

Paulo Magalhães¹, F. Simões², N.M. Fonseca Ferreira^{3,4,*}

¹Europneumaq, Rua Senhora da Mestra, nº 35, 4410-511, Serzedo

²Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), Quinta da Nora, 3030-199 Coimbra, Portugal

³GECAD - Knowledge Research Group on Intelligent Engineering and Computing for Advanced Innovation and Development of the Polytechnic

⁴Institute of Porto, Engineering Institute of Porto (ISEP), Porto, Portugal

*email: nunomig@isec.pt

A utilização de *robots* colaborativos em tarefas de soldadura em arco

Resumo: Nas últimas décadas, muitas tentativas foram feitas para automatizar todo o processo de soldadura, no entanto, continuam a existir muitas operações de soldadura não automatizadas que apresentam um perigoso constante para os trabalhadores. Este artigo apresenta uma solução automatizada de soldadura com *robots* colaborativos, e pretendemos com esta contribuição ajudar as empresas deste setor a aumentar a produtividade, a melhoria da qualidade, a redução efetiva de custos bem como melhorar as condições de trabalho dos trabalhadores.

Palavras-chave: Sistemas Robóticos, Soldadura, Colaboração, Cooperação

1. INTRODUÇÃO

A soldadura é uma especialidade profissional muito importante em termos de qualidade de fabrico. Efetivamente, é uma das especialidades onde é exigida a qualificação profissional através de certificação, sendo a técnica da soldadura usada em muitas aplicações, geralmente de elevada responsabilidade [1-4]. Entre as diversas técnicas de soldadura usualmente aplicadas em ligas metálicas ferrosas e não ferrosas, a soldadura por arco submerso bem como a soldadura MIG, TIG e MAG são particularmente adequadas para serem automatizadas e implementadas conjuntamente com robôs. A utilização de sistemas robóticos para soldadura, além dos robôs serem industriais estes ocupam um espaço operacional de grandes dimensões, além do sistema robótico são montados em equipamentos móveis que se movem nos diversos eixos [5, 6]. A utilização de posicionadores da estrutura, combinado com o robô industrial permite melhorar a forma como a estrutura é soldada [7, 8]. Um sistema robótico de soldadura, tipicamente funciona suspenso e são sistemas dispendiosos. Estes sistemas apresentam uma elevada eficiência, normalmente equipa-se o robô com tochas de soldadura, uma fonte de alimentação digital para soldadura, entre outros equipamentos.

A utilização de sistemas robóticos industriais em diversas aplicações de soldadura em arco é bastante frequente [1-4], no entanto estes sistemas ocupam um espaço operacional geralmente de grandes dimensões, além do sistema robótico industrial, muitos são montados em equipamentos móveis com diversos eixos [5, 6]. Além destes sistemas por vezes utilizam

posicionadores da estrutura o que permite melhorar a forma como a estrutura é soldada [7, 8]. Um sistema robótico de soldadura, tipicamente funciona suspenso no teto e são muito dispendiosos, mas apesar dos custos estes sistemas apresentam uma elevada eficiência o que permite o aumento da produtividade e nas empresas quanto maior for o número de *robots* instalados para este tipo de processos maior pode ser a produtividade, no entanto, existem outros muitos desafios, por exemplo, se os tempos de soldadura entre os diferentes *robots* não for idêntico, pode causar tempos de espera entre os diferentes *robots*, e para sistemas com múltiplos *robots* é necessário estudar a redução destes tempos de espera. Outros dos desafios neste tipo de trabalho é a deformação das peças devido à soldadura por um período prolongado, por essa razão nos sistemas robóticos são instalados sensores para detetar a posição de início da soldadura e sensores de arco para corrigir o desvio durante o processo de soldadura [9, 10].

