

A MÁQUINA FERRAMENTA DA INDÚSTRIA 4.0

IGOR FERNANDO BASSO - igorbasso@usp.br
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP - SÃO CARLOS

IRIS BENTO DA SILVA - ibs@sc.usp.br
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP - SÃO CARLOS

Área: 1 - GESTÃO DA PRODUÇÃO

Sub-Área: 1.4 - PROJETO DE FÁBRICA E DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

Resumo: A INDÚSTRIA 4.0 EXIGE QUE NOVAS TECNOLOGIAS SEJAM DESENVOLVIDAS E APLICADAS PARA QUE SEUS CONCEITOS DE TOTAL CONECTIVIDADE E FLEXIBILIDADE SEJAM ALCANÇADOS. NESSA QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL AS MÁQUINAS FERRAMENTAS DEVEM SER MAIS FLEXÍVEIS E AUTÔNOMAS. NESSE CONTEXTO, ESTE ARTIGO TEM O OBJETIVO DE APRESENTAR UMA BREVE REVISÃO SOBRE QUAIS CARACTERÍSTICAS DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS NA INDÚSTRIA 4.0, E APRESENTAR E DISCUTIR AÇÕES PARA IMPLEMENTAR ESSES CONCEITOS. DIFERENTEMENTE DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS CONVENCIONAIS, DESENVOLVIDAS NA PRIMEIRA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL, QUE EXIGEM QUE O OPERADOR TENHA UMA GRANDE HABILIDADE E EXPERIÊNCIA, AS MÁQUINAS FERRAMENTAS DA INDÚSTRIA 4.0, OU MÁQUINAS FERRAMENTAS 4.0, DEVEM SER INTELIGENTES, AUTÔNOMAS E CONECTADAS A TUDO E A TODOS. PARA ATINGIR ESSES OBJETIVOS AS MÁQUINAS PASSAM A SER ALTAMENTE INSTRUMENTADAS, ALÉM DE CONTAR COM UM SISTEMA, EM NUVEM, PARA ANALISAR OS DADOS E REALIZAR O SEU CONTROLE DE FORMA AUTÔNOMA. OUTRO PONTO É A INTERAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO, POR MEIO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS HÍBRIDAS, PRINCIPALMENTE AS QUE UNEM AS VANTAGENS DA USINAGEM COM A MANUFATURA ADITIVA. POR FIM, CONSIDERA-SE QUE A MÁQUINA FERRAMENTA HÍBRIDA SEJA TOTALMENTE APROPRIADA PARA A INDÚSTRIA 4.0.

Palavras-chaves: INDÚSTRIA 4.0; MÁQUINAS FERRAMENTAS; MÁQUINAS INTELIGENTES.

THE INDUSTRY TOOL MACHINE 4.0

Abstract: *INDUSTRY 4.0 REQUIRES THAT NEW TECHNOLOGIES BE DEVELOPED AND APPLIED SO THAT THEIR CONCEPTS OF FULL CONNECTIVITY AND FLEXIBILITY ARE ACHIEVED. IN THIS FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION THE MACHINE TOOLS MUST BE MORE FLEXIBLE AND AUTONOMOUS. IN THIS CONTEXT, THIS ARTICLE AIMS TO PRESENT A BRIEF REVIEW ON WHAT FEATURES OF MACHINE TOOLS IN INDUSTRY 4.0, PRESENT AND DISCUSS ACTIONS TO IMPLEMENT THESE CONCEPTS. UNLIKE CONVENTIONAL MACHINE TOOLS, DEVELOPED IN THE FIRST INDUSTRIAL REVOLUTION, WHICH REQUIRE THE OPERATOR TO HAVE GREAT SKILL AND EXPERIENCE, THE INDUSTRY'S 4.0 MACHINE TOOLS OR 4.0 MACHINE TOOLS MUST BE INTELLIGENT, AUTONOMOUS AND CONNECTED TO EVERYTHING AND EVERYONE. TO ACHIEVE THESE GOALS, THE MACHINES BECOME HIGHLY INSTRUMENTED, IN ADDITION TO HAVING A SYSTEM, IN THE CLOUD, TO ANALYZE THE DATA AND PERFORM ITS CONTROL AUTONOMOUSLY. ANOTHER POINT IS THE INTERACTION BETWEEN THE MANUFACTURING PROCESSES, THROUGH HYBRID MACHINE TOOLS, ESPECIALLY THOSE THAT COMBINE THE ADVANTAGES OF MACHINING WITH ADDITIVE MANUFACTURE. FINALLY, THE HYBRID MACHINE TOOL IS CONSIDERED TO BE FULLY SUITABLE FOR INDUSTRY 4.0.*

