

## PROPOSTA DE UMA METODOLOGIA PARA AVALIAR A SUSTENTABILIDADE EM PROCESSOS DE CORTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA METALOMECÂNICA

Matheus Gonçalves de Ataíde, [matheus.ataide@ufu.br](mailto:matheus.ataide@ufu.br)<sup>1</sup>  
Cláudio Gomes do Nascimento, [claudiogomesnascimento@hotmail.com](mailto:claudiogomesnascimento@hotmail.com)<sup>1</sup>  
José Aécio Gomes de Sousa, [aeciosousa@yahoo.com.br](mailto:aeciosousa@yahoo.com.br)<sup>2</sup>  
Wisley Falco Sales, [wisley@ufu.br](mailto:wisley@ufu.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG, 38400-089, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, Av. dos Pioneiros, 3131, Londrina, PR, 86036-370, Brasil;

**Resumo:** Com o tempo, as leis de proteção ao meio ambiente foram aperfeiçoadas em diversos países, pressionando ainda mais as empresas a serem ecologicamente corretas. Os consumidores fizeram sua parte, tornando-se mais conscientes, passando a exigir informações sobre os impactos econômicos, sociais e ambientais que geram os produtos que eles compram. Empresas poluidoras, ou socialmente irresponsáveis, perderam mercado. Portanto, cada vez mais, a cobrança por evidências de uma gestão sustentável por parte da indústria manufatureira aumenta. Sendo assim, atualmente, há uma grande demanda por um método de gestão que consiga conciliar a criação de valor com os aspectos socioambientais. O objetivo do trabalho é criar uma metodologia para a avaliação do desempenho em sustentabilidade, capaz de comparar e classificar, com foco na sustentabilidade, os diferentes tipos de processos de corte de metais. O método a ser proposto possibilitará uma visão generalizada dos aspectos a serem considerados na avaliação dos processos, tornando as empresas aptas a lidar com a maior complexidade de decisão no cenário atual. Destaca-se, ainda, que as decisões resultantes do presente método deverão ser amparadas de acordo com o conceito do resultado triplo (triple bottom line), que contempla, simultaneamente, os parâmetros econômicos, ambientais e sociais. Por fim, a metodologia criada foi aplicada no processo de corte por serra intermitente.

**Palavras chave:** sustentabilidade, manufatura, processos de corte de metais, indústria metalomecânica

**Abstract.** Along the time, as environmental protection laws have been improved in several countries, putting even more pressure on companies to be environmentally friendly. Consumers have done their part, becoming more aware, starting to demand information about the economic, social and environmental impacts that generate the products they buy. Polluting or socially irresponsible companies have lost market share. Therefore, more and more, the demand for evidence of sustainable management by the manufacturing industry increases. Thus, currently, there is a great demand for a management method that can reconcile the creation of value with the socio-environmental aspects. The objective of this research is to create a methodology for evaluating sustainability performance, capable to comparing and classifying, with a focus on sustainability, the different types of metal cutting processes. The proposed method will allow a generalized view of the aspects to be considered in the evaluation of the processes, making the companies able to deal with the greatest complexity of decision in the current scenario. It is also noteworthy that the decisions resulting from the present method must be supported according to the concept of the triple bottom line, which simultaneously contemplates the economic, environmental and social parameters. Finally, the methodology created was applied in the intermittent saw cutting process.

**Keywords:** Sustainability, Manufacture, Metal cutting, Metalworking industry

### 1. INTRODUÇÃO

Os impactos ambientais perceptíveis que ocorrem nos dias de hoje são respostas naturais de um planeta que sofre, de maneira descontrolada, constante e acelerada alteração. Sob este cenário, surge o desafio de promover, para as próximas décadas, ações em pró da conservação do planeta e das populações que nele habitam. Uma solução para este impasse são as ações que visam harmonizar a atividade humana com a conservação da biodiversidade e com o uso racional dos recursos naturais, em benefício da humanidade (Barbieri, 2012). Para isso, Koho et al. (2011), Steingrímsson et al. (2011),

Rokhmawatia et al. (2015), afirmam que a sustentabilidade é o desenvolvimento de ações que atendam às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender suas necessidades próprias.