A inclusão de sistemas robóticos colaborativos (*Cobot*) deve-se a vários fatores, em especial à facilidade de utilização e instalação deste tipo de equipamentos, além destes fatores, estes sistemas apresentam uma excelente flexibilidade [11-13]. Nas tarefas de soldadura a possibilidade da utilização de *Cobots* permite mais flexibilidade nas diferentes tarefas de soldadura, além disso permite aos técnicos especializados interagir facilmente com um ou até vários *Cobots* ao mesmo tempo, assim, é possível alterar as trajetórias de uma forma mais rápida, preparar os diferentes setups dos vários processos de soldadura, melhorando significativamente o desempenho dos trabalhos [14]. O principal objetivo da utilização de *Cobots* é combinar o desempenho deste sistema com as capacidades de um ser humano [15]. A integração de *Cobots* permite obter uma solução mais intuitiva para o técnico especialista, obtendo praticamente as mesmas funcionalidades que um *robot* industrial, mas com as vantagens dos *Cobots*, mesmo perdendo a principal função de *robot* colaborativo, mas ganhando uma função de cooperação no processo.

A colaboração entre humanos e *robots* (HRC) é uma nova tendência neste tipo de aplicações, o principal objetivo é construir um ambiente de colaboração segura entre os humanos e os sistemas robóticos. Em todos os tipos de trabalhos existem zonas de trabalho entre a produção manual e a produção totalmente automatizada, nesta zona o trabalhador humano pode interagir com uma máquina [16-18]. No entanto esta zona de trabalho tem muitas limitações devido às restrições de segurança [19-22]. Por exemplo na utilização de um sistema robótico industrial o sistema só funciona, somente se o pessoal estiver fora da célula de fabrico. Na robótica colaborativa as pessoas podem partilhar o espaço de trabalho, para que este possa

ajudar em operações não ergonômicas, operações repetitivas, ou até desconfortáveis ou mesmo perigosas.

É óbvio que qualquer *robot* através dos seus sensores instalados, pode monitorizar os seus movimentos e limitar a velocidade a qualquer momento ou até deixar de realizar uma determinada tarefa. A possibilidade de usar o espaço de trabalho sem cercas de segurança pode melhorar a produção e maximizar o espaço das empresas. A ideia é estender este conceito para diferentes aplicações robóticas, principalmente aquelas que ainda não foram automatizadas. Podemos ver estes tipos de sistemas robóticos como assistentes robóticos para melhorar a qualidade do trabalho dos trabalhadores humanos. [23, 24].

Na secção um deste artigo, é feita uma introdução das aplicações de soldadura, bem como uma introdução aos *Cobots*. A secção dois é dividida em três subsecções; a primeira subsecção apresenta a estrutura mecânica com um sistema robótico de soldadura industrial. Em seguida, na subsecção dois, apresentamos o estado da arte dos *Cobots* na indústria, e na subsecção três, feita a apresentação do protótipo industrial desenvolvido para Soldadura Colaborativa e, por fim, apresentamos nossa discussão e conclusões.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. A estrutura mecânica de um sistema de robot de soldagem industrial

A construção de equipamentos pode incluir várias linhas de soldadura de grandes dimensões em especial com a utilização de múltiplos *robots*. O processo é bastante simples, normalmente existem posicionadores para poder rodar as peças a serem soldadas e de seguida efetua-se uma repetição desta operação. Os movimentos e posições dos diversos *robots* são previamente planeados para evitar colisões. Existem duas metodologias a seguir para resolver este problema. A primeira é uma função que preveja a paragem dos *robots* e pare o movimento dos *robots* antes da colisão. A segunda forma é efetuar a soldadura em multicamada numa única linha de solda por vários *robots*. O *robot* executa uma soldadura multicamada de uma linha de solda em conjunto com outro *robot*, o que elimina o tempo de espera e reduz significativamente o tempo geral de soldadura. Exemplo de uma estrutura mecânica de um *robot* industrial é composta por duas partes principais, o sistema robótico e a sua ferramenta, conforme se mostra na Figura 1.



Figura 1. Sistema robótico industrial de soldadura.

“

É óbvio que qualquer *robot* através dos seus sensores instalados, pode monitorizar os seus movimentos e limitar a velocidade a qualquer momento ou até deixar de realizar uma determinada tarefa. A possibilidade de usar o espaço de trabalho sem cercas de segurança pode melhorar a produção e maximizar o espaço das empresas.

A ideia é estender este conceito para diferentes aplicações robóticas, principalmente aquelas que ainda não foram automatizadas.

Na Figura 2 apresenta-se como exemplo uma ferramenta de soldadura.



Figura 2. Ferramenta de soldadura montada na extremidade do sistema robótico.