Keyword: *INDUSTRY 4.0; MACHINE TOOLS; SMART MACHINES.*

1. Introdução

A história mostra que a humanidade vive em constante desenvolvimento, tanto nos aspectos morais e culturais quanto nos aspectos tecnológicos. Da mesma forma a indústria se mostra dinâmica, há cerca de três séculos o artesanato predominava no universo “industrial”, depois os esforços humanos e animal deram lugar a força das máquinas movidas a vapor, numa transformação conhecida como primeira revolução industrial. No início do século XX, ocorreu a segunda revolução industrial, com o desenvolvimento nas áreas de materiais e eletricidade, os artesãos e as máquinas a vapor foram substituídos pela produção em massa. Desde então o desenvolvimento da tecnologia apresenta uma taxa cada vez maior, primeiro com o advento do computador na terceira revolução industrial e atualmente inicia-se a quarta revolução industrial ou a indústria 4.0, com o advento da internet e sensores menores e mais inteligentes (SALKIN *et al.*, 2018; SCHWAB, 2016).

Além da indústria como um todo, o setor da usinagem teve um grande desenvolvimento nesse período, sobretudo a partir da segunda revolução industrial. O surgimento de novos materiais, e depois a exigência por uma alta produção e produtividade, e mais recentemente a demanda por produtos customizados exigiu máquinas ferramentas mais robustas, inteligentes e flexíveis. As máquinas ferramentas antes manuais, e depois controladas por computador, na indústria 4.0, passam a ter uma grande inteligência, aliada a conectividade que permite a total integração com todas as etapas da vida de um produto (LIU e XU, 2017; XU, 2017).

Este artigo propõe-se a fazer uma breve revisão sobre os requisitos e características para que uma máquina ferramenta se adeque a indústria 4.0, também serão apresentadas e discutidas algumas ações para alcançar suas características. Este artigo está organizado em quatro seções: introdução, indústria 4.0, máquina ferramenta 4.0 e considerações finais. A seguir será realizada uma introdução sobre a quarta revolução industrial, comparando-a com as três anteriores. Na seção máquina ferramenta 4.0 é apresentado uma discussão sobre as características das máquinas ferramentas nas quatro revoluções industriais, uma análise da máquina ferramenta 4.0 e exemplos de aplicações. E por fim, é apresentado as considerações finais.

2. Método de pesquisa

A revisão de literatura identificou e organizou um resumo dos principais pontos dos artigos estudados (ROWLEY, SLACK; 2004). Foi dividido em três fases: i) planejamento; ii) condução; e iii) disseminação. Na fase de planejamento, a seguinte questão de pesquisa foi

levantada: Qual é a relação da Indústria 4.0 com as máquinas-ferramentas? Na fase de condução, a pesquisa utilizou a base de dados com a palavra-chave “Indústria 4.0” e “máquinas-ferramentas” na base de dados Google Acadêmico. Em seguida, os artigos foram filtrados usando "período" (2014 a 2018). Finalmente, os artigos foram selecionados em produções que têm grande influência na economia atual. Na fase de disseminação, formulou-se a classificação e análise dos artigos selecionados, o que foi alcançado com a revisão do assunto estudado; classificação dos artigos estudados e analisados. Na Tabela 1 encontram-se os artigos pesquisados.

TABELA 1 – Artigos pesquisados sobre as classes de máquinas ferramentas na Indústria 4.0.

