

SIMULAÇÃO DE ONDA DE CHEIA DECORRENTE DA RUPTURA HIPOTÉTICA DE BARRAGEM – ESTUDO DE CASO: APM MANSO

Lucas Filipe Lucena Jesus^{1} & Luiz Rafael Palmier²*

Resumo – O presente trabalho tem como objetivo central a simulação do escoamento da onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem do Aproveitamento Múltiplo Manso, cujo reservatório é de grande porte e localizado no rio de mesmo nome, no estado de Mato Grosso. Entre os objetivos também figura a análise da eficácia do modelo HEC-RAS, utilizado neste estudo, frente ao modelo FLDWAV, utilizado em estudo semelhante para a mesma barragem, porém com menor nível de detalhamento. Os hidrogramas de ruptura adotados foram obtidos em trabalho elaborado especialmente para esse fim. As seções transversais dos cursos de água utilizadas nas simulações foram obtidas em levantamento topográfico ao longo do trecho de aproximadamente 300 km entre a barragem estudada e a cidade de Cuiabá. Esses dados foram inseridos no modelo HEC-RAS, utilizado para efetuar as simulações do escoamento não permanente decorrente da ruptura hipotética. Os resultados destacam-se pelas elevadas profundidades obtidas por meio da simulação do escoamento. Apesar disso, os resultados revelaram elevações do nível de água inferiores às obtidas em outros estudos desenvolvidos para a mesma ruptura hipotética, provavelmente devido ao maior grau de detalhamento das seções transversais utilizadas.

Palavras-Chave – ruptura de barragem, modelagem computacional, APM Manso

HYDRAULIC SIMULATION OF HYPOTHETICAL DAM BREAK FLOOD – CASE STUDY: APM MANSO

Abstract – The main objective of this paper is to present a discussion about the results of the propagation of the dam break flood of Aproveitamento Múltiplo Manso, which an associated large reservoir located at state of Mato Grosso, Brazil. Among the objectives it is also included the evaluation of the HEC-RAS model effectiveness in comparison to the FLDWAV model, as the latter was used in a less detailed dam break study of the same dam. The hydrographs were obtained in a work especially designed for this purpose. The cross sections used were obtained on a topographic survey of the 300 km reach between the APM Manso and the city of Cuiabá. These information was considered as data input for the HEC-RAS model, which was used to perform the unsteady flow simulations. The results of the propagation are characterized by high depths. Nevertheless, the results of this study revealed elevations of water level lower than those obtained in other studies for the same hypothetical rupture, probably due to the greater level of detail of the cross sections used.

Keywords – dam break, computational modeling, APM Manso

¹ Engenheiro Civil, lucena.lucas@gmail.com.

² Professor Associado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, palmier@ehr.ufmg.br

INTRODUÇÃO

Após as recentes rupturas de barragens no Brasil, principalmente de rejeitos, mas também para outros fins, o Governo Federal passou a atuar com vistas a elevar a segurança dessas estruturas ao estabelecer a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) por meio da Lei 12.334 de 20 de Setembro de 2010. Segundo a PNSB, as barragens com dano potencial considerado alto devem possuir obrigatoriamente um Plano de Ações Emergenciais (PAE).

Dentro da análise de ruptura de barragens, a Engenharia de Recursos Hídricos exerce papel de destaque na estimativa do hidrograma de ruptura e propagação desse pelo vale a jusante. Os resultados dessas etapas são fundamentais para o desenvolvimento das etapas subsequentes do Plano de Ações Emergenciais, como mapeamento das áreas inundáveis e elaboração dos planos de contingência.

O objetivo principal deste trabalho é simular a onda de cheia decorrente da ruptura hipotética da barragem do Aproveitamento Múltiplo Manso (APM Manso), analisando principalmente o comportamento dos rios Manso e Cuiabá próximo às cidades a jusante. Também é objetivo do estudo comparar os resultados aqui obtidos com os resultados obtidos na análise simplificada desenvolvida por Palmier *et al.* (2005). Ressalta-se que o presente trabalho é baseado na monografia elaborada por Jesus (2011).