Na construção de equipamentos em aço, existem diferentes processos de soldadura, a escolha entre eles depende principalmente da eficiência. Uma característica fundamental que deve ser considerada é a soldabilidade. Portanto, é essencial observar os efeitos dos parâmetros de soldadura na soldabilidade dos materiais durante o processo de soldadura em arco. O aço macio é o aço mais comum que fornece propriedades de material aceitáveis para muitas aplicações. Os metais usados em diferentes aplicações comerciais, são o alumínio, o cobre, o aço inoxidável e o aço carbono, podem ser unidos por este tipo de processo escolhendo o eletrodo apropriado, e o gás de proteção bem como as diferentes condições de soldadura [2]. As variações das fontes de alimentação e os gases de proteção, bem como os eletrodos podem provocar diferentes variações no processo de soldadura, por esta razão é necessária uma escolha adequada dos parâmetros de soldadura [3]. O metal adicionado nas peças é fornecido por um rolo permitindo um arco elétrico contínuo [4]. Quanto maior for o comprimento do arco, maiores são os efeitos eletromagnéticos. Devido à sua importância, alguns investigadores têm estudado os efeitos eletromagnéticos nos processos de soldadura [4-7].

Neste contexto, merece destaque as PME, pela dificuldade que apresentam em automatizar os seus processos produtivos com recurso a robots industriais tradicionais, em termos de disponibilidade de espaço e investimento [14], bem como as empresas de setores caracterizados por uma produção em massa [20].

2.2. Robots colaborativos

Os Cobots podem trabalhar sem a necessidade de proteção periférica podendo o seu espaço de trabalho ser mais facilmente rentabilizado, podem ser facilmente reprogramados, até mesmo por trabalhadores sem conhecimento de programação na robótica [16, 21]. Em 2008, a empresa Universal Robotics criou o Cobot designando por UR5 [14] e grandes empresas da robótica começaram a apostar no desenvolvimento deste tipo de robots, além disso já existem um conjunto de medidas de segurança bastante exigente [22]. Está garantido que se a distância de segurança do operador for menor que a distância do Cobot, este não funciona, além disso o equipamento monitorizar a distância e reduz a velocidade até parar. A norma ISO/TS 15066:2016 define as boas práticas em ambientes colaborativos. De acordo com Muller et al. [17], os Cobots e operadores podem coexistir, ou seja, quando ambos trabalham no mesmo ambiente, mas tendem a não interagir ou em momentos diferentes de cooperação entre ambos, quando ambos executam simultaneamente tarefas no mesmo espaço ou tarefas diferentes. Estes sistemas permitem aumentar a qualidade dos produtos, e uma melhoria das condições de trabalho dos operadores [18, 19]. Neste contexto, merece destaque as PME, pela dificuldade que apresentam em automatizar os seus processos produtivos com recurso a robots industriais tradicionais, em termos de disponibilidade de espaço e investimento [14], bem como as empresas de setores caracterizados por uma produção em massa [20].

2.3. Protótipo desenvolvido para o ambiente industrial

O protótipo desenvolvido serve para implementar uma solução automatizada de soldadura em arco utilizando Cobots. O protótipo corresponde ao desenvolvimento de uma célula composta por um Cobot. A principal motivação para desenvolver esta solução por parte da empresa foi a escassez de mão de obra especializada, entre outros fatores, tarefas repetitivas e também a um elevado nível de precisão e de concentração, que por vezes é inadequado do ponto de vista ergonómico, apresenta uma alta repetibilidade e movimentos bastante complexos e difíceis de executar para o ser humano.

A preparação do trabalho no posicionamento das peças e na execução da soldadura é um processo de colaboração entre o operador e o Cobot, assim, a cooperação torna-se a chave para uma solução com valor agregado muito superior, permitindo

baixíssima ocupação de espaço e alta flexibilidade no local de trabalho.

O protótipo desenvolvido é uma estação de trabalho, pode ser facilmente movida de uma estação para outra estação de trabalho. O protótipo industrial envolve o desenvolvimento de uma solução robótica colaborativa que inclui um robot colaborativo Doosan M0617 devido ao seu grande espaço de trabalho que apresenta um alcance 1700 mm para a manipulação de uma tocha de soldadura com capacidade de carga até 6 kg, eficiente para os requisitos deste trabalho. O Cobot e a máquina de solda são montados numa estrutura com rodas, e as peças a serem produzidas são dispostas ao lado do Cobot numa mesa conforme se mostra na Figura 3.



