cerrados do Brasil central. *Scientia Agrícola*, v. 55, n. 3, p. 343-354 (1998).



Patologias Generalizadas e Avaliação da Depreciação Física pelo Modelo Ross-Heidecke Modificado em um Condomínio de Edifícios de Múltiplos Andares.

Jorge Oliveira

UniCEUB, Brasília, Brasil

João da Costa Pantoja

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Aline M. C. Santoro

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

Received: 04 Jun 2017 _____ / Accepted: 18 Jun 2017 _____ / Published: 27 Aug 2017 _____.

Abstract: It was believed, when the use of reinforced concrete began, that it was indestructible. However, in the course of time, not only has its vulnerability been discovered, but that the reinforced concrete has, in fact, a determinable life cycle. In Brazil, the manifestation of pathologies led to the discovery of a series of vices of construction and maintenance of both structures and secondary elements of buildings. With the development of the Ross-Heidecke model, the calculation of the physical depreciation can even help in the determination of the realty devaluation. The depreciation model used in this article is based on the further development of the Ross-Heidecke model, in which it is used to evaluate each element of the construction rather than the building in full. From visual inspections, photographic reports and calculations of the estimated life cycle and the state of conservation, it was possible to determine the physical depreciation of a multi-storey condominium.

Key words: Generalized pathologies; physical depreciation; conservation state; Ross-Heidecke model.

1. Introdução

O estudo e a análise das patologias da construção têm como objetivo determinar as suas origens, e se estão estabilizadas, de modo a estabelecer o grau de criticidade dos casos analisados para, então, determinar as ações

necessárias para corrigi-las. Para este fim, é necessário fazer inspeções visuais, ensaios técnicos e registros fotográficos a fim de determinar se a construção se encontra de acordo com as Normas Brasileiras e, posteriormente, definir se o problema provém da fase projetual, da fase construtiva ou da falta de manutenção.

O estudo das patologias tornou-se útil, inclusive, para a avaliação imobiliária, na medida em que contribuiu para a valoração da depreciação física do imóvel. Esta, por ainda encontrar-se em desenvolvimento, nem sempre foi considerada importante em uma avaliação imobiliária eficaz, sendo introduzida pela primeira vez no Modelo de Depreciação

Autora correspondente: Aline M. C. Santoro, arquiteta, áreas de pesquisa: estruturas em concreto armado. E-mail: alinemcsantoro@gmail.com.

de Ross-Heidecke. Entretanto, este carecia de melhorias, pois ainda não considerava como relevantes os reparos e as substituições feitas nas edificações, que poderiam aumentar a vida útil, além de relevar os aspectos individuais de cada elemento construtivo.

Por esse motivo, o presente artigo estabelece o método de Pimenta [5] para a análise qualitativa da depreciação física do Condomínio Portal das Andorinhas, em Águas Claras, DF. Esse método procura estabelecer a depreciação física do imóvel a partir da soma das partes, por meio de uma valoração da depreciação individual de cada elemento construtivo e da porcentagem que esse elemento representa no valor total da edificação. Foram escolhidos, para o caso em tela, quatro parâmetros de análise: cortinas de contenção; revestimento de fachadas; pisos das áreas comuns e instalações.

Para o presente estudo, foi observado o fluxograma definido e proposto por Pimenta [5], conforme a Figura 1. Primeiramente, reuniram-se as informações sobre a edificação: o tipo de edificação; o histórico da construção e a existência ou não de obras de manutenção. Posteriormente, foi definida a estrutura de custo, a fim de estabelecer a porcentagem da construção representada pelos elementos problemáticos e o peso destes no custo total (E_i). A estrutura de custo baseia-se na proposta de Bezelga (apud [5]), pois estabelece a valoração dos elementos da construção em proporção ao custo total da construção.

Estabeleceu-se, então, a idade dos diferentes elementos construtivos (IA_i), ao levar em consideração a existência ou não de obras de reabilitação ou manutenção, e, em seguida, a definição da vida útil de projeto (VU_i), que, ao contrário, é retirada de bibliografias especializadas. A etapa subsequente – a definição do estado de conservação (EC_i) – conta, em grande parte, com a experiência do avaliador, de forma a quantificar adequadamente a depreciação física do imóvel. Baseada no modelo de Ross-Heidecke, onde a quantificação é do imóvel em geral, a quantificação agora será de cada elemento separadamente.

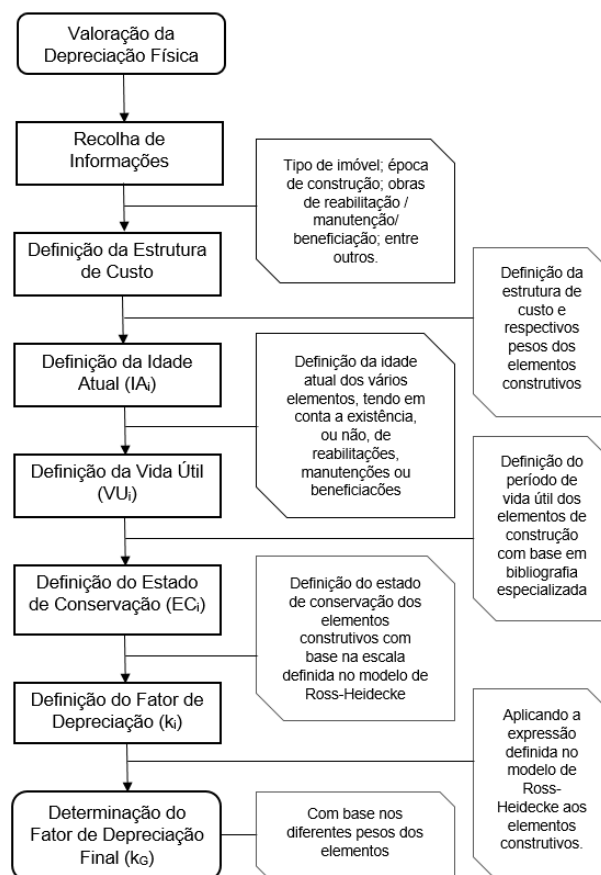


Figura 1: Fluxograma de operações [5].

