

CAV TOOLS: FERRAMENTA PARA CRIAÇÃO AUTOMATIZADA DE CURVAS COTA-ÁREA-VOLUME

Matheus Barros⁽¹⁾, João Andrade⁽²⁾, Guilherme Jannuzzi⁽³⁾, Adson Araújo⁽⁴⁾, Thiago Almeida⁽⁵⁾

(1) TPF Engenharia, Recife, Brasil, ID 0000-0001-7422-8575

(2) TPF Engenharia, Recife, Brasil, ID 0000-0002-2737-1552

(3) TPF Engenharia, Recife, Brasil, ID 0009-0004-9502-6218

(4) TPF Engenharia, Recife, Brasil, ID 0009-0006-1566-7491

(5) TPF Engenharia, Recife, Brasil, ID 0009-0007-0254-9792

Resumo

A adoção do *Building Information Modeling* (BIM) é crescente no setor de mineração, onde modelos inteligentes facilitam tomadas de decisão em projetos. A análise de curvas Cota-Área-Volume (CAV) é fundamental em estruturas geotécnicas, como pilhas de estéril e de rejeitos, para otimizar a operação, avaliando-se a variação de área e o ganho gradativo de volume pela elevação. O objetivo deste trabalho é apresentar a ferramenta CAV Tools, desenvolvida para aprimorar a eficiência da elaboração dessas curvas em projetos BIM de mineração. Para isso foi realizado o levantamento de requisitos de uma CAV; o desenvolvimento em linguagem c# da rotina de automação no Autodesk Civil 3D; e a aplicação em estudo de caso para validação dos resultados. Após o desenvolvimento, foi realizado o comparativo entre o método tradicional e o automatizado, tendo como referência o volume obtido pela comparação entre a superfície projetada da pilha e o terreno natural. Enquanto o método tradicional apresentou um erro considerável de 14%, o cálculo realizado pelo CAV Tools registrou um valor inferior a 1%. A ferramenta facilita a elaboração das curvas CAV com ganhos significativos e contribui para o avanço da engenharia digital na mineração, trazendo maior confiabilidade para os modelos.

1. Introdução

A indústria da mineração atravessa uma significativa transformação digital, na qual incorpora novas tecnologias para otimizar processos, aumentar a segurança e garantir a sustentabilidade econômico-ambiental de suas operações. Nesse cenário, o *Building Information Modelling* (BIM) ganha destaque como uma abordagem que integra informações multidisciplinares em modelos 3D inteligentes, o que facilita tomadas de decisão ao longo de todo o ciclo de vida de um ativo [1]. Estruturas geotécnicas, como pilhas de estéril e de rejeitos, são componentes

críticos em empreendimentos de mineração, sua gestão é impactada diretamente pelas inovações de tecnologias e a confiabilidade nos dados a partir da adoção do BIM.

Uma das análises fundamentais no dimensionamento e acompanhamento operacional dessas estruturas é a da curva Cota-Área-Volume (CAV), que descreve a variação de área e ganho gradativo de volume conforme a elevação. Estudos de alternativas de arranjos geométricos, sequenciamento construtivo, avaliações de volume útil de sistemas de contenção de sedimentos, planejamento de lavra e monitoramento da capacidade de armazenamento são exemplos de atividades no contexto de mineração que dependem da elaboração das curvas CAV.

As técnicas empregadas para a obtenção das curvas CAV ocorrem frequentemente por meio de métodos automatizados ou semi-automatizados, onde existem aproximações e tolerâncias dos resultados obtidos. Técnicas de sensoriamento remoto com uso de modelos digitais de elevação permitem o cálculo de curvas CAV, onde erros podem ser medidos em comparação com levantamentos topográficos da região de interesse [2-3]. Interfaces de programação em linguagens como o *python* possibilitam a criação de rotinas automatizadas para obtenção das curvas em estruturas existentes a partir de levantamentos de batimetria [4], caso de estruturas de barramentos com reservatórios.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento e a aplicação da ferramenta CAV Tools, uma solução criada para automatizar e aprimorar a eficiência da elaboração de curvas Cota-Área-Volume em projetos de pilhas de estéril e de rejeitos com uso do BIM. O artigo aborda desde o levantamento de requisitos até o desenvolvimento da rotina em linguagem *c#* para o Autodesk Civil 3D, com a validação em estudo de caso de um projeto real para atestar os ganhos em exatidão e produtividade quando comparado ao método tradicional.