Figura 3. Sistema Cobot e estrutura da Máquina.

3. RESULTADOS

Na linha de produção, o cliente dispõe de vários postos de trabalho equivalentes, cada um com um técnico especializado, além disso têm um portefólio de peças mais comum, e tem muitas referências diferentes e muitas pequenas tiragens, isto significa que há repetições de tarefas, e existem peças equivalentes para produção o que permite efetuar o setup de forma frequente conforme mostra a Figura 4.

A principal motivação para desenvolver esta solução por parte da empresa foi a escassez de mão de obra especializada, entre outros fatores, tarefas repetitivas e também a um elevado nível de precisão e de concentração, que por vezes é inadequado do ponto de vista ergonómico, apresenta uma alta repetibilidade e movimentos bastante complexos e difíceis de executar para o ser humano.

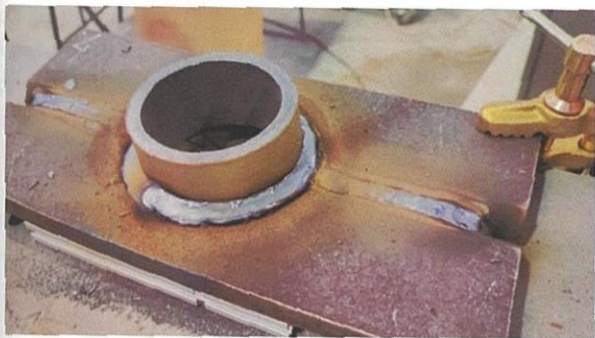


Figura 4. Exemplo de peças a serem soldadas.

O procedimento manual do processo de soldadura pressupõe o estudo do dossiê de fabricação de cada peça. Na fabricação manual o número de peças é indicado na ordem de produção e existem centenas de tipos diferentes de peças, todas feitas em aço e normalmente de grandes dimensões. Devido ao tamanho, as peças precisam de grandes costuras de solda de perfil/secção. Dependendo dos requisitos. Os requisitos do projeto são baseados nos dossiês de produção e das fichas técnicas de soldadura do cliente, para que se execute automaticamente a operação de soldadura, ou seja, automatizar cada processo, sabendo que a partir dos requisitos do sistema, ele deverá poder registrar programas completos de soldadura, ou seja, programas com referência de peças com as trajetórias e parâmetros a utilizar no processo de soldadura. Geralmente, as geometrias das peças são linhas de juntas soldadas que variam entre linhas retas, círculos e arcos com diferentes orientações. Alguns dos processos continuam a ser executados de forma manual devido ao alto número de referências. Cada referência de peça e respectivos requisitos de fabricação incluem as seguintes características importantes para o caso:

- Geometria da peça (junta soldada);
- Tipo de junta;
- Formas dos cordões;
- Perfil do cordão de solda (número de cordões de solda);
- Características dos níveis de cada passe.

O programa que efetua a soldadura está integrado com o controlador Doosan e contém os seguintes recursos para soldadura relevantes tais como as configurações e comunicação de variáveis com a máquina de solda, como no início do processo de soldadura bem como a seleção do programa de soldadura e os formatos de cordões possíveis e previamente configurados: tais como lineares, retas, circulares, arcos, trapezoidais, zig-zag, ondas e senoidais.

Para suprir a necessidade de grande secção de cordões, é necessário realizar multipasse, ou seja, cordões de solda sobrepostos na mesma junta para aumentar a secção total. Para isso, é necessário um banco de dados com as informações de cada passagem, permitindo que durante a produção a navegação entre as passagens seja automática. Cada passagem das coordenadas individuais da passagem múltipla requer as seguintes variáveis:

- Velocidade linear (mm/s);
- Deslocamento em Z (mm);
- Deslocamento Y (mm);
- Deslocamento em Theta (°);

- Deslocamento em Gama (°);
- Programa de máquina de solda (velocidade do fio, corrente, tensão, entre outros).

Os diferentes processos são atualizados:

- Processo (Principal):
 - › Efetuar cordões de soldadura de acordo com o dossier de fabrico.
- Processos (Complementares):
 - › Posicionamento e indexação de sub-peças.
- Processos (Auxiliares):
 - › Ajuste dos parâmetros da máquina de solda de acordo com o dossiê de fabricação;

Alteração das variáveis de soldadura em cada passe.