A partir dos valores identificados nas etapas anteriores, define-se o fator de depreciação física de cada elemento (k_i), a partir da seguinte equação:

$$k_i = \frac{1}{2} \left[\frac{IA_i}{VU_i} + \left(\frac{IA_i}{VU_i} \right)^2 \right] + \left[1 - \frac{1}{2} \left[\frac{IA_i}{VU_i} + \left(\frac{IA_i}{VU_i} \right)^2 \right] \right] \times EC_i,$$

onde:

IA_i = Idade atual (em anos) do elemento i

VU_i = Vida útil (em anos) do elemento i

EC_i = Estado de conservação (em %) do elemento i

Estabelecidos os fatores de depreciação individuais (k_i) e sua porcentagem de custo relativo ao global do imóvel (E_i), é então possível calcular o fator de depreciação global, k_G , por meio do somatório das multiplicações destas variáveis da seguinte forma:

$$k_G = \sum_{i=1}^j (k_i \times E_i),$$

onde:

i = Elemento objeto de depreciação

j = Número de elementos objetos de depreciação

k_i = Fator de depreciação física do elemento i

E_i = Peso do elemento i no custo total

1.1 Anamnese

O Condomínio Porta das Andorinhas, visto na Figura 2, é um prédio residencial localizado na Quadra 203, Praça das Andorinhas, Lote 06, em Águas Claras DF.



Figura 2: Vista do Condomínio Portal das Andorinhas, Fachada Principal. Fonte: acervo do autor.

Situado em um terreno de oito mil metros quadrados, possui quatro blocos dispostos conforme a Figura 3, tendo cada um: dois subsolos, um pavimento térreo, quinze pavimentos tipos e uma cobertura com terraço, reservatórios superiores, barriletes e casas de máquinas. Cada pavimento tipo conta com quatro apartamentos, somando um total de duzentos e quarenta apartamentos. No pavimento térreo ainda se encontram

espaços coletivos como piscina, quadras de esporte, jardins, salão de festas, dentre outros.



Figura 3: Identificação dos blocos do condomínio. Fonte: Google Maps, 2015.

Cada bloco integrante do condomínio foi finalizado individualmente e obteve seu Habite-se parcial em épocas diferentes. Enquanto entregou-se o Bloco A em 2005, o Bloco D, e, portanto, o Habite-se Total, foi entregue somente em 2010. Todavia, durante o levantamento histórico da edificação, observou-se que foram solicitados serviços de manutenção corretiva desde a entrega do Bloco A, acarretadas principalmente por falhas de execução.

1.2 Depreciação

Ao analisar o condomínio sob os quatro parâmetros estabelecidos anteriormente, pode-se, então, partir para o cálculo do fator de depreciação física do Condomínio Portal das Andorinhas, para o qual foi utilizado o método proposto por Pimenta [5].

No caso dos edifícios em estudo, uma vez que o primeiro edifício foi concluído em 2005 e o último em 2010, estabeleceu-se, como média, o ano de 2007 para o cálculo da idade atual dos elementos, ou seja, na data da vistoria – 2015 – a Idade Atual dos elementos (IA_i) era igual a 8 anos. Como não foram identificadas obras de

manutenção ou revitalização, o valor de 8 anos se aplica a todos os elementos estudados.

A vida útil (VU_i) é singular para cada elemento e foi atribuída com base nos valores apresentados por Pimenta [5] da seguinte maneira:

- Parâmetro 01: Fundação, $VU_i = 200$ anos
- Parâmetro 02: Revestimentos, $VU_i = 20$ anos
- Parâmetro 03: Estrutura, $VU_i = 100$ anos
- Parâmetro 04: Instalações, $VU_i = 50$ anos

Foi observado que as paredes do subsolo apresentavam infiltração, eflorescência e trincas; as fachadas careciam de juntas, revestimento e manutenção preventiva; os pisos, tanto dos subsolos quanto do térreo, apresentavam falhas devido ao mau posicionamento ou abstenção de juntas de dilatação estrutural; as instalações elétricas, hidráulicas e de combate a incêndio apresentavam uma série de irregularidades. A partir desses dados, pode-se então estimar o valor da depreciação física atual do condomínio.

2. Metodologia

O presente estudo seguiu a metodologia proposta por Pimenta [5], conforme previamente exposto. Iniciou-se com um estudo sobre o condomínio, seu histórico, projeto e qualquer documentação disponível. Foram realizadas, então, vistorias nos elementos que apresentavam os maiores problemas, em conjunto com relatório fotográfico e croquis para possibilitar a avaliação da degradação. Com os dados reunidos, foram executados os cálculos tanto do estado de conservação (EC_i), quanto do fator de depreciação física total (k_i) e de cada parâmetro individualmente (k_G).

3. Resultados e Discussões

3.1 Fundação

O edifício do condomínio em análise concentra vários problemas nas paredes dos subsolos. As paredes

apresentam manifestação de infiltração, conforme Figura 4, e de eflorescência, conforme Figura 5, ambas decorrentes de dois problemas: a má impermeabilização das cortinas de contenção e o dimensionamento inadequado do sistema de drenagem.



Figura 4: Manifestação patológica do tipo infiltração na cortina do 2º Subsolo. Fonte: acervo do autor.

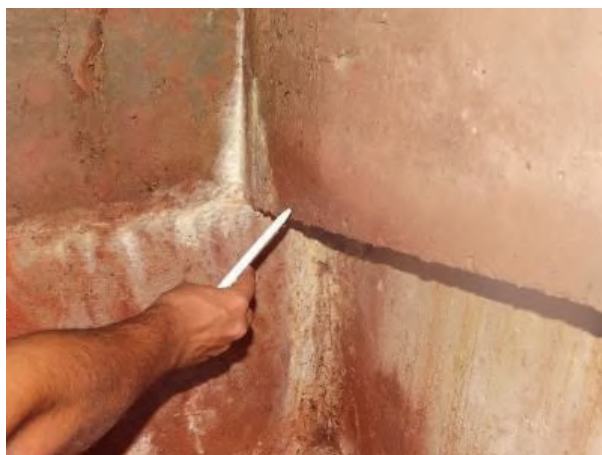


Figura 5: Manifestação patológica tipo eflorescência na cortina do 2º Subsolos. Fonte: acervo do autor.

Em se tratando da impermeabilização das cortinas de contenção, verificou-se que na cortina leste, divisa com o Condomínio Brisas, não foi executado nenhum tipo de tratamento para o sistema de impermeabilização em nenhum dos subsolos. Na cortina oeste, encontram-se diversos pontos de infiltração devidos a problemas de vedação das tubulações de esgoto, o que evidencia a

queda de desempenho do sistema. A cortina sul apresenta um trecho da rampa que não foi impermeabilizado, além de se contar outros pontos de infiltração provenientes do jardim. Por final, apenas a cortina norte teve um tratamento adequado e encontra-se em condições de uso e operação.