O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais.

Nessa perspectiva, uma empresa como a Vale, que cometeu crimes ambientais em Mariana e Brumadinho, que resultaram em mortes de centenas de pessoas, destruição de rios, fauna e flora, mais cedo ou mais tarde pagará um preço alto por sua irresponsabilidade, assim como os políticos e as autoridades ambientais que estão protegendo a empresa em vez de puni-la como ela merece.

Devido ao alto consumo da população, as indústrias estão implantando novas tecnologias e estratégias, objetivando a excelência nos processos e aumento da produtividade, para isso, técnicas de aproveitamento e reuso dos recursos são aplicadas.

Segundo Rizzo e Batocchio (2011), ações visando a eliminação de desperdícios e reutilização dos resíduos originados nos processos geram vantagens e provocam aumento da eficiência e produtividade. A adoção desta estratégia traz benefícios associados na diminuição dos impactos ao meio ambiente, além do aproveitamento dos recursos usados nos processos.

Para ser rentável e gerar valor sustentável para todas as partes interessadas, os fabricantes de próxima geração devem se desenvolver de forma rápida e econômica às mudanças nas necessidades do mercado e, ao mesmo tempo, minimizar os impactos ambientais e beneficiamento da sociedade (KOREN et al., 2018; CRIFO et al., 2015). Portanto, para atender a essa demanda, as empresas de manufatura têm que adotar inúmeras estratégias de produção, por meio do uso de processos e sistemas mais sustentáveis (HUANG e BADURDEEN, 2018). Jawahir e Bradley (2016) afirmam que o sucesso da indústria na área da sustentabilidade depende da interação entre os produtos, os processos e os sistemas de uma cadeia produtiva, como mostrado na Fig. 1.



Figura 1. Áreas da sustentabilidade. Adaptado de Jawahir e Bradley (2016)

De forma geral, não é possível pensar em desenvolvimento econômico sem a paralela preservação do meio-ambiente e no benefício mútuo da sociedade. Segundo Schwarz et al (2002), “é uma premissa da sustentabilidade que o bem estar econômico esteja inexoravelmente ligado a preservação do meio-ambiente e ao bem estar da população”. Portanto, o uso de indicadores de sustentabilidade tem auxiliado as empresas a identificarem e abandonarem as operações intensivas em recursos, perseguindo por modelos de produção mais eficientes (Azapagic, 2004). Malek e Desai (2020) afirmam que as indústrias de manufatura precisam equilibrar aspectos econômicos, ambientais e sociais para sustentar a existência do mercado. Para Esfahbodi et al. (2016) é crucial que as indústrias adotem algumas inovações de fabricação para que suas operações não prejudiquem o meio ambiente sob pena de ameaçar sua existência no mercado.

O objetivo do trabalho é criar uma metodologia para a avaliação do desempenho em sustentabilidade, capaz de comparar e classificar, com foco na sustentabilidade, os diferentes tipos de processos de corte de metais. O método a ser proposto possibilitará uma visão generalizada dos aspectos a serem considerados na avaliação dos processos, tornando as empresas aptas a lidar com a maior complexidade de decisão no cenário atual. Destaca-se, ainda, que as decisões resultantes do presente método deverão ser amparadas de acordo com o conceito do resultado triplo (triple bottom line), que contempla, simultaneamente, os parâmetros econômicos, ambientais e sociais. Por fim, a metodologia criada será aplicada no processo de corte por serra intermitente.

