

# **Programação de Braço Robótico Industrial para Tarefas de Corte por Disco Circular em Chapas de Pedra Natural**

**José Alexandre da Costa Gameiro**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

## **Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral  
Eng. Adriano Coelho

### **Júri**

Presidente: Prof. Luís Filipe Galvão dos Reis  
Orientador: Prof. Pedro Miguel Gomes Abrunhosa Amaral  
Vogal: Prof. Jorge Manuel Mateus Martins

**Novembro 2019**



## **Agradecimentos**

Queria agradecer a oportunidade e o apoio prestado durante a dissertação à equipa da Frontwave S.A., em particular ao Engenheiro Adriano, o meu orientador na empresa, e ao Engenheiro Diogo que cooperou comigo neste e noutros projetos. Um agradecimento também aos professores Pedro Amaral e Jorge Martins que representam o Instituto Superior Técnico e me e orientaram durante a dissertação.

Por fim, um agradecimento especial à minha família, principalmente à minha avó, aos meus pais e irmãos. Não esquecendo os meus colegas e amigos de curso que me acompanharam ao longo do percurso académico.



## Resumo

O presente trabalho tem como objetivo o planeamento e programação de uma célula robotizada para funções de maquinagem, nomeadamente, corte por disco circular de chapas de pedra natural. Este tipo de tarefa, comum da indústria transformadora da Pedra Natural (PN), servirá, em trabalhos futuros, para o desenvolvimento de estratégias de maquinagem, via braço robótico, com base na avaliação da performance do equipamento em operação.

O instrumento de estudo do projeto é o robô manipulador de 6 graus de liberdade KUKA KR 360 com extensão do braço L280-2 e sensor de força, instalado em modo de demonstração pela empresa FrontWave, no âmbito do projecto INOVSTONE 4.0. Este sistema será capacitado de diversas funções como manipulação de objetos, troca automática de ferramenta e maquinagem.

A realização do objetivo proposto, inicia-se pelo planeamento da célula robotizada considerando, para tal, as características do equipamento e os requisitos de projeto. Posteriormente, é construído o modelo virtual da célula com o propósito de proceder à definição de trajetórias e programação *offline* do robô. Posto isto, da programação segue-se para a etapa de otimização e validação das trajetórias. Assim, pretende-se desenvolver um programa válido que desempenhe as operações pretendidas de forma a estabelecer conclusões elucidativas sobre a melhor forma de abordar a programação de tarefas de maquinagem via braço robótico, para posterior aplicação da tecnologia na indústria da PN. Desta forma, neste setor, será possível acompanhar os avanços tecnológicos aplicados à indústria de modo a responder de forma eficaz às novas necessidades do mercado.

**Palavras-chave:** Robótica Industrial, Pedra Natural, Maquinagem, Programação *Offline*



## **Abstract**

The following report discusses the planning and programming of a robotic cell targeted to machine natural stone slabs, namely, by circular disc cutting. This type of task, common to the Natural Stone (NS) manufacturing industry, will serve, in future works, to develop machining strategies based on the performance evaluation of the robot in operation.

The machine handled over the project is the KUKA KR 360, a 6-degree industrial robot with arm extension L280-2 and force torque control, installed in demo mode by FrontWave, as part of the INOVSTONE 4.0 project. This system, when fully integrated, will be capable of many different tasks such as object manipulation, automatic tool change and machining.

To accomplish the proposed objective, the work flow begins by planning the robot cell considering the equipment characteristics and project requirements. Subsequently, the virtual cell model is built with the purpose of proceeding to the offline programming by defining machining trajectories. That said, the programming proceeds to the path optimization and validation stage. Thus, it is intended to develop a solid program that performs the desired operations in order to draw clear conclusions about the appropriate way of programming machining tasks by robotic arm, for subsequent application of the technology in the NS industry. This way, in this sector, it will be possible to follow the technological developments applied to the industry in order to respond effectively to the new market needs.

**Keywords:** Industrial Robotics, Natural Stone, Machining, Offline Programming





# Conteúdo

Agradecimentos . . . . .	iii
Resumo . . . . .	v
Abstract . . . . .	vii
Lista de Tabelas . . . . .	xi
Lista de Figuras . . . . .	xiii
Lista de Símbolos . . . . .	xv
Lista de Abreviaturas . . . . .	xviii
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Tecnologia Industrial . . . . .	2
1.3 Setor da Pedra Natural . . . . .	4
1.4 Objetivo e Contribuição . . . . .	7
1.5 Estrutura da Dissertação . . . . .	7
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>9</b>
2.1 Robótica Industrial . . . . .	9
2.1.1 Desenvolvimento e Tendências . . . . .	10
2.1.2 Necessidade e Aplicação . . . . .	12
2.1.3 Conceitos . . . . .	14
2.2 Programação de Robôs Industriais . . . . .	16
2.2.1 Programação Online . . . . .	16
2.2.2 Programação Offline . . . . .	17
2.2.3 Abordagem ao KRL . . . . .	18
2.3 Transformação da Pedra Natural . . . . .	21
2.3.1 Caracterização do Material . . . . .	21
2.3.2 Caracterização do Processo de Corte por Disco . . . . .	23
2.4 Maquinagem com Robôs Industriais . . . . .	25
<b>3 Implementação</b>	<b>29</b>
3.1 Modelação . . . . .	30
3.2 Programação, Simulação e Optimização . . . . .	33

3.3	Verificação e Validação . . . . .	40
3.4	Aplicação na Célula Robótica Real . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>45</b>
4.1	Descrição do Problema . . . . .	45
4.2	Solução e Resultados . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Conclusão</b>	<b>51</b>
5.1	Conclusões . . . . .	51
5.2	Trabalho Futuro . . . . .	52
	<b>Bibliografia</b>	<b>55</b>
<b>A</b>		<b>57</b>
A.1	Ficheiro .xml utilizado no SprutCam para representação do robô KR360 L280-2 e seu <i>end-effector</i> . . . . .	57
A.2	Desenho técnico, caso de estudo n.º 1, chapa único rasgo central . . . . .	57
A.3	Desenho técnico, caso de estudo n.º 2, chapa corte múltiplo . . . . .	57
A.4	Planta da célula robótica projectada e respetiva lista de peças . . . . .	57
A.5	Código KRL corte simples . . . . .	57
A.6	Código KRL corte múltiplo . . . . .	57
<b>B</b>	<b>Dados Técnicos</b>	<b>73</b>
B.1	Dados técnicos robô KR360 L280-2 . . . . .	73
B.2	Dados técnicos do agregado para disco de corte, HSD . . . . .	73

# Lista de Tabelas

1.1	Análise de Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças do setor da Pedra Natural em Portugal . . . . .	6
2.1	Programa KRL com dois ficheiros correlacionados . . . . .	18
2.2	Estruturas relevantes em KRL . . . . .	19
2.3	Valores recomendados de velocidade periférica para diferentes tipos de pedra natural [24] . . . . .	25
3.1	Parâmetros operativos utilizados . . . . .	35
3.2	Coordenadas e orientação do referencial TOOL frame 2 relativamente à Flange e ao TOOL frame 1 . . . . .	37
3.3	Comparação entre os modelos cinemáticos: coordenadas de junta . . . . .	42
3.4	Comparação entre os modelos cinemáticos: coordenadas cartesianas . . . . .	43



# Lista de Figuras

1.1	Revoluções industriais e seu impacto na produtividade (fonte: DFKI, 2011) . . . . .	3
1.2	Organização do subsetor de Rocha Ornamental (fonte: sigma, 2016) . . . . .	4
2.1	Unimate . . . . .	11
2.2	KR 1000 L950 TITAN PA . . . . .	11
2.3	Representação das mais valias associadas à Robótica Industrial . . . . .	13
2.4	Estimativa anual do fornecimento de robôs industriais a nível mundial [16] . . . . .	14
2.5	Workspace cartesiano [18] . . . . .	15
2.6	Workspace antropomórfico [18] . . . . .	15
2.7	Fluxo de programação online . . . . .	17
2.8	Fluxo de programação offline . . . . .	17
2.9	Definição de posição no espaço através de coordenadas de junta A1 A2 A3 A4 A5 A6 [21] . . . . .	20
2.10	Relação entre os referenciais usados na programação de Robôs Industriais [21] . . . . .	21
2.11	Granito . . . . .	22
2.12	Calcário . . . . .	22
2.13	Mármore . . . . .	22
2.14	Desgaste abrasivo . . . . .	23
2.15	Processo de corte de pedra natural através de disco circular diamantado . . . . .	24
3.1	Fluxo de trabalho adotado para programação do robô . . . . .	30
3.2	Modelo virtual do end-effector . . . . .	31
3.3	Modelo real do end-effector . . . . .	31
3.4	Modelo KR360 L280-2, com <i>end-effector</i> acoplado, utilizado no SprutCam e respetivos referenciais da flange, relativo ao referencial ROBROOT, e da ferramenta [1], relativo ao referencial da flange . . . . .	32
3.5	Chapa único rasgo central . . . . .	32
3.6	Chapa múltiplos rasgos . . . . .	32
3.7	Posicionamento do tapete e da matéria-prima em relação à origem global junto das coordenadas e orientação do referencial BASE definido em relação ao referencial WORLD . . . . .	33
3.8	Definição de parâmetros operativos, em particular, velocidade de rotação, velocidade de avanço e sentido do avanço, no SprutCam . . . . .	34

3.9	Parametrização da ferramenta, em particular, atribuição do diâmetro e espessura . . . . .	35
3.10	<i>End-effector</i> com sistema de acoplamento com agregado para discos de Ø500mm da HSD	36
3.11	<i>End-effector</i> com sistema de acoplamento simples . . . . .	36
3.12	Operação de corte linear com uma única trajetória assignada a cada chapa . . . . .	37
3.13	Operação de corte múltiplo com mais do que uma trajetória assignada a cada chapa . . .	37
3.14	Mapa concebido numa operação de corte único em que foi necessário corrigir a orientação do eixo A6 para evitar erro de inalcançabilidade . . . . .	38
3.15	Mapa concebido numa operação de múltiplos cortes com orientação constante do <i>end-effector</i> . . . . .	39
3.16	Resultado da simulação gráfica da operação de múltiplos cortes via disco circular . . . . .	40
3.17	Referencial da ferramenta 1 . . . . .	41
3.18	Referencial da ferramenta 2 . . . . .	41
3.19	Referencial base da peça . . . . .	41
3.20	Representação da sequência de operações gerada em SprutCam no software de simulação KUKA.Sim Pro . . . . .	42
3.21	Representação da instalação real da célula robótica . . . . .	43
4.1	Perfil frontal da célula robótica e respetivo volume de trabalho do robô . . . . .	46
4.2	Trajectoria programada para o <i>Tool Center Point</i> no processo de corte singular . . . . .	47
4.3	Resultado do processo de corte singular de uma chapa plana . . . . .	48
4.4	Trajectoria programada para o <i>Tool Center Point</i> no processo de corte singular . . . . .	48
4.5	Resultado do processo de corte múltiplo de uma chapa plana . . . . .	49

# Lista de Símbolos

## Referenciais

$\$WORLD$	Referencial global
$\$ROBROOT$	Referencial do robô
$\$TOOL$	Referencial da ferramenta
$\$BASE$	Referencial da peça

## Parâmetros Operativos

$d$	Diâmetro
$\emptyset$	Diâmetro
$N$	Velocidade de rotação do disco
$p$	Profundidade de corte
$a$	Velocidade de avanço





# Lista de Abreviaturas

**ANIET**, Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora.

**Assimagra**, Associação Portuguesa dos Industriais de Mármore Granito e Ramos Afins.

**BCG**, Boston Consulting Group.

**CAD**, Computer-Aided Design.

**CAD/CAM**, Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing.

**CEI**, Companhia de Equipamentos Industriais.

**CN**, Controlo Numérico.

**CNC**, Comando Numérico Computadorizado.

**GM**, General Motors.

**IFR**, International Federation of Robotics.

**IST**, Instituto Superior Técnico.

**I&D**, Investigação e Desenvolvimento.

**KRL**, KUKA Robot Language.

**LWR**, Light Weight Robot.

**MI**, Minerais Industriais.

**MM**, Minerais Metálicos.

**NS**, Natural Stone.

**PN**, Pedra Natural.

**PME**, Pequenas e Médias Empresas.

**PIB**, Produto Interno Bruto.

**RO**, Rocha Ornamental.

**RI**, Rochas Industriais.

# Capítulo 1

## Introdução

Com este capítulo introdutório é intenção do autor demonstrar a sua motivação para a realização do projeto, fazendo também um enquadramento do mesmo a nível das suas mais valias e do seu carácter inovador para a indústria da Pedra Natural.

É, em primeira fase, abordada a motivação e inserção do projeto no sub-capítulo **Motivação**, de seguida, no sub-capítulo **Tecnologia Industrial**, é feita uma contextualização dos avanços tecnológicos aplicados à indústria em geral, enfatizando as recentes necessidades de mercado e a tendência de caminhar para uma indústria digital, indústria 4.0. Posto isto, é feita uma caracterização do setor da Pedra Natural em Portugal descrevendo as suas forças, oportunidades, fraquezas e ameaças, no sub-capítulo **Setor da Pedra Natural**. Por fim, é delineado o objetivo e a contribuição do projeto de dissertação complementado com um resumo da estrutura do documento nas secções **Objetivo e Contribuição e Estrutura da Dissertação**, respetivamente.

### 1.1 Motivação

O grande desafio atual de Portugal, dos seus cidadãos e sobretudo das geração mais novas, que irão no futuro integrar o mercado de trabalho, passa por fomentar o crescimento sustentável da economia. Isto por meio de um aumento da competitividade das empresas, de uma mobilização e potencialização dos recursos naturais e humanos, objetivando assim uma melhoria na qualidade de vida, criação de emprego e de salários atrativos. Só desta forma, será possível competir com as condições económicas dos países mais desenvolvidos da União Europeia.

No que diz respeito ao papel dos órgãos da gestão financeira de Portugal, a criação de ações de mobilização de fundos estruturais para apoio de projetos de Investigação e Desenvolvimento (I&D), associados a áreas de inovação tecnológica, assumem-se como uma medida importante para o desenvolvimento económico português.

O trabalho de dinamizar o setor da Pedra Natural em Portugal teve início em 2002 com projetos mobilizadores de I&D, como, por exemplo, Jetstone e Inovstone. Pretendia-se desenvolver e inovar as tecnologias, os conceitos e as práticas do setor aplicando os pressupostos da filosofia *lean*: eliminação

de desperdícios de matéria-prima na cadeia de abastecimento, otimização da eficiência energética, flexibilização da produção, aumento da produtividade e criação de novos produtos e condições de trabalho. [1].

Desde então mais ações foram tomadas de forma a promover a competitividade do setor da Pedra Natural portuguesa. Entre elas, o processo de certificação da Marca StonePT que surge no âmbito de um projeto lançado através de uma parceria entre a Assimagra (Associação Portuguesa dos Industriais de Mármore, Granitos e Ramos Afins) e o Instituto Superior Técnico (IST). A StonePT integra a Estratégia de Eficiência Coletiva do Cluster da Pedra Natural com o objetivo de reconhecer as qualidades e origens da pedra portuguesa visando, assim, a consolidação nos mercados internacionais [2].

Em 2017, com duração de 3 anos, surge o Projeto Mobilizador Inovstone 4.0 – Tecnologias Avançadas e Software para a Pedra Natural. Impulsionado pelo Cluster dos Recursos Minerais tem como objetivo principal o desenvolvimento de tecnologias inovadoras que reorientem o modelo de operações do Setor das Rochas Ornamentais (RO) para a Indústria. Associados à implementação do Projeto Inovstone 4.0 está um Consórcio de 24 entidades liderado pela CEI (Companhia de Equipamentos Industriais), constituído por 11 Empresas de Pedra Natural, 7 Empresas Tecnológicas, entre elas a FrontWave - Engenharia e Consultadoria S.A., e 6 Entidades do Sistema Científico e Tecnológico. [3].

É precisamente neste enquadramento que surge a necessidade de investigação da dissertação de mestrado que pretende contribuir com conhecimento acrescentado através da transformação de ciência em tecnologia direcionada às necessidades do setor da Pedra Natural. Em última análise, pretende promover a evolução do mercado da Pedra Natural através da inovação tecnológica, impactando na performance das empresas e na economia nacional.

## **1.2 Tecnologia Industrial**

”O grande desafio atual de Portugal, dos seus cidadãos [...], passa por fomentar o crescimento sustentável da economia.” De facto, esta questão não retrata apenas a atualidade mais recente. É um objetivo que esteve sempre presente ao longo de várias gerações, tanto a nível nacional como a nível internacional. Uma economia saudável é sinónimo de qualidade de vida, sucesso e bem estar sendo natural ambicionar cada um destes estados.

Um indicador muito utilizado para caracterizar o estado de saúde de uma economia é o produto interno bruto (PIB). Indicador este que retrata a soma dos bens e serviços produzidos num certo país ou região durante um certo período de tempo [4]. Assim, um valor positivo do PIB reflete uma economia saudável em crescimento, enquanto que um valor negativo significa o oposto.

Com contribuição importante para o crescimento económico, refletindo-se também no PIB, está a participação da indústria. De facto, ao longo da história, é possível relacionar fases de grande crescimento económico, representadas pelo aumento no valor total de bens e serviços produzidos, com grandes transformações do modelo industrial, as chamadas revoluções industriais. Estas tiveram por base a aplicação de inovações tecnológicas à indústria originando assim aumentos significativos na produtividade diminuindo os custos de produção, logo, aumentando o produto por unidade de recurso.

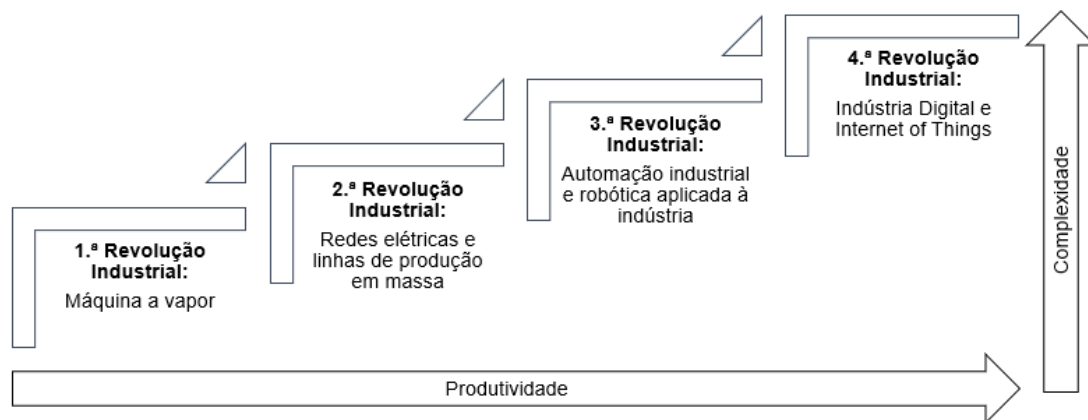


Figura 1.1: Revoluções industriais e seu impacto na produtividade (fonte: DFKI, 2011)

Tal como demonstra a Figura 1.1, desde do dia das fábricas movidas a vapor na 1.ª revolução, aos tempos da eletrificação que levou à produção em massa no início da 2.ª revolução industrial e ainda à automatização da indústria na década de 1970 com a 3.ª revolução industrial, que a aplicação de tecnologia à indústria tem revolucionado o paradigma da produção. Com isso, a consequente alteração da economia proporcionada pelo crescimento industrial.

No entanto, nos últimos anos, os avanços tecnológicos industriais têm sido apenas incrementais consequência da conjugação da incerteza e da instabilidade associada à introdução de novas tecnologias com o período de recessão económica que condicionou o investimento. Ainda assim, vê-se hoje em dia a necessidade crescente da indústria em produzir melhor, de forma mais flexível e ainda de maneira sustentável tanto a nível económico como a nível ambiental. Objetivos como a customização em massa, a flexibilidade da capacidade produtiva e uma cadeia de valor circular prometem ser grandes desafios a nível industrial, o que levou muitos observadores a acreditar que a indústria está à beira de seu quarto paradigma tecnológico impulsionada pela digitalização dos processos de produção combinada com o uso generalizado da Internet [5].

*“What if existing manufacturing and large technological innovations came together to create the next big manufacturing reinvention? Bingo. This is the fourth manufacturing revolution, and it’s happening right now.”* - Olivier Scalabre, Senior Partner and Managing Director, BCG Paris

O crescimento de uma tecnologia industrial digital faz parte de uma revolução, conhecida como Indústria 4.0, que possibilita a reunião e partilha de informação entre produto, máquina e humano, permitindo processos mais rápidos, mais flexíveis e mais eficientes para produzir gamas de produtos de alta qualidade a custos reduzidos. Esta transformação na indústria aumentará a produtividade, mudará a economia, promoverá o crescimento industrial e modificará o perfil do trabalhador atual. Em última análise, mudando a competitividade das empresas e das regiões.

Segundo um estudo conduzido pela organização The Boston Consulting Group estima-se que o impacto da indústria 4.0 será bastante significativo a nível do crescimento económico e criação de emprego

esperando-se novos sistemas de produção 30 % mais rápidos e 25 % mais eficientes [5].

A tecnologia digital avançada já é usada na produção, mas com a Indústria 4.0, ela irá transformá-la. Tendências tecnológicas, tais como, *big data and analytics*, *smart robots*, *simulation*, *horizontal and vertical system integration*, *the industrial internet of things*, *cybersecurity*, *the cloud*, *additive manufacturing* e *augmented reality* formam os blocos de construção da Indústria 4.0 [5].

### 1.3 Setor da Pedra Natural

A nível nacional, um dos setores em destaque no que toca à geração de riqueza e crescimento económico é precisamente o setor industrial da Pedra Natural. Portugal é um dos principais produtores de pedra natural que aliado à extensa variedade de recursos naturais proporciona-lhe uma posição de destaque no cenário mundial. O conhecimento e tradição na transformação deste tipo de matéria prima permitem acrescentar valor ao produto transformado contribuindo fortemente para o crescimento da economia, através do aumento do número total de bens produzidos, e para a sustentabilidade do setor. Setor este que é composto por quatro subsectores que incorporam tanto a extração como a transformação: Rocha Ornamental (RO), Rochas Industriais (RI), Minerais Industriais (MI) e Minerais Metálicos (MM) [6].

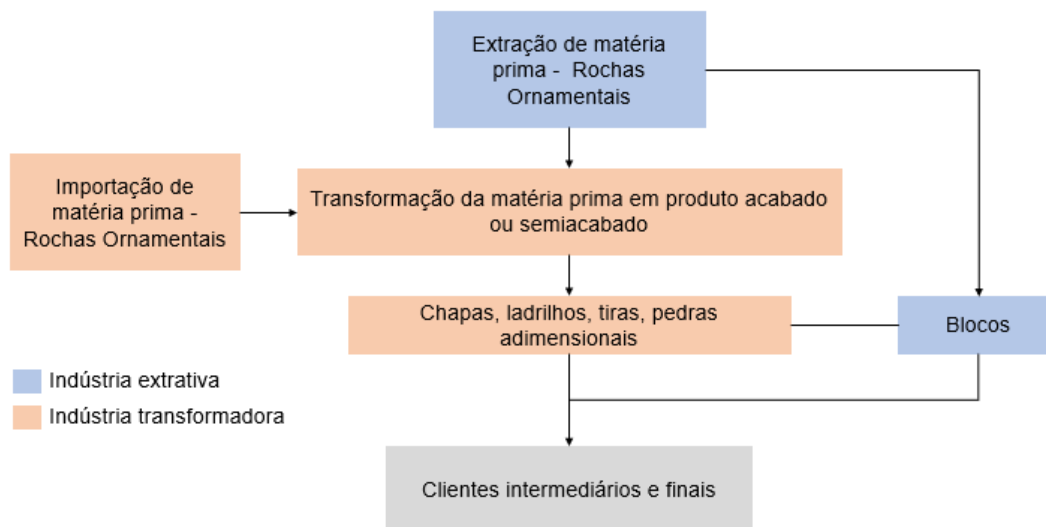


Figura 1.2: Organização do subsector de Rocha Ornamental (fonte: sigma, 2016)

O subsector das Rochas Ornamentais é constituído essencialmente pelas empresas de extração e/ou transformação de rochas calcárias, granitos, mármore, xistos e outras rochas siliciosas para fins decorativos. Neste subsector as empresas transformadoras recebem os blocos extraídos das pedreiras e convertem-nos em produtos destinados ao cliente final para aplicações a pavimentações, revestimentos, domésticas, arte funerária, escultura, entre outras [6]. É precisamente através desta transformação dos blocos de matéria prima em produto acabado que se acrescenta o importante valor ao produto. Por sua vez, o valor acrescentado depende da forma como a transformação é realizada,

do custo envolvente e dos resultados obtidos. Por este motivo, são as empresas transformadoras que mais beneficiam com os desenvolvimentos tecnológicos associados ao processo produtivo. Quanto mais desenvolvido o processo for maior valor acrescentado será dado à matéria prima que evidenciará assim o setor português face à concorrência mundial. A Figura 1.2 representa a cadeia de valor das Rochas Ornamentais dividida segundo a área de atuação de cada indústria, nomeadamente, a azul a indústria extrativa e a laranja a indústria transformadora.

Segundo o estudo promovido pela Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora (ANIET) intitulado Diagnóstico Competitivo sobre o Setor da Extração e Transformação da Pedra Natural, com dados relativos ao final do ano 2014, agregando a totalidade da fileira extrativa e transformadora, as rochas ornamentais ascenderam a um volume de negócio nacional de 700 milhões euros, cerca de 73,1 % do valor total do setor da Pedra Natural, empregando 13.061 pessoas distribuídas por 2.186 empresas. O mármore, o granito, o calcário e a ardósia são as principais rochas ornamentais extraídas e transformadas em Portugal [6]. Produzem-se em diversas regiões do país, resultado do processo de acumulação de depósitos ao longo de distintas etapas geológicas [7]. Existem depósitos das principais rochas em praticamente todo o Continente.

Através da análise setorial conduzida pelo Espírito Santo Research - Research Sectorial é possível verificar que a indústria das Rochas Ornamentais se concentra em duas zonas geográficas. Na Europa, salientando Itália, Espanha e Portugal, e na Ásia, onde se destacam China e Índia. Em conjunto, estas duas áreas geográficas são responsáveis por aproximadamente 80 % da oferta mundial de mármore e granitos. A Europa lidera com 51 % a produção de rochas ornamentais, com realce nos mármore, já a Ásia domina a produção de granitos. Itália surge destacada no que toca a produtos de obra onde, a tradição, a imagem, a marca, o domínio dos canais de distribuição, o design, e a organização em cluster atuam como peças fundamentais para uma supremacia no setor [7].