Ainda, o complexo apresenta graves problemas quanto ao sistema de drenagem nos subsolos. Verificou-se que o projeto de drenagem foi executado somente para a cortina norte e esta se encontra em estado crítico. Além do mais, constatou-se que a execução das caixas de passagem não foi feita de acordo com a boa técnica, pois apresentam acúmulo de água, conforme se evidencia na Figura 6, e as de concreto armado estão em desacordo com a NBR 6118 (2014) [3], uma vez que as ferragens encontram-se expostas e corroídas.



Figura 6: Caixas de passagem com acúmulo de água. Fonte: acervo do autor.



Figura 7: Infiltração no reservatório inferior de água potável do Bloco B. Fonte: acervo do autor.

Outrossim, percebeu-se que o lençol freático se eleva nos períodos de chuva e, consequentemente, a ausência do sistema de drenagem em todo o perímetro do condomínio causa ainda mais infiltrações. A ocorrência de infiltração mais crítica foi verificada nos reservatórios inferiores de água potável, como mostra a Figura 7, tendo como consequência o risco de contaminação da água potável.

Quase todos os subsolos apresentaram fissuras decorrentes do mau dimensionamento, ou inexistência, das juntas de dilatação estrutural. Na cortina norte do segundo pavimento, apesar da mesma contar com juntas verticais e horizontais, manifestaram-se fissuras em vários lugares, enquanto a ocorrência de fissuras no primeiro subsolo se deu por falta de juntas horizontais. Já, nas demais, não há nenhuma junta de dilatação, dando origem a trincas, como a demonstrada na Figura 8.



Figura 8: Manifestação patológica trinca na cortina do 1º Subsolo. Fonte: acervo do autor.



Figura 9: Piso de concreto do 2º subsolo com trinca. Fonte: acervo do autor.

Devido aos fatores aqui apresentados, em especial a brusca perda da vida útil do sistema de impermeabilização e a infiltração nos reservatórios de água potável, foi obtido o fator do estado de conservação para o parâmetro fundação em 52,6%, ou seja, demanda reparos importantes.

3.2 Estrutura

As juntas de dilatação têm como objetivo permitir a movimentação da estrutura. No decorrer da vistoria, foram identificadas várias trincas nos pisos dos dois subsolos, conforme Figura 9, devido à inexistência de juntas em alguns pontos e à localização errada em outros. A sua ausência, em conjunto com a movimentação estrutural, provoca fissuras nos pontos em que elas deveriam existir e, mesmo tendo sido feito tratamento nas trincas existentes, estas voltaram a ocorrer, pois indicam o local onde deveriam existir juntas.

As juntas devem ser tratadas com sistemas que propiciem a movimentação da estrutura de tal maneira que não se rompam. Precisam ser empregados materiais altamente deformáveis, como borracha alveolar e espuma de poliuretano, devendo estes sofrer manutenção constante, pois seu rompimento torna a estrutura vulnerável à passagem de água, causando infiltrações.



Figura 10: Junta de dilatação com falhas ocasionando infiltrações no subsolo. Fonte: acervo do autor.

As juntas existentes no pavimento térreo apresentam baixo desempenho (Figura 10) e, em conjunto ao desnivelamento do piso e falta de caimento para os ralos, contribui para vários pontos de alagamento no subsolo. A estrutura, portanto, carece de reparos simples, e, dessa forma, se configura em estado de conservação de 18,1%.

3.3 Revestimento

Os revestimentos de paredes externas devem observar a NBR 13755 [4], sendo necessárias juntas de movimentação para que o revestimento possa trabalhar sem ocasionar falhas. As fachadas do condomínio se encontram em estado regular, porém apresentam

complicações devidas a falhas de construção e à falta de manutenção periódica por parte dos condôminos.

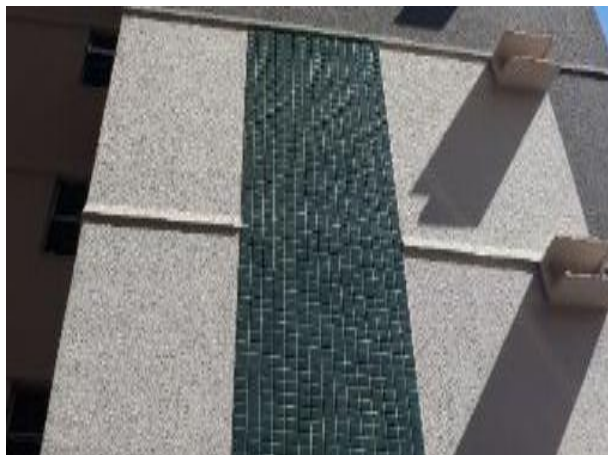


Figura 11: Parte da fachada do edifício onde não existem as juntas de movimentação. Fonte: acervo do autor

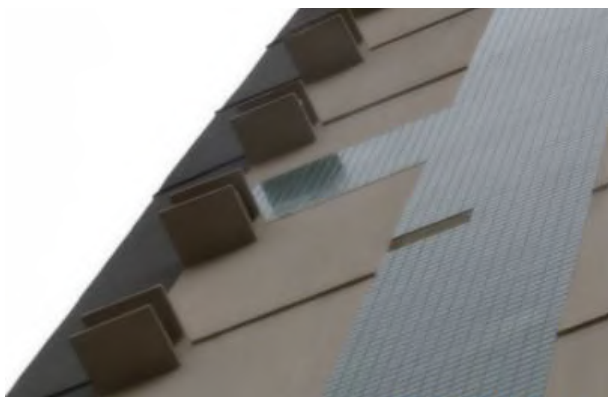


Figura 12: Deslocamento do revestimento cerâmico do bloco B. Fonte: acervo do autor.

A inexistência de juntas de dessolidarização, evidenciada pela Figura 11, é a maior causa do problema, pois acarreta tanto o estufamento das placas cerâmicas quanto o deslocamento das mesmas, conforme se vê na Figura 12.

A falta de manutenção periódica pode ocasionar outros problemas. Na Figura 13, é possível observar o deslocamento das pingadeiras na fachada, fato que, se não for resolvido prontamente, pode levar a problemas mais graves de infiltração.