Autor, ano	Journal	Característica
CAO, H.; ZHANG, X.; CHEN, X., 2017	International Journal of Machine Tools & Manufacture,	Intelligent spindles
LAUWERS, B.; KLOCKE, F.; KLINK, A.; TEKKAYA, A. E.; NEUGEBAUER, R.; MCINTOSH, D, 2014	CIRP Annals – Manufacturing Technology	Hybrid processes
FLYNN, J. M.; SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T.; DHOKIA, V., 2016	Journal of Machine Tools & Manufacturing	Hybrid additive and subtractive machine tools
LEVENTON, W. A., 2016	Cutting Tool Engineering	Machine tool for industry 4.0
LIU, C.; XU, X., 2017	Procedia CIRP	Cyber-physical machine tool
SALKIN, C.; ONER, M.; USTUNDAG, A.; CEVIKCAN, E., 2018	Cham: Springer	Framework for industry 4.0
SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B., 2018	Revista Produção e Desenvolvimento	Indústria 4.0: desafios e oportunidades
THOBEN, K. D.; WIESNER, S.; WUEST, T., 2017	International Journal of Automation Technology,	Industrie 4.0 and smart manufacturing
XU, X., 2017	International Journal of Advanced Manufacturing Technology	Machine tool 4.0 for the new era

Fonte: elaborada pelos autores.

3. Indústria 4.0

A Figura 1 esquematiza o desenvolvimento industrial do século XVIII até a atualidade. Antes da primeira revolução industrial, toda produção fabril era feita de forma artesanal, mas o desenvolvimento do motor a vapor desencadeou o início da indústria mecanizada. Entre o final do século XIX e o início do século XX, com o desenvolvimento da eletricidade e materiais que unidos a criação da divisão das tarefas, padronização e linhas de produção possibilitou a fabricação de produtos em série, ou produção em massa. Como consequência os produtos industrializados ficaram mais acessíveis e novos empregos foram criados,

aumentando o poder de aquisição da população. Esse avanço da indústria ficou conhecido como segunda revolução industrial. Após a segunda guerra mundial, surgiram os primeiros computadores que somados a avanços na eletrônica e em materiais, principalmente semicondutores desencadearam a terceira revolução industrial, ou revolução digital. Essa revolução teve como palavra chave a automatização devido à larga utilização da robotização e máquinas automáticas controladas por computador (SCHWAB, 2016; SANTOS et al, 2018; ZHOU, LIU E ZHOU, 2016).

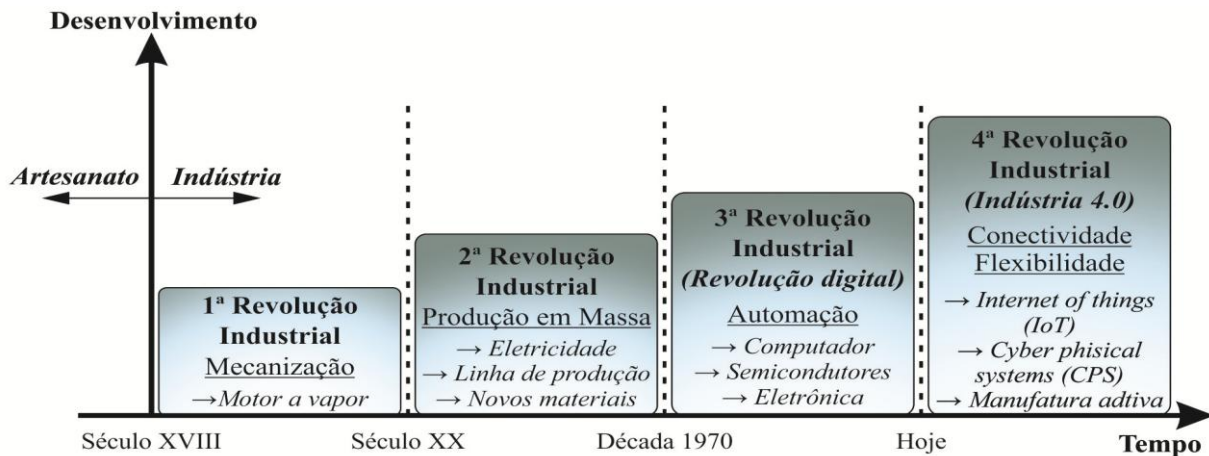


FIGURA 1 - Evolução histórica da indústria. Adaptado de: Thoben, Wisner e Wuest (2017), Santos et al. (2018) e Zhou, Liu e Zhou (2016).