Nos últimos anos, outros países ganharam evidência, como Brasil, Irão e Turquia, ao passo que Portugal, enquanto produtor tradicional, perdeu posição no mercado. Foi necessário um esforço de adaptação a esta nova realidade para assegurar a sustentabilidade do setor nacional, pois estamos perante países com elevados recursos naturais, com incentivos próprios para exploração das pedreiras, com grandes mercados internos, menores custos laborais e energéticos e em constante crescimento [7].

Em termos de emprego, a nível nacional, estamos diante um setor relevante, composto, maioritariamente, por Pequenas e Médias Empresas (PME), que evidenciam necessidades comuns e têm importante peso ao nível do emprego regional e das exportações.

Em 2015, segundo dados do Diagnóstico Competitivo sobre o Setor da Extração e Transformação da Pedra Natural, promovido pela Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora, as exportações totalizaram 857,3 milhões de euros, ao passo que as importações registaram o valor de 162,6 milhões de euros. O saldo das transações do comércio externo foi amplamente favorável ao setor. A taxa de cobertura das importações pelas exportações apresentou valor na ordem dos 500 %, muito superior aos 104,04 % de média nacional em 2015 [6]. Ainda assim, existe a convicção de que o valor acrescentado da produção nacional tem campo para crescer. A intervenção prioritária deverá pas-

sar pelo desenvolvimento das empresas de maior dimensão através de movimentos cooperativos com centros tecnológicos do setor. Possibilitando assim, uma constante introdução de novas tecnologias e promovendo a qualidade dos produtos e processos.

A Tabela 1.1 sintetiza e complementa a informação retratada ao longo deste sub-capítulo através de uma listagem dos pontos fortes e fracos do setor da Pedra Natural, bem como das oportunidades e ameaças que este enfrenta.

<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>
Variedade e abundância de recursos naturais	
Setor tradicional com conhecimento e experiência	Empresas pequenas
Reconhecimento de qualidade internacional	Empresas familiares
Marca StonePT, <i>made in portugal</i>	Capacidade financeira reduzida
Adaptação aos novos concorrentes internacionais	
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
Comércio global	<i>Players</i> internacionais com mais condições
Desenvolvimento tecnológico	Sustentabilidade ambiental
Modo operativo da indústria 4.0	Potencial crise financeira e imobiliária
Cooperação com centros tecnológicos	Modelos de informação da construção BIM
Projetos de Investigação e Desenvolvimento	<i>Standardização</i> dos produtos

Tabela 1.1: Análise de Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças do setor da Pedra Natural em Portugal

Em Portugal, o sector das rochas ornamentais tem observado progressivos avanços na mecanização e industrialização de processos, ainda que com os constrangimentos inerentes à tradição mais ornamental da utilização das rochas. A valorização da não repetibilidade das cores, formas e dimensões, numa atividade tipicamente artesanal, afirmaram-se como grandes desafios à automação de processos, pois estas bem aproveitadas são um fator diferenciador e acrescentador de valor ao produto final [7]. No entanto, com maiores ou menores dificuldades, é dever do setor da PN e das empresas que o constituem dar resposta às necessidades do mercado, bem como acompanhar a tendência da indústria digital que já se alastrou a outros setores, como o automóvel. Mudanças a nível da flexibilidade, velocidade e qualidade de produção, associadas à necessidade de customização em massa, cadeias de valor circular e ligação do cliente ao produto final criam a necessidade de intervenção neste setor, sobretudo através da aplicação tecnológica por meio de projetos de Investigação e Desenvolvimento (I&D). Este paradigma é fundamental para assegurar a competitividade da pedra natural portuguesa, mais ainda com o surgimento de novos *players* internacionais, mas também consiste numa oportunidade para as empresas de desenvolvimento tecnológico que atuem diretamente nas necessidades do setor.



## 1.4 Objetivo e Contribuição

Partindo do objetivo global de contribuir com conhecimento acrescentado através da transformação de ciência em tecnologia direcionada às necessidades do setor da Pedra Natural e identificadas essas necessidades, o projeto de dissertação vem com o propósito de avaliar a utilização de uma célula robótica para tarefas de maquinagem particulares do setor da PN. Nomeadamente, em trabalhos futuros, a célula servirá de modelo de teste e desenvolvimento do processo de corte por disco, para uma posterior aplicação direta no ambiente industrial. O desafio passa por demonstrar a viabilidade da tecnologia de braço robótico na indústria da PN, através de soluções para programação do manipulador robótico e para planeamento e otimização do layout da célula. Com base nos resultados dos pontos anteriores objetiva-se criar uma sequência de código que possa ser introduzida e executada pelo controlador real de forma a cumprir as intenções do programador para traçar conclusões que contribuam para responder à questão de investigação:

Q) É possível aplicar a tecnologia de braço robótico no processo de corte por disco do setor industrial da Pedra Natural acrescentado mais valia?

Com esta questão surgem muitos outros desafios, tais como, o dimensionamento da célula robótica, o hardware a utilizar, o software e a conexão com o robô, a performance do robô mediante as estratégias e parâmetros operativos, flexibilização do processo, programação do robô, entre outras.

Ultrapassados estes desafios será dado um contributo a vários níveis:

1. Dimensionamento, planeamento e otimização do layout da célula robótica, tendo em conta o robô utilizado, os seus constrangimentos e a função pretendida
2. Simulação *offline* e parametrização do processo produtivo de corte por disco
3. Definição de trajetórias de maquinagem optimizadas
4. Programação do robô em linguagem própria, KRL

Com isto, pretende-se adquirir conhecimento necessário acerca da aplicação das possíveis soluções de programação disponíveis de forma a avaliar o método mais adequado para abordar a questão da programação de tarefas de maquinagem de chapas planas de pedra natural, em particular, corte por disco circular.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está organizada em capítulos que por sua vez estão organizados em subcapítulos. No início de cada capítulo é realizado um parágrafo síntese relativo à sua estrutura. Ao todo a dissertação consta de cinco capítulos e obedece à seguinte estrutura:

## **Capítulo 1 - Introdução**

O primeiro capítulo oferece uma introdução relativa à inserção do projeto, ao estado da tecnologia industrial e ao setor da Pedra Natural. É também neste capítulo que é exposto o objetivo e as contribuições do trabalho.

## **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica**

O segundo capítulo serve de enquadramento do estado da arte dos temas próprios da dissertação. Entre eles estão a Robótica Industrial, a programação de robôs, o processo de transformação da pedra natural e a maquinagem através de robôs industriais.

## **Capítulo 3 - Implementação**

O terceiro capítulo retrata a fase de implementação. Este reflete, de certo modo, o trabalho executado a nível de modelação, programação e aplicação real. Neste capítulo é evidenciado e justificado o processo de obtenção de resultados.

## **Capítulo 4 - Resultados**

O quarto capítulo é resultado da implementação realizada no capítulo anterior. Neste são expostos os resultados obtidos para que se possam traçar conclusões finais.

## **Capítulo 5 - Conclusões**

O capítulo final vem concluir a dissertação com uma análise dos resultados expostos no capítulo anterior. Neste capítulo são apresentadas as conclusões alcançadas bem como as perspectivas de continuação do projeto de dissertação.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

Após o capítulo introdutório, segue-se uma revisão bibliográfica para abordar os fundamentos inerentes ao tema da dissertação. Inicia-se com uma visão sobre a evolução e sobre o estado da arte da tecnologia da robótica industrial no meio industrial, no sub-capítulo **Robótica Industrial**. De seguida, no sub-capítulo **Programação de Robôs Industriais**, é enfatizado o tema da programação de robôs industriais através da exposição das técnicas de programação mais atuais e dos seus respetivos conceitos. Posto isto, o sub-capítulo **Transformação de Pedra Natural**, é dedicado à transformação da pedra natural no que toca a noções acerca da matéria prima e do processo de transformação. Por fim, como conclusão do capítulo é feita uma relação entre os temas abordados anteriormente, no sub-capítulo **Maquinagem com Robôs Industriais**, ao mesmo tempo que é tratado o estado da arte da maquinagem com robôs industriais, nomeadamente no setor da Pedra Natural.

### 2.1 Robótica Industrial

A aplicação da robótica a projetos de engenharia é cada vez mais uma tendência da produção no século XXI. Por detrás desta ciência, que já conta com vários anos de desenvolvimento, estão fundamentos relativos a diversas áreas de investigação, como por exemplo, design de equipamento, controlo de sistemas, eletrónica, programação, visão artificial, planeamento de produção, entre outros [8].

Neste sub-capítulo de fundamentos acerca da robótica industrial será apresentada uma contextualização dos temas essenciais alusivos a este tópico. Em primeiro lugar, na sub-secção **Desenvolvimento e Tendências**, é elaborada uma investigação sobre o desenvolvimento e as tendências técnicas do robô comparando a primeira iteração realizada com o estado da arte do robô industrial dos dias hoje. De seguida, na sub-secção **Necessidade e Aplicação**, são analisadas as necessidades do mercado em conjunto com as aplicações da tecnologia. Por fim, são introduzidos conceitos específicos da robótica industrial para melhor precessão ao longo da dissertação, na sub-secção **Conceitos**.

## 2.1.1 Desenvolvimento e Tendências

Segundo a norma ISO 8373:2012 a palavra *robot* define um “*actuated mechanism programmable in two or more axes with a degree of autonomy, moving within its environment, to perform intended tasks*” [9]. No entanto, nem sempre assim foi. O termo *robot* surge pela primeira vez na tradução para Inglês de uma peça de teatro checoslovaca escrita por Karel Capek em que a palavra “*robota*” significava servidão ou trabalhador forçado. Nesta peça o robô acaba por se revoltar com o seu papel subserviente a ponto de terminar com a vida dos seus criadores [8]. Peças de ficção científica como esta foram as principais responsáveis pela criação de consciência relativamente a esta tecnologia, que iria ter os seus primeiros desenvolvimentos em meados dos anos 40.

O grande impulsionador da robótica, nomeadamente da robótica industrial, foi George Devol que em 1954 desenvolveu o primeiro design de um robô industrial designado “*Programmed Article Transfer*”. Com o objetivo de comercializar o manipulador robótico Devol e Joseph Engelberger criam a empresa Unimation [8]. Em 1961, na linha de montagem da General Motors, dá-se a primeira instalação de um robô industrial, designado Unimate. Este “*universal transfer device*”, como era chamado na altura, pesava duas toneladas e obedecia a comandos ponto-a-ponto armazenados num sistema de tambor magnético. Os atuadores eram hidráulicos e foram programados de forma direta em coordenadas de junta. Ou seja, os ângulos das várias juntas de revolução eram armazenados durante a fase de ensino e reproduzidos em operação. Tinha como função transferir peças acabadas de sair da fundição, como por exemplo, maçanetas de portas e janelas, para a zona de arrefecimento [10], uma tarefa repetitiva, mas arriscada para os operários pois submetia-os a fumos tóxicos e aos perigos inerentes de manipular peças metálicas a altas temperaturas.

Mais aplicações industriais foram tomando forma nos anos que se seguiram. Em 1969 surgem as primeiras aplicações de robôs industriais a tarefas de soldadura, destacando-se, a GM que instalou 66 robôs de soldadura por pontos na sua fábrica em Lordstown, Ohio. Estes robôs, Unimate, aumentaram a produtividade permitindo que mais de 90% das operações de soldadura fossem automatizadas contra apenas 20% a 40% nas fábricas tradicionais [11]. Em 1972 são instaladas as primeiras linhas de montagem robotizadas na Europa e na Ásia, nomeadamente, na Fiat em Itália e na Nissan no Japão [12].

Nesta fase o robô industrial era caracterizado pela sua versatilidade, precisão e capacidade de executar tarefas simples com elevados níveis de repetibilidade o que lhe proporcionava grande utilidade nas linhas de montagem, especialmente, ao reduzir os custos de produção, aumentar a produtividade, a qualidade dos produtos, o nível automatização dos processos e a segurança dos operadores. Ainda assim até ao final dos anos 70, a introdução do manipulador robótico na indústria consistiu num processo lento e moroso, sendo que nessa data o número de aplicações ainda era relativamente baixo. Com o final do século XX e o início do século XXI, os desenvolvimentos tecnológicos permitiram colmatar algumas das limitações que impediam uma maior adesão por parte da indústria. Nomeadamente, a nível de capacidade de carga útil, eficiência energética, rapidez de processo, controlo, programação e viabilidade económica.

Em 1975 a empresa ABB desenvolveu um robô industrial com uma capacidade de carga útil até 60 kg. Com isto, atendeu-se aos requisitos do mercado automóvel que necessitava de maior capacidade de carga mantendo a flexibilidade característica desta tecnologia. O robô, chamado de IRB60, foi entregue pela primeira vez à Saab, na Suécia, para tarefas de soldadura em carroçarias de automóveis. Em 1979 a empresa Japonesa, Nachi, desenvolveu os primeiros robôs atuados por motores elétricos. Estes robôs, que desempenharam tarefas de soldadura por pontos, inauguraram assim uma nova era de robôs elétricos, substituindo a era anterior de atuadores hidráulicos. Em 1996 a empresa KUKA, Alemanha, lançou o primeiro sistema de controlo baseado em ambiente de PC. Foi possível, pela primeira vez, interagir com o robô em tempo real usando um dispositivo de controlo interativo. Este dispositivo *Touch Pendant* apresentava uma interface de utilização do Windows para controlo e programação do robô. Em 2006 a KUKA, Alemanha, apresenta o primeiro Light Weight Robot (LWR). Com estrutura externa de alumínio tinha uma capacidade de carga de 7 kg e sensores integrados. Isso tornava-o ideal para tarefas mais complexas de manuseamento e montagem. Devido ao seu baixo peso de apenas 16 kg o robô era energeticamente eficiente e bastante portátil podendo executar uma ampla gama de tarefas. Em 2007 chega ao mercado o KR Titan da KUKA. Este robô veio revolucionar o mercado devido a uma capacidade de carga de 1000 kg e a um raio de alcance de 3 metros e 200 milímetros. Foi considerado, na altura, o maior robô industrial e o robô com maior capacidade de carga do mundo, feito que está inclusive, registado no livro de recordes do Guinness.

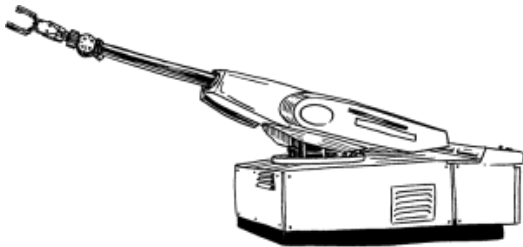


Figura 2.1: Unimate



Figura 2.2: KR 1000 L950 TITAN PA

São notórias as diferenças entre a primeira iteração feita por George Devol, Figura 2.1, e o robô industrial comum aos dias de hoje, Figura 2.2. Entre eles estão anos de desenvolvimento por parte das organizações que trabalham para aumentar a competitividade da tecnologia no meio industrial. Trabalho este que irá proliferar de forma a introduzir novos progressos e ideais no mercado.

Um dos focos atuais da indústria consiste em dotar os robôs de capacidades sensoriais superiores. Isto através da introdução de conceitos de visão computacional, como por exemplo, reconhecimento baseado em imagens e reconstrução 3-D. Com o assimilar desta ciência será possível uma colaboração entre humanos e robôs de forma mais segura e eficiente abrindo portas à concepção de robôs industriais

cooperativos [13]. Outra importante tendência são os *smart robots*. Este conceito faz parte de um dos oito pilares da quarta revolução industrial e define robôs providos de capacidade de auto-aprendizagem. Isto através da recolha de informação e aplicação de princípios de inteligência artificial e *machine learning* no seu processamento. Deste modo, informação importante relativa ao processo é utilizada de forma constante para o seu melhoramento. Para além disso, em paralelo com as inovações tecnológicas anteriores, haverá sempre a necessidade de introduzir melhoras a nível de design, eficiência energética, portabilidade, simplicidade e facilidade de programação do robô industrial. Por exemplo, a introdução de sistemas de CAD/CAM, plataformas de programação e simulação offline afirmam-se cada vez mais como apostas de futuro.

Todas estas contribuições serão responsáveis por moldar o futuro da indústria. Futuro esse que é idealizado com robôs industriais autónomos, auto-programáveis e mais seguros a partilharem o espaço de trabalho juntamente com operários, executando diversos tipos de tarefas e funções.

### **2.1.2 Necessidade e Aplicação**

Os benefícios arrecadados no longo caminho do desenvolvimento tecnológico do robô industrial associados às atuais necessidades do mercado contribuíram para a sua popularização a nível industrial.

Com a globalização da economia os níveis de competitividade na indústria aumentaram exponencialmente sendo que, agora, o produtor mais tradicional compete diretamente com organizações de topo pelo posicionamento no mercado. Questões como a qualidade das peças produzidas, tempos e custos associados à produção e entrega das mesmas são cada vez mais determinantes para a sustentabilidade de uma indústria. No entanto, hoje em dia, ainda existem muitos processos largamente dependentes de operações manuais [14]. Para combater este problema implementaram-se soluções de automação de processos de manipulação de objetos, como por exemplo, tapetes lineares, pontes rolantes, carros lineares, entre outros, e de maquinagem, como por exemplo, máquinas CNC, centros de torneamento e centros de maquinagem. Este importante passo evolutivo permitiu que os processos de fabrico fossem pensados de forma a obter grandes volumes de produção a baixo custo. Surgiram então as linhas de produção em massa indicadas para produções uni-produto devido à sua inflexibilidade e incapacidade de comportar necessidades de customização. Contudo, hoje em dia, estamos perante um mercado muito diversificado onde as linhas de produção rígidas caem cada vez mais em desuso. Surgem assim linhas de produção flexíveis que revolucionam o paradigma da produção respondendo às mais variadas necessidades dos clientes mantendo taxas de produção elevadas, custos de fabrico reduzidos de forma eficiente e sustentável [15]. Nesta perspetiva, surgem as aplicações da robótica à indústria que, tal como demonstrado na Figura 2.3, combinam a capacidade das máquinas industriais com as mais valias próprias do trabalho manual [14].

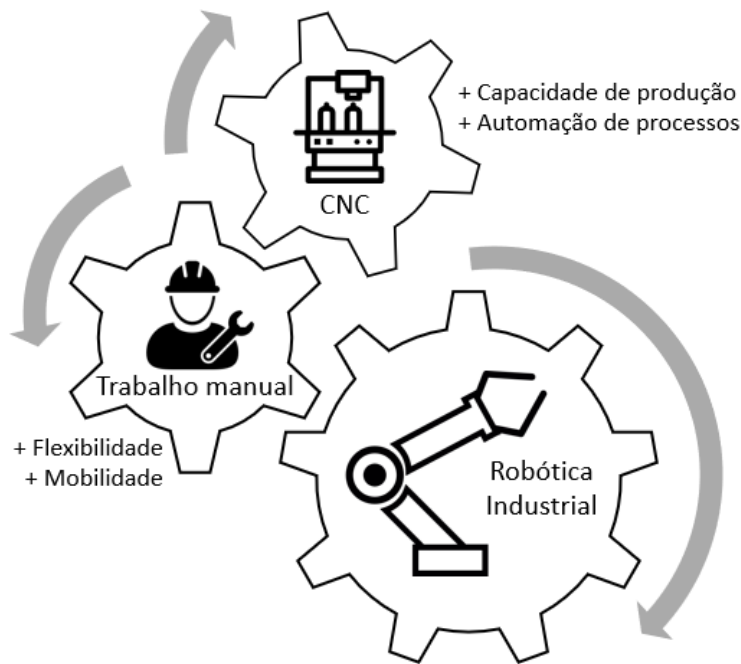


Figura 2.3: Representação das mais valias associadas à Robótica Industrial

De facto, a incorporação dos robôs industriais nos processos de produção dos mais diversos setores industriais e com as mais diversas funções está a ter um crescimento exponencial em praticamente todo o mundo. Os números disponibilizados pelo IFR, Figura 2.4, são a prova disso mesmo. Em 2017 a venda de robôs industriais aumentou 30% para 381 mil unidades, um crescimento verificado pelo quinto ano consecutivo, atingindo assim um valor de mercado de 14,4 mil milhões de euros. Entre 2012 e 2017, o aumento médio das vendas de robôs foi de 19% por ano. Entre 2015 e 2017 o aumento médio anual foi de cerca de 310 mil unidades. As estimativas de crescimento entre 2017 e 2021 são também positivas, sendo esperado um crescimento de 10 % em 2018 e um crescimento médio anual de 14 % entre 2019 e 2021 o que significaria um aumento de 2,1 milhões de unidades [16].

A indústria automóvel continua a liderar a procura de robôs industriais sendo responsável por um terço das compras de 2017. No entanto, indústrias como a metálica e sobretudo a eletrónica tiveram grande crescimento, respetivamente, 55% e 33%, sendo esta última responsável por 32% das compras de 2017. De facto, a indústria dos componentes eletrónicos tem estado em grande ascensão representando, hoje em dia, grande parte do mercado Asiático como China e Japão [16].

No que diz respeito às funções atribuídas a este tipo de tecnologia, estas estão representadas por três grandes grupos de operações: manuseamento, onde se incluem *pick and place*, paletização, carga e descarga de materiais - o robô automatiza os transportes e movimentos dos objetos dentro da linha de produção - montagem e inspeção - incluem tarefas de montagem de componentes e inspeção - e processamento onde temos tarefas de soldadura, pintura e maquinagem sendo esta última uma tendência recente das aplicações da robótica industrial [17] e o foco do estudo da dissertação de mestrado.

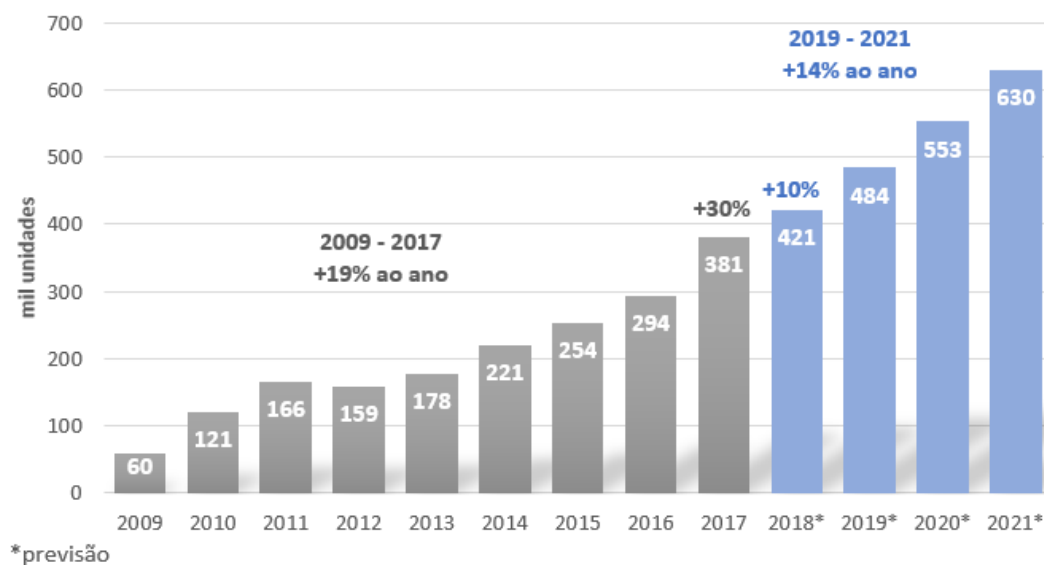


Figura 2.4: Estimativa anual do fornecimento de robôs industriais a nível mundial [16]

### 2.1.3 Conceitos

Para a formulação da dissertação de mestrado foi necessário a realização de um estudo mais aprofundado à ciência da robótica que conduziu à compreensão de conceitos fundamentais para a indústria. Entre eles é possível referenciar, graus de liberdade, volume de trabalho, end-effector, precisão, repetibilidade e singularidades.

No que toca aos robôs estes podem ser classificados segundo dois tipos: base móvel, ou base fixa. Este último, também designado por robô manipulador, corresponde à grande maioria das aplicações industriais e é composto por um braço que assegura a mobilidade, um pulso que determina a orientação e pelo *end effector* que representa a ferramenta montada na extremidade [8]. Outra forma de descrever um manipulador, do ponto de vista da sua estrutura, é através de um conjunto de corpos rígidos, *links*, interligados por articulações, *joints*, que formam assim uma cadeia cinemática. Consoante a sequência formada pelos corpos rígidos obtemos dois tipos de cadeias cinemáticas: *closed kinematic chain* quando a sequência forma um loop e *open kinematic chain* no caso contrário. [18].

Em verdade, a estrutura de um robô manipulador é a sua principal característica sendo determinante para a sua aplicabilidade e performance. Das configurações base que um robô industrial pode tomar destacam-se a configuração cartesiana, representada pelo primeiro robô industrial a ser construído, Figura 2.1, e a antropomórfica, que corresponde à estrutura do robô utilizado na dissertação, Figura 2.2 [18]. Grande parte da utilização de robôs no meio industrial traduz-se na configuração antropomórfica que se assemelha bastante ao braço humano. Esta configuração é formada por seis juntas de revolução que garantem o movimento relativo do braço e pulso de forma a alcançarem qualquer posição e orientação no espaço 3-D, confinada ao volume de trabalho do robô [18]. Por volume de trabalho define-se o espaço 3-D, ilustrado para diferentes configurações nas figuras 2.5 e 2.6, no qual



a extremidade do robô, sem *end effector*, pode alcançar [8]. Com influência no espaço de trabalho está a estrutura do robô e os seus graus de liberdade. Graus de liberdade que estão associados às juntas e definem a forma de movimento deste componente. Num robô, o número de graus de liberdade corresponde ao número total de deslocamentos independentes.