REVISÃO DA LITERATURA

Previsão do hidrograma de ruptura

O hidrograma de ruptura de uma barragem depende das características do barramento, do reservatório, da brecha formada e da causa da ruptura hipotética considerada. As informações de bancos de dados de ruptura de barragens podem nortear a elaboração de cenários para uma análise mais aprofundada.

Vários tipos de modelos foram desenvolvidos com o intuito de representar o processo de formação de brechas, e podem ser classificados como: i) modelos baseados em equações da física, que computam os parâmetros da brecha com fundamentação em princípios da hidráulica, do transporte de sedimentos, da mecânica dos solos, etc.; ii) modelos fisicamente baseados, com hipóteses simplificadoras; iii) modelos baseados em equações de previsão a partir da análise de casos de ruptura observados; e iv) modelos que definem as características da ruptura com base em dados observados de ruptura de barragens semelhantes.

Simulação da onda de ruptura

Segundo Morris e Galland (2000), como os eventos de ruptura de barragem são mais severos que aqueles de cheia naturais associados a precipitações intensas, a calibração desses modelos não é simples, dada a dificuldade de serem estabelecidas condições para o fluxo nas planícies de inundação.

Para a simulação da onda de cheia ao longo do vale a jusante da barragem, são necessários, além do hidrograma de ruptura, dados topobatimétricos do vale a jusante, coeficientes de rugosidade tanto para a calha principal quanto para planície de inundação e informações sobre possíveis obstruções ao fluxo, como edificações, pontes, escombros etc.

Como observado por Morris e Galland (2000), os dados topográficos devem descrever tão bem quanto possível a região pela qual escoará o hidrograma de ruptura. O escoamento observado a partir da simulação da onda de cheia, por envolver vazões de pico normalmente superiores às das

enchentes naturais, tende a atingir profundidades elevadas, fazendo com que água não acompanhe estritamente o sentido do fluxo do rio, mas sim a topografia da região.

A seleção dos coeficientes de rugosidade é um dos pontos de maiores incertezas na propagação do hidrograma de ruptura, devendo ser selecionados aqueles que melhor traduzirem a rugosidade global da superfície de escoamento (presença de árvores, pequenas edificações, pontes e outras obstruções).

A determinação dos impactos potenciais da ruptura hipotética de uma barragem nas áreas urbanas é de extrema importância. Contudo, as técnicas de modelagem de fluxo nessas áreas são limitadas e a metodologia a ser adotada depende fortemente da precisão dos dados disponíveis e das informações a serem obtidas com o estudo. As abordagens desse tipo de problema são variadas, podendo ir desde a adoção simples de um coeficiente de Manning elevado para áreas urbanas até a representação de todo o arreamento a partir de uma rede complexa de canais, áreas de armazenamento, redes de drenagem etc. (Morris e Galland, 2000).

Apesar de estruturas como pontes, aterros de rodovias e estradas de ferro e diques serem tradicionalmente representados na modelagem de cheias naturais, na análise de ruptura de barragens essas obstruções podem não causar efeitos sensíveis sobre o escoamento. Segundo Morris e Galland (2000), a necessidade de previsão da obstrução pode ser julgada se: i) provocar alterações no controle hidráulico ou obstruções consideráveis sobre o escoamento; ou ii) resistir ao impacto da onda de cheia.

METODOLOGIA

Modelo utilizado

O uso do modelo hidráulico HEC-RAS justificou-se pelos seguintes fatores: i) esse modelo é amplamente difundido em todo o mundo; e ii) seu uso permite que os resultados encontrados e a facilidade de convergência da solução das equações de Saint-Venant sejam comparados com os resultados obtidos por Palmier *et al.* (2005), que utilizaram o modelo FLDWAV.