Figura 13: Parte da fachada do edifício que apresenta deslocamento da pingadeira. Fonte: acervo do autor.

Em consequência às patologias apresentadas nos revestimentos das fachadas, tanto por falta de manutenção como por erro de dimensionamento, obteve-se o estado de conservação (EC_i) igual a 18,1%, requerendo apenas reparos simples.

3.4 Instalações

Os quadros elétricos de distribuição de energia são os equipamentos onde se encontram os disjuntores dos circuitos alimentadores de energia provenientes de um cálculo de demanda segundo a NBR 5410 de 2014 [2]. O cálculo dos circuitos, dos disjuntores e o dimensionamento da fiação são feitos em projeto e aprovados pela CEB para cada empreendimento.



Figura 14: Quadro elétrico do bloco B: inexistência de DR, fiação subdimensionada e disjuntores com amperagem abaixo de projeto. Fonte: acervo do autor.



Figura 15: Caixa de passagem com fiação elétrica exposta e sem eletrodutos. Fonte: acervo do autor.

Todavia, os quadros elétricos encontrados no Condomínio Portal das Andorinhas, conforme mostra a Figura 14, apresentaram diversas falhas graves, tais como a ausência do DR – responsável por desarmar o quadro no caso de um curto circuito –, fiações e

disjuntores com dimensão abaixo de projeto e inexistência de aterramento em vários circuitos.

Observou-se ainda, conforme a Figura 15, que as caixas de passagem da fiação do jardim continham fios elétricos sem a devida proteção – eletrodutos ou mangueiras – deixando o ambiente suscetível a perigos, como choques elétricos, incêndios e explosões.

O sistema de combate a incêndio dos edifícios do condomínio está com problemas de funcionamento e totalmente aquém da NBR 10897 de 2014 [1]. Esta estabelece que os bicos devem estar a uma distância máxima do forro de trinta centímetros, porém os existentes estão entre cinquenta e quatro e oitenta centímetros (Figura 16).

Existem também áreas dos dois subsolos que não contam com nenhum bico de sprinkler e, em consequência, estão desprotegidas de incêndio. Ademais, apresenta risco grave a ineficiência do grupo de bombas do sistema. A ligação das bombas deveria ser independente e acionada por motores elétricos, devendo a queda da pressão na rede ocasionar a partida automática das bombas. Todavia, o conjunto motor bomba, até a data da vistoria, não se encontrava em funcionamento.



Figura 16: Posicionamento inadequado dos bicos de sprinkler em desacordo com a Norma NBR 10897/2014. Fonte: acervo do autor.

Em relação às instalações hidráulicas e de esgoto, foi observado que houve uma movimentação de terras devido ao alagamento das áreas de jardins que danificou várias tubulações de esgoto nos subsolos. Outrossim, constatou-se que os apartamentos dos primeiros três andares do Bloco A apresentam queda e irregularidade de pressão da água.

As graves falhas de construção relativas às instalações atribuem a estas um estado de conservação de 52,6%, pois apresentam inúmeros riscos aos usuários. Precisam, por conseguinte, de reparos importantes.

4. Diagnóstico

Para melhor compreensão da influência da depreciação física advinda das patologias apresentadas sobre o valor monetário dos quatro fatores, foram estabelecidos quatro cenários. O primeiro seria um cenário ideal, levando em consideração nenhum vício construtivo ou de manutenção. O segundo representa uma situação mais realista, onde o edifício estaria em condições regulares. O próximo cenário leva em consideração o estado de conservação levantado em obra por meio de vistorias, variando o valor de acordo com a necessidade de reparos e a experiência do autor. O último cenário estabelece, ainda, uma variação na idade atual dos parâmetros, pois ao invés de ser calculado pela idade real, estima-se a idade aparente.

Cada cenário é então calculado de acordo com o modelo Ross-Heidecke modificado por Pimenta [5] e ainda adaptado a uma situação de somente quatro parâmetros, pois são desconsideradas as áreas da edificação onde não constam patologias. A estrutura de custos calculada, portanto, leva em conta os quatro elementos estabelecidos – fundação, revestimentos, estrutura e instalações. Estabeleceu-se, portanto, o peso de cada parâmetro (E_i) de acordo com seu custo relacionado ao valor total das obras de recuperação dos quatro.

Para o último cenário, estabeleceu-se, ainda, uma outra mudança no modelo de Pimenta [5], levando em

conta não somente o nível de depreciação, mas também a idade aparente dos parâmetros.

4.1 Cenário 01

Dados:

- Parâmetro 01: Fundação, $VU_i = 200$ anos; $EC_i =$ Entre nova e regular (0,32%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 2\%$
- Parâmetro 02: Estrutura, $VU_i = 100$ anos; $EC_i =$ Entre nova e regular (0,32%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 9,6\%$
- Parâmetro 03: Revestimentos, $VU_i = 20$ anos; $EC_i =$ Entre nova e regular (0,32%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 67,5\%$
- Parâmetro 04: Instalações, $VU_i = 50$ anos; $EC_i =$ Entre nova e regular (0,32%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 20,9\%$

Tabela 1: Cenário 01

Sistemas		1. Fundações	2. Estrutura	3. Revestimentos	4. Instalações
	EC_i	0,003	0,003	0,003	0,003
	E_i	0,020	0,096	0,675	0,209
	$C*EI$	0,000	0,000	0,002	0,001
	IA_i	8	8	8	8
	VU_i	200	100	20	50
	(IAI/VUI)	0,040	0,080	0,400	0,160
	$(IAI/VUI)^2$	0,002	0,006	0,160	0,026
	$PARC1$	0,021	0,043	0,280	0,093
	$PARC2$	0,003	0,003	0,002	0,003
	k_i	0,024	0,046	0,282	0,096
	k_G	0,215			

4.2 Cenário 02

Dados:

- Parâmetro 01: Fundação, $VU_i = 200$ anos; $EC_i =$ regular (2,52%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 2\%$
- Parâmetro 02: Estrutura, $VU_i = 100$ anos; $EC_i =$ regular (2,52%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 9,6\%$
- Parâmetro 03: Revestimentos, $VU_i = 20$ anos; $EC_i =$ regular (2,52%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 67,5\%$
- Parâmetro 04: Instalações, $VU_i = 50$ anos; $EC_i =$ regular (2,52%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 20,9\%$