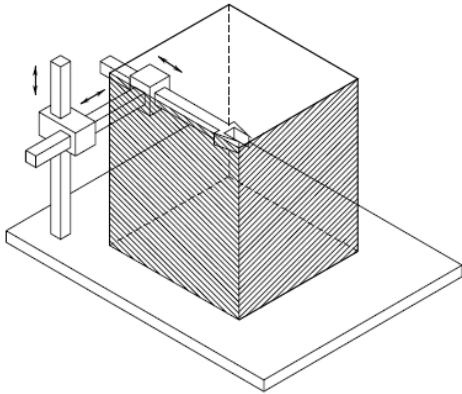


Figura 2.5: Workspace cartesiano [18]

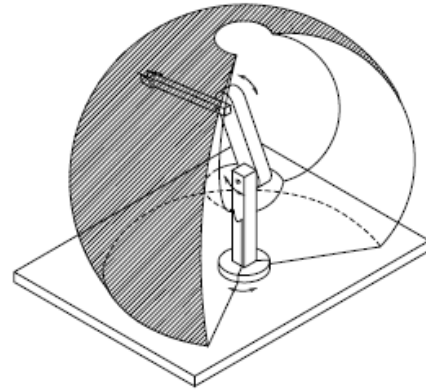


Figura 2.6: Workspace antropomórfico [18]

Como parte das características fundamentais de um robô estão também aquelas associadas ao seu movimento, as características dinâmicas. Entre elas a velocidade e aceleração concedidas pelos atuadores. Estas duas características são importantes para a conceção de movimentos rápidos e tempos de ciclo curtos, no entanto, têm efeito prejudicial na performance, sobretudo, na precisão e capacidade de carga do robô [8]. A capacidade de carga do robô corresponde ao peso máximo suportado por este na condição mais desfavorável, isto é, com o braço completamente estendido. Contabilizado neste indicador está o peso do *end effector*, pelo que podem ser distinguidas duas capacidades de carga: capacidade de carga bruta (*gross weight carrying capacity*) e capacidade de carga útil (*net weight carrying capacity*). Para os fabricantes de robôs apenas faz sentido referenciar a capacidade de carga bruta sendo responsabilidade do utilizador o cálculo da capacidade de carga útil através da Equação 2.1:

$$\text{capacidade de carga útil} = \text{capacidade de carga bruta} - \text{peso do } \textit{end effector} \quad (2.1)$$

No que toca à precisão esta pode ser avaliada segundo três indicadores: resolução espacial, exatidão e repetibilidade sendo que todos juntos avaliam a capacidade do robô alcançar a posição desejada, dentro do seu volume de trabalho. A resolução espacial retrata o menor incremento no movimento possível de ser reproduzido pelo robô. Este valor está relacionado com a resolução do controlador e com as imprecisões mecânicas do robô. Quanto menor for a resolução espacial maior será a precisão do robô. Por sua vez, a exatidão representa a capacidade do robô posicionar a sua extremidade no ponto pretendido. Este indicador acaba por ser consequência da resolução espacial sendo que pode ser definido, no pior cenário, como metade da resolução espacial, Equação 2.2.

$$\text{exatidão} = \frac{\text{resolução espacial}}{2} \quad (2.2)$$

Por fim, a repetibilidade faz referência à capacidade do robô voltar a produzir uma posição previamente ensinada, isto é, avalia a precisão com que o robô repete essa determinada posição [8]. Na prática, esta resulta, no espaço 3-D, a um volume aproximadamente esférico ao redor de um ponto no qual se retira o valor do raio para caracterizar a repetibilidade do sistema [8], Equação 2.3.

$$\text{repetibilidade} = \pm r \quad (2.3)$$

## 2.2 Programação de Robôs Industriais

A programação de um robô industrial consiste numa tarefa essencial para a definição de um ciclo de trabalho em que são incorporadas informações tais como posições, movimentos, velocidades, sinais lógicos, decisões, entre outras. De facto, é através da programação que é feita a ponte entre o pensamento humano e a ação do robô. Esta pode ser realizada segundo dois modos distintos: *online* e *offline*, sendo que cada um apresenta os seus benefícios e limitações.

Precisamente por isto que resulta este sub-capítulo onde será feita uma contextualização acerca do estado da arte a nível da programação de robôs industriais. Em primeiro lugar abordando as técnicas mais clássicas na sub-secção **Programação Online** e de seguida as novas tendências na sub-secção **Programação Offline**. Por fim, uma revisão sobre conceitos de programação será conduzida para melhor precessão ao longo da dissertação, na sub-secção **Abordagem ao KRL**.

### 2.2.1 Programação Online

A programação de robôs industriais foi inicialmente pensada através do modo de programação online. Este modo é caracterizado pela necessidade de utilização do robô para efeitos de programação. Isto é, quer seja a partir de programação direta, via consola de comandos (*touch pendant*), ou por meio de linguagens de programação de alto nível, existe sempre a necessidade de definir posições pelo guiamento do manipulador, ponto a ponto, ao longo da trajetória pretendida. *Teach & learn* é outra forma de apelidar este tipo de programação, visto que as posições são, em primeiro lugar, ensinadas e só depois reproduzidas em operação [8]. Através da sequência de operações apresentada na Figura 2.7 é possível verificar a simplicidade e eficácia do método que, ainda assim, contém algumas limitações que contribuíram para o desenvolvimento de outras alternativas de programação. Como desvantagens temos a dificuldade de programação de tarefas complexas que exijam maior rigor tais como, operações de processamento (soldadura, pintura e maquinagem), a falta de flexibilidade no que toca à necessidade de realizar alterações, a insegurança dos operadores no processo de guiamento e o acréscimo de tempos mortos na produção para programar ou reprogramar o robô [15].

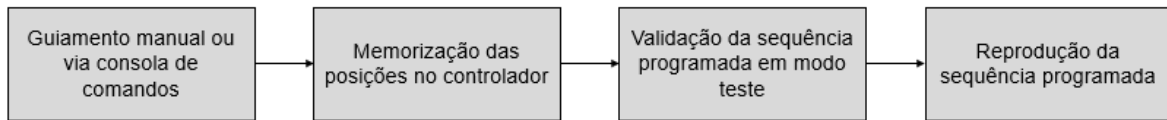


Figura 2.7: Fluxo de programação online

Apesar das suas desvantagens, este tipo de programação é dos mais utilizados na indústria. Sobre-tudo, graças ao seu baixo custo sendo suficiente para programar tarefas simples de manuseamento, inspeção e até de processo. Ainda assim, a programação *online* não é a melhor solução para abordar a programação de tarefas de maquinagem.

## 2.2.2 Programação Offline

Para colmatar grande parte das limitações da programação *online* surge, assim, a programação *offline*. Este método não necessita diretamente do robô. Os programas são criados e editados num interface próprio, normalmente em computador, isolado do robô. Desta forma junta-se uma maior flexibilidade de programação à minimização dos tempos não produtivos. A lógica base de programação offline pode ser observada na Figura 2.8. O código, por sua vez, pode ser criado de diferentes formas, no entanto, destacam-se, como as mais relevantes, a programação direta através da linguagem de programação própria do fabricante do robô e a programação mediante de ambientes gráficos [19].

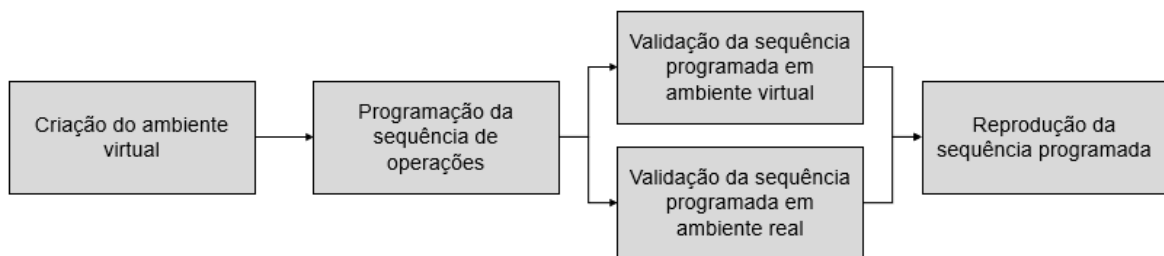


Figura 2.8: Fluxo de programação offline

A grande vantagem dos ambientes virtuais de programação face à programação direta consiste na sua simplicidade. Isto através da utilização de ferramentas gráficas no apoio à programação. Assim, o utilizador beneficia de uma forma mais objetiva de programar tendo noção, em forma de ícones gráficos, dos comandos introduzidos. Uma outra funcionalidade deste tipo de abordagem está na possibilidade de simular a execução do código em ambiente virtual validando e verificando *offline* o comportamento do robô no que toca a singularidades, colisões, limites de junta e de alcance. Neste processo de simulação o código é corrido passo a passo e as posições reproduzidas pelo robô, em ambiente virtual,

com recurso a modelos matemáticos de cinemática direta ou inversa, de acordo com o tipo de entradas em coordenadas de junta ou cartesianas [20].

São diversos os softwares para programação via ambiente virtual disponíveis no mercado. Uns com funções mais generalizadas e outros com aplicações a tarefas mais específicas. De facto, hoje em dia, existe uma grande aposta neste tipo de programação por parte dos fabricantes de robôs, pois esta permite que pessoas com menos conhecimentos técnicos possam interagir com a tecnologia. Nesta perspectiva surgem também os softwares de CAD/CAM direcionados, sobretudo, à programação de tarefas de maquinagem em robôs.

O software CAD/CAM surgiu originalmente para colmatar a necessidade de criar programas de maquinagem, em linguagem normalizada, para equipamentos de comando numérico (CN). No entanto, expandiu-se rapidamente à robótica industrial devido à forte tendência de maquinagem através deste tipo de tecnologia. A sua funcionalidade permite uma programação *offline* através de ambiente virtual que posteriormente é traduzida em código via pós-processador. Cada robô interpreta um tipo de linguagem textual particular de acordo com o seu fabricante [19]. Assim, a geração de código, através de programação CAD/CAM, implica a utilização de um pós-processador específico para cada robô.

A grande desvantagem na programação *offline*, nomeadamente, em ambiente virtual está na sua transposição para o ambiente físico. A correspondência entre o modelo virtual e o modelo real nem sempre acontece, pelo que este tipo de programação pode dar azo a erros de posição [20]. Para colmatar estes erros é importante realizar um processo de calibração cuidado.

### 2.2.3 Abordagem ao KRL

Quer seja através de programação *online*, *offline*, via código direto ou ambiente gráfico a finalidade será sempre a criação de um ou vários ficheiros de código, em linguagem textual, que serão posteriormente interpretados pelo robô, nomeadamente pela sua unidade de controlo. Como verificado anteriormente, cada fabricante desenvolve o seu tipo de linguagem de programação para uso exclusivo nos seus robôs. Assim, em abordagem inicial à programação de um robô industrial, é fundamental ter em conta a compatibilidade entre este e a sua linguagem de programação.

Sendo o objeto de estudo desta dissertação um robô industrial da KUKA foi realizado um estudo mais aprofundado às funcionalidades da linguagem de programação compatível, a KUKA Robot Language (KRL). Como qualquer linguagem de programação esta conta com uma série de estruturas e comandos compreendidos em texto, com construção semelhante ao inglês, que dão forma à sequência lógica do programa. A interpretação desta sequência lógica está a cargo do controlador.

Ficheiro fonte: **PROG01.src**

Ficheiro data: **PROG01.dat**

Tabela 2.1: Programa KRL com dois ficheiros correlacionados

Um programa em KRL é composto por ficheiros SRC e DAT. O ficheiro SRC, que pode ser chamado *source*, corresponde ao código do programa. Por sua vez, o ficheiro DAT, ou *data*, contém a informação referente ao programa. Um programa simples é composto apenas por um ficheiro SRC, mas para tarefas mais complexas é possível coexistirem vários ficheiros correlacionados, como observado na Tabela 2.1. Cada ficheiro respeita uma estrutura base iniciada pela zona de declarações, seguida pela zona de inicialização e por fim a zona de instruções. É na zona inicial de declarações que são introduzidas as variáveis. As variáveis são um elemento fundamental à programação de robôs industriais, sobretudo, na interação com sensores. Estas acomodam informação que pode ser acedida ou manipulada em diversas alturas do programa. Após a declaração de uma variável esta deve ser inicializada conforme o seu tipo, isto é, segundo a sua *data type*. Neste campo, existem as *data type* comuns à programação geral, tais como, INT, REAL, BOOL, Array, entre outras. Em KRL é de destacar as STRUC que consistem em conjuntos de diferentes *data types* que formam assim uma estrutura. Como é possível observar na Tabela 2.2 existem já estruturas predefinidas em KRL. Estas são de extrema importância para a programação de robôs industriais, pois contêm informação relativa a posições, orientações, coordenadas de junta do robô e coordenadas de junta de equipamentos externos.

STRUC AXIS	REAL	A1, A2, A3, A4, A5, A6
STRUC E6AXIS	REAL	A1, A2, A3, A4, A5, A6, E1, E2, E3, E4, E5, E6
STRUC FRAME	REAL	X, Y, Z, A, B, C
STRUC POS	REAL	X, Y, Z, A, B, C, INT S,T
STRUC E6POS	REAL	X, Y, Z, A, B, C, E1, E2, E3, E4, E5, E6, INT S,T

Tabela 2.2: Estruturas relevantes em KRL

Os componentes A1 a A6 correspondem às coordenadas de junta, de 1 a 6 respetivamente, de um manipulador robótico com 6 eixos. Este conceito pode ser definido como os valores dos ângulos de rotação de cada eixo que servem para descrever uma posição e orientação do robô no espaço, como demonstra a Figura 2.9. Outra forma de descrever uma posição no espaço é através dos componentes X, Y e Z, que são os valores das coordenadas cartesianas no espaço 3-D, e dos componentes A, B e C que dizem respeito à rotação em torno do eixo Z, Y e X respetivamente. Ambas as formas são válidas para declarar *targets* no espaço 3-D, isto é posições a alcançar pelo robô. A forma com que o controlador lida com estes dois tipos de programação é que difere. A programação através de coordenadas de junta é a que faz mais sentido a nível do controlo de movimento. Isto porque, os atuadores (motores) e sensores (encoders), no caso de juntas rotacionais, lidam com rotações, logo, o que de certa forma importa para definir o início e o fim do movimento são os *offsets* angulares. No entanto, este tipo de representação não favorece o utilizador que está acostumado a trabalhar em coordenadas cartesianas. Deste modo, dispõe-se da possibilidade de programar em coordenadas X, Y e Z, mais a respetiva orientação A, B e C. Neste caso, o controlador é responsável por usar modelos de cinemática inversa para transformar as coordenadas cartesianas em coordenadas de junta para que sejam reproduzidas e controladas pelos atuadores e sensores.

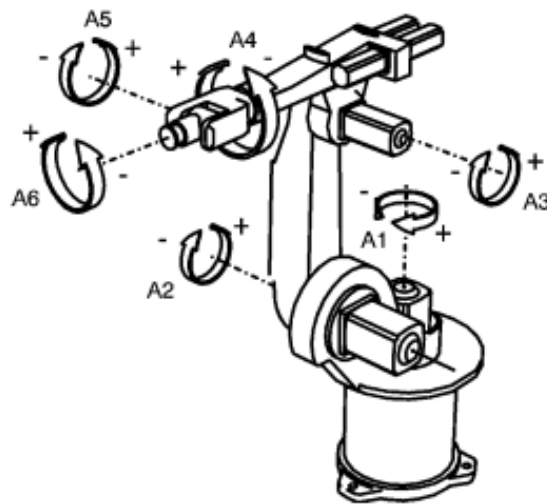


Figura 2.9: Definição de posição no espaço através de coordenadas de junta A1 A2 A3 A4 A5 A6 [21]

De facto, uma das funções essenciais do controlador consiste em determinar a movimentação do robô. Isto por meio de comandos específicos da linguagem da robótica, introduzidos pelo programador. Este género de instruções pode ser dividido em dois grupos consoante o tipo de movimento: contínuo e ponto a ponto. Os movimentos contínuos são caracterizados por trajetórias precisas e bem definidas no espaço, como por exemplo, movimentos lineares ou circulares. Por outro lado, as trajetórias dos movimentos ponto a ponto não são possíveis de prever e dependem da cinemática do robô. Normalmente, representam o caminho mais simples de ir de A para B.

Com exceção do movimento contínuo circular, para aplicar uma instrução de movimento apenas é necessário definir o ponto de destino. Ao executá-la, o controlador irá ordenar o manipulador robótico a movimentar-se da sua posição atual para a posição final especificada, que passará a contar como posição inicial para o movimento seguinte. Ainda assim, para além disso, existe a possibilidade de estabelecer propriedades do movimento através do uso de variáveis. Entre estas propriedades constam velocidades, acelerações, controlo de orientação, aproximações de trajetórias e referenciais utilizados. Na programação de robôs industriais os referenciais utilizados assumem uma grande importância. No controlador são predefinidos quatro tipos para fins de programação:

- \$WORLD: corresponde à origem da célula robótica e serve de base para o referencial de origem do robô (\$ROBROOT) e para os restantes equipamentos da célula. A sua posição é fixa no espaço, mas por norma está situado na base do robô e é coincidente com a origem do mesmo.
- \$ROBROOT: corresponde à origem do robô, que é relativa ao referencial \$WORLD, e serve de base à construção mecânica do robô e aos seus referenciais \$TOOL. Está localizado na base do robô acompanhando-a em caso de manipulador de base móvel.
- \$TOOL: corresponde à extremidade da ferramenta que é relativa ao referencial \$ROBROOT e serve de ponto de referência às movimentações do robô. Por definição está situado na flange do robô, mas deve ser modificado consoante a ferramenta utilizada.

- \$BASE: corresponde à origem da *workpiece* que é relativa ao referencial \$WORLD e serve de base às coordenadas de programação. Por definição é coincidente com a origem da célula que por sua vez é coincidente com a origem do robô.

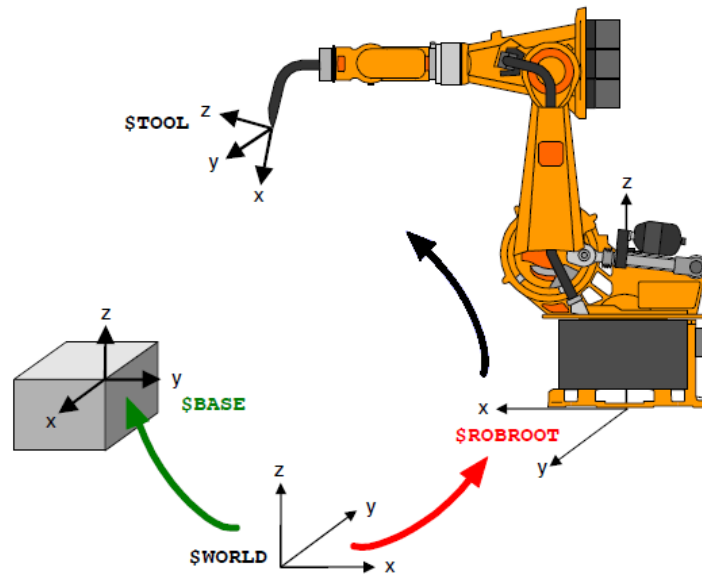


Figura 2.10: Relação entre os referenciais usados na programação de Robôs Industriais [21]

A Figura 2.10 é demonstrativa dos conceitos introduzidos onde é possível verificar o caso mais comum em que a *tool* é montada no robô.

## 2.3 Transformação da Pedra Natural

A indústria de transformação de PN tem como função processar os blocos de matéria prima provenientes da indústria extrativa, das pedreiras, em produtos acabados e semiacabados usados para fins estruturais ou decorativos. Para isso é fundamental ter consciência das características do material e do processo de transformação utilizado. Desta feita, este capítulo vem apresentar uma contextualização acerca da caracterização da pedra natural, na sub-seção **Caracterização do Material**, seguida do processo de corte por disco, na sub-seção **Caracterização do Processo de Corte por Disco**. Com isto, pretende-se tratar conceitos importantes para futura relação com a aplicação da robótica industrial.

### 2.3.1 Caracterização do Material

Tal como o nome indica, a indústria transformadora da Pedra Natural lida com material de origem natural. Constituído por um agregado consolidado ou não consolidado de minerais forma-se assim a matéria-prima designada Rocha Ornamental. A sua origem provém de um processo geológico natural de ação física, química e biológica onde o material é submetido a condições extremas de temperatura e pressão. Com duração de milhares de anos é consoante este processo que são definidas características ornamentais, físicas e mecânicas da rocha [22].

As rochas ornamentais, ou pedras naturais, são materiais frágeis que suportam muito pouca deformação antes de fraturar. A nível de propriedades mecânicas apresentam boa resistência à compressão, no entanto, resistência aproximadamente nula à tração e ao corte [23]. Por sua vez, os atributos ornamentais resultam de características como a cor que, por seu turno, é fruto dos minerais dominantes, da sua granularidade e do seu grau de alteração. Das propriedades físicas destacam-se o modo de fratura, a dureza e a porosidade. Através da análise do modo de fratura da pedra é possível avaliar a sua conformidade com processos como corte ou polimento. No que lhe diz respeito, a dureza retrata a resistência oferecida a partir da capacidade de um material "riscar" outro. Para classificar a dureza é utilizada a escala de *Mohs* de 1 a 10. Quanto maior a dureza maior a resistência oferecida à maquinagem, nomeadamente ao corte, pelo que pedras duras necessitam de ferramentas com dureza superior. A porosidade é uma característica consequente da estrutura. Esta depende da disposição e dimensão dos poros sendo que quanto maior a porosidade menor será a resistência à compressão e menor será a sua durabilidade. As seguintes imagens ilustram três tipos de pedra natural comuns à indústria que apresentam propriedades e características distintas.



Figura 2.11: Granito



Figura 2.12: Calcário



Figura 2.13: Mármore

Características tais como as acima referenciadas são fundamentais no que toca à escolha do equipamento de fabrico, bem como do processo e dos parâmetros utilizados. Assim sendo, na indústria transformadora, para diferenciação técnica, subdivide-se a pedra natural no grupo dos mármore, pedra macia (Figura 2.13), e dos granitos, pedra dura (Figura 2.11). Uma pedra considerada "dura" é identificada por uma composição mineralógica rica em minerais de dureza superior a 6 na escala de Mohs o que resulta numa maior dificuldade de processo e consequente desgaste da ferramenta e equipamento. Por outro lado, pedras "macias", com minerais de grau 3 na escala de Mohs, são de processamento mais ligeiro tendo assim efeito menor no que toca ao desgaste da ferramenta e equipamento [24]. Outra das particularidades da pedra natural está na dificuldade de prever as suas características. Isto devido ao seu carácter natural, que se desenvolve ao longo de milhares de anos sob condições distintas. Assim, para além do tipo de pedra ser variado, é comum também que cada variedade tenha características diferentes entre si.

Tudo junto, por ser um material exigente e com características difíceis de prever origina um desafio



ao processo de transformação. Os perfis de força de corte elevados e irregulares afetam desempenho da máquina ferramenta. Sendo esta um robô industrial, os problemas de precisão, vibrações e oscilações agravar-se-ão impactando na durabilidade do equipamento e na qualidade da produção. Assim, para validar o processo de corte informação relativa à energia consumida pela máquina-ferramenta, vibrações sentidas na máquina-ferramenta, desgaste da ferramenta, eficácia do corte e qualidade do corte devem ser avaliadas e comparadas com processos já estabelecidos [25].

### 2.3.2 Caracterização do Processo de Corte por Disco

Na transformação de pedra natural esta é submetida a diversos processos de maquinagem a fim de obter as dimensões e acabamentos pretendidos adquirindo assim valor de mercado para quem a produz. Neste setor a remoção de material é feita, essencialmente, através de processos de maquinagem abrasivos. Dos métodos mais tradicionais à indústria transformadora da PN destacam-se o corte por fio, corte por disco circular e o polimento. Em conformidade com o tema da dissertação de mestrado, apenas será contextualizado o corte por disco circular. Neste processo, tal como o nome indica, são utilizados discos metálicos circulares como ferramenta. A remoção de material é consolidada através do desgaste abrasivo proporcionado pelos segmentos, por norma grãos de diamante, distribuídos aleatoriamente pela estrutura da matriz da ferramenta. Como representado na Figura 2.14, a remoção de material através de desgaste abrasivo é consequência da interação entre uma partícula abrasiva mais dura e a superfície de um corpo macio. Durante o seu ciclo de intervenção no processo a partícula abrasiva exerce diferentes tipos de desgaste na superfície do corpo. Juntando a isto o facto da distribuição de partículas na matriz da ferramenta ser aleatória faz com que o desgaste abrasivo seja algo muito difícil de prever resultando em perfis de força de corte bastante inconstantes.

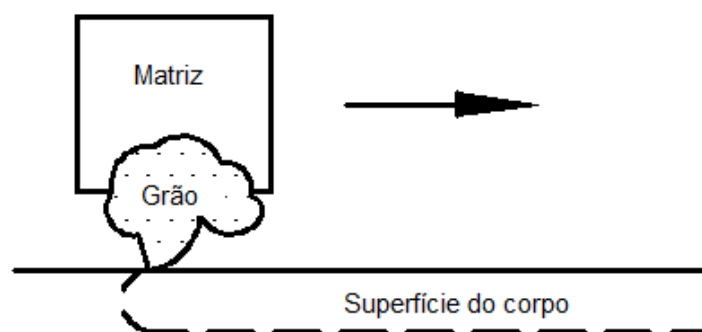


Figura 2.14: Desgaste abrasivo

No que diz respeito à performance e aos resultados do processo de corte de pedra natural por disco, estes estão diretamente relacionados com os parâmetros operativos selecionados. Na sua escolha pesam vários fatores inerentes às necessidades do projetos, mas também à capacidade da máquina ferramenta. Um exemplo disto mesmo pode ser observado nas imposições a nível de dimensões e acabamentos superficiais que limitam as taxas de remoção de material, logo, a produtividade e rapidez do processo que, por sua vez, depende do equipamento a utilizar. Mais ainda, processos mais rápidos

têm maior impacto na vida útil da ferramenta e da máquina ferramenta. Por este motivo, alcançar um balanço adequado em relação aos parâmetros operativos consiste numa tarefa bastante complexa, mas que é fundamental para assegurar qualidade do produto final sem abdicar de tempo de produção.