Referencial teórico

A ruptura de barragem é um evento de pequena duração que provoca um hidrograma com vazões elevadas. Assim, a simulação desse escoamento deve ser feita seguindo os princípios do regime não permanente, representado pelas seguintes equações (equações de Saint-Venant):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \pm q_l = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} - I_0 + I_f = 0 \quad (2)$$

As principais hipóteses das equações de Saint-Venant são: i) escoamento unidimensional, com velocidade uniforme em cada seção transversal; ii) escoamento predominantemente no sentido longitudinal; iii) escoamento gradualmente variado considerando distribuição hidrostática de pressões na vertical e desprezando efeitos de componentes de aceleração vertical; iv) fluido incompressível; v) variação gradual das seções transversais e ausência de singularidades como contrações, pilares de ponte, soleiras de fundo, etc; e vi) linha de energia podendo ser calculada por uma equação estabelecida para o regime permanente e uniforme, como a equação de Manning.

Cenários adotados e hidrograma de ruptura

Os cenários adotados neste trabalho e os hidrogramas de ruptura correspondentes originam-se do trabalho desenvolvido por Rocha (2010), observando também as análises efetuadas por Palmier *et al.* (2005).

Rocha (2010), ao analisar os hidrogramas de ruptura desenvolvidos para o APM Manso, considerou a utilização de modelos baseados em equações de previsão, modelos paramétricos e modelos fisicamente baseados. A hipótese de galgamento foi verificada e não confirmada, sendo os estudos, portanto, feitos apenas para a ocorrência de *piping*.

Dentre os hidrogramas calculados por meio de modelos paramétricos serão simulados os hidrogramas com vazões de pico máximas, mínimas e intermediárias, efetuando-se uma análise de sensibilidade.

No trabalho de Palmier *et al.* (2005), também foi calculado o hidrograma de ruptura e feita a simulação da propagação desse hidrograma. Contudo, as vazões de pico encontradas eram de grande magnitude, de tal sorte que a propagação, feita no modelo FLDWAV com seções em menor quantidade e nível de detalhamento do que neste trabalho, não foi bem sucedida, resultando em erros na solução das equações de Saint-Venant. A solução encontrada foi simular a propagação para hidrogramas com vazão de pico cada vez menores, até que fosse obtida a convergência. Isso foi conseguido para a vazão de pico de 23.500 m³/s, bastante inferior às vazões de pico calculadas por Rocha (2010).

Espera-se que, com dados de seções transversais mais detalhados e em maior número, e utilizando outro modelo de simulação (HEC-RAS), possa ser feita a propagação de hidrogramas de ruptura com vazões de pico maiores. Contudo, caso não haja convergência na solução das equações de Saint-Venant nessas condições, serão simulados hidrogramas de ruptura com vazão de pico minorada.

Seções transversais

As seções transversais utilizadas nesse trabalho foram obtidas por meio de levantamento topobatimétrico realizado em 2010 pela empresa HIDROGEST ENGENHARIA E CONSULTORIA LTDA. Foram levantadas 29 seções transversais ao longo dos rios Manso, Cuiabazinho e Cuiabá, num trecho de aproximadamente 300 km a jusante da barragem.

Os coeficientes de rugosidade de Manning adotados foram de 0,035 para a calha principal dos rios e de 0,10 para a planície de inundação. Os limites da calha principal para cada curso d'água foram estabelecidos por meio de análise visual da seção transversal.

ESTUDO DE CASO: APM MANSO

Informações gerais

O Aproveitamento Múltiplo Manso (Figura 1) está situado no rio Manso, logo a jusante da confluência entre o rio de mesmo nome e o rio Casca. O empreendimento situa-se no município de Chapada dos Guimarães, no estado de Mato Grosso, na região limítrofe aos municípios de Cuiabá e Rosário Oeste, tendo como coordenadas geográficas 14° 52' de latitude sul e 55° 48' de longitude oeste (FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2002).

Os principais objetivos da implantação do APM Manso são a geração de energia elétrica para distribuição nos sistemas Sudeste/Centro-Oeste e interligado de Mato Grosso e o controle de cheias, protegendo principalmente as cidades de Cuiabá e Várzea Grande.