Atualmente o mundo observa uma grande presença do domínio virtual, diariamente surgem novos aparelhos mais inteligentes e conectados tais como: celulares (“*smartphones*”), relógios (“*smartwatch*”), televisores (“*smartTVs*”), entre outros. Isso cria uma forte relação entre o domínio físico (real) e o virtual, na forma de sistemas físicos-virtuais (CPS, “*cyber-physical systems*”), possibilitando o advento da Internet das Coisas (IoT, “*Internet of Things*”) e Internet dos Serviços (IoS, “*Internet of Services*”). Neste contexto se inicia a quarta revolução industrial, marcada pela introdução do termo Indústria 4.0 instituída pelo governo Alemão na feira de Hanover em 2011. Sistemas de produção físicos-virtual permitem criar as chamadas indústrias inteligentes (“*smart factories*”) e fábricas do futuro (“*factories of the future*”), que por conceito são fabricas que possuem máquinas inteligentes e conectadas, o que permite uma produção mais flexível e eficiente (SALKIN *et al.*, 2018; SCHWAB, 2016; XU, 2017; ZHOU, LIU E ZHOU, 2016).

Essas mudanças são encaradas por alguns acadêmicos como uma consequência da terceira revolução industrial, mas, Schwab (2016) defende a existência da quarta revolução industrial com base em três observações: a velocidade, a dimensão e o impacto dos sistemas. Nenhuma das revoluções anteriores evoluiu com uma velocidade tão grande como a quarta,

ela cresce em ritmo exponencial e não linear; todos os dias novas tecnologias são desenvolvidas, que por sua vez geram novas tecnologias. A quarta revolução é baseada na terceira junto com a introdução de múltiplas tecnologias, dando-a uma dimensão tão grande que ela não afeta apenas tecnologias e métodos, mas também o modo de viver da população. Seu impacto é tão grande a ponto de afetar sistemas inteiros como empresas, indústrias, países e a sociedade como um todo (SCHWAB, 2016).

Salkin *et al.* (2018) comenta que a indústria 4.0 está baseada em oito avanços tecnológicos: robótica adaptativa, análise de dados e inteligência artificial (“*big data analytics*”), simulação, sistemas embarcados, comunicação e *networking*, sistemas em nuvem (“*cloud*”), manufatura aditiva e tecnologias de virtualização. Essas são as ferramentas básicas para que o conceito de fábrica inteligente seja alcançado. O uso intensivo da robotização, o alto sensoriamento das máquinas/processos unido a extensiva análise dos dados gerados em compartilhamento na nuvem são pontos essenciais para qualquer aplicação de conceitos da Indústria 4.0.

Sumarizando, as palavras chave da quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, são conectividade e flexibilidade. Nessa nova etapa da indústria e da humanidade as máquinas inteligentes fabricaram produtos inteligentes e customizados, ambos conectados a tudo e todos.

4. Máquina Ferramenta 4.0

4.1 Classificação das máquinas ferramentas

Xu (2017) classifica as máquinas ferramentas (MF) de acordo com os níveis de autonomia da máquina em MF 1.0, 2.0, 3.0 e 4.0. A Tabela 2 compara algumas características entre as quatro classes de MF.

A classe máquina ferramenta 1.0 (ou máquinas convencionais) surgiu nos primeiros anos da primeira revolução industrial na Inglaterra, e o período de maior importância nas indústrias foi entre 1775 até 1950. Embora essas máquinas tenham acionamento mecânico (até então grande parte das máquinas era acionada por força humana ou animal), sua operação e controle eram manuais, o que exigia grande habilidade e experiência do operador (LIU e XU, 2017; XU, 2017). Deve-se ressaltar que as MF 1.0 ainda se encontram presente na indústria, sobretudo, para pequenos reparos/manutenção de peças com baixa complexibilidade ou em micro/pequenas empresas. Simon (2015) realizou um inventário de máquinas ferramentas de usinagem existentes no Brasil, pesquisando 10.209 empresas. Seus resultados estimam que,

nas empresas analisadas, existam 210 mil MF, onde 68% destas são convencionais, ou seja, classificadas como MF 1.0 (SIMON, 2015). Isto se reflete numa baixa produtividade da indústria brasileira, e dificulta, ou atrasa, a implementação de indústrias 4.0 no país.

TABELA 2 – Características das classes de máquinas ferramentas.