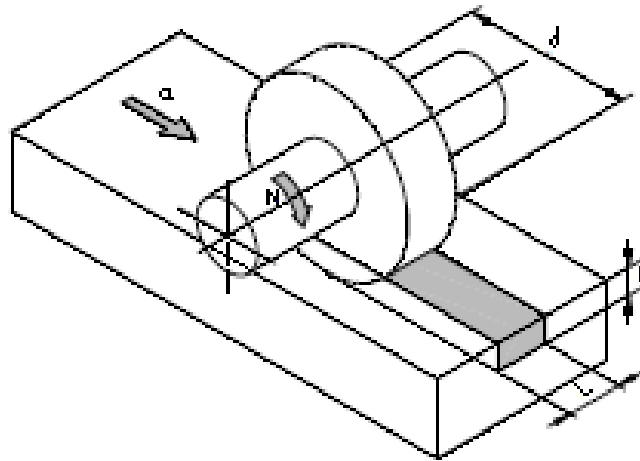


Figura 2.15: Processo de corte de pedra natural através de disco circular diamantado

Para o processo de corte de pedra natural por disco circular destacam-se diversos parâmetros com importância significativa, representados na Figura 2.15. Entre eles estão:

- Velocidade de rotação do disco **N**
- Velocidade de corte ou velocidade periférica do disco
- Profundidade de corte **p**
- Velocidade de avanço **a**
- Sentido do avanço

Relativamente à velocidade de rotação do disco esta descreve, normalmente em rpm, a velocidade angular de rotação do disco que, por sua vez, dita a velocidade de corte ou velocidade periférica do mesmo, dependendo do seu diâmetro, segundo a relação apresentada na Equação 2.4.

$$\text{velocidade de corte [m/s]} = \frac{d}{2} [m] * \frac{2\pi}{60} N [rpm] \quad (2.4)$$

Por norma, a informação relativa à velocidade periférica recomendada é fornecida pelo fabricante da ferramenta. Esta depende não só do diâmetro do disco, tal como constatado através da equação anterior, mas também do material a tratar. A Tabela 2.3 serve de indicador de valores recomendados de velocidade periférica para diferentes tipos de pedra natural. É possível observar que esta diminui consoante o aumento da dureza do material tratado, devido à ação cada vez mais desgastante que este tem sobre a ferramenta.

Tipo de pedra natural	Gama de velocidade periférica m/s
Mármore macios	48 - 62
Mármore de dureza média	42 - 50
Mármore duros	40 - 50
Mármore muito duros	32 - 42
Granitos com baixa percentagem de quartzo	30 - 40
Granitos com alta percentagem de quartzo	20 - 30

Tabela 2.3: Valores recomendados de velocidade periférica para diferentes tipos de pedra natural [24]

No que toca à profundidade de corte, esta está, por norma, associada à capacidade da máquina-ferramenta e da própria ferramenta. A velocidade de avanço pode ser exprimida em mm/min, mm/rev ou mm/tooth e impacta diretamente a taxa de produção e a qualidade do produto final. Por fim, o sentido do avanço pode ser dividido em duas opções: avanço concordante e avanço discordante, sendo que, no primeiro caso, o sentido do movimento corresponde ao sentido do avanço e no segundo caso o contrário.

Não existe uma única abordagem correta para a escolha dos parâmetros operativos. Devido aos vários fatores a considerar nesta decisão é difícil desenvolver modelos que possam representar uma decisão ótima. Assim, hoje em dia, a decisão dos parâmetros recai essencialmente em resultados experimentais previamente testados e comprovados ou em conhecimento adquirido através da experiência no ramo.

## 2.4 Maquinagem com Robôs Industriais

Conforme foi verificado na subsecção 2.1.2 existe um aumento acelerado na procura de robôs em todo o mundo. Este indicador é, naturalmente, consequência de um balanço positivo entre as mais valias e limitações da tecnologia que a tornam mais ou menos apropriada a uma determinada função e indústria. Hoje em dia, encontram-se facilmente na indústria células robotizadas a desempenhar, com excelentes resultados, funções de manuseamento, inspeção e processo, como soldadura e pintura. Todavia, o mesmo não se verifica para funções de maquinagem. A principal causa da lenta expansão da robótica industrial a este tipo de tarefas está na perseverança de soluções alternativas como as máquinas CNC. No entanto, estas apresentam certas limitações que, em conjunto com as recentes necessidades do mercado vistas na subsecção 2.1.2, constituem uma oportunidade à aplicação da robótica.

A principal mais valia do robô face a este tipo de equipamento, para tarefas de maquinagem, está no seu espaço de trabalho e versatilidade. Devido aos seus 6 graus de liberdade e superior volume de trabalho o robô industrial é capaz de maquinar peças maiores, com elevado nível de complexidade, numa única operação enquanto que soluções de 3 a 5 graus de liberdade, tais como máquinas CNC, não o permitem. Para estes casos o processo é subdividido em múltiplas operações e em caso extremo de grandes peças estas são divididas e novamente assembladas após processamento. No caso de peças

com geometria complexa os equipamentos standard CNC são equipados com acessórios especiais que permitam colmatar as necessidades do processo [26]. Ainda assim, existem certas desvantagens na utilização do braço robótico industrial para tarefas de maquinagem, face às CNC. Entre elas estão os problemas de precisão que advêm da construção mecânica do robô. A sua estrutura mecânica aberta limita os valores de precisão comparativamente aos conseguidos pelas estruturas fechadas dos equipamentos CNC [27]. Além disso, com um maior espaço de trabalho perde-se rigidez estrutural face às máquinas CNC que apresentam valores superiores aos 50 N/μm, enquanto que para o RI os valores são inferiores ao 1 N/μm. Esta diferença vem agravar os problemas de precisão pois incapacita o robô de resistir às forças inerentes ao processo de maquinagem, nomeadamente à força de corte. Para uma precisão aceitável em tarefas de maquinagem via robô industrial a força de corte deverá ser limitada [26]. Isto apresenta-se como uma adversidade no que diz respeito à maquinagem de materiais mais exigentes que necessitem forças de corte elevadas, tal como a pedra natural e os metais comuns [26]. Ainda assim, a precisão do robô industrial tem melhorado bastante nos últimos anos. Hoje em dia, os robôs são construídos para manter os requisitos de precisão exigidos pelas indústrias e podem ser calibrados perto de sua repetibilidade na ordem dos micrones. Para além disso, tecnologias como *force feedback* complementam estes valores através do ajuste do posicionamento da ferramenta consoante os valores de força registados no decorrer do processo. Outro dos problemas da maquinagem através de robô industrial tem a ver com susceptibilidade que este apresenta a vibrações. Isto deve-se, sobretudo, à baixa frequência natural característica da sua estrutura que possibilita a ocorrência de fenómenos de ressonância [15]. Uma análise aos efeitos da vibração de um robô industrial num processo de maquinagem publicada no *Journal of Materials Processing Technology* permitiu verificar aumentos abruptos na força de corte aquando da ocorrência de vibrações. Tudo junto, os problemas de precisão, incapacidade de resistir a forças elevadas e os efeitos de vibração têm impacto direto na qualidade das peças manufacturadas e correspondem aos principais desafios na aplicação desta nova tecnologia na indústria da pedra natural.

Em comparação com as máquinas CNC o RI é também mais vantajoso no que toca aos custos. Ambas as soluções envolvem um investimento inicial elevado. No entanto, estudos realizados acerca do custo direto de ambos os equipamentos industriais estimaram uma redução de 30 % para o robô industrial, comparando com uma máquina-ferramenta com o mesmo espaço de trabalho [28]. Relativamente aos custos indiretos a versatilidade do robô permite uma redução no número de equipamentos o que origina poupança de espaço de oficina e custos de manutenção.

Em relação aos tempos de ciclo, no processo de trabalho comum de uma máquina CNC o operador executa várias tarefas manuais como abrir a máquina, colocar e fixar a peça de trabalho no dispositivo de fixação, fechar a máquina, reabrir e retirar a peça acabada no final do ciclo. Já no ciclo de trabalho do robô, é o equipamento que é responsável por processar todas as peças, uma após a outra, de modo automatizado. No final da produção, quando as peças estão acabadas, elas são retiradas diretamente pelo operador na zona de output de material. Desta forma, o processo através do robô industrial economiza tempo significativo do operador em comparação com os equipamentos CNCs. A nível de custos, isto permite economizar no número de horas homem bem como beneficiar dos custos indiretos

relativos a aumentos na produtividade.

Em relação à programação, por ser uma tecnologia mais recente existem menos soluções de simulação e programação assistida por computador que origina maior complexidade em comparação com as metodologias praticadas para os equipamentos CNC.

Para tarefas de maquinagem exigentes o robô industrial dificilmente substituirá as máquinas industriais mais direcionadas ao processo. No entanto, não deixa de ser uma solução que pode ser considerada válida. Tanto que, hoje em dia, já existem soluções de maquinagem de pedra natural via braço robótico capazes de produzir esculturas, banheiras, bacias, fontes, lápides, entre outras aplicações.



## Capítulo 3

# Implementação

A implementação da programação do braço robótico para tarefas de maquinagem em chapas de pedra natural é demonstrada neste capítulo. É exposto o método adotado para que se possa chegar ao código final com as instruções e procedimentos de maquinagem interpretadas pelo controlador do robô. De notar que a criação de código para ser executado pelo robô consiste num passo complexo que incorre em bastantes riscos, pelo que será dividido em várias tarefas tratadas ao longo do capítulo.

Tal como a maior parte dos equipamentos industriais, o robô como máquina ferramenta representa perigo para o meio que o envolve. Caso seja introduzido código proveniente de programas gerados de forma errónea é possível provocar erros de operação, peças indesejadas e, no pior cenário, danos ao equipamento ou aos equipamentos e pessoas que o rodeiam. Assim, e com auxílio dos desenvolvimentos a nível de software e simulação abordados no sub-capítulo 2.2, foi pensado e aplicado um método que se pudesse adequar à tarefa. Para tal, em primeiro lugar, é utilizado um software CAD/CAM para realizar a programação *offline* em ambiente gráfico. Este apresenta bastantes vantagens já referenciadas anteriormente pelo que foi considerado como a melhor forma de abordar o problema. De seguida, o output gerado pelo aplicativo anterior é testado e validado para aplicação direta, em modo automático, no controlador do robô. Sintetizando, é apresentado, na Figura 3.1, um procedimento que reflete o fluxo de trabalho. Ao longo deste capítulo cada etapa será abordada com maior detalhe de forma a retratar o trabalho executado, as decisões tomadas e os conhecimentos adquiridos.

Com base no fluxo de trabalho apresentado, após a realização da modelação e reprodução da célula robótica virtual de forma a se assemelhar ao máximo à realidade, no sub-capítulo **Modelação**, segue-se, no sub-capítulo **Programação, Simulação e Optimização**, a programação de trajetórias e parâmetros de maquinagem, neste caso de corte. Posto isto, o software CAD/CAM utilizado realiza a simulação avaliando possíveis erros, colisões, singularidades e limites de junta e alcance. Em caso de erro existe a necessidade de o corrigir voltando a um dos passos iniciais consoante o erro encontrado. Caso a simulação seja válida pode ainda ser otimizada ficando essa decisão a cargo do programador. Por fim, sucede o sub-capítulo **Verificação e Validação** onde são testados métodos de aprovação do código gerado pelo pós-processador de forma a que este seja executado com segurança pelo controlador do robô, no sub-capítulo final **Aplicação na Célula Robótica Real**.

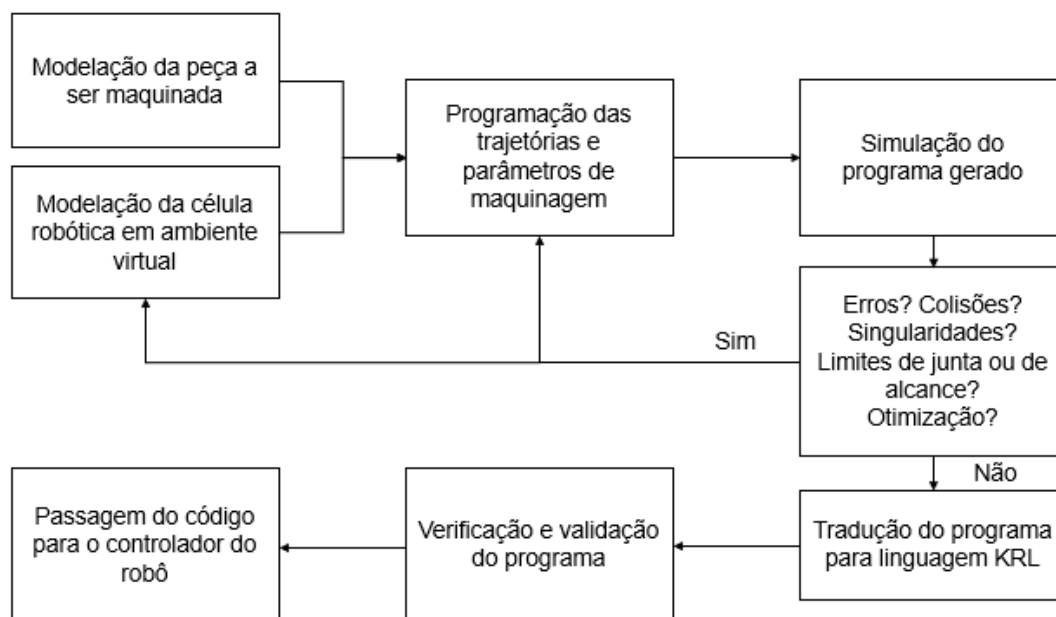


Figura 3.1: Fluxo de trabalho adotado para programação do robô

### 3.1 Modelação

Como primeira etapa da criação do programa de maquinagem de chapas de pedra natural via braço robótico foi idealizada uma célula robótica capaz de efetivar as tarefas desejadas pelo projeto. Tarefas essas que passam pela realização de operações de corte por disco circular em pedra natural. Esta célula encontra-se localizada na empresa FrontWave - Engenharia e Consultoria S.A., em Pêro Pinheiro, Sintra. Como ferramenta essencial à construção e optimização da célula foram utilizados softwares de programação *offline* - Sprutcam - e modelação 2-D e 3-D - AutoCAD e SolidWorks respetivamente. Da célula robótica idealizada fazem parte o robô manipulador, o seu controlador, o seu *end-effector* e os restantes acessórios como tapetes lineares, paletes e caixas.

O robô manipulador utilizado consiste no modelo KR 360, da marca alemã KUKA, com extensão de braço de 250 mm originando assim o modelo KR 360 L280 - 2 com capacidade de carga bruta de 280 kg e controlador KR C2. Este robô manipulador constituído por 6 eixos, com uma repetibilidade de  $\pm 0,08\text{mm}$ , proporciona um volume de trabalho de  $91\text{ m}^3$  e um alcance máximo de 3076mm. Na extremidade do eixo A6 encontra-se a flange de acoplamento da ferramenta que segue a norma DIN ISO 9409-1-A200 [29]. Mais detalhes em relação aos dados técnicos do robô podem ser consultados na ficha técnica do mesmo, no Apêndice B.1.

Para utilização do modelo do robô em SprutCam foi necessária a criação de um ficheiro .xml com informações precisas acerca da sua estrutura cinemática. Para tal, são necessárias dimensões entre eixos e limites de alcance angular de cada junta, que foram obtidos através da consulta da ficha técnica das características do equipamento, presente no Apêndice B.1. Para completar a configuração do ficheiro .xml foram também preparados os modelos CAD de cada corpo rígido e respetiva junta. Para esse fim, importou-se o modelo Parasolid do robô KR 360 L280 - 2 disponibilizado pela KUKA onde



se decompôs, através do SolidWorks, o robô nas seis diferentes partes guardando cada uma delas, individualmente, em formato .osd. Posto isto cada parte foi adicionada à respetiva alocação do ficheiro .xml. O processo de criação do ficheiro de leitura .xml permite que o robô fique disponível para utilização na biblioteca de máquinas-ferramenta do SprutCam, no entanto, apenas fica concluído com a introdução das informações e modelos CAD referentes ao *end-effector* utilizado.

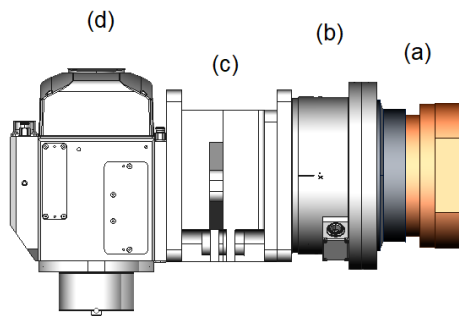


Figura 3.2: Modelo virtual do end-effector

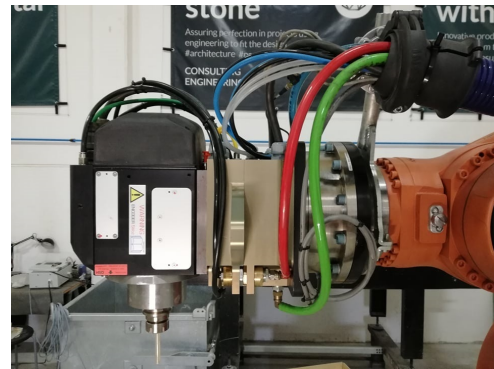
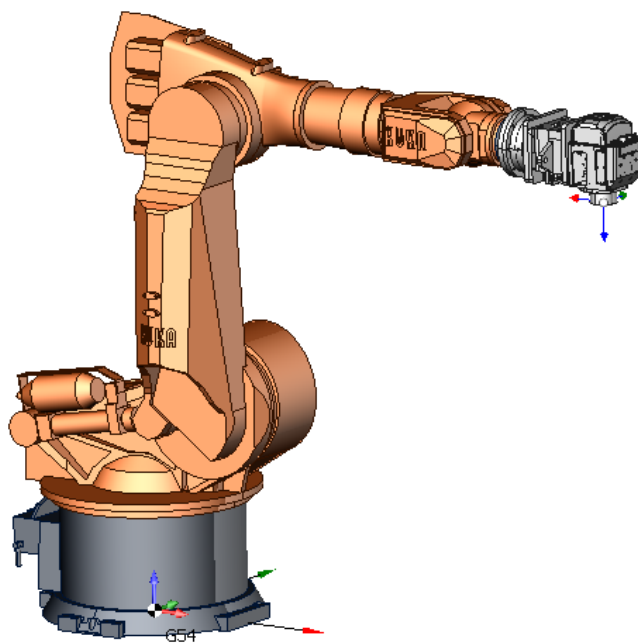


Figura 3.3: Modelo real do end-effector

Relativamente ao *end-effector* utilizado este é constituído por diversos componentes. A Figura 3.3 representa o *end-effector* real e a Figura 3.2 *end-effector* modelado através do SolidWorks onde é possível identificar os componentes constituintes:

- (a) Flange de acoplamento
- (b) Célula de carga
- (c) Sistema de troca de ferramenta macho e fêmea
- (d) Spindle

Com o *end-effector* adequado modelado e guardado em ficheiro .osd procedeu-se à sua introdução no ficheiro .xml. Para concluir o ficheiro, a informação alusiva ao referencial da ferramenta, nomeadamente posição e orientação relativamente à flange, foi avaliada e registada no .xml. O ficheiro .xml final, utilizado para as seguintes fases da dissertação, pode ser consultado no Apêndice A.1. O modelo do robô no SprutCam, com a respetiva informação acerca do referencial da flange e da ferramenta, pode ser observado na Figura 3.4. O referencial da ferramenta TOOL frame [1], que pode ser constatado na figura, está situado na zona de encaixe entre o spindle e o cone acoplador. Para este referencial as coordenadas e orientações apresentadas são relativas ao referencial da TOOL [0] que por definição está situado no centro da flange de acoplamento do eixo A6. Por sua vez, as coordenadas e orientações apresentadas para o TOOL [0] são relativas ao referencial ROBROOT situado na base do robô.



TOOL [0]		TOOL frame [1]	
X	2065	X	223.46
Y	0.00	Y	-1.11
Z	2400	Z	460.18
Rz'	0	Rz'	0
Ry'	90	Ry'	90
Rx'	0	Rx'	0

Figura 3.4: Modelo KR360 L280-2, com *end-effector* acoplado, utilizado no SprutCam e respectivos referenciais da flange, relativo ao referencial ROBROOT, e da ferramenta [1], relativo ao referencial da flange

De seguida, deu-se a modelação da peça a produzir. Sendo que o objetivo é programar o corte por disco circular via robô, projetaram-se dois tipos de chapas de pedra natural para realização de várias iterações. Ambas partem da mesma matéria prima com dimensões de 1000mm x 600mm x 20mm, no entanto, o primeiro caso apresenta um rasgo central, ao longo do comprimento, com 5mm de profundidade enquanto que o segundo caso, que resulta de uma optimização do primeiro, apresenta 29 rasgos ao longo do comprimento, com profundidade de 18mm, e espaçamento de 17mm. A modelação em SolidWorks de ambas as peças pode ser observada nas figuras 3.5 e 3.6 enquanto que os desenhos técnicos constam no Apêndice A.2 e A.3.

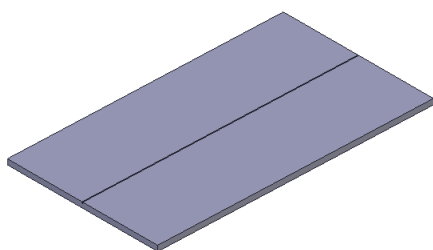


Figura 3.5: Chapa único rasgo central

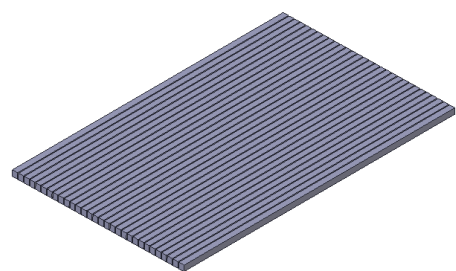


Figura 3.6: Chapa múltiplos rasgos

Para composição do ambiente virtual modelaram-se também acessórios como um tapete linear que serve de mesa de trabalho para o corte das chapas, um caixote para colocar desperdícios e bancadas de *input* de matéria prima. A presença de acessórios como estes no modelo virtual, de forma semelhante à realidade, é opcional, contudo pode ser de extrema importância na medida que permite a simulação de possíveis colisões e situações inesperadas.

### 3.2 Programação, Simulação e Otimização

Na segunda etapa da criação do programa de maquinagem de chapas de pedra natural via braço robótico são definidas, simuladas e otimizadas as trajetórias de corte pretendidas com base em diferentes estratégias e parâmetros de operação. Para tal, é utilizado o programa de manufactura assistida por computador SprutCam.

A programação através do SprutCam segue uma lógica que é dividida, essencialmente, em três etapas, sendo cada uma delas alocada a um separador diferente da janela de trabalho. Em primeiro lugar, está o separador *Model* para onde são importados e posicionados os modelos 3-D da peça, ou peças, a maquinar e os restantes acessórios integrantes do ambiente de trabalho que sejam considerados necessários. É também neste separador que pode, ou não, ser estabelecido o referencial BASE que servirá de referencial base às coordenadas de programação. Por definição no SprutCam, caso não seja alterado, este coincide com a base do robô. A Figura 3.7 é representativa do trabalho executado no separador *Model* para onde se importaram a peça a produzir, da Figura 3.6, e o tapete linear como componente de fixação desta. O referencial Global, ou WORLD, está localizado na base do robô (que se encontra oculta) enquanto que o referencial BASE está localizado no canto superior da chapa. O offset do tapete linear em relação ao referencial Global foi quantificado a partir de uma das suas pernas. Já a matéria prima foi posicionada em relação ao tapete. Uma representação do posicionamento do tapete e da matéria prima pode ser observada na Figura 3.7.

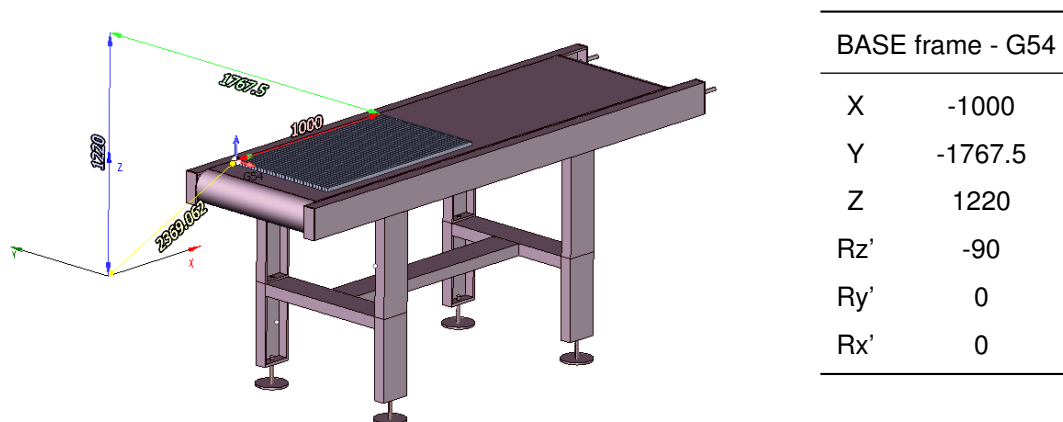


Figura 3.7: Posicionamento do tapete e da matéria-prima em relação à origem global junto das coordenadas e orientação do referencial BASE definido em relação ao referencial WORLD

Posto isto, segue-se o separador *Machining* que engloba diversas funções como a escolha e configuração da máquina-ferramenta, a escolha e configuração da operação de maquinagem e dos seus parâmetros, a escolha e configuração da ferramenta a utilizar, a atribuição e configuração das trajetórias de maquinagem, entre outras.

Aquando da seleção da máquina-ferramenta pode ser utilizada a biblioteca padrão do SprutCam que contém alguns exemplares prontos a utilizar, sobretudo, no que toca a máquinas CNC. No caso do robô utilizado na dissertação, este não constava na lista disponibilizada pelo software, de tal forma que foi necessário criar e configurar uma máquina-ferramenta, tal como explicitado no sub-capítulo anterior. Este passo permitiu a seleção do robô KR 360 L280-2 e respetivo *end-effector*, Figura 3.4, para ser utilizado no SprutCam.

Com este passo concluído, foi então gerada a matéria prima em volta da peça importada e selecionado o processo de "Sawing" para retratar a operação de corte por disco circular. Nesta fase é realizada a parametrização da respetiva operação e da ferramenta utilizada. Através da janela de *Operation: Sawing. Parameters*, Figura 3.8, é possível estabelecer parâmetros como velocidade de rotação do disco (RPM), velocidade do movimento de aproximação, velocidade do movimento rápido, velocidade de avanço (mm/min), estratégia de maquinagem, neste caso, corte concordante ou corte discordante, zonas de segurança, orientação da ferramenta, número de passagens, *lead in*, *lead out*, entre outras.