Figura 1 – Vista de jusante da barragem do Aproveitamento Múltiplo Manso

A barragem do APM Manso, predominantemente composta por solo compactado, é dividida em três porções: margem esquerda, margem direita e do leito do rio. O comprimento total, considerando as três partes do barramento, é de aproximadamente 3.560 metros. A elevação da crista da barragem não é constante ao longo de sua extensão, variando entre 290,0 m e 291,5 m. A altura máxima sobre as fundações é de 73 metros, ocorrendo na barragem do leito do rio. O nível de água máximo normal do reservatório corresponde à elevação 287,0 m, associada também ao volume de 7.300 Hm³ e à área inundada de 387 km². A vazão média de longo termo da bacia de contribuição é de 170,0 m³/s (FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2002).

Descrição do vale a jusante

Conforme Palmier *et al.* (2005), no trecho a jusante da confluência do rio Manso com o rio Cuiabazinho (que forma o rio Cuiabá, próximo ao eixo da barragem), as margens apresentam vegetação de pequeno porte até a cidade de Rosário Oeste, onde há uma ponte sobre o rio. Logo a montante da cidade, o rio possui uma calha secundária bem definida, sendo caracterizada, assim como a calha principal, com a ocorrência de grandes curvas. As características do trecho a jusante de Rosário Oeste até o lugarejo conhecido como Engenho são semelhantes às do trecho anterior, com ocupação apenas no perímetro da cidade.

Segundo os mesmos autores, de Engenho até Guia, o rio possui menos curvas, porém com declividade maior do que nos trechos de montante. O leito do rio apresenta alguns afloramentos rochosos e as planícies de inundação são compostas de pastos e árvores de pequeno porte. Logo a montante da cidade de Acorizal, onde há uma ponte sobre o rio, o rio Cuiabá recebe o rio Jangada em sua margem direita.

Entre Guia e Cuiabá a declividade do curso de água diminui, com uso do solo semelhante aos trechos anteriores. Em Cuiabá, onde a ocupação da planície de inundação é intensa, há quatro pontes. Em virtude da disponibilidade de dados do levantamento topográfico, a extensão da análise da ruptura da barragem limita-se à cidade de Cuiabá.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Hidrogramas de ruptura

Os hidrogramas a serem simulados no modelo HEC-RAS foram escolhidos conforme sua vazão de pico. O primeiro hidrograma simulado foi aquele com menor vazão de pico dentre os apresentados por Rocha (2010) (127.706 m³/s, cenário 1). Contudo, como os resultados mostraram profundidades semelhantes à altura da barragem logo a jusante dessa, a simulação de hidrogramas com vazão de pico superior foi descartada. Para simular os demais cenários, o hidrograma do cenário 1 foi reduzido até as vazões de 80.000 m³/s (cenário 2) e 30.000 m³/s (cenário 3). Os hidrogramas da ruptura hipotética são mostrados na Figura 2.

Simulação hidráulica

As profundidades encontradas na simulação do escoamento, bem como o tempo decorrido até a onda de cheia atingir as cidades no vale a jusante, são mostradas na Tabela 1.

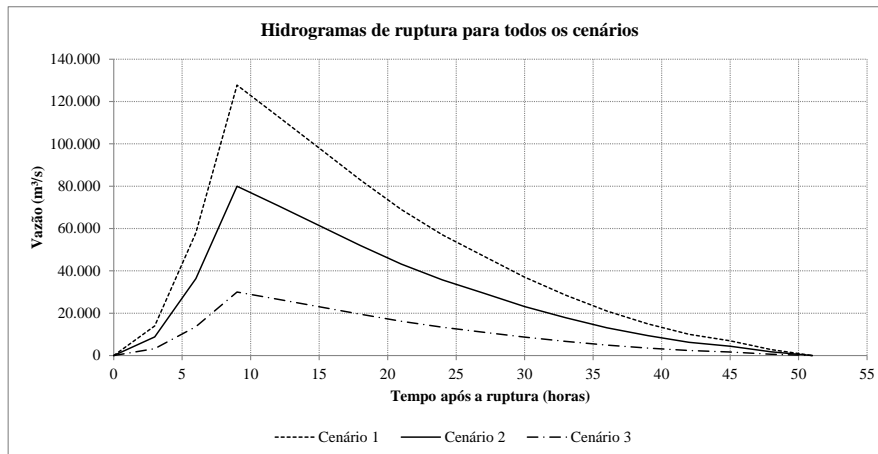


Figura 2 – Hidrogramas de ruptura simulados

Tabela 1 – Profundidade e tempo decorrido entre a ruptura hipotética e a ocorrência da profundidade máxima para as cidades ao longo do trecho estudado