Tabela 2: Cenário 02

Sistemas		1. Fundações	2. Estrutura	3. Revestimentos	4. Instalações
	EC_i	0,025	0,025	0,025	0,025
	E_i	0,020	0,096	0,675	0,209
	$C*EI$	0,001	0,002	0,017	0,005
	IA_i	8	8	8	8
	VU_i	200	100	20	50
	(IAI/VUI)	0,040	0,080	0,400	0,160
	$(IAI/VUI)^2$	0,002	0,006	0,160	0,026
	$PARC1$	0,021	0,043	0,280	0,093
	$PARC2$	0,025	0,024	0,018	0,023
	k_i	0,045	0,067	0,298	116
	k_G	0,233			

4.3 Cenário 03

Dados:

- Parâmetro 01: Fundação, $VU_i = 200$ anos; $EC_i =$ Reparos importante (52,6%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 2\%$
- Parâmetro 02: Estrutura, $VU_i = 100$ anos; $EC_i =$ Reparos simples (18,1%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 9,6\%$

- Parâmetro 03: Revestimentos, $VU_i = 20$ anos; $EC_i =$ Reparos simples (18,1%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 67,5\%$
- Parâmetro 04: Instalações, $VU_i = 50$ anos; $EC_i =$ Reparos importante (52,6%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 20,9\%$

Tabela 3: Cenário 03

Sistemas		1. Fundações	2. Estrutura	3. Revestimentos	4. Instalações
	EC_i	0,526	0,181	0,181	0,526
	E_i	0,020	0,096	0,675	0,209
	$C*EI$	0,011	0,017	0,122	0,110
	IA_i	8	8	8	8
	VU_i	200	100	20	50
	(IAI/VUI)	0,040	0,080	0,400	0,160
	$(IAI/VUI)^2$	0,002	0,006	0,160	0,026
	$PARC1$	0,021	0,043	0,280	0,093
	$PARC2$	0,515	0,173	0,130	0,477
	k_i	0,535	0,216	0,410	570
	k_G	0,427			

4.4 Cenário 04

Dados:

- Parâmetro 01: Fundação, $VU_i = 200$ anos; $EC_i =$ Reparos importante (52,6%); $IA_i = 100$ anos; $E_i = 2\%$
- Parâmetro 02: Estrutura, $VU_i = 100$ anos; $EC_i =$ Reparos simples (18,1%); $IA_i = 15$ anos; $E_i = 9,6\%$
- Parâmetro 03: Revestimentos, $VU_i = 20$ anos; $EC_i =$ Reparos simples (18,1%); $IA_i = 8$ anos; $E_i = 67,5\%$
- Parâmetro 04: Instalações, $VU_i = 50$ anos; $EC_i =$ Reparos importante (52,6%); $IA_i = 25$ anos; $E_i = 20,9\%$

Tabela 4: Cenário 04

Sistemas		1. Fundações	2. Estrutura	3. Revestimentos	4. Instalações
	EC_i	0,526	0,181	0,181	0,526
	E_i	0,020	0,096	0,675	0,209
	$C*EI$	0,011	0,017	0,122	0,110
	IA_i	100	15	8	25
	VU_i	200	100	20	50
	(IAI/VUI)	0,500	0,150	0,400	0,500
	$(IAI/VUI)^2$	0,250	0,023	0,160	0,250
	$PARC1$	0,375	0,086	0,280	0,375
	$PARC2$	0,329	0,165	0,130	0,329
	k_i	0,704	0,252	0,410	0,704
	k_G	0,462			

4.4 Resultado

Como se pode perceber pelas Tabelas 1, 2, 3 e 4, há um acréscimo significativo do fator de depreciação global (k_G) entre os cenários 2 e 3. O k_G , nesse caso, representa um acréscimo de aproximadamente 20% entre uma situação ideal realista – sem vícios de construção ou manutenção – e a situação atual aparente. Esse valor significa um acréscimo proporcional ao custo de manutenção. Percebe-se, ainda, pela Figura 17, uma diferença de aproximadamente 3,5% entre os cenários 3 e 4, ou seja, ao considerar a idade aparente ao invés da idade real.

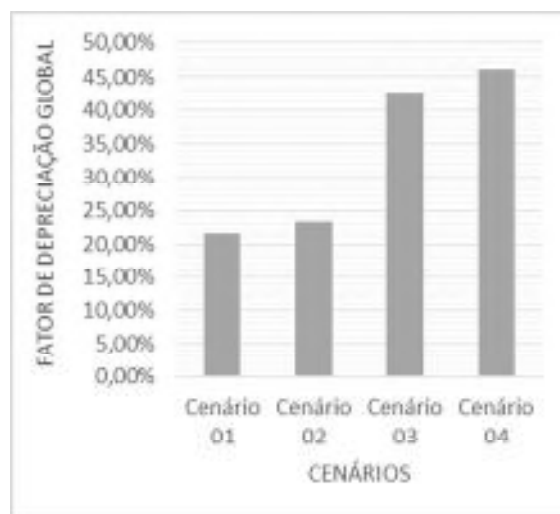


Figura 17: Variação dos fatores de depreciação global (k_G) para os quatro cenários.

5. Conclusões

As patologias apresentadas no Condomínio Portal das Andorinhas possibilitaram a análise, a partir do modelo de Pimenta [5], dos fatores de depreciação dos quatro parâmetros que apresentavam vício de construção e manutenção. Foram, inicialmente, realizadas vistorias, registros fotográficos e pesquisas documentais sobre o complexo habitacional. A partir dos dados obtidos, foram calculadas as constantes requeridas pelo modelo escolhido, para, então, obter o fator de depreciação individual e global dos quatro parâmetros.

Os dados obtidos possibilitaram a avaliação da desvalorização imobiliária, assim como o custo de recuperação. No caso em tela, verificou-se um acréscimo no custo de aproximadamente 20% de manutenção corretiva entre uma situação ideal e a situação atual, ressaltando, portanto, a importância do justo processo construtivo.

6. Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10897: Sistemas de proteção contra incêndio. Rio de Janeiro, 2014.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro, 2014.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13755: Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante - Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.
- [5] PIMENTA, J. C. Propostas de Desenvolvimento dos Modelos Clássicos de Depreciação Física na Avaliação Imobiliária. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Edificações, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.