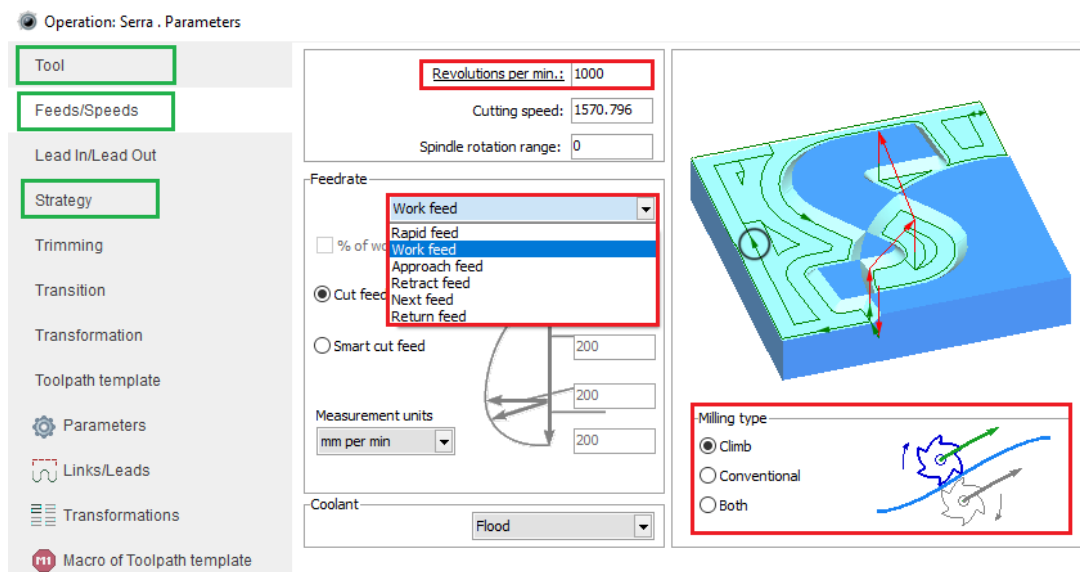


Figura 3.8: Definição de parâmetros operativos, em particular, velocidade de rotação, velocidade de avanço e sentido do avanço, no SprutCam

A Figura 3.8 é representativa da definição de certos parâmetros mencionados anteriormente. Nesta, estão destacados a verde os separadores mais relevantes direcionados a diferentes parametrizações tais como ferramenta, velocidades e estratégia de maquinagem. Por sua vez, destacados a vermelho estão parâmetros relativos às velocidades e ao sentido do avanço. A Tabela 3.1 consuma os parâmetros definidos nesta etapa e utilizados nas restantes fases do trabalho. As velocidades foram estabelecidas

segundo valores standard recomendados para o processo [24] enquanto que estratégias e *Leads* foram resultado de optimizações do processo. No caso dos *Leads*, estes foram utilizados para evitar erros de contacto com a peça em movimentos de aproximação.

	velocidade de rotação	1000 RPM
	velocidade de corte	26.18 mm/min
Velocidades	velocidade de avanço	200 mm/min
	velocidade movimento rápido	10000 mm/min
	velocidade movimento de aproximação	200 mm/min
Estratégia	sentido do avanço	concordante
	número de passagens	1
	<i>stock</i>	0
<i>Links/Leads</i>	zona de segurança	plano a 100 mm
	<i>lead in</i>	10 % por tangente
	<i>lead out</i>	10 % por tangente

Tabela 3.1: Parâmetros operativos utilizados

Relativamente à parametrização da ferramenta, tal como acontece com as máquinas-ferramenta, existe uma biblioteca padrão do SprutCam onde estas estão disponíveis e prontas a usar. No entanto, é também possível criar e configurar uma ferramenta específica caso necessário. No que à dissertação diz respeito, foi criada uma nova ferramenta conceptualizando um disco real de diâmetro 500 mm e espessura 3 mm. A Figura 3.9 representa o separador relativo à ferramenta onde estes parâmetros são atribuídos.

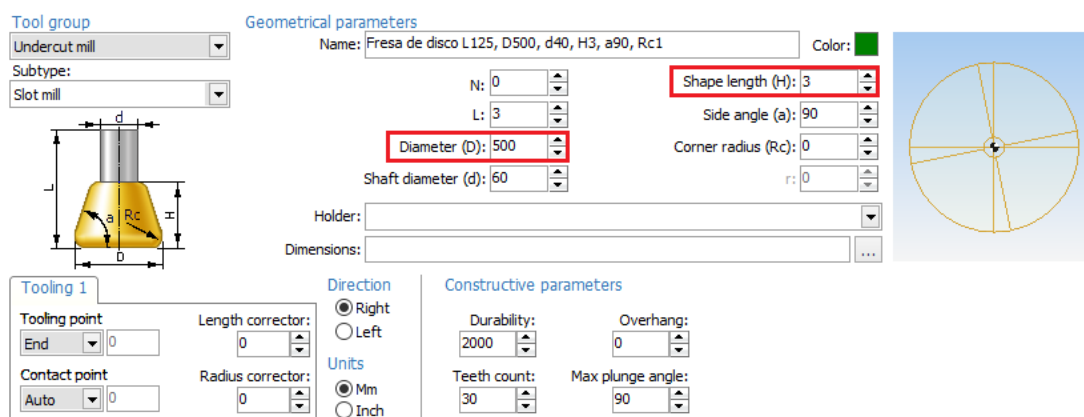


Figura 3.9: Parametrização da ferramenta, em particular, atribuição do diâmetro e espessura

A acoplação da ferramenta com o Spindle do *end-effector* é feita através de cone parametrizado. Neste ponto surge a possibilidade de criar um sistema de ligação simples via cone e ferramenta ou de utilizar uma solução mais completa que esteja disponível no mercado. Consultando o catálogo de produtos destinados ao corte de pedra e vidro da HSD, estudou-se um acoplamento com agregado para discos de Ø500mm. Esta solução apresenta, num sistema integrado, cone de ligação ISO 40, dispensador de fluído de corte e invólucro protector. As especificações técnicas podem ser consultadas com maior detalhe no Apêndice B.2, nomeadamente, as suas dimensões importantes, tal como, a saliência da ferramenta em relação ao ponto de encaixe. Esta é fundamental no que toca à parametrização da ferramenta pois servirá para actualizar o seu referencial. Consultando a ficha técnica do Apêndice B.2 obtemos um valor de 122.7mm para a saliência da ferramenta. O modelo 3-D do sistema foi disponibilizado pelo fabricante e posteriormente assemblado no *end-effector* virtual. Assim sendo, foi necessária uma actualização do mesmo através de um novo modelo atribuído ao ficheiro .xml. O resultado do *end-effector* com sistema de acoplamento com agregado para discos de Ø500mm da HSD pode ser observado na Figura 3.10 juntamente com a alternativa simplificada correspondente a um sistema de cone e ferramenta com a mesma saliência, na Figura 3.11.

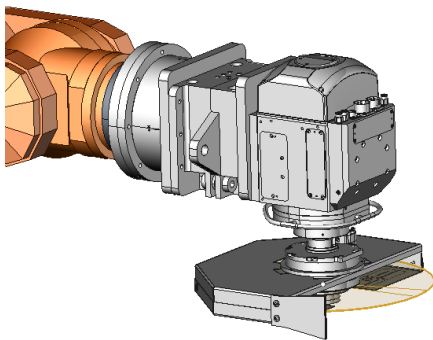


Figura 3.10: *End-effector* com sistema de acoplamento com agregado para discos de Ø500mm da HSD

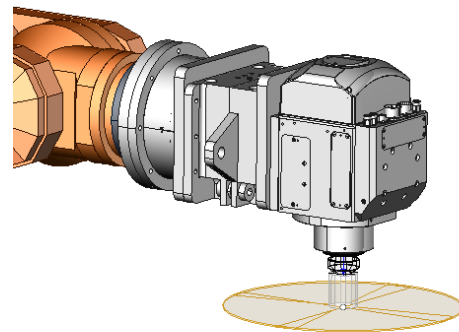


Figura 3.11: *End-effector* com sistema de acoplamento simples

Optou-se por utilizar o sistema de acoplamento da HSD, pois este distingue-se como a solução mais completa e direccionada para a função apesar dos custos acarretados. Seguiu-se então a actualização do referencial da ferramenta causado pela saliência do sistema acoplador. Foi então definido um segundo referencial da ferramenta com uma translação de 122.7mm segundo o eixo Z, relativamente ao referencial TOOL frame [1]. Este novo referencial localiza-se no centro da zona de acoplamento do disco coincidindo então com o centro da ferramenta, neste caso, com o centro do disco. Na Tabela 3.2 são apresentadas as coordenadas e a orientação deste novo referencial relativamente ao referencial da flange, TOOL [0], e ao referencial TOOL frame [1].

TOOL frame [2]			
Flange		TOOL frame [1]	
X	344.46	X	0
Y	-1.11	Y	0
Z	460.18	Z	122.7
Rz'	0	Rz'	0
Ry'	90	Ry'	0
Rx'	0	Rx'	0

Tabela 3.2: Coordenadas e orientação do referencial TOOL frame [2] relativamente à Flange e ao TOOL frame [1]

Após uma parametrização correta da operação e da ferramenta, segue-se a definição do ciclo de trabalho através da geração das trajetórias, neste caso, de corte. Esta tarefa é realizada no *icon job assignment* onde se seleccionam as curvas e direções das trajetórias. O processo não é automático pelo que quanto mais rasgos se pretender fazer mais superfícies terão de ser seleccionadas. As figuras seguintes demonstram dois exemplos de trabalho realizado onde é possível identificar, a verde, as trajetórias de corte assignadas a cada chapa, bem como a sua direção. Na Figura 3.12 está representada uma operação de corte em duas chapas com apenas uma trajetória assignada a cada resultando assim num único rasgo central. Na Figura 3.13 estão representadas duas chapas com inúmeras trajetórias assignadas resultando assim numa operação de múltiplos cortes.

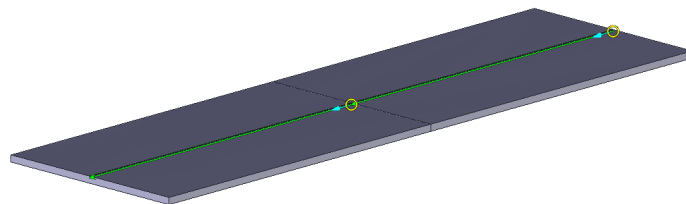


Figura 3.12: Operação de corte linear com uma única trajetória assignada a cada chapa

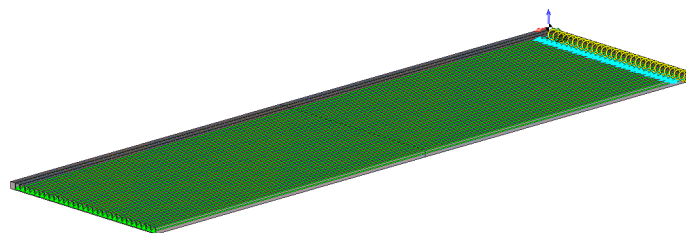


Figura 3.13: Operação de corte múltiplo com mais do que uma trajetória assignada a cada chapa

Das tarefas realizadas anteriormente resulta uma operação de corte inteiramente definida que pode ser simulada no *software* de CAD/CAM mediante do separador *Simulation*. Através de modelos de cinemática inversa e direta são estimadas posições dos eixos e juntas do robô e avaliados erros durante o processo. Dos erros possíveis de acontecer constam colisões, limites de alcance, limites angulares de junta, singularidades e contactos com a peça em velocidades incorrectas, em particular, movimentos rápidos ou de aproximação. Em caso de erro, surge um aviso em forma de ponto de exclamação para que possa ser resolvido.

De modo a corrigir os erros mencionados anteriormente, mas também com potencial de optimização de trajetórias, o SprutCam oferece uma funcionalidade que permite definir as alternativas de controlo dos graus de liberdade extra de um robô. Por intermédio da construção de um mapa expressivo das várias configurações que representam o mesmo percurso da ferramenta, em que o eixo X diz respeito à posição da ferramenta em relação ao seu ponto inicial e o eixo Y ao valor angular do eixo extra a otimizar, é possível identificar zonas indesejadas marcadas por limites de alcance, limites angulares de junta, singularidades e colisões. A Figura 3.14, representativa do trabalho realizado, ilustra a funcionalidade acima descrita onde foi necessário corrigir a configuração do robô de modo a evitar um erro de inalcançabilidade representado pela zona a vermelho. De notar também a existência de zonas de colisão, a laranja, e de limite angular de junta, a cor-de-rosa, que, ainda assim, não interferem com a configuração optimizada do robô ao longo percurso, assinalada pela linha verde.

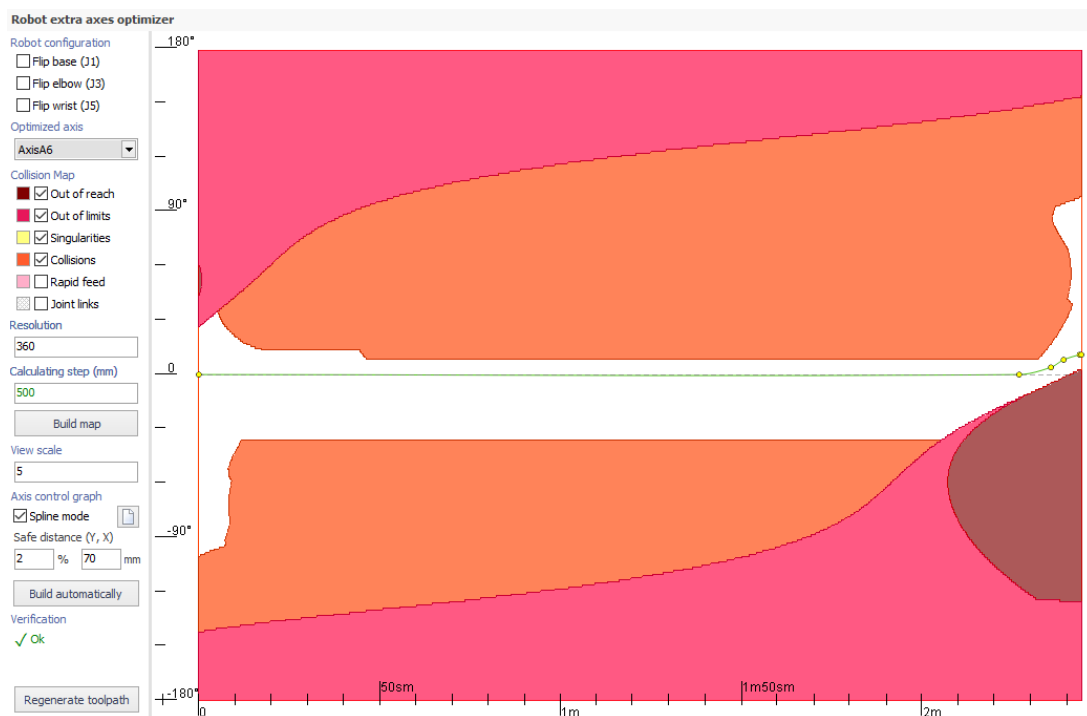


Figura 3.14: Mapa concebido numa operação de corte único em que foi necessário corrigir a orientação do eixo A6 para evitar erro de inalcançabilidade

Ainda assim, relativamente à trajetória da operação de corte por disco circular, esta foi idealizada de modo a que o *end-effector* mantenha uma orientação constante em relação à peça. Com isto pretende-



se melhorar a performance da ferramenta para que o corte se processe da forma mais homogênea possível. Para isso especificou-se no controlo do eixo seis uma direção fixa segundo o vetor +Z, o que impossibilitava a alteração da configuração durante o percurso, que acontece na Figura 3.14. Contudo, também não seria possível continuar o programa devido ao erro de alcance existente. Deste modo, para resolver a questão anterior, recorreu-se a uma otimização do layout da célula, nomeadamente, do tapete linear a fim de o situar na zona adequada à operação. Posto isto, foi possível manter uma orientação constante do *end-effector* ao longo das trajetórias de corte pretendidas com os parâmetros designados sem incorrer de qualquer tipo de erro. Tal como observado na Figura 3.15, que representa o mapa de uma operação onde são realizados múltiplos cortes, a orientação do eixo seis ao longo do percurso da ferramenta é constante e está representada pela linha cinza a tracejado. Nesta operação não existe qualquer zona de erro que interfira com a configuração do robô ao longo percurso, logo, a trajetória é considerada válida.



Figura 3.15: Mapa concebido numa operação de múltiplos cortes com orientação constante do *end-effector*

Após a obtenção de trajetórias válidas a sequência de operações é novamente simulada no separador *Simulation*. Desta maneira o programador dispõe de uma percepção gráfica da operação realizada em que é possível avaliar o resultado da remoção de material. Continuando com a operação anterior, de múltiplos cortes via disco circular representada na Figura 3.15, a simulação do material removido é ilustrada na Figura 3.16. Neste *frame* retirado da simulação a ferramenta encontra-se a maquinar o quinto rasgo. Uma escala relativa ao toleranciamento dimensional da operação permite avaliar a performance da simulação do corte.

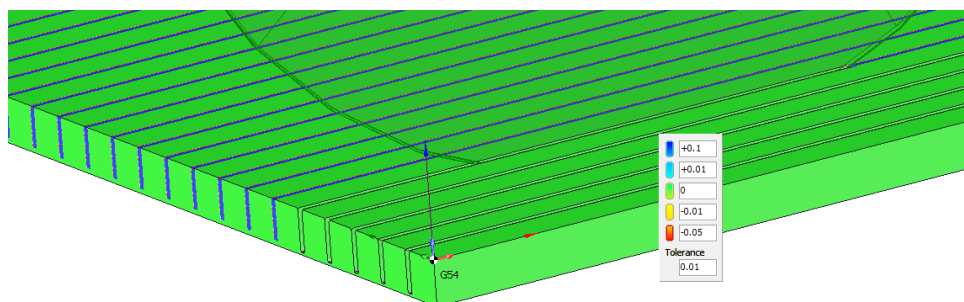


Figura 3.16: Resultado da simulação gráfica da operação de múltiplos cortes via disco circular

A possibilidade de otimização do programa está sempre presente ao longo das etapas abordadas anteriormente. Em particular, na otimização de trajetórias, sequências de corte, *layout* da célula e ferramentas. Cabe ao programador impor o limite de satisfação com o resultado obtido na simulação tendo em conta os recursos disponíveis e os objetivos pretendidos. Caso se atinja o desfecho pretendido sucede a fase de geração do código próprio do robô. Para tal, o SprutCam vem equipado com uma biblioteca de pós-processadores que fazem a ponte entre a sequência de operações realizada no software e o código texto a introduzir no controlador. Como parte dos pós-processadores disponíveis existem dois dirigidos a robôs KUKA. A diferença entre eles está na forma com que o código é apresentado sendo ambos válidos para o controlador. Ao executar a operação no pós-processador, o código é disponibilizado e guardado num ficheiro .txt concluindo assim a fase de programação via SprutCam.

### 3.3 Verificação e Validação

Para verificação do código gerado pelo pós processador do SprutCam testou-se a utilização do software KUKA.Sim Pro que permite simular e programar código KRL. No que à simulação diz respeito o software da KUKA difere do SprutCam pois é capaz de compilar e interpretar o código reproduzindo-o posteriormente tal como se do controlador do robô se tratasse. Por outro lado, o SprutCam (como mencionado anteriormente) apenas simula a sequência de operações definidas pelo programador sendo que o código é gerado a posteriori.

Para iniciar esta etapa foi necessário ter acesso às licenças de utilização do software disponíveis no laboratório de robótica no piso -1 do pavilhão de mecânica III do Instituto Superior Técnico. Posto isto, a célula robótica foi novamente reproduzida em ambiente virtual de forma semelhante à realidade e ao que tinha sido previamente feito em SprutCam. Uma vez que os componentes já se encontravam modelados em 3-D apenas foi necessário importá-los e posicioná-los correctamente no ambiente virtual. Quanto ao *end-effector* este foi configurado para ser acoplado de forma correta na flange, localizada na extremidade do eixo A6. Para tal, no *end-effector*, adicionado ao ambiente de trabalho do KUKA.Sim Pro, foi incorporado um referencial de acoplamento que lhe proporcionou a propriedade desejada.

De seguida, com o ambiente virtual representado de forma correta prosseguiu-se à definição dos referenciais da ferramenta e da base. Foram utilizados referenciais com as mesmas coordenadas e

orientações que os previamente estabelecidos no SprutCam. O primeiro referencial da ferramenta localiza-se no centro do cone de encaixe enquanto que o segundo referencial da ferramenta está localizado no centro do disco. Ambos contam com uma orientação proveniente de uma rotação de 90°, em torno de OY, do referencial da flange, situado na extremidade de A6. Já o referencial da base encontra-se localizado no canto superior da chapa com uma translação e rotação relativa ao referencial global. As figuras 3.17 e 3.18 são demonstrativas das coordenadas e orientações dos referenciais 1 e 2 da ferramenta, respetivamente, ao passo que a Figura 3.19 representa as coordenadas e orientações do referencial base.

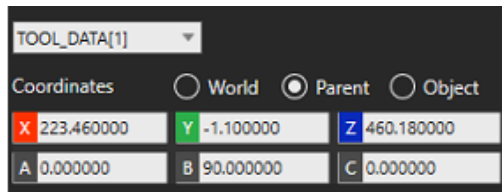


Figura 3.17: Referencial da ferramenta 1

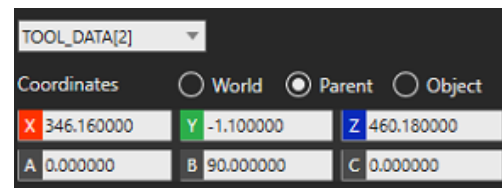


Figura 3.18: Referencial da ferramenta 2

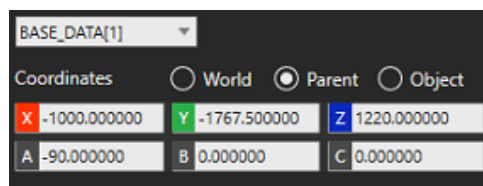


Figura 3.19: Referencial base da peça

Posto isto, passou-se à fase de importação do código KRL gerado pelo SprutCam para o mapa de trabalho do KUKA.Sim Pro. Este software dispõe de uma funcionalidade que permite a introdução de código KRL proveniente de ficheiros .txt externos. No entanto, esta foi ineficaz no que toca ao código gerado pelo SprutCam pois era incapaz de o interpretar correctamente. Assim procedeu-se à reprodução manual do ciclo de trabalho programados em SprutCam no KUKA.Sim Pro. Isto implica a transposição dos valores exactos das coordenadas de junta ou das coordenadas cartesianas, dependendo do modo de representação. No excerto do código a ser reproduzido no ambiente KUKA, apresentado abaixo, é possível observar um movimento rápido descrito em coordenadas de junta, nas linhas 2 e 3, seguido de um movimento de aproximação em coordenadas cartesianas, nas linhas 5 e 6.

---

```

1 $VEL.CP=0.167 % Movimento rapido em coordenadas de junta
2 PTP {A1 104.273, A2 -87.552, A3 73.861, A4 0.000, A5 103.691, A6 194.273}
3 PTP {A1 86.706, A2 -92.443, A3 95.615, A4 0.000, A5 86.828, A6 176.706}
4 $VEL.CP=0.003 % Movimento de aproximacao em coordenadas cartesianas
5 LIN {X 301.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
6 LIN {X 301.5, Y 1100, Z 244, A 180, B -90, C 0} C_DIS

```

---

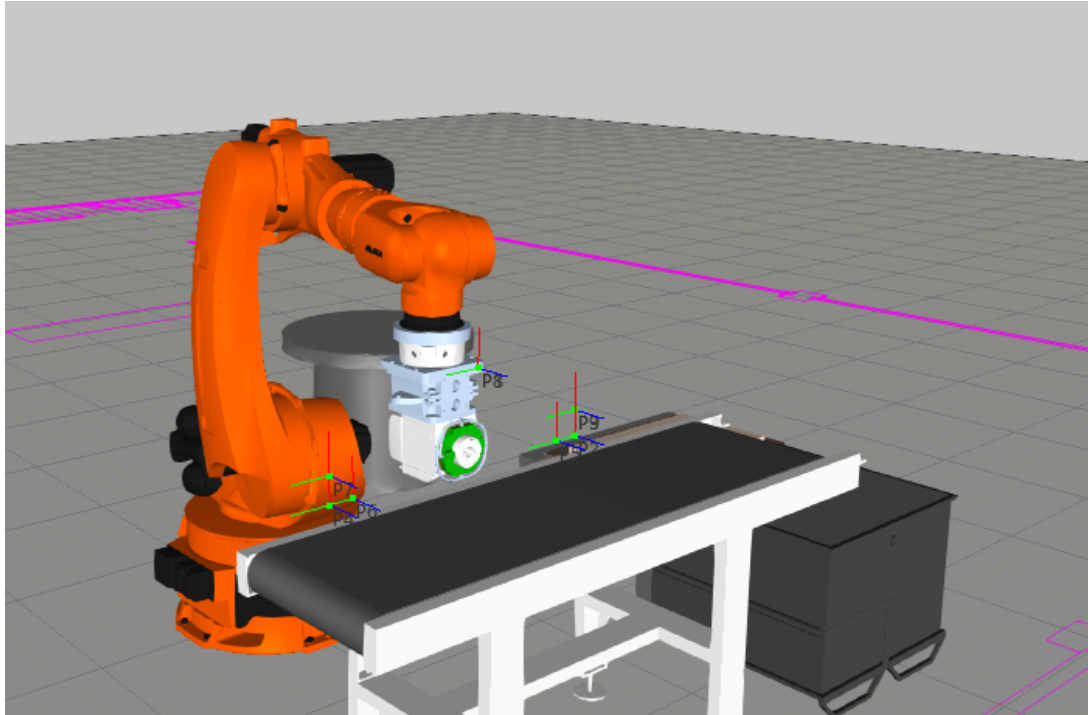


Figura 3.20: Representação da sequência de operações gerada em SprutCam no software de simulação KUKA.Sim Pro

Para verificar se a cinemática do modelo do robô disponibilizado no KUKA.Sim Pro corresponde à cinemática do modelo do SprutCam programou-se um movimento para um ponto previamente conhecido. Em primeiro lugar utilizou-se coordenadas de junta do robô e de seguida coordenadas cartesianas correspondentes ao mesmo ponto segundo a cinemática do SprutCam. Em caso de coincidência a nível de *target* é admissível equiparar ambas as estruturas cinemáticas. No entanto, isto não sucedeu, pelo que o mesmo ponto representado pelas coordenadas de junta da Tabela 3.3 é representado com coordenadas cartesianas diferentes no SprutCam e no KUKA.Sim Pro, na Tabela 3.4.