## 2. METODOLOGIA

Um aspecto comum entre os modelos de medição da sustentabilidade é a ausência de uma forma clara e estruturada de identificação e avaliação dos principais aspectos de desempenho. Outra característica corresponde ao detalhamento do procedimento com a finalidade de obter um indicador de sustentabilidade com base em diferentes medidas de

desempenho. O alicerce da metodologia de mensuração de indicadores de sustentabilidade (Key Performance Indicator) proposta tem como base o conceito de “Triple Botton Line”. As descrições dos KPI’s, abreviação para Key Performance Indicator, foram criadas com base em normas e metodologias de cálculos para a mensuração do indicador de sustentabilidade, sendo discriminadas em: sociais, econômicas e ambientais. A Figura 2 apresenta os indicadores de sustentabilidade propostos neste trabalho. A escolha desses indicadores foram com base nos conceitos de economia circular e suas aplicações.

Os indicadores remuneração por hora, número de acidentes, nível de ruído, nível de risco para o operador, treinamento, custo da mão de obra, tempo de produção e consumo de energia podem ser obtidos no chão de fábrica. Os indicadores custo de máquina, custo de ferramenta e custo total de produção podem ser obtidos por meio de dados eletrônicos. Os indicadores consumo de insumos e geração de resíduos podem ser obtidos, respectivamente, por meio de empresas e dados da literatura.

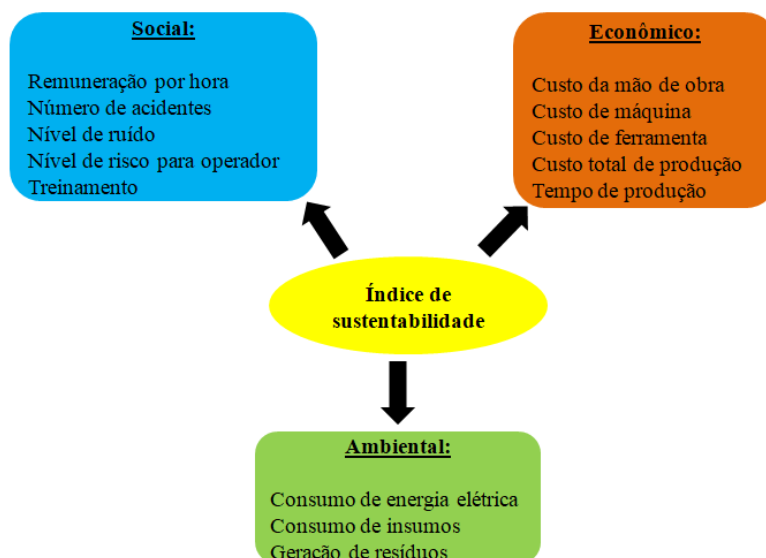


Figura 2. Indicadores de sustentabilidade utilizados neste trabalho

A mensuração do conceito de risco de acidente foi realizada por uma técnica clássica de gerenciamento de risco, conhecida como Análise Preliminar de Riscos, originada de Preliminary Hazard Analysis, que consiste na mensuração de riscos em sistemas (Cicco et al., 2003). Nesta análise, é realizada a identificação de duas variáveis fundamentais: frequência (Tab. 1) e severidade (Tab. 2). Na sequência, determinou-se o grau de risco da operação (Tab. 3).

Tabela 1. Determinação da frequência (Cicco et al., 2003)

Faixa de Frequência	Categoria
≥ 10 anos	Extremamente remota (A)
10 anos a 1 ano	Remota (B)
1 mês a 1 ano	Pouco provável (C)
1 dia a 1 mês	Provável (D)
< 1 dia	Frequente (E)

Tabela 2. Determinação da severidade (Cicco et al., 2003)

Severidade	Categoria
Não degrada o sistema ou seu funcionamento. Não causa lesões	Desprezível (I)
Degradação que causa lesões leves, mas compensável ou controlável	Marginal (II)
Degradação que causa lesões críticas, danos substanciais e pode colocar o sistema em risco. Necessidade de correção imediata. Séria degradação ao sistema produtivo	Crítica (III)
Perdas no sistema, mortes ou lesões permanentes	Catastrófica (IV)