Referência	Distância até a barragem (km)	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3	
		Tempo (h)	Profundidade (m)	Tempo (h)	Profundidade (m)	Tempo (h)	Profundidade (m)
Cidade de Nobres	101	33,5	30,64	35,0	26,58	37,0	20,01
Rosário Oeste	135	38,5	24,42	40,0	21,49	45,0	16,73
Acorizal	216	67,5	23,99	72,0	20,61	78,0	15,41
Montante de Cuiabá	272	95,0	29,74	97,0	25,27	98,0	18,77
Várzea Grande	281	95,5	29,26	97,0	24,57	100,0	17,51
Jusante de Cuiabá	302	98,0	32,75	99,0	27,53	102,0	19,32

A simulação realizada retornou resultados qualitativos satisfatórios para os cenários simulados. Como esperado, houve amortecimento da vazão escoada ao longo do trecho estudado. As elevadas profundidades, ocasionadas pela baixa declividade do curso de água, acabaram por tornar o escoamento subcrítico para os três cenários.

O amortecimento da vazão ao longo do trecho em estudo, mostrado na Figura 3, apesar de ocorrer, não foi totalmente conclusivo. Apesar de, graficamente, as curvas terem se aproximado, os valores de vazão na seção mais a jusante são muito diferentes (27.210 m³/s para o cenário 1; 18.586 m³/s para o cenário 2; e 8.319 m³/s para o cenário 3).

Apesar de as vazões amortecidas serem ainda muito superiores às vazões das cheias naturais – a vazão máxima provável do rio Cuiabá na cidade homônima, sem a implantação da APM Manso, é de 9.700 m³/s, segundo FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (2002) –, nenhum dos resultados pode ser descartado, pois não há indícios de que a ruptura da barragem de um reservatório de grande magnitude não provoque fluxos tão elevados, mesmo numa seção 300 km a jusante. Além disso, não se sabe se o elevado volume armazenado exerce influência na distância necessária para que as vazões propagadas sejam amortecidas. De fato, em estudos realizados com empreendimentos cujo volume corresponde a menos de 10% do volume do APM Manso, as vazões, para todos os cenários estudados, eram amortecidas até o mesmo valor em poucas dezenas de quilômetros. A inexistência de casos de ruptura de reservatórios com capacidade de armazenamento similar induz à dúvida quanto ao comportamento mais provável da onda de ruptura.

Associada à vazão na seção mais a jusante está também a profundidade do escoamento. Enquanto as cheias naturais ocorrem para profundidades de até 10 metros, aproximadamente (FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., 2002), as profundidades encontradas por esse estudo variam entre 19 metros e 33 metros. Qualitativamente, esses resultados estão de acordo com o trabalho desenvolvido por Palmier *et al.* (2005), que alerta que há indícios de que a defluência do volume do APM Manso seria suficiente para provocar escoamentos com grandes elevações de nível de água nos municípios localizados próximos à calha do rio Cuiabá.