Consequentemente, esta forma, previamente pensada, de validar o código gerado pelo pós-processador do SprutCam através do KUKA.Sim Pro caracteriza-se como pouco precisa. Isto porque irão ocorrer erros na configuração do robô e erros de posição em certos *targets* alcançados através de coordenadas de junta, porém, a sequência de operações e os referenciais utilizados são equiparáveis. Decidiu-se então utilizar o código gerado pelo pós-processador de SprutCam.

Coordenadas de junta	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	86.705	-92.443	95.615	0.000	86.828	176.705

Tabela 3.3: Comparação entre os modelos cinemáticos: coordenadas de junta

Coordenadas cartesianas	X	Y	Z	A	B	C
SprutCam	301.5	1100	350	-180	-90	0
KUKA.Sim Pro	290.4	1100	248.2	-180	-90	0
Erro (%)	3.7	0	29.1	0	0	0

Tabela 3.4: Comparação entre os modelos cinemáticos: coordenadas cartesianas

### 3.4 Aplicação na Célula Robótica Real

A aplicação do código gerado via software externo na célula robótica real vem concluir o fluxo de trabalho estabelecido para o capítulo da Implementação. No âmbito da dissertação, esta etapa serve, sobretudo, para avaliar se a sequência de operações programada é realizada de forma correta possibilitando assim cumprir com as geometrias e os acabamentos pretendidos em contexto industrial. Os testes práticos foram realizados na célula robótica presente nas instalações da FrontWave - Engenharia e Consultoria S.A., em Pêro Pinheiro, Sintra. A Figura 3.21 é representativa da instalação aí presente onde se verifica a presença do robô KUKA KR 360 L280-2, do seu *end-effector*, do controlador KR C2, de um tapete linear e da matéria prima em forma de chapa.

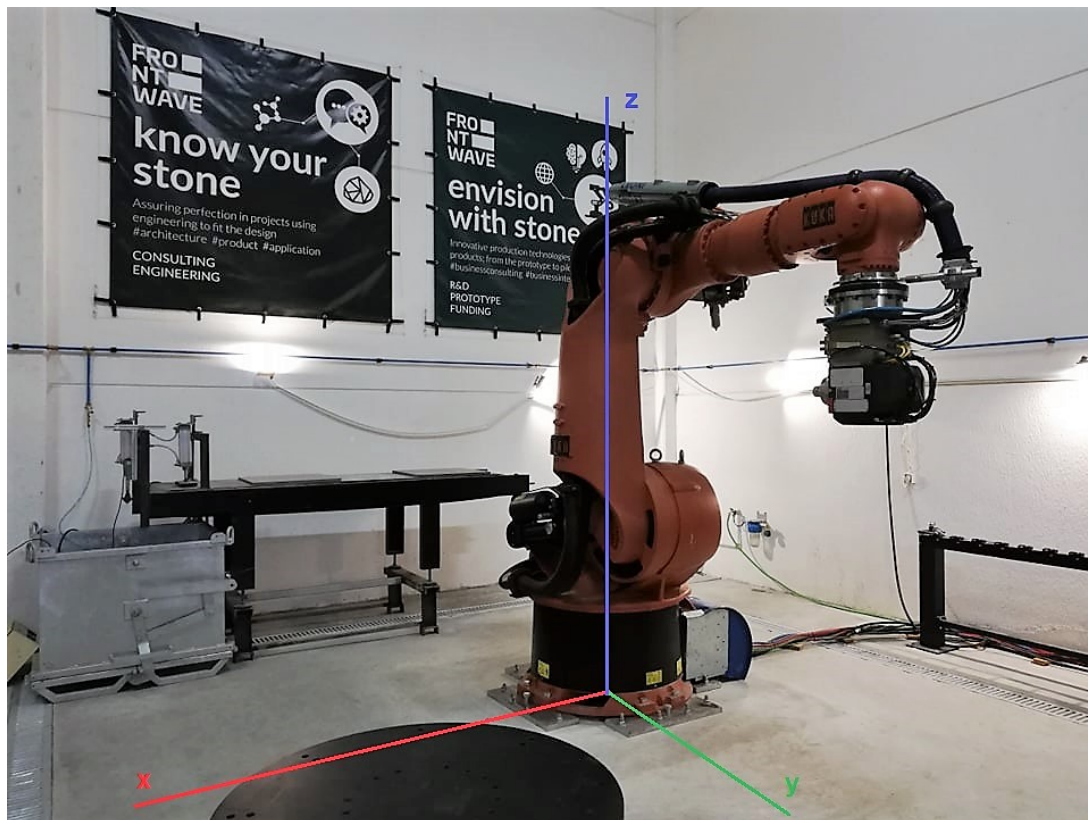


Figura 3.21: Representação da instalação real da célula robótica

A transposição do programa do ambiente virtual para o ambiente real não foi imediata, sendo que foram necessários certos cuidados para que ocorresse de forma correta. Em primeiro lugar, através de movimentos de *jog* via consola de comandos foi possível situar o referencial Global do robô no ambiente real. Representado na Figura 3.21, o seu enquadramento real é importante pois serve de base para os restantes referenciais a utilizar, nomeadamente, do robô e da Base. Posto isto, foi realizada a configuração dos referenciais da ferramenta e da Base no ambiente real. Apesar de já estarem definidos no SprutCam, foram actualizados de forma a evitar possíveis dessemelhanças entre o modelo real e o modelo virtual.

O referencial da ferramenta foi construído utilizando o método dos 4 pontos e o ABC world para definir origem e orientação respetivamente. Por sua vez, o referencial da BASE foi ensinado através do método dos 3 pontos. Ambos os métodos contam com um procedimento exemplificado no manual de operação da KUKA [21] e são executados através de funções disponíveis na consola de comandos.

Após a realização destes cuidados essenciais foi possível executar o código no controlador do robô que correu da forma esperada sem erros, colisões, singularidades ou outro tipo de situação inesperada. Devido ao estado da instalação, houve restrições no que toca à possibilidade de maquinar pedra natural, pelo que apenas foi possível executar os movimentos sem realização de qualquer processo de corte.

## Capítulo 4

# Resultados

Depois do capítulo que retrata a Implementação está o capítulo dos Resultados. Neste é apresentado a resultante do procedimento desenvolvido e executado anteriormente. O capítulo inicia-se com uma descrição base do problema, no sub-capítulo **Descrição do Problema**, seguida da sua solução e dos resultados obtidos, no sub-capítulo **Solução e Resultados**. Para finalizar, os resultados são discutidos de forma a que se possam traçar conclusões acerca dos mesmos. Este capítulo é a repercussão final do trabalho realizado, tendo sido testadas diferentes abordagens que originaram várias soluções, no entanto serão apresentadas apenas aquelas consideradas óptimas.

### 4.1 Descrição do Problema

A dissertação de mestrado parte da pergunta de investigação introduzida no sub-capítulo 1.4 que questiona a possibilidade de aplicar a tecnologia de braço robótico para processos de maquinagem, nomeadamente corte por disco circular, no setor industrial da Pedra Natural Portuguesa, acrescentando mais valia. A esta questão foram associadas muitas outras que dariam matéria para diversas dissertações. No entanto, relativamente à dissertação em questão, esta incidiu na programação e performance do código produzido para a realização de tarefas de corte por disco circular em chapas de pedra natural.

Para melhor compreensão do problema, ao longo da dissertação foram aprofundados assuntos relativos ao estado da arte do hardware e software da tecnologia da robótica industrial. Foram também identificados os requisitos e encargos do projeto, sendo um deles o tipo de robô a utilizar. Este correspondia a um modelo da marca KUKA que impôs assim uma familiarização com a linguagem de programação compatível com o mesmo.

Como finalidade do projeto de dissertação procurava-se obter contribuições a nível do dimensionamento da célula robótica, de simulação *offline* com trajetórias optimizadas do processo de corte por disco circular, no layout projectado, resultando assim, num ficheiro de texto, correspondente ao ciclo de trabalho simulado anteriormente, com código compatível com o controlador do robô para ser executado de forma automática.

## 4.2 Solução e Resultados

As contribuições são apresentadas individualmente nas sub-seções seguintes:

### Dimensionamento do Layout da Célula Robótica

O resultado do dimensionamento do layout da Célula Robótica pode ser consultado através da planta presente no Apêndice A.4, com a respetiva lista de peças associada. Uma figura ilustrativa do perfil frontal da célula é apresentada de seguida na Figura 4.1. Nesta é possível observar os demais constituintes da célula robótica bem como a linha delimitadora do volume de trabalho do robô. Verifica-se que o tapete linear, a ferramentaria e a pallet de input de material se encontram dentro do volume de trabalho, como seria de esperar.

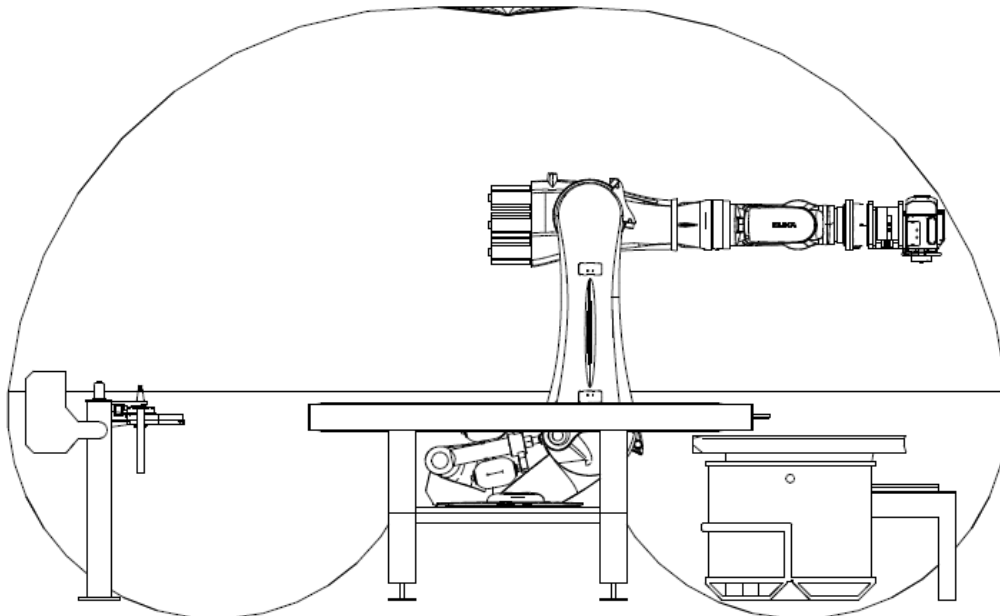


Figura 4.1: Perfil frontal da célula robótica e respetivo volume de trabalho do robô

### Simulação *offline* do processo de corte por disco circular

A programação *offline* via ambiente gráfico através de um *software* CAD/CAM foi considerada a melhor forma de abordar a programação do ciclo de tarefas devido às inúmeras vantagens que proporciona. Entre elas a possibilidade de visualizar a nível de simulação os resultados obtidos e as demais funcionalidades direcionadas à programação de tarefas de maquinaria.

Foram realizados dois casos de estudo que visavam obter diferentes tipos de corte numa chapa plana de pedra natural. O primeiro tinha como objetivo um único rasgo central enquanto que o segundo, que resulta de uma optimização do primeiro, objectivava múltiplos cortes no mesmo tipo de chapa plana. Nas figuras que se seguem é possível observar os resultados a nível das trajectórias programadas para o *Tool Center Point* e a resultante do processo de maquinaria virtual para os dois casos de estudo.



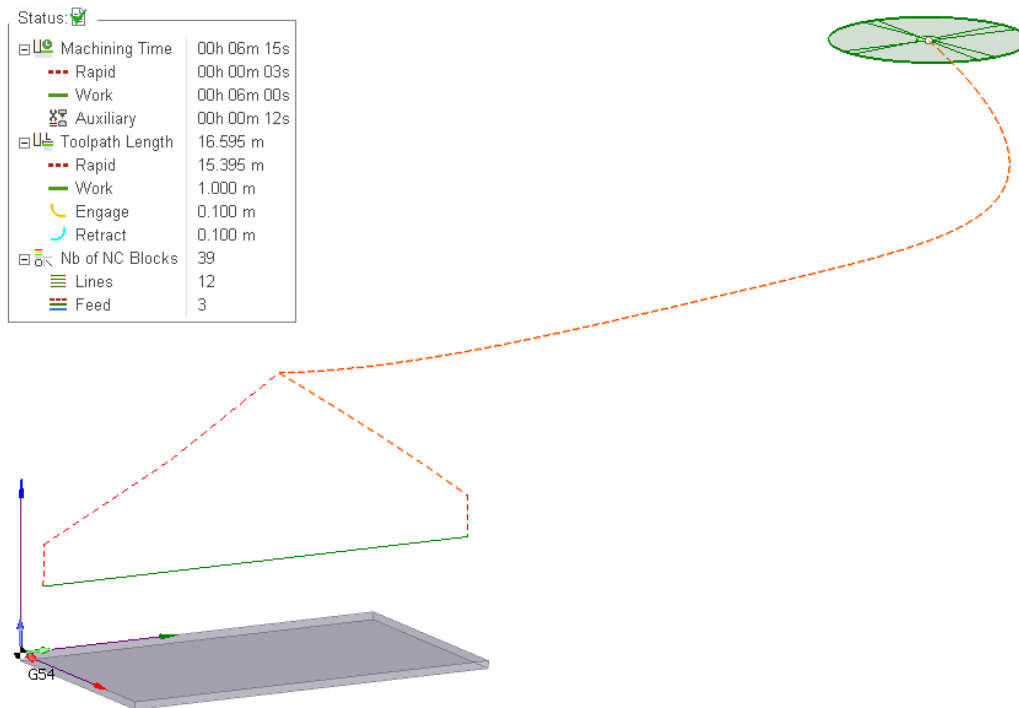


Figura 4.2: Trajectória programada para o *Tool Center Point* no processo de corte singular

A Figura 4.2 representa a trajetória descrita pelo *Tool Center Point*, situado no centro do disco que é representado a verde, em relação ao referencial situado no canto superior da chapa que, por sua vez, é representada a cinza claro, para o processo de corte singular. Nesta simples trajetória é possível identificar dois tipos de movimento: movimento rápido, representado a tracejado vermelho, e movimento de avanço, representado a traço verde. O movimento de avanço consiste numa trajetória bem definida representada por um movimento contínuo linear à velocidade de avanço. Por outro lado, o movimento de aproximação é composto por movimentos ponto a ponto que representam o caminho mais simples de ir de A para B, conforme a cinemática do robô. Na janela *Status* presente no canto superior esquerdo da imagem é possível constatar informação relativa ao processo. Nomeadamente, informação acerca de tempos e distâncias de maquinagem. O tempo total associado ao processo foi de 6 minutos e 15 segundos, estando grande parte deste alocado ao movimento de avanço - 96 %. Por outro lado, relativamente à distância de maquinagem, esta é sobretudo percorrida em movimento rápido - 93 %. De notar o facto de existirem também movimentos de *lead in* e *lead out* tangentes que correspondem a 10 % da distância de corte - 0.1 metros cada. Tal como justificado anteriormente, este tipo de movimentos são fundamentais para evitar erros de contacto com a peça em movimentos rápidos. O processo de corte, representado pela trajetória acima, foi simulado no *software* CAD/CAM e a sua resultante pode ser observada na Figura 4.3. Nesta figura é possível avaliar a performance do corte a nível da remoção de material. A escala de cores reflete o excesso ou escassez de material removido no processo. O corte A-A representa a vista de perfil do rasgo efectuado pela ferramenta. Pela imagem ampliada é possível identificar uma área de maior imperfeição, na zona inferior do rasgo, com excesso de remoção de material na ordem dos 50  $\mu\text{m}$ . Valor com uma ordem de grandeza bastante inferior ao

toleranciamento exigido e que pode ser justificado pela repetibilidade de  $\pm 80 \mu\text{m}$  do braço robótico e pelo efeito da geometria da ferramenta no processo de corte. Assim os resultados da performance do corte consideram-se bastante satisfatórios para o toleranciamento geral grosso exigido no desenho técnico.

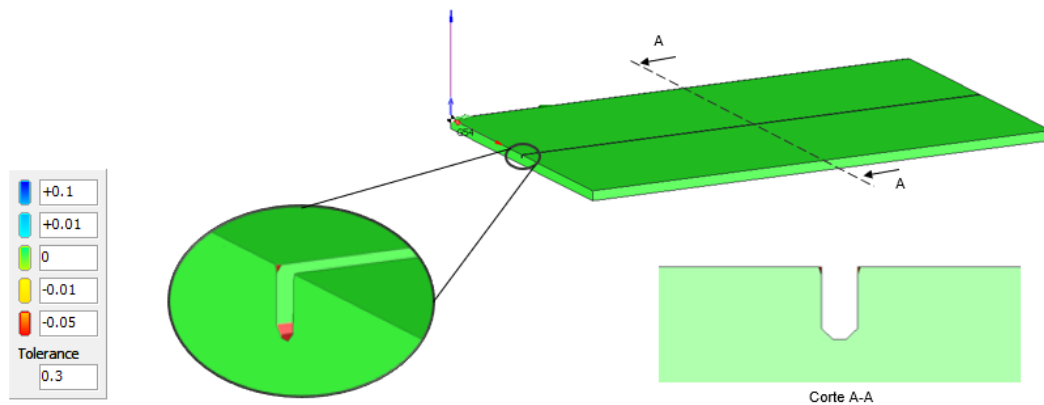


Figura 4.3: Resultado do processo de corte singular de uma chapa plana

De forma semelhante, foram levantados resultados para o segundo caso de estudo, nesta circunstância, corte múltiplo em chapa plana. Este caso de estudo resulta de uma otimização do primeiro caso de estudo sendo útil para uma futura componente de avaliação da performance do equipamento em operação. Neste ciclo de tarefas são realizados 29 rasgos ao longo do comprimento da chapa, o que significa um acréscimo de 28 rasgos em relação ao caso anterior.

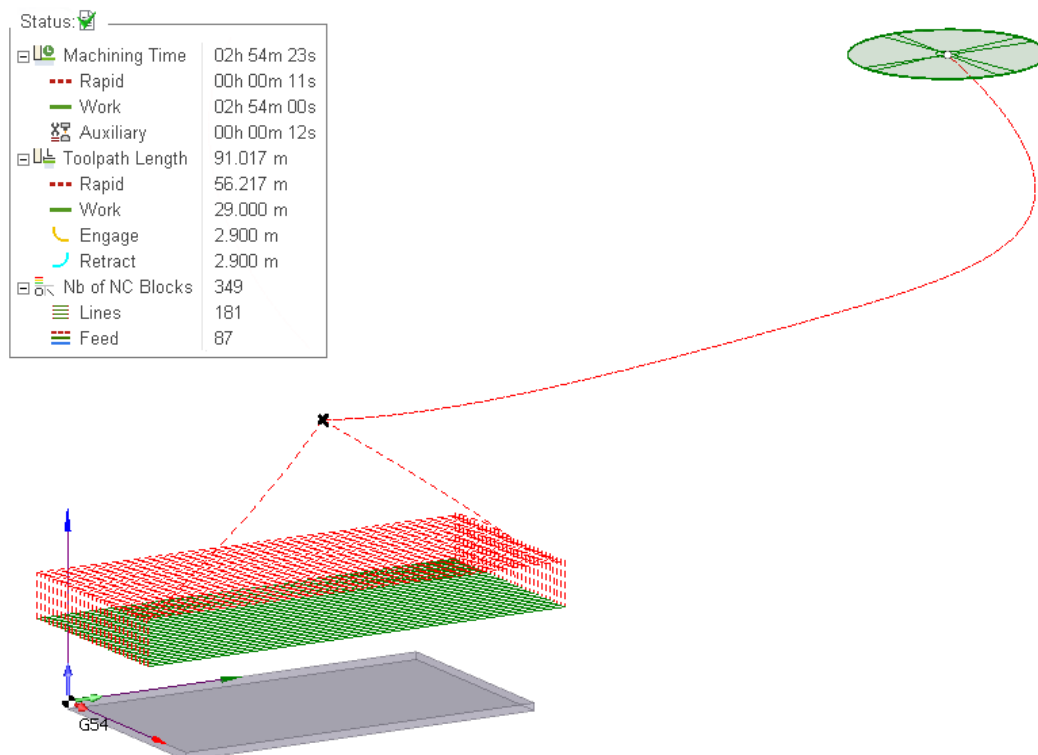


Figura 4.4: Trajectória programada para o *Tool Center Point* no processo de corte singular

A Figura 4.4 representa as trajetórias descritas pelo *Tool Center Point* para o caso do corte múltiplo junto da respetiva informação de tempos e distâncias de maquinagem. De forma similar ao anterior é possível distinguir graficamente os movimentos rápidos dos movimentos de avanço. O movimento inicial é análogo ao anterior. Em ambos os casos foi definido um ponto de aproximação e retorno correspondendo às coordenadas de junta {A1 104.273, A2 -87.552, A3 73.861, A4 0.000, A5 103.691, A6 194.273}. A diferença entre os dois casos de estudo assenta essencialmente no número de movimentos executados, sendo que este último consiste numa tarefa mais complexa que naturalmente reflete num tempo e distância de maquinagem de ordem superior. Através da janela *Status* é possível constatar um tempo de maquinagem de 2 horas, 54 minutos e 23 segundos, aproximadamente 28 vezes superior, abrangido, de forma similar, pelo movimento de avanço. A distância de corte aumentou 29 vezes, como seria de esperar pelo aumento do número de cortes, tal como os movimentos de *lead in* e *lead out*, que representam cada um 10% desta. Por fim, tal como no caso anterior, é possível avaliar a performance do processo de corte a nível da remoção de material através da escala de cores da Figura 4.5.

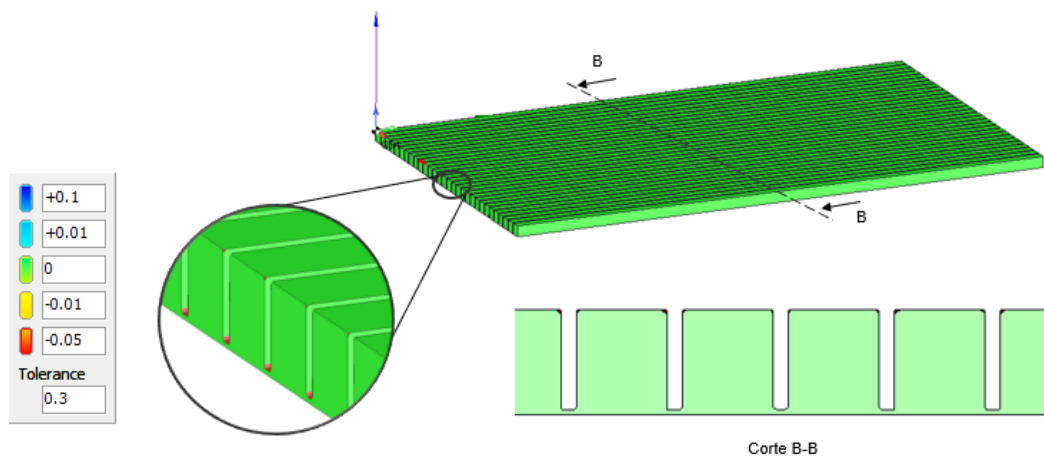


Figura 4.5: Resultado do processo de corte múltiplo de uma chapa plana

À semelhança do caso anterior a performance do corte é bastante positiva sendo que o maior incumprimento dimensional volta a ser na zona inferior do rasgo na ordem dos 50  $\mu\text{m}$  justificado pela repetibilidade do equipamento e pelo efeito da geometria da ferramenta. O corte B-B representa a vista de perfil dos rasgos efectuados pela ferramenta. De forma semelhante à anterior a positividade dos resultados justifica-se pelo tipo de toleranciamento geral exigido no desenho técnico.

### Código texto representativo das ordens de trabalho

Para constituição do código texto representativo das ordens de trabalho simuladas na sub-secção anterior é utilizado o pós-processador do SprutCam. Para ambos os casos o código KRL obtido é apresentado, juntamente com comentários, no anexo A.5 e A.6. Verifica-se que a estrutura do programa segue a norma, iniciada pela zona de declaração de variáveis, seguida da zona de inicialização e finalizada pela zona de instruções. A atribuição dos referenciais é realizada na zona de inicialização.



## Capítulo 5

# Conclusão

A necessidade de investigação do projeto de dissertação surge no âmbito de contribuir com conhecimento acrescentado ao setor da Pedra Natural. Mais especificamente discutindo o modo de programação de robôs industriais para realização de tarefas de maquinagem, tentando assim responder à questão de investigação acerca da valia deste equipamento no setor em questão. Ao longo da dissertação foi estudado e implementado um método de programação que permitiu adquirir conhecimentos necessários para traçar conclusões elucidativas sobre a melhor forma de abordar o problema. Assim, neste capítulo final, são apresentadas as conclusões alcançadas ao longo do trabalho, no sub-capítulo **Conclusões** e as perspectivas de continuação do projeto no sub-capítulo **Trabalho Futuro**.

### 5.1 Conclusões

Na dissertação, o problema da programação de robôs industriais para tarefas de maquinagem foi abordado através de programação *offline* via ambiente gráfico utilizando um *software* CAD/CAM. Desta forma foi possível projectar um layout adequado para a função e obter resultados positivos para os critérios dimensionais e geométricos estabelecidos. Com o método implementado foi possível confirmar as mais valias da programação *offline*, sobretudo a nível de optimização do layout, simulação, correcção de erros e situações imprevistas sem necessitar de utilizar fisicamente o robô. De destacar também as funcionalidades próprias do *software* CAD/CAM que o adequam à programação de operações de maquinagem. Entre estas funcionalidades estão os campos que simplificam o procedimento de definição e alteração de parâmetros operativos, tais como, velocidades de rotação, velocidades de avanço e estratégias de maquinagem.