2. Etapas Metodológicas

A abordagem metodológica para o desenvolvimento da ferramenta seguiu uma estrutura inspirada em boas práticas de gestão de projetos [5], organizada em três fases sequenciais: Entradas (*Inputs*), Desenvolvimento da Ferramenta e Saídas (*Outputs*).

2.1 Levantamento de Requisitos e Entradas (Inputs)

O objetivo desta primeira etapa foi identificar os requisitos técnicos para a automação. Com o auxílio de projetistas experientes na área, realizou-se um mapeamento dos gargalos e das tarefas repetitivas no processo de elaboração de curvas CAV. Com isso, buscou-se definir os parâmetros técnicos de entrada (*inputs*) e as informações de saída (*outputs*) necessárias para garantir que a ferramenta atendesse às demandas de projetos de mineração e seguisse as boas práticas de engenharia.

2.2 Desenvolvimento da Ferramenta

A segunda etapa concentrou-se no desenvolvimento da rotina de automação. Utilizou-se o software Autodesk Civil 3D como plataforma alvo, devido à sua capacidade de modelagem de estruturas geotécnicas de grande porte. A programação do CAV Tools foi realizada em linguagem *c#* no ambiente Microsoft Visual Studio. Essa abordagem permitiu a integração com a Interface de Programação de Aplicação (API) do Autodesk Civil 3D, para acessar e manipular por meio dos códigos as superfícies topográficas e projetadas.

2.3 Saídas (Outputs) e Validação

A principal saída do processo foi a própria ferramenta CAV Tools, integrada e funcional no Autodesk Civil 3D. A validação ocorreu nessa etapa com a aplicação em um projeto real de uma pilha de estéril de modo a testar a eficácia da ferramenta. Para isso, realizou-se uma comparação entre os resultados do método automatizado e do método tradicional. Adotou-se como volume de referência o valor obtido pela comparação direta entre a superfície projetada da pilha e a superfície topográfica do terreno natural, o que permitiu uma análise quantitativa do erro de cada método.

3. Resultados e Discussões

3.1 Abordagem tradicional e automatizada para obtenção de curvas CAV

A partir do levantamento de requisitos técnicos para obtenção de curvas CAV foram identificados gargalos e pontos de melhoria. Tradicionalmente, a ferramenta mais utilizada no Autodesk Civil 3D para identificar a variação das áreas e dos volumes de uma estrutura conforme a mudança de elevação é a *Stage Storage*. A ferramenta apresenta duas abordagens de cálculo: o método da área final média (*average end area method*) e o método de aproximação cônica (*conic approximation method*) [6].

O *Average End Area Method* calcula o volume assumindo uma distribuição uniforme entre as cotas de um reservatório ou pilha, utilizando a área média das seções transversais em dois pontos de elevação adjacentes para estimar o volume. Por sua vez, o *Conic Approximation Method* assume que a forma da estrutura segue uma geometria cônica entre dois pontos de cota, estimando o volume com uma aproximação cônica das superfícies [6].

Ambos os métodos trazem aproximações ao considerar duas cotas e geometrias simplificadas, desprezando variações complexas da superfície do terreno. Além disso, os resultados são dependentes do intervalo de curva de níveis estabelecido pelo usuário e não diretamente da superfície, o que pode induzir a erros.

A ferramenta *Stage Storage* do Autodesk Civil 3D foi idealizada originalmente para estimar curvas CAV para reservatórios de barramentos. Observa-se o mesmo para exemplos da literatura [2-4]. Dessa forma, o principal parâmetro de entrada das ferramentas é a superfície topográfica do reservatório, onde avalia-se gradativamente a área alagada e o volume para diferentes valores de cota.

No contexto de mineração de estruturas em aterro, como pilhas de estéril e de rejeitos, e em escavação, como os sistemas de contenção de sedimentos, a variação de volumes e de área deve ser restrita à geometria da estrutura projetada. Portanto, a superfície projetada também deve ser um parâmetro de entrada.