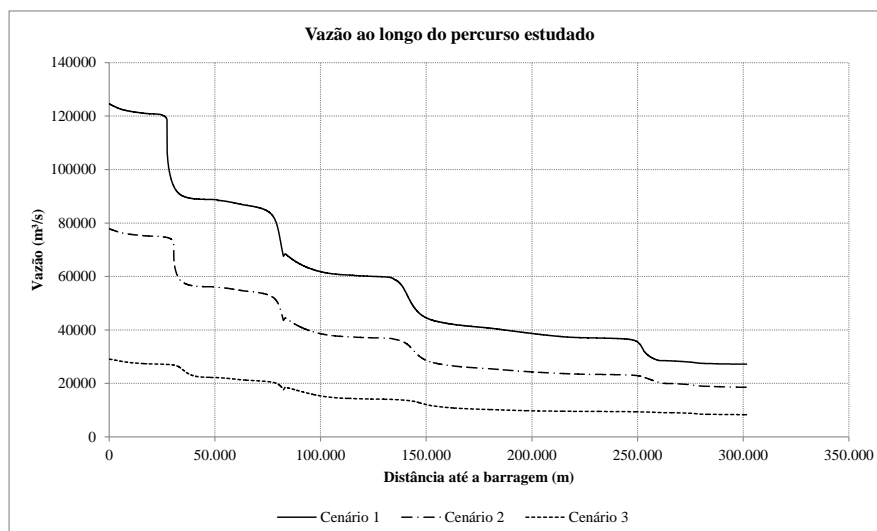


Figura 3 – Atenuação da vazão para os cenários estudados

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos indicam que os modelos FLDWAV e HEC-RAS apresentam resultados qualitativamente próximos, apesar de numericamente distintos, quando do estudo de ruptura hipotética de um reservatório de grande porte. Além disso, o modelo HEC-RAS obteve a

convergência mais facilmente, ainda que com resultados mais conservadores. Percebeu-se um amortecimento reduzido de vazões ao longo do trecho estudado, com 300 km de extensão: a vazão encontrada para a última seção transversal (Cuiabá) variou entre 8.000 e 27.000 m³/s, enquanto que as cheias naturais para o mesmo local correspondem a valores entre 2.000 e 3.000 m³/s. A vazão máxima provável para esse local, sem a implantação da barragem, é de cerca de 9.700 m³/s, segundo FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (2002).

Apesar de a simulação ter sido realizada com sucesso, podem ser enumeradas as seguintes limitações:

- Grande incerteza nos parâmetros da brecha de ruptura e do hidrograma afluente;
- Possível inadequação do modelo unidimensional à análise, mesmo que apenas ao longo de um curto trecho logo a jusante da barragem;
- Fim da área de abrangência desse estudo antes da convergência das vazões atenuadas; e
- As contribuições de vazão da bacia dos rios Cuiabá e Manso não foram calculadas. Mesmo sendo provavelmente inferiores às vazões de pico dos hidrogramas considerados, seu cômputo poderia influenciar o comportamento hidráulico da onda de cheia.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do projeto Propagação de onda proveniente de ruptura de barragens, mapeamento de áreas inundáveis, avaliação de danos e elaboração de planos de contingência. Os autores também agradecem à FAPEMIG, pelo apoio constante concedido para a participação em simpósios e congressos, e à equipe da Pimenta de Ávila Consultoria Ltda. pelo apoio ao desenvolvimento da monografia de conclusão do curso de Engenharia Civil que motivou a elaboração do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (2002). *Aproveitamento Múltiplo Manso – memória técnica*. Furnas Centrais Elétricas S. A., Rio de Janeiro – RJ, 1070 p.
- JESUS, L. F. L. (2011) *Simulação de onda de cheia decorrente de ruptura hipotética de barragem – estudo de caso: APM Manso, Mato Grosso, Brasil*. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia/UFMG Belo Horizonte – MG, 80p.
- MORRIS, M. W., GALLAND, J. C. (2000). *Dam break modelling – Guidelines and best practice*. CADAM Project. Reino Unido, 32 p.
- PALMIER, L. R.; BRASIL, L. S. S.; MONTE-MOR, R. C.; NASCIMENTO, N.; ROCHA, E. G.; SILVA, N. S.; CANELLAS, A. V. B. (2000). Modelagem simplificada de onda de cheia proveniente de ruptura hipotética de barragem - Estudo de caso: barragem do aproveitamento múltiplo Manso, Mato Grosso, Brasil. In *Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Norte e Centro-Oeste*. Campo Grande, 2005. 17 p.
- ROCHA, F. F. (2010) *Análise comparativa de modelos de previsão da evolução temporal de brechas e formação de hidrogramas de ruptura - estudo de caso: barragem do aproveitamento múltiplo Manso, Mato Grosso, Brasil*. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia/UFMG Belo Horizonte – MG, 81p.