Analisando os resultados dos tempos de maquinagem foi possível concluir que estes são maioritariamente influenciados pela velocidade de avanço. Através da utilização do KUKA.Sim Pro não foi possível simular o código proveniente do *software* CAD/CAM. No entanto, o código gerado pelo pós-processador do SprutCam revelou-se compatível com o controlador do robô. Deste modo, foi possível concluir que a programação via SprutCam é uma alternativa válida para reproduzir tarefas de maquinagem em robôs industriais. Sem esquecer, no entanto, a importância da compatibilidade entre ambiente real e ambiente

virtual, sobretudo, no que toca à estrutura cinemática do robô e *end-effector*, que, caso não aconteça, origina erros de posição, orientação e configuração do robô.

Contudo, a principal desvantagem verificada no método implementado, que o torna inadequado para produções em massa customizadas, consiste na sua inflexibilidade no que toca a alterações nas trajetórias de corte e no posicionamento da matéria prima. Isto devido à sequência característica da programação em CAD/CAM, que é realizada em função do modelo CAD da peça a produzir, e da necessidade de redefinir manualmente o referencial base de programação (BASE) e/ou o referencial da ferramenta (TOOL). Desta forma, foi possível concluir que para uma produção em massa variada o método de programação perde eficácia, pois requer um *know-how* para realização da programação em SprutCam e uma reconfiguração dos referenciais BASE e/ou TOOL.

Em tese final, com o trabalho realizado foi possível identificar e implementar uma abordagem viável à programação de robôs industriais para tarefas de corte por disco circular em chapas de pedra natural. Com isto, contribuiu-se para o objetivo final de modo a tornar o robô uma solução adequada para complementar as mais valias do trabalho manual com a capacidade das máquinas industriais no setor industrial da Pedra Natural.

Ainda assim, podem ser realizados certos aperfeiçoamentos de forma a tornar o processo implementado mais flexível e completo.

## 5.2 Trabalho Futuro

Em conformidade com o objetivo futuro de avaliação da viabilidade do robô industrial para tarefas maquinagem no setor da Pedra Natural propõe-se, como seguimento do projeto de dissertação, uma aplicação completa das operações idealizadas nos casos de estudo. Desta forma será possível qualificar a performance do equipamento em operação, a nível de forças e vibrações, e quantificar os resultados obtidos no processo de maquinagem, a nível de acabamentos, tolerâncias, desgaste de ferramenta e tempos de maquinagem.

Para colmatar as desvantagens do método de programação implementado sugere-se o desenvolvimento de uma interface de manipulação/geração de código conforme dados introduzidos pelo utilizador. Neste tipo de solução a programação seria gerada automaticamente segundo valores introduzidos para os demais parâmetros do processo, tais como, dimensões da matéria prima, localização da matéria prima, número de cortes a realizar, profundidade dos cortes a realizar, parâmetros operativos relevantes, entre outros. Desta forma seria possível flexibilizar alterações a nível de trajetórias, de uma forma simples, sem recorrer à programação CAD/CAM, de modo a admitir produções customizadas. Para complementar o conceito sugerido anteriormente, propõe-se um reconhecimento do posicionamento da matéria prima e conseqüente referencial BASE através de visão computacional.

Por fim, para dotar a célula robótica do modo operativo da indústria 4.0 sugere-se a sensorização do sistema, para recolha de dados do processo, tais como, eficácia do corte, desgaste de ferramenta, tempos de ciclo e potência consumida. Com uma posterior utilização dos mesmos para melhoria do processo. A nível do desgaste da ferramenta informação relativa a zonas com maior desgaste de grãos

de diamante e em relação ao seu tempo de vida podem ser utilizadas para otimizar os perfis de força, os parâmetros operativos e a própria construção e composição da ferramenta. Relativamente ao tempo de ciclo e à potência consumida esta informação deve ser utilizada para tornar o processo mais rápido e eficiente.





# Bibliografia

- [1] FrontWave. Inovstone - novas tecnologias para a competitividade da pedra natural. Brochura.
- [2] J. S. Gomes, editor. *CERTIFICAÇÃO DE PRODUTOS EM PEDRA NATURAL - A MARCA STONEPT*, 8º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia / V Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo, Setembro 2017. INEGI/FEUP.
- [3] A. da Silva. Inovstone 4.0 – tecnologias avançadas e software para a pedra natural. Brochura, 2014.
- [4] F. R. Tebchirani. *Princípios de economia micro e macro*. Ibplex, 2012.
- [5] P. G. M. W. J. J. P. E. Michael Rubmann, Markus Lorenz and M. Harnisch. Industry 4.0. Technical report, The Boston Consulting Group, April 2015.
- [6] P. Consultores. Diagnóstico competitivo sobre o setor da extração e transformação da pedra natural. Technical report, Associação Nacional da Indústria Extrativa e Transformadora, 2016.
- [7] E. S. R. R. Sectorial. Produção de rochas ornamentais - análise setorial. Technical report, Banco Espírito Santo, Fevereiro 2014.
- [8] R. N. N. e. N. G. O. Mikell P. Groover, Mitchell Weiss. . *Industrial robotics: Technology, programming and applications*. McGraw-Hill, 1986.
- [9] I. . Robotics. *ISO 8373:2012 Robots and robotic devices – Vocabulary*. International Organization for Standardization, 2 edition, Março 2012.
- [10] P. Mickle. A peep into the automated future. *The Trentonian*, 1961.
- [11] A. Weber. Gm centennial: Manufacturing innovation, 2008.
- [12] D. C. M. Richard Michael Cyert. *The Impact of Technological Change on Employment and Economic Growth*. National Academies, 1988.
- [13] M. Davids. A glimpse into the future of industrial robotics. Blog, julho 2018.
- [14] S. O. da Costa. Rebarbagem em célula robô através de programação offline em cam. Master's thesis, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 2016.

- [15] I. F. Baptista. Percursos de maquinagem realizados com robôs. Master's thesis, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Junho 2016.
- [16] *Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots*. International Federation of Robotics, 2018.
- [17] P. M. F. Almeida. Programação de robôs para realização de tarefas de maquinação. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Setembro 2016.
- [18] G. O. Bruno Siciliano, Lorenzo Sciavicco Luigi Villani. *Robotics - Modelling, Planning and Control*. Springer, 2009.
- [19] G. Biggs and B. MacDonald. A survey of robot programming systems. Technical report, Department of Electrical & Electronic Engineering, University of Auckland, 2004.
- [20] F. E. M. da Silva Moura. Aplicação para programação automática de robôs de paletização. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Outubro 2017.
- [21] *KUKA System Software 8.3 - Operating and Programming Instructions for End Users*. KUKA Roboter GmbH, Zugspitzstraße 140, D-86165 Augsburg, Germany, kss 8.3 end v1 en edition, Janeiro 2013.
- [22] J. M. F. Carvalho. Rochas ornamentais, pedras naturais ou pedras dimensionais. *Boletim de Minas*, 42(2):157–160, 2007.
- [23] A. M. Moreira. Pedras naturais. Technical report, Instituto Politécnico de Tomar, 2009.
- [24] I. P. S. Carosio, editor. *Machines and Tools for Stone Quarrying and Processing*, volume 1. Laboratory of Metallurgy, 2003.
- [25] R. M. Mohammad Ataei, Sadjad Mohammadi. Evaluating performance of cutting machines during sawing dimension stones. *Journal of Central South University*, 26(7):1934–1945, July 2019.
- [26] P. S. G. C. John Pandremenos, Christos Doukas, editor. *Machining with robots: A critical review*, 7th International Conference on Digital Enterprise Technology, Athens, Greece, September 2011.
- [27] . T. J. W. Vergeest, J. S. Robot machines rapid prototype. *Industrial Robot*, pages 17–20, 1996).
- [28] O. V. Hoai Nam Huynh, Edouard Rivière-Lorphèvre. Asme 2017 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference. In *Report of Robotic Machining Measurements Using a Stäubli TX200 Robot: Application to Milling*, 2017.
- [29] KUKA. Technical data.

# **Apêndice A**

- A.1 Ficheiro .xml utilizado no SprutCam para representação do robô KR360 L280-2 e seu *end-effector***
- A.2 Desenho técnico, caso de estudo n.º 1, chapa único rasgo central**
- A.3 Desenho técnico, caso de estudo n.º 2, chapa corte múltiplo**
- A.4 Planta da célula robótica projectada e respetiva lista de peças**
- A.5 Código KRL corte simples**
- A.6 Código KRL corte múltiplo**

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<SCCollection ID="">
  - <SCNameSpace ID="MachineRegistrar">
    - <SCType ID="RegKUKA_KR360_2_saw" Enabled="True" Type="TRegisterMachineRecord">
      <TypeName DefaultValue="RegKUKA_KR360_2_saw"/>
    </SCType>
  </SCNameSpace>
  - <SCType ID="RegKUKA_KR360_robotex" Enabled="True" Type="KukaRobotTemplate" Caption="KUKA
  KR360_2_saw">
    <GUID DefaultValue="{b567b518-4c8f-4d6a-a8b0-0c4774b04c05}"/>
    <Name DefaultValue="KUKA KR360_2_saw"/>
    <Image DefaultValue="KUKA KR360_2_saw.jpg"/>
    - <MachineDimensions>
      <SpindleModelRotationAngleX DefaultValue="0"/>
      <SpindleModelRotationAngleY DefaultValue="0"/>
      <SpindleModelRotationAngleZ DefaultValue="-90"/>
    - <ToolData>
      <ToolLength DefaultValue="0"/>
      <X DefaultValue="344.46"/>
      <Y DefaultValue="-1.11"/>
      <Z DefaultValue="460.18"/>
      <A DefaultValue="0"/>
      <B DefaultValue="90"/>
      <C DefaultValue="0"/>
    </ToolData>
    - <RobotSize>
      <A12X DefaultValue="500"/>
      <A12Z DefaultValue="1045"/>
      <A23Z DefaultValue="1300"/>
      <A34Z DefaultValue="55"/>
      <A35X DefaultValue="1275"/>
      <A14Y DefaultValue="0.00"/>
      <A56X DefaultValue="290"/>
    </RobotSize>
    - <SCType ID="BaseData" Type="ComplexType" Caption="Base">
      <SCType ID="X" Type="Double" DefaultValue="1800"/>
      <SCType ID="Y" Type="Double" DefaultValue="280"/>
      <SCType ID="Z" Type="Double" DefaultValue="870"/>
      <SCType ID="A" Type="Double" DefaultValue="-90"/>
      <SCType ID="B" Type="Double" DefaultValue="0"/>
      <SCType ID="C" Type="Double" DefaultValue="0"/>
      <SCType ID="TableToCrossPoint" Type="Double" DefaultValue="347" Caption="TableToCrossPoint"/>
    </SCType>
    <MachineDimensions>
  - <ControlData>
    - <ToolFrameOutput>
      <Format DefaultValue="EulerZYX"/>
      - <AdditionalTransform>
        <A DefaultValue="180"/>
        <B DefaultValue="0"/>
        <C DefaultValue="-90"/>
      </AdditionalTransform>
    </ToolFrameOutput>
  </ControlData>
  - <MachineStateParameters>
    - <AxisA1Pos>
      <Min DefaultValue="-185"/>
      <Max DefaultValue="185"/>
      <InitialValue DefaultValue="0"/>
    </AxisA1Pos>
    - <AxisA2Pos>
      <Min DefaultValue="-130"/>
      <Max DefaultValue="20"/>
      <InitialValue DefaultValue="-90"/>
    </AxisA2Pos>
    - <AxisA3Pos>
      <Min DefaultValue="-94"/>
      <Max DefaultValue="150"/>
      <InitialValue DefaultValue="90"/>
    </AxisA3Pos>
  </MachineStateParameters>
</SCType>
</SCCollection ID="">

```

```

- <AxisA4Pos>
  <Min DefaultValue="-350"/>
  <Max DefaultValue="350"/>
  <InitialValue DefaultValue="0"/>
</AxisA4Pos>
- <AxisA5Pos>
  <Min DefaultValue="-118"/>
  <Max DefaultValue="118"/>
  <InitialValue DefaultValue="0"/>
</AxisA5Pos>
- <AxisA6Pos>
  <Min DefaultValue="-350"/>
  <Max DefaultValue="350"/>
  <InitialValue DefaultValue="0"/>
</AxisA6Pos>
- <ExtAxis1Pos>
  <Enabled DefaultValue="True"/>
  <Address DefaultValue="E1"/>
  <Min DefaultValue="-90"/>
  <Max DefaultValue="90"/>
  <Group DefaultValue="rotaryAxis"/>
</ExtAxis1Pos>
- <ExtAxis2Pos>
  <Enabled DefaultValue="True"/>
  <Address DefaultValue="E2"/>
  <Min DefaultValue="-100000"/>
  <Max DefaultValue="100000"/>
  <Group DefaultValue="rotaryAxis"/>
</ExtAxis2Pos>
</MachineStateParameters>
- <Schema>
  <ImageFile DefaultValue="Images\RailsFrame.osd"/>
  - <Rails1 Caption="Rails 1">
    <ImageFile DefaultValue="Images\Rails1.osd"/>
    <!--ParameterName DefaultValue="ExtAxis1Pos"/-->
    - <Direction>
      <X DefaultValue="1"/>
      <Y DefaultValue="0"/>
      <Z DefaultValue="0"/>
    </Direction>
    - <Rails2 Caption="Rails 2">
      <ImageFile DefaultValue="Images\Rails2.osd"/>
      <!--ParameterName DefaultValue="ExtAxis2Pos"/-->
      - <Direction>
        <X DefaultValue="0"/>
        <Y DefaultValue="1"/>
        <Z DefaultValue="0"/>
      </Direction>
      - <Rails3 Caption="Rails 3">
        <ImageFile DefaultValue="Images\Rails3.osd"/>
        <!--ParameterName DefaultValue="ExtAxis3Pos"/-->
        - <Direction>
          <X DefaultValue="0"/>
          <Y DefaultValue="0"/>
          <Z DefaultValue="1"/>
        </Direction>
        - <RobotFrame Caption="Robot frame">
          <ImageFile DefaultValue="Images\base_kr360_3.osd"/>
          - <AxisA1>
            <ImageFile DefaultValue="Images\L1_kr360_3.osd"/>
          - <AxisA2>
            <ImageFile DefaultValue="Images\L2_kr360_3.osd"/>
          - <AxisA3>
            <ImageFile DefaultValue="Images\L3_kr360_3.osd"/>
          - <AxisA4>
            <ImageFile DefaultValue="Images\L4_kr360_3.osd"/>
          - <AxisA5>
            <ImageFile DefaultValue="Images\L5_kr360_3.osd"/>
          - <AxisA6>
            <ImageFile DefaultValue="Images\L6_kr360_3.osd"/>

```

```

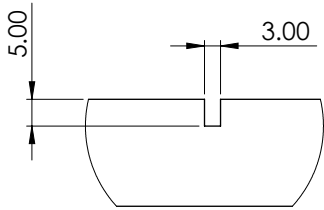
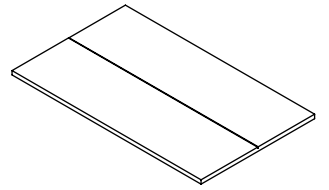
- <ToolBlockSelector>
  <ActiveNode DefaultValue="ToolBlock"/>
  - <ToolBlock>
    <!--ImageFile
      DefaultValue="Images\spindle_tool_kr360_3.osd"/-->
    <ImageFile DefaultValue="disc_tool_kr360_3.osd"/>
  </ToolBlock>
</ToolBlockSelector>
</AxisA6>
</AxisA5>
</AxisA4>
</AxisA3>
</AxisA2>
</AxisA1>
</RobotFrame>
</Rails3>
</Rails2>
</Rails1>
- <SCType ID="Table" Type="TMachineNode" Caption="Rotary table">
  - <Matrix>
    <SCType ID="T0" Type="TTranslateZ"
      DefaultValue="-[MachineDimensions.BaseData.TableToCrossPoint]"/>
    - <SCType ID="T1" type="TComplexTransformation3d">
      - <Translation>
        <X DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.X]"/>
        <Y DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.Y]"/>
        <Z DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.Z]"/>
      </Translation>
      - <Rotation>
        <Convention DefaultValue="EulerZYX"/>
        <R1 DefaultValue="180+[MachineDimensions.BaseData.A]"/>
        <R2 DefaultValue="-[MachineDimensions.BaseData.B]"/>
        <R3 DefaultValue="-[MachineDimensions.BaseData.C]"/>
        <R4 DefaultValue="0"/>
      </Rotation>
    </SCType>
    <!--SCType ID="T0" Type="TTranslateZ"
      DefaultValue="-[MachineDimensions.BaseData.TableToCrossPoint]"/> <SCType ID="T3"
      Type="TRotateZ" DefaultValue="180+[MachineDimensions.BaseData.A]"/> <SCType ID="T2"
      Type="TRotateY" DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.B]"/> <SCType ID="T1"
      Type="TRotateX" DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.C]"/> <SCType ID="T7"
      Type="TTranslateZ" DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.TableToCrossPoint]"/> <SCType
      ID="T4" Type="TTranslateX" DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.X]"/> <SCType ID="T5"
      Type="TTranslateY" DefaultValue="[MachineDimensions.BaseData.Y]"/> <SCType ID="T6"
      Type="TTranslateZ" DefaultValue="-[MachineDimensions.BaseData.TableToCrossPoint]"+
      [MachineDimensions.BaseData.Z]"/-->
  </Matrix>
  - <VisualProperties>
    - <Color>
      <R DefaultValue="224/255"/>
      <G DefaultValue="113/255"/>
      <B DefaultValue="34/255"/>
    </Color>
    <DisplayMode DefaultValue="Shade"/>
  </VisualProperties>
  <ImageFile DefaultValue="Images\TableF.osd"/>
  - <SCType ID="AxisA" Type="TMachineAxis" Caption="Axis A">
    - <Matrix>
      <SCType ID="T1" Type="TRotateY" DefaultValue="90"/>
    </Matrix>
    - <VisualProperties>
      - <Color>
        <R DefaultValue="224/255"/>
        <G DefaultValue="113/255"/>
        <B DefaultValue="34/255"/>
      </Color>
      <DisplayMode DefaultValue="Shade"/>
    </VisualProperties>
    - <VisMatrix>
      <SCType ID="T1" Type="TRotateY" DefaultValue="-90"/>
    </VisMatrix>
  </SCType>

```

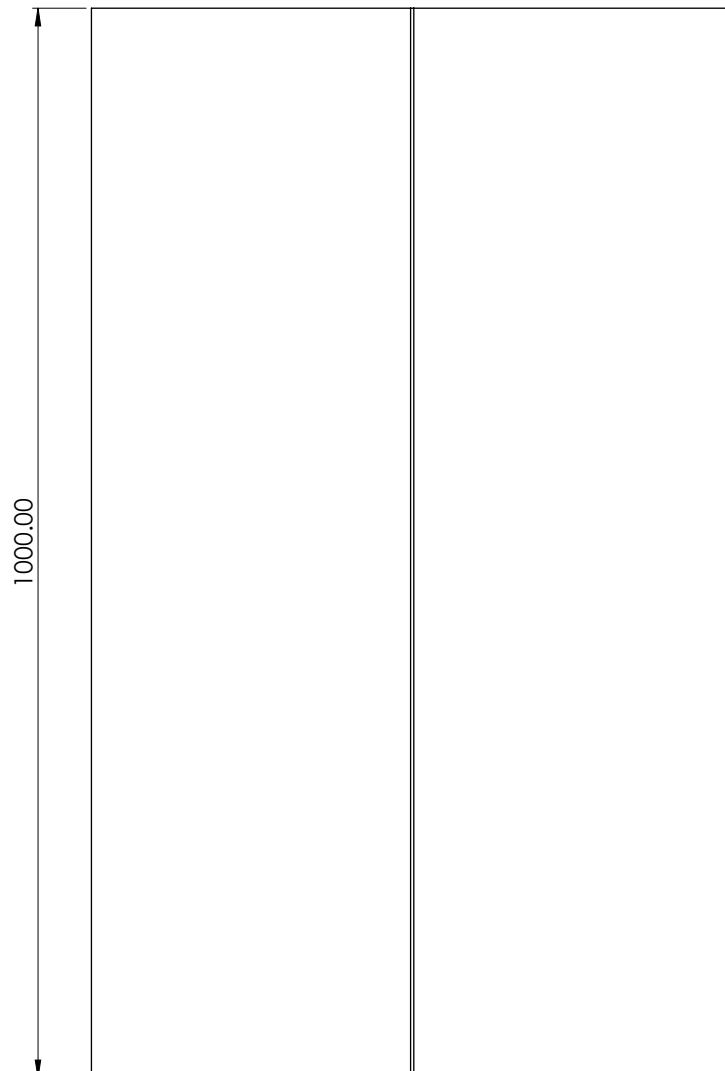
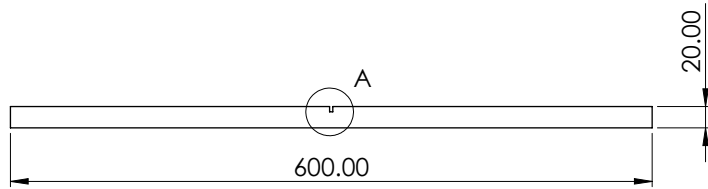
```