Resíduos Sólidos na Produção de Artefatos de Concreto

Gisele Alves Fernandes

Curso de Engenharia Civil, Faculdade ICESP de Brasília

Nilo Silvio Costa Serpa

Professor Titular, Faculdade ICESP de Brasília

Received: 16 Jun 2017 / Accepted: 25 Jun 2017 / Published: 27 Aug 2017

Abstract: Present article discusses the production of concrete artifacts that use in their composition recycling aggregates of *Solid Waste from Construction and Demolition* (SWCD). The study was designed as experimental / comparative, with destructive tests of proof bodies made with recycled aggregates (test group) and with traditional aggregates (control group). Subsequent statistical analysis of the data collected from the comparison between these groups was conducted. Also, during the experiments, data were collected on the structural characteristics of the artifacts, as well as on the processes involved in recycling. The optimal dosage for each type of artifact produced with recycled aggregates was found, demonstrating that the choice of recycled materials could be an economical and environmentally sustainable solution in the context of the eco-innovations.

Keywords: recycling; solid waste; concrete artifacts.

1. Introdução

Com o crescimento desordenado das grandes cidades, aliado ao avanço tecnológico e industrial, um expressivo percentual dos recursos naturais tem sido consumido, provocando danos ao meio ambiente. A construção civil aparece em destaque como agente poluidor e consumidor de recursos, posto que é atividade geradora da maior parte dos resíduos sólidos

urbanos, tendo na indústria cimentícia e nas aplicações do cimento em canteiros de obras seus mais agressivos processos.

Considerando-se que já foi ultrapassada a capacidade da natureza para absorver o volume descomunal de resíduos produzidos anualmente pela humanidade, é sensato atentar para as recentes mudanças climáticas e o aumento dos desastres naturais, avaliando cuidadosamente até que ponto os impactos ambientais antropogênicos afetarão o globo terrestre de modo dramático em questão de poucas décadas. As políticas públicas mundiais sobre meio-ambiente resumem considerações de que, se algo não for feito, o custo daqueles impactos será

Autora correspondente: Gisele Alves Fernandes, Discente em Engenharia Civil, áreas de pesquisa: reciclagem de resíduos sólidos, logística de canteiro de obras. E-mail: gisele.af.bsb@gmail.com.

extremamente alto, certamente conduzindo a cenários sombrios.

No que concerne a construção civil, identifica-se no concreto seu maior vilão. É constituído pela mistura de cimento, água, agregado graúdo (brita ou cascalho) e agregado miúdo (areia). Trata-se do material mais utilizado em canteiros de obras, de modo que o presente estudo evidencia os problemas associados ao acúmulo de seus resíduos no montante de resíduos da construção e demolição (RCD), destacando as vantagens de sua reutilização.

2. A Situação Atual

Apesar da ascensão do aço com suas vantagens plásticas e como promotor de uma produção mais limpa, o concreto é ainda o material mais requisitado na área da construção civil. No entanto, sua produção causa a emissão de gases poluentes, como o CO_2 , sendo seus destinos finais, quase sempre, os lixões a céu-aberto — já banidos no Primeiro Mundo —, causando assim sérios malefícios ecológicos.

É premente a adoção de soluções que busquem mitigar os efeitos gerados pela construção civil, os quais são globalmente prejudiciais sob vários aspectos. A utilização em escala cada vez maior de recursos não renováveis, como calcário na produção de cimento, rochas e areias, pressiona cada vez mais as fronteiras naturais da exploração em direção ao esgotamento das reservas. A própria extração de minerais provoca estragos no entorno da atividade, o que compromete o equilíbrio ecológico em favor do “desenvolvimento” econômico. Sob o prisma da gestão de canteiro de obras e da cadeia produtiva da construção civil, a elevada geração de resíduos mostra-se negligenciada quanto aos processos de classificação e destinação segura e inócua [8].

A reciclagem do concreto endurecido em agregado graúdo para ser utilizado novamente em concretos estruturais tem se mostrado uma alternativa de fácil

argumento junto a construtores e engenheiros. Contudo, há que se buscar maior fundamentação teórico-prática no que tange as características técnicas dos materiais originados da reciclagem.

Por falta de um parâmetro que sirva de índice de qualidade para os agregados reciclados, estudos têm abordado diferentes formas de utilizá-los. Uma delas é a utilização apenas como substituto de parte do agregado natural (miúdo e/ou graúdo), de forma a não afetar tanto as propriedades do concreto. Outra forma tem sido especulada a partir da investigação do efeito de várias composições do agregado sobre as propriedades do concreto, como que buscando uma composição ideal. De todo modo, assume-se que a porosidade do material é uma propriedade com grande potencial para servir como parâmetro de controle do agregado reciclado, podendo ser monitorada por meio da massa específica do agregado e/ou pela capacidade de absorção de água.

3. O Estudo Realizado

Trata-se de investigação conduzida ao longo de um ano, segundo procedimentos criteriosos de modo a minimizar o risco de bias nas observações registradas. As misturas definidas no estudo de dosagem realizado foram analisadas a partir das propriedades constatadas nos estados fresco e endurecido. Para substituição dos agregados convencionais pelos agregados reciclados na produção de um concreto sustentável que pudesse substituir o concreto convencional, foram feitos os ensaios de caracterização do RCD, assim como os ensaios para a análise das características deste novo concreto, com um traço padrão.

Para a absorção de água, o agregado graúdo reciclado ensaiado apresentou resultado muito parecido ao do grupo de controle, com diferença registrada de 2,3% a menos para o grupo de teste. Quanto à resistência, considerando-se o RCD a 25%, foram alcançados 24,96 Mpa conforme mostrado na Figura 1. Durante os procedimentos de teste, foram

levadas em conta as importantes observações de Modler, quando afirma que

“A análise mais importante a ser feita nesse caso relaciona-se ao fato de que os maiores índices de absorção dos agregados de concreto não acarretam aumento da absorção do concreto endurecido. Desta forma, a influência que o tipo de agregado exerce sobre a absorção do concreto está relacionada ao arranjo granular entre os diferentes agregados” [9].

Os resultados corroboram a aferição com relação à quantidade de água necessária quando feita a dosagem. Na ocasião, ficou claro que a presença de agregado reciclado tornava o ajuste da trabalhabilidade uma atividade bastante delicada. Quanto mais tempo passava, desde o início da mistura, maior a necessidade de manipulação do concreto.

A meta neste ponto da pesquisa passou a ser, então, ajustar o *slump* da mistura o mais rápido possível, sob pena de se abandonar a amostra devido a esta apresentar valores de trabalhabilidade além do especificado com mínimas quantidades de água adicionadas.