Tabela 3. Determinação do grau de risco da operação (Cicco et al., 2003)

		<b>Frequência</b>				
<b>Severidade</b>		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>
	<b>I</b>	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Menor	Moderado
	<b>II</b>	Desprezível	Desprezível	Menor	Moderado	Sério
	<b>III</b>	Desprezível	Menor	Moderado	Sério	Catastrófico
	<b>IV</b>	Menor	Moderado	Sério	Catastrófico	Catastrófico

Para a medição do consumo de energia elétrica, foi utilizado um sensor de corrente não invasivo SCT-013-000 que utiliza o princípio da lei de indução eletromagnética de Faraday. Para verificar a tensão de linha do equipamento foi utilizado um multímetro digital da marca Multitoc, modelo DT-830BXXX com escala de tensão AC até 650 VAC.

A Figura 3 apresenta a configuração da instrumentação para mensurar consumo de energia elétrica durante o corte. Com o sensor de corrente é possível aquisição de toda a forma de onda da corrente durante todo o processo. Além disso, a tensão de linha foi constantemente monitorada para verificar que a mesma não varie, pois a potência ativa varia diretamente com a tensão e corrente. Foi utilizado um micro controlador Arduino® DUE com uma taxa amostragem de 600 Hz e 12 bits. Posteriormente todos os dados foram processados no software MatLab®.

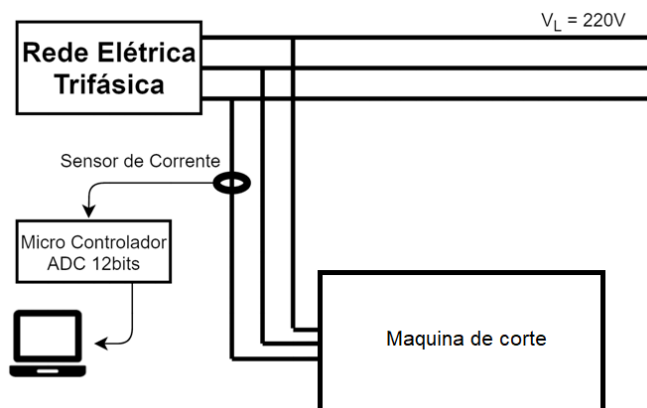


Figura 3. Esquema do sistema de medição do consumo de energia elétrica

Dessa forma, segundo Kularatna (2008), o consumo de energia elétrica da máquina pode ser calculada mediante a Eq. (1).

$$Pot_{cons} = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} I_{pico} \cdot FP \tag{1}$$

Onde,  $U_L$  é a tensão de linha,  $I_{pico}$  é a corrente de pico da linha absorvida na máquina de corte e  $FP$  é o fator de potência que é a razão entre a defasagem da tensão e da corrente na máquina.

O KPI's relacionados ao custo de máquina, custo de ferramental e custo total de produção foram obtidos a partir de catálogos e/ou dados eletrônico da empresa fabricante.

Foi utilizada uma balança digital da marca Gehaka, modelo BK500, para a medição das amostras e do ferramental utilizados antes e após o processo de corte das amostras.

O material utilizado para a realização dos experimentos foi o aço ABNT 8640 que tem grande aplicação na construção mecânica, substituindo o aço 1045 devido sua melhor propriedade nas secções transversais, resistência à fadiga. Suas principais aplicações são na fabricação de virabrequins, eixos, engrenagens entre outros (Figura 4). Antes de iniciar os cortes foi realizado o aplainamento das superfícies. Esta operação visa garantir um maior paralelismo entre as superfícies das amostras.