Como limitação das ferramentas existentes para mineração, o usuário deve adaptar as superfícies para que sejam tratadas como estruturas de barramentos com reservatórios. Esse procedimento pode introduzir inconsistências geométricas por triangulações indesejadas e operacionais por lentidões de processamento, a depender do peso dos arquivos.

O Autodesk Civil 3D possibilita a comparação direta entre superfícies, onde estima-se o volume da diferença entre uma superfície topográfica e uma superfície projetada. Nessa abordagem, consideram-se variações locais e geometrias complexas do terreno natural sem aproximações, o que garante uma maior precisão dos resultados obtidos. Contudo, a comparação tem por saída

apenas o volume total da estrutura, sem possibilitar a análise do ganho gradativo de volume pela variação de cotas.

Para os objetos de superfície do Autodesk Civil 3D, utiliza-se principalmente malhas irregulares de triângulos pelo método de Delaunay, onde uma malha contínua é formada pela regra de que não podem existir pontos dentro da circunferência circunscrita de cada triângulo [7]. O método Delaunay minimiza possíveis erros de discontinuidades de superfícies no qual poderiam causar erros nas estimativas de volumes da CAV.

A partir da análise de requisitos, a ferramenta CAV Tools foi idealizada para automatizar o processo de obtenção das curvas por meio de múltiplas comparações entre superfícies temporárias em diferentes cotas, de acordo com a Figura 1. Dessa forma, erros por aproximações são minimizados, uma vez que se utiliza como base de cálculo as geometrias complexas projetadas e do terreno natural.

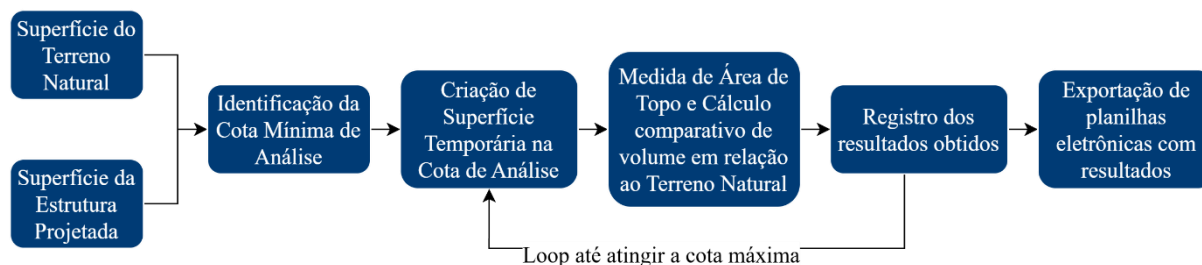


Figura 1: Diagrama resumo da automação.

Como saída do fluxo, foi planejada uma planilha eletrônica com a área e o volume para cada cota, o que possibilita avaliar a viabilidade de área mínima de trabalho para operação e o volume de disposição de material conforme planejamento do sequenciamento construtivo.

3.2 Interface da Ferramenta

A aplicação da ferramenta CAV Tools no Autodesk Civil 3D inicia-se a partir de uma interface de comando que solicita ao usuário a inserção de parâmetros de entrada (*input*) descritos a seguir, conforme Figura 2.

- *Pile Surface*: Superfície que representa a configuração final da estrutura projetada (por exemplo, a pilha de estéril).
- *Terrain Surface*: Superfície topográfica que corresponde às condições do terreno natural antes da implantação do projeto.
- *Sump Height*: Parâmetro específico para sistemas de contenção, que define a profundidade máxima do reservatório da estrutura.
- Tipo de Estrutura: Opção que define a natureza da obra para ajustar o método e objetivo de cálculo, dividida em duas categorias.
 - *Cut (Sump)*: Seleção aplicada a sistemas de contenção de sedimentos, onde o volume gerado corresponde à capacidade do reservatório da estrutura.
 - *Fill (Pile)*: Seleção para o dimensionamento de pilhas, onde o volume está relacionado ao acumulado de disposição de material.