A partir dos resultados médios obtidos da compressão dos blocos experimentais, observou-se que o valor mínimo de 4,5 Mpa estabelecido pela norma NBR 6136 (ABNT, 1994) foi alcançado com a idade de 3 (três) dias.

4. Discussão

No Brasil, grupos de ambientalistas e estudiosos vêm alertando sobre a necessidade de o país posicionar-se mais firmemente acerca de sustentabilidade, tema que avança e envolve profissionais de diversas áreas; estes, em certos momentos, precisam se reunir e trabalhar em conjunto na busca de soluções para os desafios propostos. Como observa Corrêa,

“A incorporação de práticas de sustentabilidade na construção é uma tendência crescente no mercado. Sua adoção é <<um caminho sem volta>>, pois diferentes agentes — tais como governos, consumidores, investidores e associações — alertam, estimulam e pressionam o setor da construção a incorporar essas práticas em suas atividades” [6].

Corrêa também menciona que as construções, as reformas, as ampliações e as demolições são atividades altamente geradoras de RCD, sendo cerca de 60% somente de reformas [6]. O mesmo comentário é feito pela Associação Brasileira dos Escritórios de Arquitetura - ASBEA, o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável – CBCS, e outras instituições que apresentam diversos princípios básicos da construção sustentável, dentre os quais destacamos:

- Aproveitamento de condições naturais locais;
- Utilização mínima de terreno e integração com o ambiente natural;
- Análise do entorno;
- Minimização de impactos no entorno – paisagem, temperaturas e concentração de calor, sensação de bem-estar;
- Qualidade ambiental interna e externa;
- Sustentabilidade logística da implantação da obra;
- Adaptação às necessidades atuais e futuras dos usuários;
- Emprego de matérias-primas que contribuam com a eco-eficiência do processo;
- Redução do consumo energético;
- Redução do consumo de água;
- Redução, reutilização, reciclagem e disposição correta dos resíduos sólidos;
- Introdução de inovações tecnológicas sempre que possível e viável;
- Educação ambiental: conscientização dos envolvidos no processo (*stakeholders*).

Assim, em 2002, a Resolução CONAMA 307, posteriormente alterada pela Resolução 348/2004, determinou que o gerador do resíduo sólido fosse o responsável pelo seu gerenciamento. Essa determinação representou um importante marco legal, determinando responsabilidades e estipulando a segregação dos resíduos em diferentes classes, tornando obrigatórios seus encaminhamentos para reciclagem ou disposição final adequada.

Porto informa que diante de tantas razões, a produção dos RCD é um problema relacionado ao projeto pela falta de precisão nos memoriais prescritivos, baixa qualidade dos materiais adotados, falta de definições e/ou detalhamentos satisfatórios relacionados a processos de reutilização e reciclagem no canteiro. De acordo com este autor,

“O entulho é um dos resíduos industriais mais heterogêneos; ele é constituído de restos de praticamente todos os materiais de construção (argamassa, areia, cerâmicas, concretos, madeiras, metais, papéis, plásticos, pedras, tijolos, tintas, etc.)” [10].

O avanço em termos da legislação veio quando o Governo Federal, por intermédio da Lei nº 12 305/2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pela qual criou os instrumentos necessários para o Brasil enfrentar os principais problemas ambientais, econômicos e sociais que surgem quando o manejo dos resíduos sólidos é feito de forma inadequada [3,4]. Porto explica que

“Os entulhos podem gerar riscos sanitários e ambientais, principalmente na disposição final inadequada. Seu descarte indevido causa problemas sanitários (enfermidades veiculadas por vetores e poluentes químicos), ambientais (contaminação do solo e da água subterrânea), sociais (catação), econômicos (desvalorização de áreas, comprometimento do sistema de drenagem, desperdício de materiais e energia)” [10].

Segundo a resolução 307 do CONAMA, os resíduos da construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras, bem como os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha” [1].

Contudo, o fato dessa Resolução não incluir os resíduos de amianto na Classe D gerou, como consequência, uma nova publicação [2] constituída pela Resolução 348/2004 que acrescenta o amianto na Classe D (Tabela 1).

A indústria nacional tem no setor da construção civil um de seus principais segmentos, sendo por vezes, exageradamente, considerado um termômetro indicativo do crescimento econômico e social. Por constituírem setor que utiliza um montante expressivo de recursos naturais, as obras da construção civil colaboram para a alteração da paisagem e, como quaisquer atividades desenvolvidas pela sociedade, geram resíduos. Por um lado, se houver a disposição imprópria destes restos, problemas de ordem estética, ambiental e de saúde pública podem ser gerados. De outro lado, os resíduos constituem um problema da gestão regional/municipal, sobrecarregando, assim, os sistemas de limpeza pública.

Para facilitar a implantação de um Plano Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos, a Resolução CONAMA 307 Art. 3º estabelece que “Os resíduos da construção civil deverão ser classificados, para efeito desta Resolução, da seguinte forma:

I – Classe A – são resíduos reutilizáveis ou recicláveis como os agregados:

a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

II – Classe B – são resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;

III – Classe C – são resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação;

IV – Classe D – são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde” [1,5].

A Tabela 1 adapta essa classificação e a apresenta de forma mais detalhada.

As quantidades no volume dos RCD dão um tom de urgência para a questão, já que a estimativa é de que venha a representar de 50 a 70% da massa de resíduos sólidos urbanos dos 5.564 municípios brasileiros. Cerca de 72% dos municípios avaliados possuem serviço de manejo de resíduos de construção civil, sendo que 2.937 (aproximadamente 53%), exercem o controle sobre os serviços de terceiros para os resíduos especiais. A maioria dos municípios (em torno de 55%) exerce controle sobre o manejo de resíduos especiais, executado por terceiros no caso do RCD.

Através do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE publicou, em 2010, um mapa que identificou os municípios brasileiros que coletavam RCD, seja pelo próprio município, seja pela contratação de terceiros, e mapeou também os municípios que cobram pela prestação desses serviços [7]. A soma das quantidades em volume e peso dos RCD coletados representa uma estimativa nacional, chegando a aproximadamente 7.192.372,71 t/ano de origem pública, e 7.365.566,51 t/ano de origem privada. É razoável supor que estes quantitativos não representam a real situação, pois de acordo com dados levantados pelo IBGE, apenas 7,04% dos municípios considerados possuem alguma forma de processamento dos RCD.