Características	MF 1.0	MF 2.0	MF 3.0	MF 4.0
Nível de autonomia	*	**	***	****
Atuação	manual	eletrônica	eletrônica	eletrônica
Controle	manual	numérico	computador	autônoma
Produtividade	*	**	***	****
Flexibilidade	*	*	***	****
Complexidade das peças	*	*	***	****
Habilidade do operador	****	***	**	*

Fonte: adaptado de Liu e Xu (2017) e Xu (2017).

Por volta da década de 1950, um grupo de pesquisa do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) desenvolveu a primeira máquina controlada numericamente, adaptando uma máquina ferramenta convencional. Esse tipo de máquina é classificado por Xu (2017) como máquina ferramenta 2.0. O seu controle numérico é feito através de fitas/cartões perfurados ou fitas magnéticas, com pouquíssima memória, o que dificultava a edição de programas. No entanto essa classe de máquinas trouxe uma grande melhoria da produtividade e na qualidade das peças, em comparação as máquinas ferramentas 1.0 da época (LIU e XU, 2017; XU, 2017). O período de maior importância das máquinas ferramentas 2.0 para a indústria foi entre as décadas de 1950 e 1980, atualmente estão praticamente obsoletas.

Com o desenvolvimento do computador, por volta da década de 1970, o controle numérico por meio de cartões perfurados foi substituído pelo controle numérico computadorizado (CNC) dando início a era de máquinas ferramentas 3.0, que perdura até hoje. Essa máquina permitiu a fabricação de peças mais complexas, diminuiu drasticamente a ação humana na fabricação e permitiu a união de vários processos de usinagem em uma única máquina. Geralmente, uma máquina CNC contém a máquina ferramenta e uma unidade de controle de máquina (MCU), que por sua vez consiste em uma unidade de processamento de dados (DPU) e uma unidade de controle de *loops* (CLU). O DPU processa os dados do programa e transmite as informações de posição, direção de movimento e velocidade de cada eixo para o CLU, que aciona os mecanismos que opera a máquina e recebe sinais de retroalimentação. Este sistema é integrado com sistemas de desenho assistido por computador

(CAD) e manufatura assistida por computador (CAM), permitindo a integração entre o projeto e a fabricação, o que torna a manufatura mais flexível (LIU e XU, 2017; XU, 2017).

Atualmente, a quarta revolução industrial exige a classe de máquinas ferramentas 4.0 que são mais inteligentes, conectadas, acessíveis, flexíveis e autônomas do que qualquer das outras classes de máquina-ferramenta comentadas acima. As máquinas-ferramentas 4.0 permitem total integração vertical e horizontal. As máquinas transformam-se em máquinas ferramentas físicas-virtual (CPMT, “*cyber-physical machine tools*”), que se trata da integração entre a máquina ferramenta, computador e *networking*, no quais os últimos monitoram e controlam os processos de usinagem com as informações de retroalimentação da máquina. Toda CPMT terá um modelo virtual (“*cyber twins*”) que recebe e analisa dados de sensores das máquinas físicas, dando a máquina autoconsciência e autopredição (LIU e XU, 2017; XU, 2017).

Leventon (2016) relata um modelo de MF 4.0 instalada em uma fábrica de rolamentos em Hoehstadt, na Alemanha. Um centro de usinagem *DMG Mori's DMC 80 FD duo BLOCK* foi instrumentado com mais de 60 sensores extras que medem força, vibração, temperatura, pressão, entre outros. Os dados desses sensores são transmitidos em tempo real do domínio físico para o virtual, onde podem ser visualizados e analisados pelos usuários da máquina, fornecedores e clientes. Dessa forma, pode se prever a falha de um componente, fazer a solicitação de produção ao fornecedor e a sua substituição programada, sem perdas maiores de tempo devido a quebras imprevistas. Além disso, todas as peças fabricadas por essa máquina são codificadas e analisadas individualmente, de modo a identificar e corrigir possíveis problemas no processo fabricação. As grandes vantagens desse conceito de instrumentação são: maior precisão da usinagem, otimização do processo e manutenção aprimorada (LEVENTON, 2016).

4.2 Ações para implementação da máquina ferramenta 4.0

A máquina ferramenta 4.0, requisitada pela indústria 4.0, deve ser inteligente e flexível. Para atingir a inteligência da máquina deve conhecer, analisar e se necessário corrigir seu atual estado de funcionamento. Para tanto, pesquisadores e indústrias trabalham na instrumentação/sensoriamento e sistemas de análise dos dados de máquinas ferramentas. Um exemplo dessa ação é o desenvolvimento de fusos inteligentes. Por outro lado, uma maior flexibilidade é atingida quando a máquina consegue realizar maior número possível de processos/operações de fabricação, o que é o caso das máquinas ferramentas híbridas, que unem processos de fabricação por adição e subtração de material (impressão 3D e usinagem).