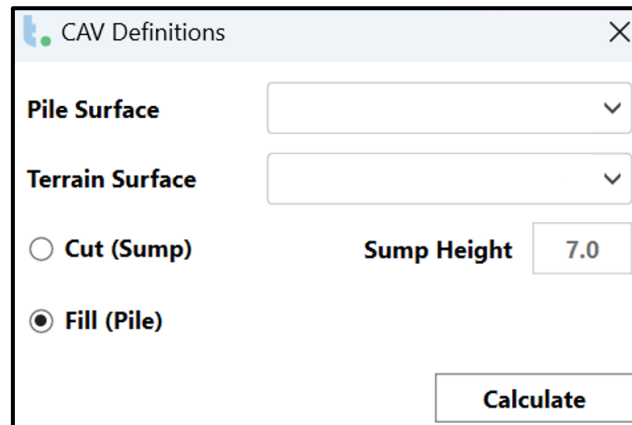


Figura 2: Interface do usuário.

3.3 Estudo de Caso

A validação da ferramenta CAV Tools ocorreu por meio da sua aplicação em estudo de caso real, o que permitiu uma comparação direta entre a abordagem tradicional e a automatizada para estimativa de curvas CAV. Considerou-se uma pilha de estéril com cota de crista de 930 metros, inclinação de taludes de 1:2,5, altura máxima de taludes de 10 metros e largura mínima de bermas de 10 metros, conforme Figura 3.

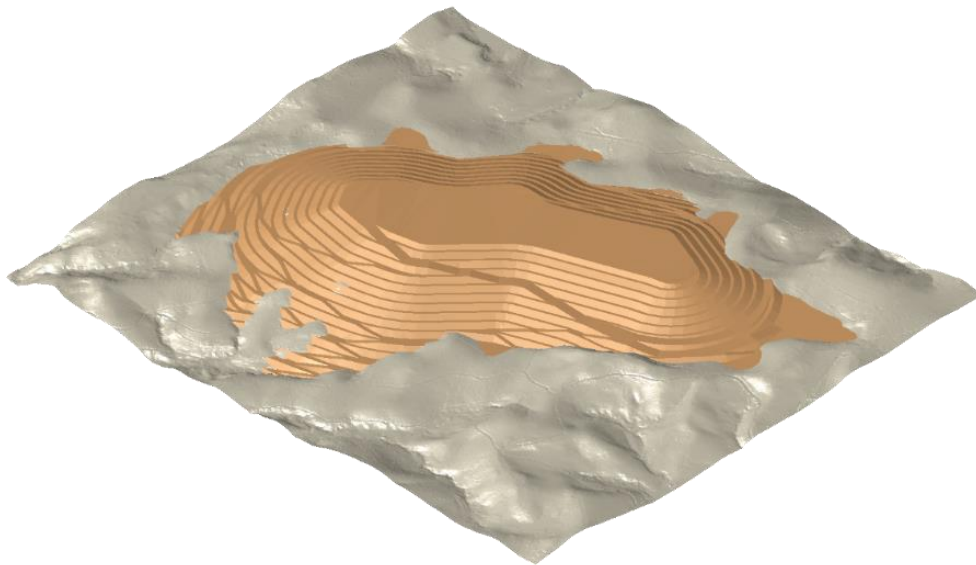


Figura 3: Pilha de estéril do estudo de caso.

Para estabelecer um parâmetro de referência, calculou-se o volume da superfície da pilha de estéril em relação à superfície topográfica pelo Autodesk Civil 3D. Idealmente, quanto mais próximo o valor acumulado de volume de uma CAV estiver do volume obtido por comparação direta entre as superfícies, mais exata é a curva obtida. Em seguida, a estimativa da CAV foi realizada pelo método tradicional e pela ferramenta CAV Tools.

Na Figura 4, apresenta-se a CAV obtida pelo método tradicional, onde foram circulados pontos com comportamento que pode ser originado das aproximações e simplificações. Na curva de área, nota-se próximo à crista de 930 metros da estrutura um comportamento de assíntota.