Os processos complementares continuarão a ser executados pelo operador enquanto os processos principais e auxiliares serão executados pelo robot. O sistema assume dois perfis de utilizador, operador e técnico de soldadura especializado.

Com os requisitos específicos para cada peça e devido ao elevado número de peças, o cliente deve ser capaz de programar ou configurar o sistema, conforme se apresenta na Figura 5.



Figura 5. Edição das especificações de soldadura para os requisitos específicos de cada peça.

O técnico de soldadura especializado desenvolve a programação/configuração específica para cada tipo de junta de soldadura. Em cada especificação é armazenada e pode ser usado por qualquer programa. O principal objetivo é explorar o potencial de repetibilidade, ou seja, cada tipo de junta com

“O programa que efetua a soldadura está integrado com o controlador Doosan e contém os seguintes recursos para soldadura relevantes tais como as configurações e comunicação de variáveis com a máquina de solda, como no início do processo de soldadura bem como a seleção do programa de soldadura e os formatos de cordões possíveis e previamente configurados: tais como lineares, retas, circulares, arcos, trapezoidais, zig-zag, ondas e senoidais.

O desenvolvimento da solução proposta permite uma fácil interação com os técnicos além de reduzir os defeitos de qualidade e os custos de produção. Comparando as velocidades de funcionamento dos robots industriais e os robots colaborativos, em que os robots industriais apresentam uma grande vantagem na velocidade de operação, mas como este tipo de equipamentos necessitam de interação com os técnicos especializados, verifica-se que é vantajoso a utilização de sistemas mais intuitivos e fáceis de utilizar, em especial para as empresas de pequena e média dimensão, em que o operador pode facilmente criar de forma detalhada todas as dimensões e movimentos a efetuar bem como alterar os parâmetros de soldadura de forma simples

determinadas características, nomeadamente o tipo de material, tem normalmente os mesmos parâmetros de soldadura. Assim, é possível remover tarefas sem valor agregado durante o processo de produção.

O Operador deverá desenvolver os programas referentes a cada referência de peça, conforme a Figura 6. Para isso, utiliza um ambiente muito intuitivo. A solução apresentada também inclui uma correção automática de pontos em relação aos ângulos Theta (θ) e Gamma (γ) para o caso do multipasse. Nesta solução, ensinam-se os pontos referentes ao primeiro movimento na peça.



Figura 6. Método de aprendizagem dos pontos a memorizar.

Por fim, a produção da série de peças é realizada de forma colaborativa com o sistema, ou seja, é necessário o posicionamento das peças pelo operador e a execução dos cordões de solda conforme os programas e as especificações, a ser realizada pelo Cobot, conforme se mostra na Figura 7.



Figura 7. HMI para interação com o operador.

4. DISCUSSÃO

O desenvolvimento da solução proposta permite uma fácil interação com os técnicos além de reduzir os defeitos de qualidade e os custos de produção. Comparando as velocidades de funcionamento dos robots industriais e os robots colaborativos, em que os robots industriais apresentam uma grande vantagem na velocidade de operação, mas como este tipo de equipamentos necessitam de interação com os técnicos especializados, verifica-se que é vantajoso a utilização de sistemas mais intuitivos e fáceis de utilizar, em especial para as empresas de pequena e média dimensão, em que o operador pode facilmente criar de forma detalhada todas as dimensões e movimentos a efetuar bem como alterar os parâmetros de soldadura de forma simples. Deste modo permite aumentar a produtividade e melhorar a qualidade no seu trabalho, além disso o trabalhador não se vê substituído pelo equipamento bem como pretende melhorar de forma continua o trabalho que está a executar.

5. CONCLUSÕES

A utilização da tecnológica pode ajudar as empresas a obter maior produtividade, competitividade, qualidade, bem como reduzir os custos e tempos no seu processo de fabricação, mas antes de adicionar novos equipamentos é necessário saber a forma de maximizar o retorno do investimento. No nosso entendimento o caminho da inovação está no desenvolvimento de software dedicado, permitindo obter soluções interessantes,

A utilização da tecnológica pode ajudar as empresas a obter maior produtividade, competitividade, qualidade, bem como reduzir os custos e tempos no seu processo de fabricação, mas antes de adicionar novos equipamentos é necessário saber a forma de maximizar o retorno do investimento.

porque por um lado simplifica o uso dos recursos das tecnologias adquiridas, ocultando os detalhes mais complexos, e permite que o sistema seja mais flexível de modo a aumentar a rentabilidade do equipamento adquirido.