O fuso é um dos sistemas mais importantes da máquina ferramenta, podendo fornecer uma grande quantidade de dados da condição instantânea do processo (por exemplo: estado de vida da ferramenta, características da vibração, possibilidade de choque) por isso existem várias pesquisas para desenvolvimento do fuso inteligente. Segundo Cao, Zhang e Chen (2017) fusos inteligentes são aqueles com a capacidade de detectar, tomar decisão e controlar de forma a garantir a segurança e otimização de processos de usinagem. Espera-se que os fusos inteligentes tenham pelo menos seis funções básicas: monitoramento e controle da ferramenta, vibração, colisão do fuso, temperatura/erro térmico, equilíbrio e segurança do fuso. Para atingir essas funções os fusos devem ser instrumentados, ter a capacidade de analisar os dados de maneira autônoma para otimizar ou corrigir parâmetros de processos. A principal característica é a sua autonomia, para garantir melhores parâmetros, o sistema de controle do fuso deve ter autoaprendizagem, assim é possível garantir que ele estará apto a resolver o maior número de problemas possível, conforme eles apareçam (CAO, ZHANG, CHEN, 2016).

No objetivo de aumentar a flexibilização dos processos começam a surgir máquinas ferramentas híbridas, que são aquelas máquinas que realizam mais de um processo de fabricação. Além disso, as vantagens dos dois, ou mais, processos são maximizadas e as desvantagens são minimizadas, como resultado final, a vantagem do processo híbrido é maior que a soma das vantagens de cada processo que incorpora o processo híbrido (FLYNN *et al*, 2016; LAUWERS *et al*, 2014; ZHU, 2013). Lauwers *et al* (2014) apresentaram a definição mais ampla de processo híbrido como a interação controlada e simultânea de mecanismos, fontes de energia e/ou ferramentas que tenham um efeito significativo no desempenho do processo. Nesse sentido mais amplo, processos assistidos (como exemplo usinagem e dobramento assistido por *laser* e usinagem assistida por vibração), mistura de processos (como exemplo processo de fabricação por remoção e adição de material) e aqueles processos que unem características de dois processos intrinsecamente (por exemplo a retificação de aços endurecidos e o aquecimento, devido a altas pressões, com a remoção do material) são considerados processos híbridos (LAUWERS *et al*, 2014).

Contudo, no contexto de Indústria 4.0 o processo híbrido mais interessante é aquele que une a fabricação por adição e subtração de material (WHAPS, “*workstation for hybrid additive and subtractive processing*”) em uma única máquina ferramenta. Ambos processos têm várias desvantagens. Na manufatura aditiva é difícil se obter bons acabamentos e tolerâncias dimensionais estreitas, enquanto que a usinagem apresenta um elevado tempo de fabricação tornando o custo elevado devido à dificuldade de criar geometrias complexas,

sobretudo internas (dutos e furos complexos). A união dos dois processos permite construir peças de elevada complexibilidade, com tolerâncias geométricas estreitas, acabamentos finos, em menor tempo e gastando menos ferramentas e energia. O maior ganho para as indústrias e a sociedade como todo é a economia de material, ferramenta e energia. Além disso, o WHAPS (*workstation for hybrid additive and subtractive processing*) pode ser usado para o retrabalho/recondicionamento de peças de alto custo, como exemplo o reparo de matrizes e moldes (FLYNN *et al.*, 2016). Outra grande vantagem do WHAPS que vai ao encontro dos objetivos da indústria 4.0 é a possibilidade de fabricar componentes inteligentes ou otimizados com relação ao(s) material(ais). A manufatura aditiva permite imprimir em uma única peça diferentes materiais/componentes, desde que sejam quimicamente compatíveis e estáveis. Assim o processo pode ser otimizado para que uma determinada região da peça que tenha uma tal solicitação receba um material compatível com condição, enquanto que o restante da peça pode ser construída de um material menos nobre/mais barato.