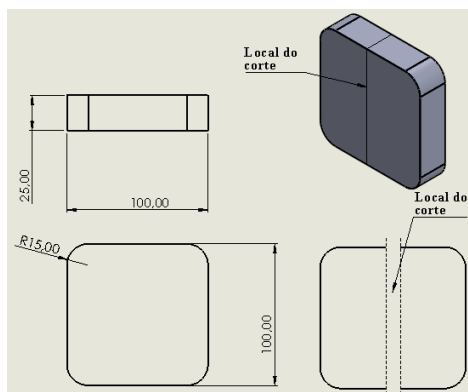


Figura 4. Dimensões do corpo de prova

Para a aplicação da metodologia, foi utilizado uma serra intermitente da marca Franho, Tipo 2000, 220 V, 60 Hz, 5 CV. Como ferramenta de corte foi utilizada uma lâmina de serra Starrett; Tipo Rs-2104-8, Fabricado em aço rápido ao molibdênio, 10 dentes/polegada. Esse processo de corte foi realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem da Universidade Federal de Uberlândia (LEPU/UFU). A Figura 5 apresenta o momento do corte da amostra pelo processo de serra intermitente.

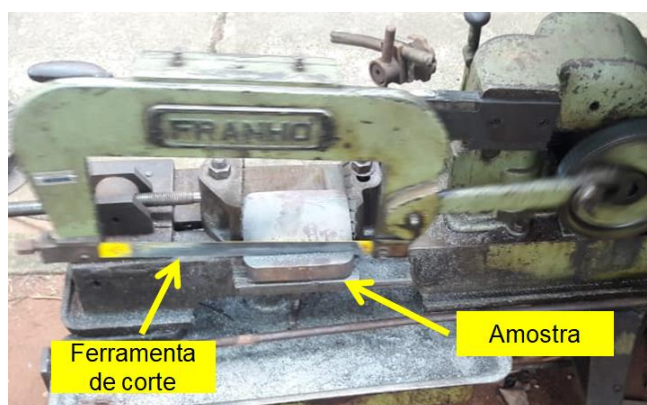


Figura 5. Serra intermitente da marca Franho

### 3. RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta alguns valores referentes aos custos com máquina e ferramental utilizados no processo de corte por serra intermitente.

Tabela 4. Indicadores de sustentabilidade utilizados neste trabalho

Descrição	Valor	Referência
Custo da máquina	R\$ 3000	Franho (2020)
Custo da ferramenta	R\$ 70	Starret (2020)
Número de peças fabricadas até a troca da ferramenta	500 peças	Empresa
Tempo médio de manutenção	1 h	Empresa

A Tabela 5 apresenta os dados de desempenho da sustentabilidade para a metodologia proposta neste trabalho. Todas as medidas foram obtidas levando em conta a produção de uma unidade do corpo de prova, segundo padrões de qualidade e desempenho previamente definidos para a peça.

Tabela 5 – Indicadores de sustentabilidade para o corte por serra intermitente

	<b>Indicadores</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>
Ambiental	Consumo de energia	kW/peça	0,259
	Consumo de insumo:		
	- Ferramenta de corte*	unidade/peça	0,0020
	Geração de resíduo:		
	- Ferramenta de corte	g/peça	0,20
	- Material da peça	g/peça	129,80
	Total	g/peça	130,00
Social	Remuneração por hora		
	Salário médio R\$ 1.500,00/mês	R\$/h	9,3750
	Número de acidentes	acidente/horas de trabalho	0,0001
	Nível de ruído	dB	80
	Nível de risco para o operador	Índice de risco	Desprezível
	Treinamento	horas/ano	2
Econômico	Custo da mão-de-obra	R\$/peça	1,7504
	Custo de máquina	R\$/peça	0,5384
	Custo de ferramenta	R\$/peça	0,1400
	Custo total de produção	R\$/peça	1,9288
	Tempo de produção	segundos/peça	672,17

\* 1kWh = R\$ 0,80

#### 4. CONCLUSÃO

Como foi visto acima, os indicadores de desempenho em sustentabilidade foram obtidos de bases de dados eletrônicas, dados de literatura (artigos científicos, relatórios públicos, análises ACV), dados não publicados (empresas, laboratórios, autoridades, outros), ou então, medições e/ou cálculos. Os indicadores foram agrupados em três parâmetros de controle (ambiental, social e econômico), que atendem a todos os treze aspectos de desempenho.