REFERÊNCIAS

- [1] H. B. Cary, (1994). *Modern Welding Technology, Third Edition*, Regents/Prentice Hall Book, Company, Inc., Upper Saddle River, New Jersey.
- [2] N. S. Seo, (2002). *Modern Manufacturing Processes*, Dongmyungsa, Korea.
- [3] P. F. Ostwald, and J. Munoz, (1997). *Manufacturing Processes and Systems*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- [4] S. Kalpakjian, (1992). *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA.
- [5] J. J. Craig, (1989). *Introduction to Robotics, Mechanics, and Control*, Addison Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA.
- [6] K. S. Fu, *Robotics*, (1987). McGraw-Hill International Book Company, Inc., New York.
- [7] Richardson RW, (1986). *Robotic Weld Joint Tracking Systems - Theory and Implementation Methods*, Welding Journal, Nov.
- [8] Pires, JN, and Loureiro, Altino et al, (2002). *Object-Oriented and Distributed Software applied to Industrial Robotic Welding*, Industrial Robot, An International Journal, MCB University Press, March.
- [9] Pires, JN, and Loureiro, A et al, (2003). *Welding Robots*, IEEE Robotics, and Automation Magazine.
- [10] Pires, JN, (2005). *Complete Robotic Inspection Line using PC based Control, Supervision, and Parameterization Software*, Elsevier and IFAC Journal Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 21, No1.
- [11] Pires, JN, (2005). *Complete Robotic Inspection Line using PC-based Control, Supervision, and Parameterization Software*, Elsevier and IFAC Journal Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 21, No1.
- [12] Pires, JN, and Loureiro A et al, (2003). *Welding Robots*, IEEE Robotics, and Automation Magazine.
- [13] Michalos, G. et al., (2014). *ROBO-PARTNER: Seamless Human-Robot Cooperation for Intelligent, Flexible and Safe Operations in the Assembly Factories of the future*. Procedia CIRP.
- [14] Universal Robotics, *Our history*, (2018), www.universal-robotics.com/about-universal-robotics/our-history.
- [15] Eloise Matheson, Riccardo Minto, Emanuele G. G. Zampieri, Maurizio Faccio and Giulio Rosati, (2019), *Human-Robotic Collaboration in Manufacturing Applications: A Review*, Robotics 2019, 8, 100.
- [16] Shirine El Zaatari, Mohamed Marei, Weidong Li, Zahid Usman, (2019), *Cobot programming for collaborative industrial tasks: An overview*, Robotics, and Autonomous Systems, Volume 116, Pages 162-180.
- [17] Müller, R., Vette, M., Geenen, A., (2017) *Skill-based dynamic task allocation in Human-Robotic-Cooperation with the example of welding application*. Procedia Manuf., 11, 13-21.
- [18] R. Muller, M. Vette, O. Mailahn, (2016), *Process-oriented task assignment for assembly processes with human-robotics interaction*, Proc. CIRP 44, 210-215.
- [19] L. Peternel, W. Kim, J. Babic, A. Ajoudani, (2017), *Towards ergonomic control of human-robotics co-manipulation and handover*, in 2017 IEEE-RAS 17th International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids), IEEE.
- [20] European Commission, (2018). *Periodic Reporting for period 1 - colobotics (collaborative robotics for assembly and kitting in smart manufacturing)*, Tech. Rep.
- [21] Pentikainen, T et al, (2016). *How to make collaborative robot programming easier*. Teknisk- naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten Platbrood, F e Görnemann.
- [22] Platbrood, F e Görnemann, O, (2018). *Safe robotics - A segurança em sistema*.



Nós tornamos a sua máquina segura

A nova cortina de segurança SLC440 (IP69)

- Ideal para a indústria alimentar
- Design higiénico - proteção IP69
- Invólucro de proteção muito robusto, em policarbonato
- Tampas de vedação e suportes de fixação em aço inoxidável V4A

www.schmersal.pt



 **SCHMERSAL**