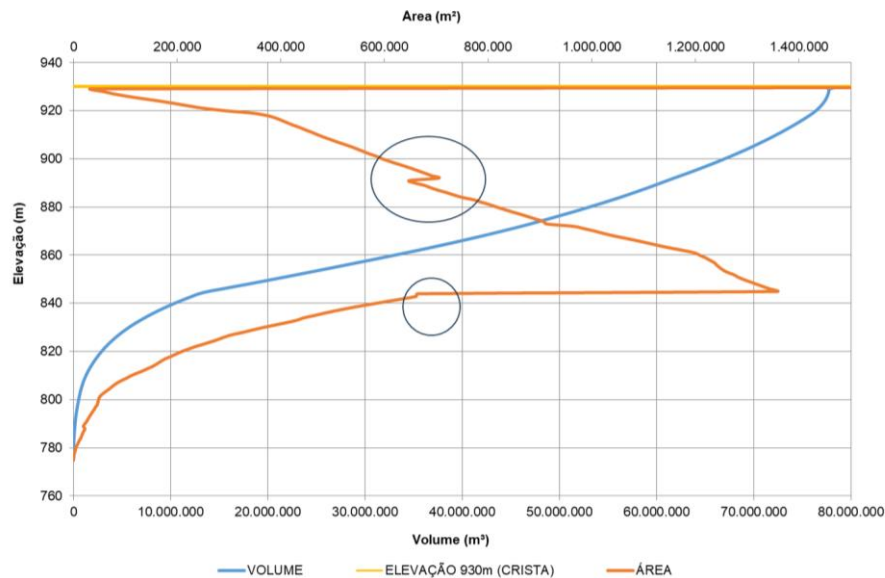


Figura 4: CAV com o método tradicional.

Na Figura 5, por sua vez, apresenta-se a CAV obtida pelo método automatizado com o CAV Tools, onde nota-se uma maior suavidade da curva de área, sem o comportamento de assíntota. Para a mesma crista de 930 metros, foram obtidos valores inferiores de volume em relação ao método tradicional.

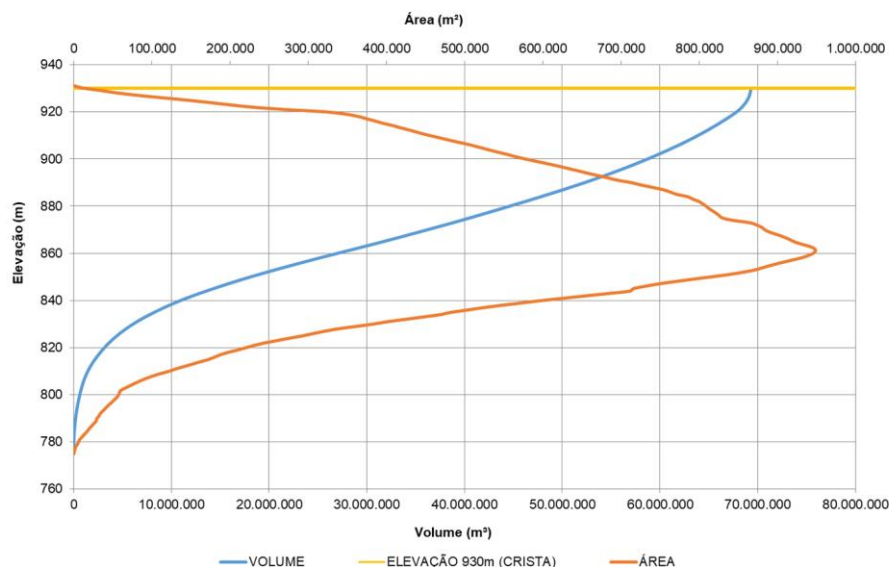


Figura 5: CAV com o método automatizado.

A análise das abordagens revelou uma discrepância significativa. O método tradicional, com aproximações e simplificações, resultou em um erro percentual de aproximadamente 14% em relação ao volume de referência. Em contrapartida, o cálculo executado pelo CAV Tools atestou maior exatidão ao valor de referência, com um desvio inferior a 1%, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Comparação entre Método Tradicional e Automatizado

	Volume estimado pela abordagem (m³)	Volume obtido por comparação de superfícies (m³)	Diferença (%)
Método Tradicional	78.987.744,44	69.321.030,12	13,945
Método Automatizado (CAV Tools)	69.318.978,65	69.321.030,12	-0,003

A exatidão do CAV Tools mitiga riscos e garante maior confiabilidade aos volumes obtidos dos modelos. A automação do processo representa um ganho significativo em produtividade, uma vez que reduz o tempo necessário para a geração das curvas e minimiza o esforço em conferências manuais, prática comum em projetos anteriores à ferramenta.