A propositura é apresentada para mensuração de índices de sustentabilidade para a etapa de processo. O que confere as organizações a possibilidade da evolução nos aspectos de gestão de sustentabilidade, uma vez que ao analisar cada fase individualmente evita ocultar algumas deficiências, comparada quando se aplica modelos em organizações como um todo.

Tal propositura poderá ser integrada a um sistema IoT (Internet of Things), que opera interligado e em cooperação em ambientes fechados, por meio de redes de dados globais ou locais e podem ser identificados individualmente e interagir uns com os outros. Assim o modelo aqui proposto seria alimentado automaticamente quando diversos setores da empresa alimentassem os dados.

#### 3. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Araucária pelo o apoio financeiro. Agradecem, também, a Universidade Federal de Uberlândia e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo suporte técnico.

#### 4. REFERÊNCIAS

- Azapagic, A., 2004, "Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry", *Journal of Cleaner Production*, 12, , p. 639-662;
- Barbieri, J. C. *Gestão Ambiental Empresarial*. São Paulo: Saraiva, 2002.
- Cicco, F., Fantazzini, M. L. *Tecnologias Consagradas de Gestão de Risco*, São Paulo: Risk Tecnologia, 2003.
- Crifo, P., Forget, V.D., Teyssier, S., 2015. The price of environmental, social and governance practice disclosure: an experiment with professional private equity investors. *J. Corp. Fin.* 30, 168e192. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2014.12.006>.

- Esfahbodi, A., Zhang, Y., Watson, G., Zhang, T., 2016, “Governance pressures and performance outcomes of sustainable supply chain management - an empirical analysis of UK manufacturing industry”, *J. Clean. Prod.*, p 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.098>;
- Huang, A.; Badurdeen, F. Metrics-Based Hierarchical Approach for Sustainable Manufacturing Systems Performance Evaluation. *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, n. Icpr, p. 672–677, 2017. <https://doi.org/10.12783/dtetr/icpr2017/17690>.
- Jawahir, I. S.; Bradley, R. Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 103–108, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.067>.
- Koho, M., Nylund, H., Arha T., Torvinen, S.: Towards Manufacturing System Sustainability Assessment: An Initial Tool and Development Plans. In: Seliger G., Khraisheh M., Jawahir I. (eds) *Advances in Sustainable Manufacturing*. Springer, Berlin, Heidelberg (2011). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7_44).
- Koren, Y. et al. Sustainable Living Factories for Next Generation Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, v. 21, p. 26–36, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.091>.
- Rizzo, G. V; Batocchio, A. Manufatura Sustentavel: Estudo e Análise da Adopção Articulada das Tecnicas de Produção Mais Limpa e Produção Enxuta. *Proceedings of 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production*, p. 9, 2011.
- Malek, J., Desai, T. N., 2020, “Review: A systematic literature review to map literature focus of sustainable manufacturing”, *Journal of Cleaner Production*, vol 256, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120345>;
- Rokhmawatia, A.; Sathyeb, M.; Sathyec, S. The Effect of GHG Emission, Environmental Performance, and Social Performance on Financial Performance of Listed Manufacturing Firms in Indonesia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. vol. 211, p. 461–470, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.061>.
- Schwarz, J.; Beloff, B.; Beaver, E., 2002, “Use Sustainability Metrics to Guide Decision- Making”, *Chemical Engineering Progress*;
- Steingrímsson, J.G., Bilge, P., Heyner S., Selinger G.: Business Strategies for Competition and Collaboration for Remanufacturing of Production Equipment. In: Seliger G., Khraisheh M., Jawahir I. (eds) *Advances in Sustainable Manufacturing*. Springer, Berlin, Heidelberg, p.91-97 (2011). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20183-7_14).

## 5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.