</VisualProperties>
<ImageFile DefaultValue="Images\TableA.osd"/>
<AxisType DefaultValue="Rotary"/>
<Scale DefaultValue="-1"/>
<ParameterName DefaultValue="ExtAxis1Pos"/>
- <SCType ID="AxisC" Type="TMachineAxis" Caption="Axis C">
  - <Matrix>
    <SCType ID="T1" Type="TRotateY" DefaultValue="-90"/>
  </Matrix>
  - <VisualProperties>
    - <Color>
      <R DefaultValue="100/255"/>
      <G DefaultValue="100/255"/>
      <B DefaultValue="100/255"/>
    </Color>
    <DisplayMode DefaultValue="Shade"/>
  </VisualProperties>
  <ImageFile DefaultValue="Images\TableC.osd"/>
  <AxisType DefaultValue="Rotary"/>
  <Scale DefaultValue="-1"/>
  <ParameterName DefaultValue="ExtAxis2Pos"/>
  - <SCType ID="WorkpieceBlock" Type="TMachineNode" Caption="WorkpieceBlock">
    - <Matrix>
      <SCType ID="T1" Type="TTranslateZ"
        DefaultValue="[MachineDimensions.TablePos.TableToCrossPoint]"/>
      <SCType ID="T2" Type="TRotateZ" DefaultValue="-90"/>
    </Matrix>
    <SCType ID="Workpiece" Type="TWorkpieceHolderNode" Caption="Table Plate"/>
  </SCType>
</SCType>
</SCType>
</SCType>
</Schema>
<ToolChangeMachineState DefaultValue="A1(0) A2(-90) A3(90) A4(0) A5(0) A6(0)"/>
- <Leads>
  <ApproachRefPoints DefaultValue="G53 A1 A2 A3 A4 A5 A6 E1 E2"/>
  <ReturnRefPoints DefaultValue="G53 A1 A2 A3 A4 A5 A6"/>
</Leads>
- <Simulation>
  <SimulationResolution DefaultValue="srLow"/>
  <GougeDetectionTolerance DefaultValue="1" InchDefaultValue="0.125"/>
</Simulation>
</SCType>
</SCCollection>

```

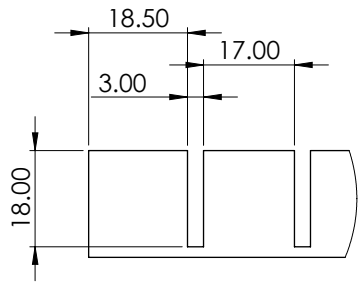
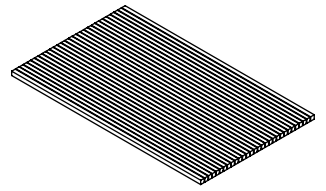


Detalhe A  
Escala 1 : 1

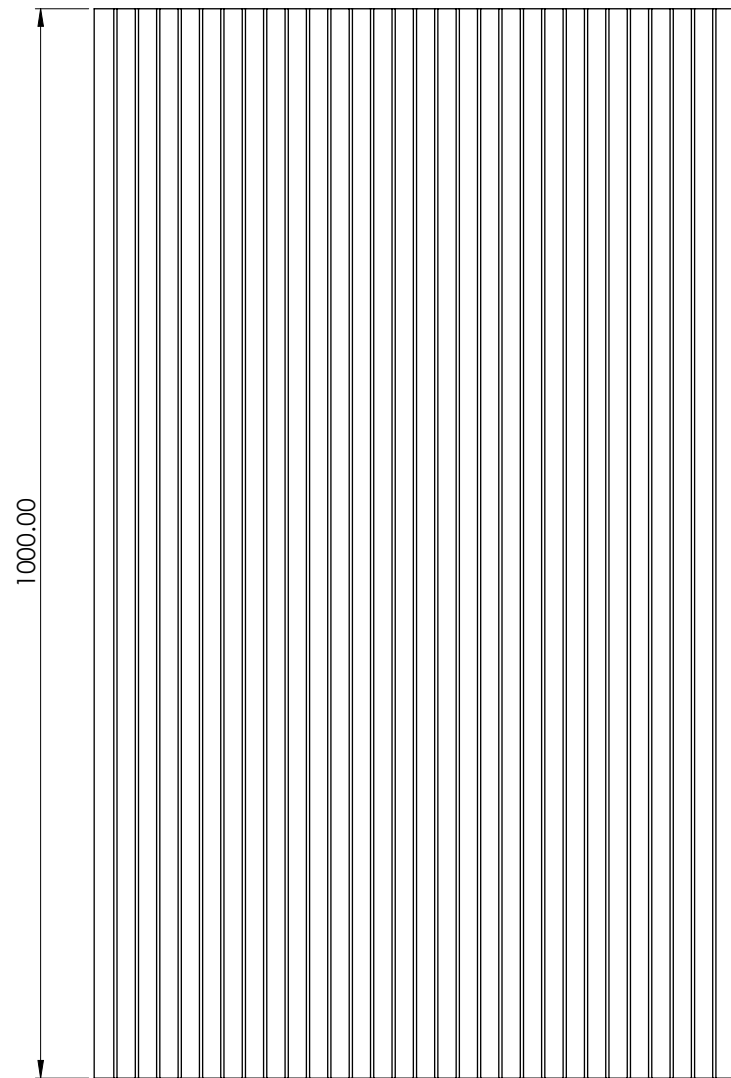
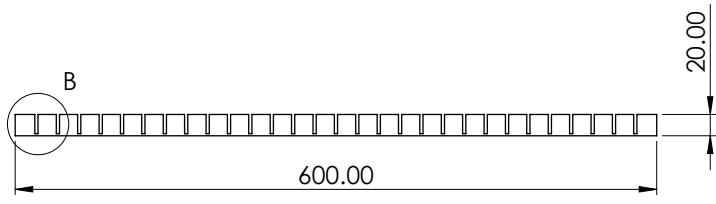


	Escala <b>1:5</b>	Rúbrica	Data	<b>Desenho e Modelação Geométrica</b>	
	Desenhou José	12/10/2019	Nome: José Gameiro n.º 81610 Curso: Engenharia Mecânica		
	Material: <b>Granito</b>	Verificou José	12/11/2019	Projectou José	12/10/2019
	Tolerância Geral: ISO 2768-c	Acabamentos: ISO 1302-2002	Notas:		<b>Chapa único rasgo central</b>
Folha <b>A3</b>	Desenho n.º 81610-01	Folha 1	Peso:	Revisão:	



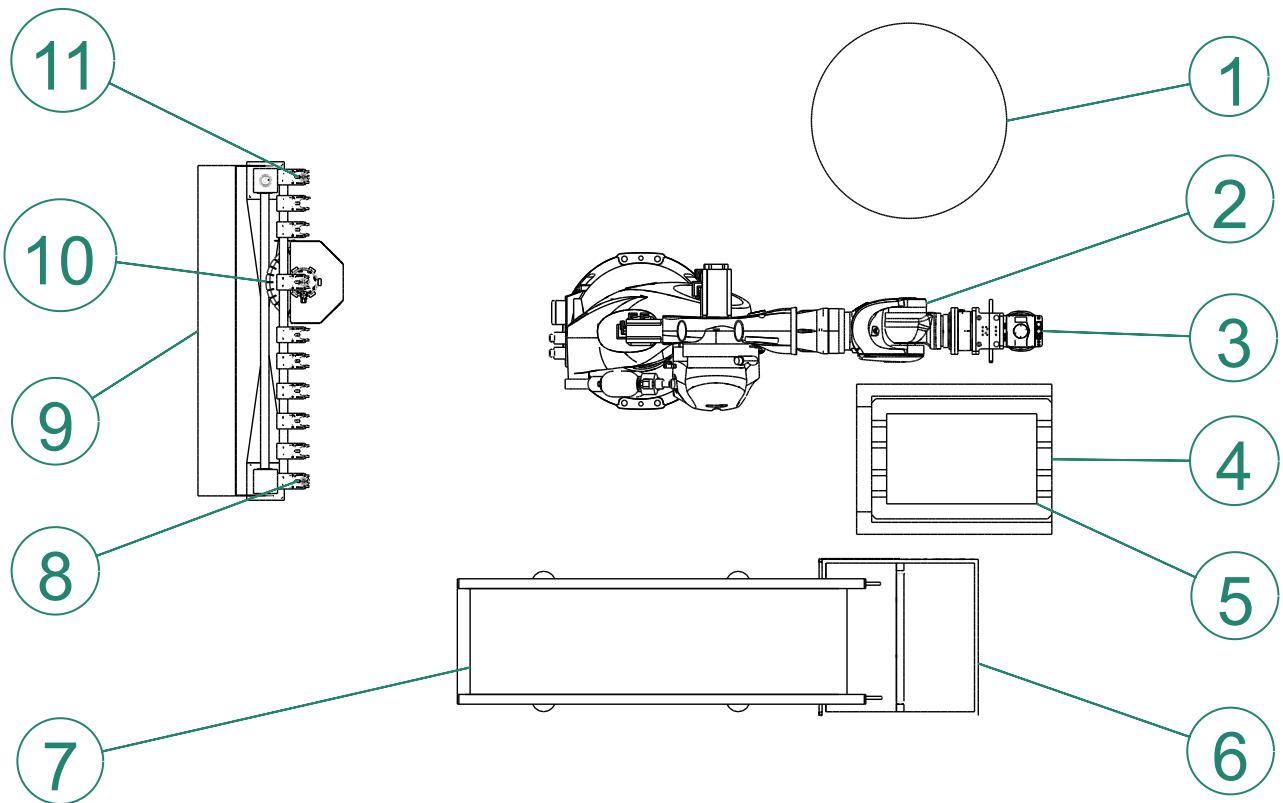


Detalhe B  
Escala 1 : 1



	Escala <b>1:5</b>	Rúbrica José	Data 12/10/2019	Desenho e Modelação Geométrica	
	Desenhou José	Verificou José	Projectou José		
	Material: <b>Granito</b>	Fabricou José	Nome: José Gameiro n.º 81610 Curso: Engenharia Mecânica		
	Tolerância Geral: ISO 2768-c	Notas:	<b>Chapa corte múltiplo</b>		
Acabamentos: ISO 1302-2002	Folha <b>A3</b>	Desenho n.º <b>81610-02</b>	Folha <b>1</b>	Peso:	Revisto:

ITEM	QTY	NAME
1	1	Mesa Rotativa
2	1	KUKA KR 360 L280-2
3	1	end-effector
4	1	Pallet
5	1	Bloco 1
6	1	Contentor de desperdício
7	1	Tapete linear
8	1	Fresa
9	1	Ferramenteira
10	1	Disco de corte
11	1	Cone IS040



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION 1	
DRAWN		SIGNATURE		DATE		TITLE: <h1>Célula Robótica</h1>			
CHK'D						DWG NO.		A4	
APPV'D						PNT001 - Part			
MFG						SCALE: 1:50		SHEET 1 OF 1	
Q.A				MATERIAL:					
				WEIGHT:					

---

```

DEF CORTELINEAR_REAL_1CHAPA() %nome da operacao
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
INTERRUPT ON 3

%%%%%%%%%%%% inicializacao de variaveis %%%%%%%%%%%%%%
BAS (#INITMOV,0)
BAS (#VEL_PTP,20)
BAS (#ACC_PTP,20)

%inicializacao de referenciais
$BASE=BASE_DATA[1] %definir posicao BASE no canto da pedra
$TOOL=TOOL_DATA[2] %definir TOOL no centro do disco
$advance=5

%%%%%%%%%%%% zona de instrucoes %%%%%%%%%%%%%%
$VEL.CP=0.167 %movimento rapido
PTP XHOME %reset do programa
PTP {A1 0.000, A2 -90.000, A3 90.000, A4 0.000, A5 0.000, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5
    0, E6 0} %posicao inicial (cotovelo a 90 graus)
PTP {A1 104.273, A2 -87.552, A3 73.861, A4 0.000, A5 103.691, A6 194.273, E1 0, E2 0, E3 0, E4
    0, E5 0, E6 0} %movimento para o ponto de aproximacao

PTP {A1 86.716, A2 -92.214, A3 95.395, A4 0.000, A5 86.818, A6 176.716, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0,
    E5 0, E6 0}
LIN {X 301.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %posicao igual a anterior

LIN {X 301.5, Y 1100, Z 244, A 180, B -90, C 0} C_DIS %desce para o nivel da pedra

$VEL.CP=0.003 %movimento de aproximacao e de avanco
LIN {X 301.5, Y 1000, Z 244, A 180, B -90, C 0} C_DIS %lead in de 100 mm (aproximacao)
LIN {X 301.5, Y 0, Z 244, A 180, B -90, C 0} C_DIS %corte de chapa de 1000 mm (avanco)
LIN {X 301.5, Y -100, Z 244, A 180, B -90, C 0} C_DIS %lead out de 100 mm (retorno)

$VEL.CP=0.167 %movimento rapido
LIN {X 301.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %movimento para o ponto de aproximacao
PTP {A1 104.273, A2 -87.552, A3 73.861, A4 0.000, A5 103.691, A6 194.273, E1 0, E2 0, E3 0, E4
    0, E5 0, E6 0} %posicao igual a anterior
PTP {A1 0.000, A2 -90.000, A3 90.000, A4 0.000, A5 0.000, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5
    0, E6 0} %posicao inicial (cotovelo a 90 graus)
PTP XHOME %reset do programa
END

```

---

---

```

DEF CORTEMULTI_REAL_1CHAPA() %nome da operacao
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
INTERRUPT ON 3

%%%%%%%%%%%% inicializacao de variaveis %%%%%%%%%%%%%%
BAS (#INITMOV,0)
BAS (#VEL_PTP,20)
BAS (#ACC_PTP,20)

%inicializacao de referenciais
$BASE=BASE_DATA[1] %definir posicao BASE no canto da pedra
$TOOL=TOOL_DATA[2] %definir TOOL no centro do disco
$advance=5

%%%%%%%%%%%% zona de instrucoes %%%%%%%%%%%%%%
$VEL.CP=0.167 %movimento rapido
PTP XHOME %reset do programa
PTP {A1 0.000, A2 -90.000, A3 90.000, A4 0.000, A5 0.000, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5
    0, E6 0} %posicao inicial (cotovelo a 90 graus)
PTP {A1 104.273, A2 -87.552, A3 73.861, A4 0.000, A5 103.691, A6 194.273, E1 0, E2 0, E3 0, E4
    0, E5 0, E6 0} %movimento para o ponto de aproximacao

PTP {A1 86.716, A2 -92.214, A3 95.395, A4 0.000, A5 86.818, A6 176.716, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0,
    E5 0, E6 0}
PTP {A1 86.080, A2 -104.683, A3 106.002, A4 0.000, A5 88.681, A6 176.080, E1 0, E2 0, E3 0, E4
    0, E5 0, E6 0}
LIN {X 21.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %posicao igual a anterior

LIN {X 21.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %desce para o nivel da pedra

$VEL.CP=0.003 %movimento de aproximacao e de avanco
LIN {X 21.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %lead in de 100 mm (aproximacao)
LIN {X 21.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %corte de chapa de 1000 mm (avanco)
LIN {X 21.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %lead out de 100 mm (retorno)

$VEL.CP=0.167 %movimento rapido
LIN {X 21.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %sobe para o plano de segurancia
LIN {X 41.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %movimento rapido para o rasgo seguinte, n2
LIN {X 41.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %desce para o nivel da pedra

$VEL.CP=0.003 %movimento de aproximacao e de avanco

```

```
LIN {X 41.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %lead in de 100 mm (aproximacao)
LIN {X 41.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %corte de chapa de 1000 mm (avanco)
LIN {X 41.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %lead out de 100 mm (retorno)
```

```
$VEL.CP=0.167 %movimento rapido
```

```
LIN {X 41.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %sobe para o plano de seguranca
LIN {X 61.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS %movimento rapido para o rasgo seguinte, n3
LIN {X 61.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS %desce para o nivel da pedra
```

```
%continua em padrao para os restantes 26 cortes
```

```
$VEL.CP=0.003
```

```
LIN {X 61.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 61.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 61.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.167
```

```
LIN {X 61.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 81.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 81.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.003
```

```
LIN {X 81.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 81.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 81.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.167
```

```
LIN {X 81.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 101.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 101.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.003
```

```
LIN {X 101.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 101.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 101.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.167
```

```
LIN {X 101.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 121.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 121.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.003
```

```
LIN {X 121.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 121.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 121.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```
$VEL.CP=0.167
```

```
LIN {X 121.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 141.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

```

LIN {X 141.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 141.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 141.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 141.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 141.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 161.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 161.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 161.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 161.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 161.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 161.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 181.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 181.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 181.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 181.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 181.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 181.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 201.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 201.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 201.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 201.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 201.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 201.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 221.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 221.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 221.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 221.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 221.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 221.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 241.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 241.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003

```

```

LIN {X 241.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 241.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 241.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 241.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 261.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 261.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 261.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 261.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 261.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 261.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 281.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 281.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 281.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 281.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 281.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 281.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 301.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 301.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 301.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 301.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 301.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 301.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 321.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 321.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 321.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 321.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 321.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 321.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 341.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 341.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 341.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 341.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS

```

```

LIN {X 341.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 341.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 361.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 361.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 361.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 361.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 361.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 361.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 381.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 381.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 381.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 381.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 381.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 381.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 401.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 401.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 401.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 401.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 401.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 401.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 421.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 421.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 421.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 421.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 421.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 421.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 441.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 441.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 441.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 441.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 441.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167

```



```

LIN {X 441.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 461.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 461.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 461.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 461.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 461.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 461.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 481.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 481.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 481.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 481.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 481.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 481.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 501.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 501.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 501.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 501.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 501.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 501.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 521.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 521.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 521.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 521.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 521.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 521.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 541.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 541.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 541.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 541.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 541.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 541.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 561.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS

```

```
LIN {X 561.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.003
LIN {X 561.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 561.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 561.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
$VEL.CP=0.167
LIN {X 561.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 581.5, Y 1100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C_DIS
LIN {X 581.5, Y 1100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C_DIS
```

*%ultimo corte, n. 29*

*\$VEL.CP=0.003 %movimento de aproximacao e de avanço*

*LIN {X 581.5, Y 1000, Z 231, A 180, B -90, C 0} C\_DIS %lead in de 100 mm (aproximacao)*

*LIN {X 581.5, Y 0, Z 231, A 180, B -90, C 0} C\_DIS %corte de chapa de 1000 mm (avanço)*

*LIN {X 581.5, Y -100, Z 231, A 180, B -90, C 0} C\_DIS %lead out de 100 mm (retorno)*

*\$VEL.CP=0.167 %movimento rapido*

*LIN {X 581.5, Y -100, Z 350, A 180, B -90, C 0} C\_DIS %sobe para o plano de seguranca*

*PTP {A1 104.273, A2 -87.552, A3 73.861, A4 0.000, A5 103.691, A6 194.273, E1 0, E2 0, E3 0, E4  
0, E5 0, E6 0} %movimento para o ponto de aproximacao*

*PTP {A1 0.000, A2 -90.000, A3 90.000, A4 0.000, A5 0.000, A6 0.000, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5  
0, E6 0} %posicao inicial (cotovelo a 90 graus)*

*PTP XHOME %reset do programa*

*END*

---

## **Apêndice B**

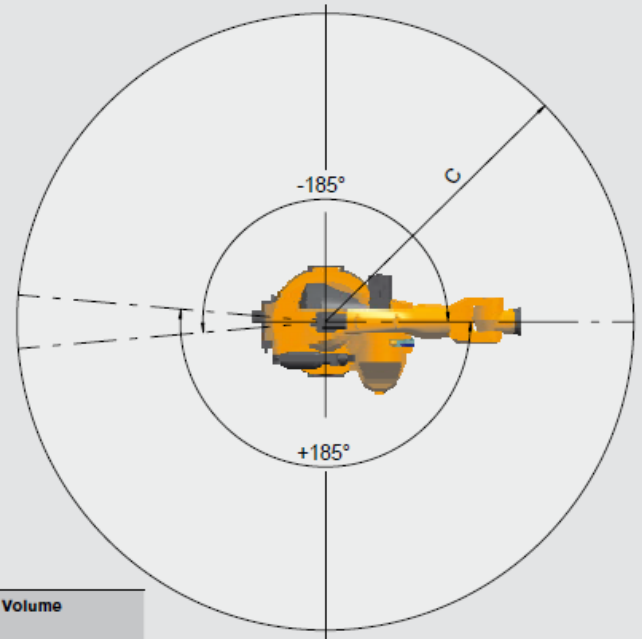
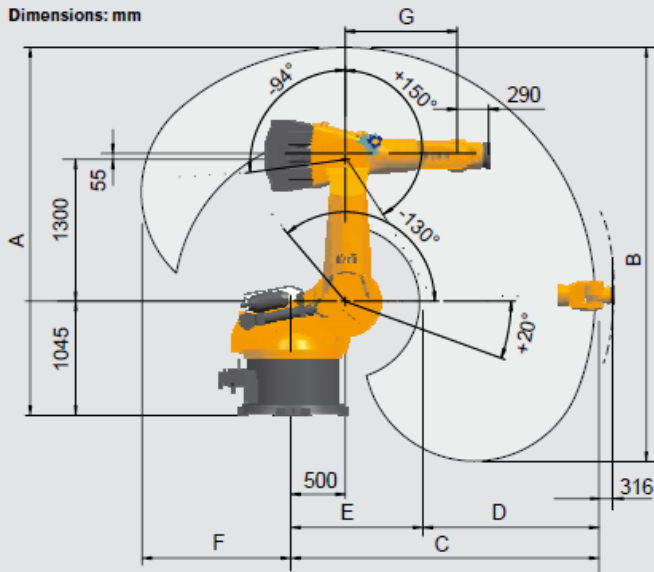
# **Dados Técnicos**

**B.1 Dados técnicos robô KR360 L280-2**

**B.2 Dados técnicos do agregado para disco de corte, HSD**

## »TECHNICAL DETAILS KR 360-2 AND KR 500-2

Dimensions: mm



Work envelope	Dimensions <sup>1)</sup>							Volume
	A	B	C	D	E	F	G	
<b>KR 360-2</b>	3,371 mm	3,076 mm	2,826 mm	1,614 mm	1,212 mm	1,362 mm	1,025 mm	68 m <sup>3</sup> ; 35 m <sup>3**</sup>
<b>KR 360 L280-2</b>	3,621 mm	4,297 mm	3,076 mm	1,856 mm	1,220 mm	1,612 mm	1,275 mm	91 m <sup>3</sup> ; 50 m <sup>3**</sup>
<b>KR 360 L240-2</b>	3,871 mm	4,797 mm	3,326 mm	2,016 mm	1,310 mm	1,862 mm	1,525 mm	118 m <sup>3</sup> ; 68 m <sup>3**</sup>
<b>KR 500-2</b>	3,371 mm	3,076 mm	2,826 mm	1,614 mm	1,212 mm	1,362 mm	1,025 mm	68 m <sup>3</sup> ; 35 m <sup>3**</sup>
<b>KR 500 L420-2</b>	3,621 mm	4,297 mm	3,076 mm	1,856 mm	1,220 mm	1,612 mm	1,275 mm	91 m <sup>3</sup> ; 50 m <sup>3**</sup>
<b>KR 500 L340-2</b>	3,871 mm	4,797 mm	3,326 mm	2,016 mm	1,310 mm	1,862 mm	1,525 mm	118 m <sup>3</sup> ; 68 m <sup>3**</sup>

<sup>1)</sup> Relative to intersection of axes 4/5  
 \* floor-mounted robot only  
 \*\* ceiling-mounted robot only

Type	KR 360-2	KR 360 L280-2	KR 360 L240-2	KR 500-2	KR 500 L420-2	KR 500 L340-2
Maximum reach	2,826 mm	3,076 mm	3,326 mm	2,826 mm	3,076 mm	3,326 mm
Rated payload	360 kg	280 kg	240 kg	500 kg	420 kg	340 kg
Suppl. load, arm/link arm/rotating col.	50/100*/400** kg					
Suppl. load, arm + link arm, max.	100 kg*; 50 kg**					
Maximum total load	860 kg	780 kg	740 kg	1,000 kg	920 kg	840 kg
Number of axes	6					
Mounting position	Floor, ceiling					
Variant	Foundry	Foundry	Foundry	Cleanroom, Foundry	Foundry	Foundry
Positioning repeatability*	±0.08 mm					
Path repeatability*						
Controller	KR C2 edition2005					
Weight (excluding controller), approx.	2,350 kg	2,375 kg	2,385 kg	2,350 kg	2,375 kg	2,385 kg
Temperature during operation	+10 °C to +55 °C					
Protection classification	IP 65					
Robot footprint	1,240 mm x 1,240 mm					
Connection	13.5 kVA					
Noise level	< 75 dB					

Drive system, electromechanical with brushless AC servomotors

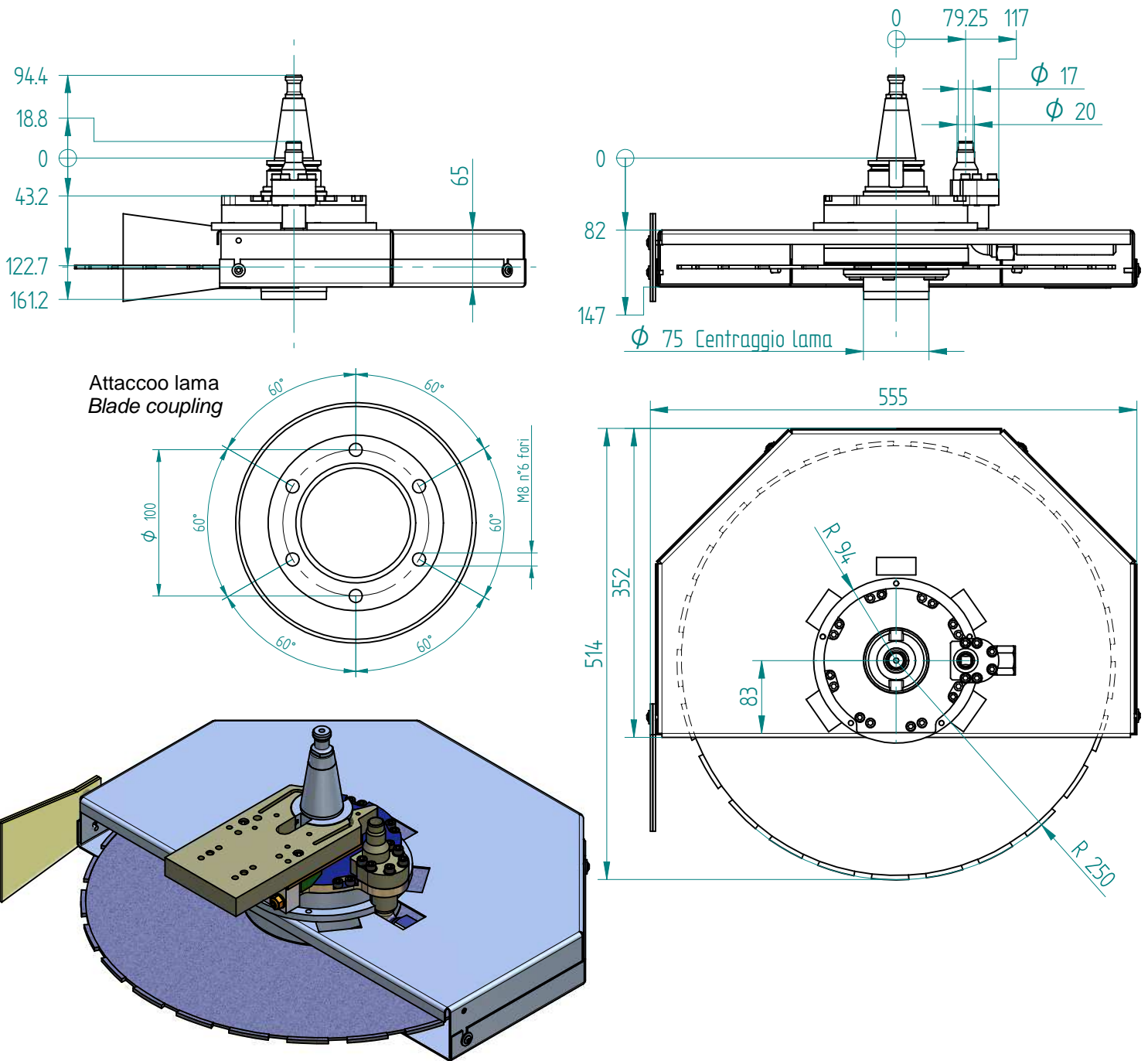
<sup>2)</sup> to ISO 9283  
 \* floor-mounted robot only  
 \*\* ceiling-mounted robot only

Axis data	Range (software)	Speed with rated payload					
		360 kg	280 kg	240 kg	500 kg	420 kg	340 kg
Axis 1 (A1)	±185°	89°/s	89°/s	89°/s	69°/s	69°/s	69°/s
Axis 2 (A2)	+110°/-40°; +50°/-40°**	89°/s	89°/s	89°/s	69°/s	69°/s	69°/s
Axis 3 (A3)	+60°/-184°	93°/s	93°/s	93°/s	69°/s	69°/s	69°/s
Axis 4 (A4)	±350°	109°/s	109°/s	109°/s	77°/s	77°/s	77°/s
Axis 5 (A5)	±118°	112°/s*	112°/s*	112°/s*	76°/s	76°/s	76°/s
Axis 6 (A6)	±350°	157°/s*	157°/s*	157°/s*	120°/s	120°/s	157°/s

Details provided about the properties and usability of the products are purely for information purposes and do not constitute a guarantee of these characteristics. The extent of goods delivered and services performed is determined by the subject matter of the specific contract. No liability accepted for errors or omissions.

# AGGREGATO ATTACCO LAMA PER DISCO SEGA CIRCOLARE Ø500 CON $i=1:3.2$

## AGGREGATE BLADE COUPLING FOR Ø500 CIRCULAR BLADE $i=1:3.2$

**CODICE:** HASM0103P  
**CODE:**
**CODICE AUX:**  
**Rif:**
**REV. 01**
**DATA: 20/07/2010**


Velocità di rotazione elettromandrino / <i>Electrospindle rotation speed</i>	4.000	rpm	
Velocità di rotazione utensile / <i>Tool rotation speed</i>	1.250	rpm	
Rapporto di trasmissione / <i>Speed ratio</i>	1:3.2		
Attacco elettromandrino / <i>Electrospindle coupling</i>	ISO40		
Diametro codolo / <i>Tool shank diameter</i>		mm	
Diametro punta max / <i>Max bit diameter</i>		mm	
Diametro lama / <i>Blade diameter</i>	500	mm	
Profondità di lavorazione / <i>Working depth</i>		mm	
Peso / <i>Weight</i>	~6	kg	
Lubrificazione / <i>Lubrication</i>	grasso / <i>grease</i>		KLÜBER NBU 15
Temperatura di esercizio / <i>Working temperature</i>			

Le caratteristiche tecniche sono fornite a scopo informativo e non hanno carattere impegnativo. HSD si riserva pertanto di apportare le modifiche e i miglioramenti che riterrà necessari, senza preavviso e obbligo di estendere l'innovazione ai prodotti già forniti o in fase di fornitura. HSD si solleva altresì dai danni recati a terzi da un uso improprio e non conforme alle indicazioni sopraindicate e si riserva la proprietà dei disegni vietandone la divulgazione a terzi se non dietro un'espressa autorizzazione.

Technical features are provided for information only and are not binding. HSD reserves to make any adjustment and improvement considered necessary, without notice and obligation to extend the innovation to the already supplied or being supplied products. HSD also dismisses from damages caused to others because of improper use and not keeping with the listed instructions. HSD is owner of the drawings and forbids its disclosure to others except when authorized.