Flinn *et al.* (2014) listam diversas máquinas ferramentas híbridas, para fabricação por adição e remoção de material, vendidas comercialmente. Contudo, no ano passado o Brasil deu um importante passo para adentrar no caminho da indústria 4.0 com o lançamento de uma máquina híbrida (WHAPS – *workstation for hybrid additive and subtractive processing*) pelas Indústrias ROMI (2018) na Feira Internacional de Máquinas Ferramenta e Automação Industrial (EXPOMAFE) 2017. A máquina ferramenta ROMI DCM 620-5X HYBRID consiste em um centro de usinagem com cinco eixos (graus de liberdade) equipada com um cabeçote de adição de material por solda de deposição a laser (LMD, “*laser metal deposition*”) que permite criar estruturas por adição com metais como inonel e aço inoxidável (INDÚSTRIAS ROMI S. A., 2018).

5. Considerações Finais

Este artigo fez uma breve revisão sobre as características de uma máquina ferramenta 4.0, ou seja, daquela máquina exigida pela indústria 4.0. Também foi apresentado e discutidos alguns métodos para alcançar os requisitos exigidos para as máquinas inteligentes. Os principais requisitos são que as máquinas ferramentas sejam autônomas, altamente flexíveis e conectadas. Os sistemas das máquinas ganham uma série de sensores, que fornecem dados para serem analisados em sistemas de controle *on-line* para que sejam tomadas decisões sobre alterações do processo. Uma ação muito promissora no caminho das máquinas ferramentas 4.0 é o desenvolvimento de máquinas híbridas, assim pode-se unir as vantagens de dois ou

mais processos de fabricação reduzindo substancialmente as desvantagens desses processos isolados.

Referências

- CAO, H.; ZHANG, X.; CHEN, X. The concept and progress of intelligent spindles: a review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 112, p. 21-52, 2017.
- LAUWERS, B.; KLOCKE, F.; KLINK, A.; TEKKAYA, A. E.; NEUGEBAUER, R.; MCINTOSH, D. Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, v. 63, p. 561-583, 2014.
- FLYNN, J. M.; SHOKRANI, A.; NEWMAN, S. T.; DHOKIA, V. Hybrid additive and subtractive machine tools – Research and industrial developments. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, v. 101, p. 79-101, 2016.
- LEVENTON, W. A machine tool for industry 4.0. *Cutting Tool Engineering*, v. 6, n. 1, p. 30-32, jan. 2016.
- LIU, C.; XU, X. Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. *Procedia CIRP*, v. 63, p. 70-75, 2017.
- INDÚSTRIAS ROMI S. A. ROMI DCM 620-5X HYBRID. Disponível em: <<http://www.romi.com/produtos/romi-hybrid/>>. Acesso em: 18 de junho de 2018.
- ROWLEY, J., SLACK, F. Conducting a Literature Review. *Management Research News* 2004; 27(6)31–39.
- SALKIN, C.; ONER, M.; USTUNDAG, A.; CEVIKCAN, E. A conceptual framework for industry 4.0. In: USTUNDAG, A.; CEVIKCAN, E. Industry 4.0: managing the digital transformation. *Cham: Springer*, 2018. p. 3-23.
- SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUA-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 4, n. 1, p. 111-124, 2018.
- SCHWAB, K. *The fourth industrial revolution*. Genebra: World Economic Forum, 2016.
- SIMON, A. T. XIII Inventário MM: as máquinas-ferramentas de usinagem instaladas no parque industrial brasileiro. *Máquinas e Metais*, v. 599, p. 20-38, dez. 2015.
- THOBEN, K. D.; WIESNER, S.; WUEST, T. “Industrie 4.0” and smart manufacturing – a review of research issues and application examples. *International Journal of Automation Technology*, v. 11, n. 1, p. 4-16, 2017.
- XU, X. Machine tool 4.0 for the new era of manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 92, p. 1893-1900, 2017.
- ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: towards future industrial opportunities and challenges. In: 2015 12TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FUZZY SYSTEMS AND KNOWLEDGE DISCOVERY (FSKD), 12., 2015, Zhangjiajie, China. Anais... China: IEEE, 2016, p. 2147-2152.
- ZHU, Z.; DHOKIA, V. G.; NASSEHI, A.; NEWMAN, S. T. A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 26, n. 7, p. 596-615, 2013.