A Lei nº 12.305/2010 preconiza a utilização dos chamados “3R”, quais sejam: **redução** da quantidade de resíduos gerados, tendo em vista que se deve evitar ao máximo a geração do resíduo; **reutilização** do resíduo em outro ponto da obra, evitando o desperdício de material que pode ser aproveitado; **reciclagem** do resíduo que não puder ser evitado/aproveitado nos processos anteriores. Essa reciclagem pode ser feita no próprio canteiro de obras ou em um local externo dedicado para esse fim. Infelizmente, as políticas públicas brasileiras projetadas para este fim ainda estão longe de uma aplicação plena e sujeita a processos fiscalizatórios rigorosos. Com efeito, Corrêa deixa claro que

“Os principais resultados produzidos pela reciclagem do entulho são os benefícios ambientais. A equação da qualidade de vida e da utilização não predatória dos recursos naturais é mais importante que a equação econômica. Os benefícios são conseguidos não só por se diminuir a deposição em locais impróprios como também por minimizar a necessidade de extração de matéria-prima em jazidas, o que nem sempre é adequadamente fiscalizado. Reduz-se, ainda, a necessidade de destinação de áreas públicas para a deposição dos resíduos” [6].

5. Conclusão

O presente estudo mostrou resultados animadores quanto ao emprego dos resíduos de concreto na produção de um concreto estrutural reciclado. Apesar da resistência que ainda existe quanto ao reaproveitamento dos RCD, os testes realizados mostraram que não há razão para semelhante resistência. O estudo também apresentou argumentos sociais e econômicos que esclarecem de maneira inequívoca a necessidade de eco-inovações na construção civil. Espera-se que este artigo motive outras pesquisas em processos de reciclagem, estimulando acadêmicos e empresários para a busca de processos que garantam mais qualidade de vida às gerações futuras.



6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do NIP a essa pesquisa.

7. Referências

- [1] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Diário Oficial de União, Brasília, DF. 17 de julho de 2002.
- [2] BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA N° 348, de 16 de agosto de 2004. Altera a Resolução CONAMA N° 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos. Diário Oficial de União, Brasília, DF. 17 de agosto de 2004.
- [3] BRASIL. Lei Federal N° 12.305/2010, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei n° 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 02 de agosto de 2010.
- [4] BRASIL. Plano Nacional de Resíduos Sólidos, fevereiro de 2012.
- [5] CLASSIFICAÇÃO dos Resíduos na Construção Civil. Belém – PA, 18 Mar 2015. Disponível em: <http://www.portalesiduossolidos.com/classificacao-d-os-residuos-da-construcao-civil-no-brasil/>. Acessado em 28 de abril 2015.
- [6] CORRÊA, L. R. Sustentabilidade na Construção Civil. Monografia de Especialização, UFMG, Belo Horizonte - MG, 2009.
- [7] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- [8] KARPINSK, A. L., *et al.* Gestão Diferenciada de Resíduos da Construção Civil: Uma Abordagem Ambiental. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2009.
- [9] MODLER, L. E., POZZOBON, C. E., 2008. Avaliação da Viabilidade Técnica de Concreto Elaborado com Agregado Graúdo Reciclado. *Teoria e Prática na Engenharia Civil* 11, 43-53.
- [10] PORTO, M. E., SILVA, S. V. Reaproveitamento dos Entulhos de Concreto na Construção de Casas Populares. Rio de Janeiro: ENEGEP, 2008.

TIPO RCC	DEFINAÇÃO	EXEMPLOS	DESTINAÇÕES
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados.	- Resíduos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; - Resíduos de componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto; - Resíduos oriundos de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.	Reutilização ou reciclagem na forma de agregados, ou encaminhamento às áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir utilização ou reciclagem futura.
Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações.	- Plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros.	Reutilização/reciclagem ou encaminhamento às áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir utilização ou reciclagem futura.
Classe C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis.	- Produtos oriundos do gesso.	Armazenamento, transporte e destinação final conforme normas técnicas específicas.
Classe D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção.	- Tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados, oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.	Armazenamento, transporte, reutilização e destinação final conforme normas técnicas específicas.

Tabela 1 – Classificação dos RCD segundo a Resolução 307: 2002 – CONAMA.

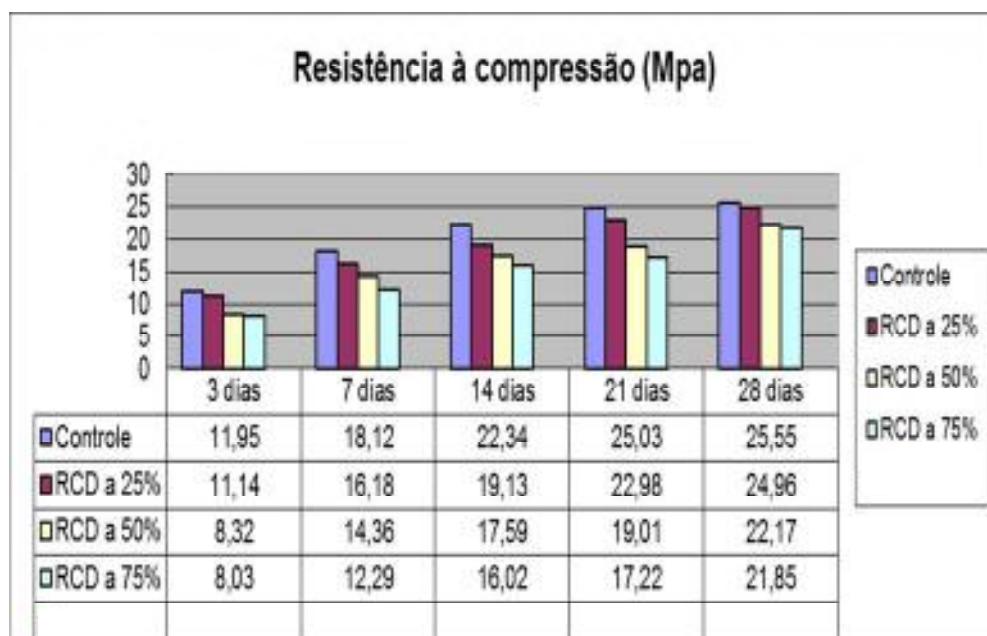


Figura 1 - Medições do teste de resistência à compressão.