O erro do método tradicional de 14% está relacionado com as simplificações geométricas da ferramenta *Stage Storage*, citadas anteriormente. Foram realizados testes do cálculo da CAV em mais de 10 estruturas, onde foram obtidos resultados similares. O método automatizado permaneceu com a diferença média inferior a 0,5% em relação ao volume de referência, enquanto o método tradicional apresentou variações entre 7 e 20%.

Ressalta-se que uma vez que a ferramenta foi desenvolvida em linguagem *c#*, existe a possibilidade de adaptar o código-fonte para outros sistemas que suportem essa linguagem. Ainda, podem ser estabelecidas integrações com a API de outros softwares proprietários e não-proprietários. Nesse último caso, será necessário avaliar se o software escolhido realiza cálculos de volumes por comparação de superfícies, como o Autodesk Civil 3D.

De modo a incentivar o openBIM em projetos de mineração, sugere-se como próximos passos que a rotina possa ser adaptada para o Blender em extensões como o Bonsai, de modo a estimar as curvas CAV com base em objetos do esquema *Industry Foundation Classes* (IFC).

Nesse outro fluxo de trabalho, o cálculo de volumes poderia ser realizado em modelos oriundos de diversos softwares de autoria e não apenas do Autodesk Civil 3D, uma vez que a interoperabilidade é garantida com a exportação em IFC. Dado que o cálculo de volumes é realizado pela geometria dos objetos, metadados não são utilizados, o que reduz o esforço de manter a consistência de informações entre plataformas.

4. Considerações Finais

A partir do exposto, considera-se que a ferramenta CAV Tools representa uma contribuição para o fortalecimento da engenharia digital no contexto de mineração, pois automatiza um processo crítico de projetos e proporciona ganhos significativos de produtividade. A solução desenvolvida aumenta a confiabilidade dos modelos geotécnicos elaborados no contexto de uso do BIM e se torna uma alternativa às ferramentas mais tradicionais no qual foram idealizadas para estruturas de barramentos com reservatórios. Para pesquisas futuras, sugere-se explorar a aplicação da ferramenta em mais projetos, de modo a consolidar o uso da automação em diferentes geometrias e condições com validação por estudos estatísticos, e testar a integração com outras plataformas.

Referências

- [1] C. M. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *Manual de BIM : Um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2014.
- [2] C. L. D. Marçal, R. L. Mendonça, A. R. da Paz, *Estimativas de Curvas Cota-Área-Volume e Área Alagada de Reservatórios a partir de diferentes Modelos Digitais de Elevação*, Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, São Paulo, Brasil, 2019.
- [3] D. M. Paulek, C. Freitas, M. I. Almeida, *Análise da Evolução da Curva Cota-Área-Volume de um Reservatório de Cabeceira*, Anais do XIII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, I Partículas das Américas, Vitória, Espírito Santo, Brasil, 2018.
- [4] J. A. Rebouças, C. L. de Almeida, S. A. Cipriano, K. B. da Silva, *Proposta de utilização da interface Pythoh/ArcGIS na elaboração de curva cota-área-volume de reservatórios*, Anais do Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação (VII CONNEPI), Palmas, Tocantins, Brasil, 2012.
- [5] L. Weijh, A. Stamford, J. Scanoni, J. Carvalho, *Análise de qualidade em modelos BIM: Aprimorando a eficiência*, Anais do 5º Congresso Português de Building Information Modeling, vol. 2, Coleção Atas, 2024. doi: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.164.3>
- [6] Autodesk, *Sobre os métodos de cálculo de volumes de armazenamento de fases de superfície*, Ajuda do Autodesk Civil 3D, 2026. <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/PTB/?guid=GUID-5D4A56B4-2438-452B-BC75-DC9F0D82D7E8> (acessado em fevereiro de 2026).
- [7] Autodesk, *Criação de Superfícies*, Ajuda do Autodesk Civil 3D, 2017. <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2017/PTB/?caas=caas/documentation/CIV3D/2014/ENU/filesCUG/GUID-46EA9E06-78D4-4B03-A385-5FCC04C3ED67-htm.html> (acessado em abril de 2026).