



Estudo comparativo de grafites para ferramentas de EDM para produção de cavidades moldantes

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Bruno Miguel Faria Moreira

Leiria, setembro de 2024



Estudo comparativo de grafites para ferramentas de EDM para produção de cavidades moldantes

Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção Industrial

Bruno Miguel Faria Moreira

Trabalho de Projeto realizado sob a orientação da Professora Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves e do Professor Doutor Mário António Simões Correia

Leiria, setembro de 2024

Originalidade e Direitos de Autor

O presente relatório de projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, vertente Produção Industrial, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Um agradecimento especial à minha esposa, Valdione Vieira, pela paciência que teve ao longo de todo o meu percurso de estudo.

À empresa Moldetipo pela disponibilização de recursos e tempo, viabilizando o sucesso dos trabalhos.

Aos colaboradores da Moldetipo, Vasco Martins, José Oliveira, Bruno Cadete, João Lopes, Inácio Nelson e Tiago Santos pelo apoio e conhecimento transmitido.

Aos meus orientadores, Doutora Maria Leopoldina Mendes Ribeiro de Sousa Alves e Doutor Mário António Simões Correia pela sua mentoria.

Resumo

O presente trabalho estuda o comportamento do processo de maquinagem por eletroerosão (EDM), analisando diversos índices de performance no uso de ferramentas de grafite de três granulometrias diferentes. Os índices de performance que são alvo de estudo são a Taxa de Remoção de Material (MRR – para a 1ª Eletroerosão, 2ª Eletroerosão e Global), Rugosidade Superficial (SR – Rugosidade Ra e Rz, e Classificação SR), Desvio Dimensional (DD – Planeza, Classificação Planeza, Dimensão e Centro Geométrico), Custo Total do Processo (C_{Ptot}), Custo Específico do Processo (CEP) e o Índice de Performance Global (IPG). Este estudo é de elevado interesse para a indústria dos moldes, que recorre ao uso da tecnologia de EDM para maquinar (erodir no caso da tecnologia de EDM) cavidades moldantes em aço de elevada dureza.

O processo de EDM comporta também a erosão da própria ferramenta (elétrodo), sendo necessário o uso de múltiplos elétrodos para o sucesso da operação. Este estudo tenta aferir a possibilidade de, para atingir a geometria pretendida com a melhor qualidade superficial possível e de forma economicamente mais viável, usar um menor número de elétrodos, usando para isso um grafite de menor granulometria. De igual modo, é analisado o comportamento global do processo de eletroerosão no uso de grafites de diferentes granulometrias.

Neste estudo são utilizados 3 tipos de grafites, de granulometrias diferentes, com tamanho médio de partículas de 8 (grafite de referência), 5 e 4 µm respetivamente. Duas geometrias foram projetadas neste estudo, o Rib e a Caixa (CX), geometrias habituais na indústria dos moldes, sendo o Rib normalmente usado como reforço estrutural e a CX para montagem de posições de moldação. Ambas as geometrias foram erodidas em três profundidades distintas, 3, 6 e 12 mm, usando as três grafites em estudo.

Palavras-chave: Eletroerosão (EDM), grafite, granulometria, taxa de remoção de material, rugosidade superficial, desvio dimensional.

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

Abstract

The present work studies the behaviour of the Electrical Discharge Machining (EDM) process, analysing several performance indices in the use of graphite tools of three different grain sizes. The performance indices that are the target of study are the Material Removal Rate (MRR – for 1st EDM, 2nd EDM and Global), Surface Roughness (SR – Roughness Ra and Rz, and SR Rating), Dimensional Deviation (DD – Flatness, Flatness Rating, Dimension and Geometric Centre), Total Process Cost (C_{Ptot}), Process Specific Cost (CEP) and the Global Performance Index (IPG). This study is of great interest to the mold industry, which uses EDM technology to machine (erode in the case of EDM technology) moulding cavities in high hardness steel.

The EDM process also involves the erosion of the tool itself (electrode), requiring the use of multiple electrodes for the success of the operation. This study tries to assess the possibility of using a smaller number of electrodes to achieve the intended geometry with the best possible surface quality and in a more economically viable way, using a graphite with a smaller particle size. Likewise, the global behaviour of the EDM process in the use of graphites of different grain sizes is analysed.

In this study, 3 types of graphites are used, of different particle sizes, with an average particle size of 8 (reference graphite), 5 and 4 μm respectively. Two geometries were designed in this study, the Rib and the Box (CX), common geometries in the mold industry, with the Rib usually used as structural reinforcement and the CX for the assembly of moulding inserts. Both geometries were eroded at three distinct depths, 3, 6 and 12 mm, using the three graphites under study.

Keywords: Electrical Discharge Machining (EDM), graphite, particle size, material removal rate, surface roughness, dimensional deviation.

Índice

Estudo comparativo de grafites para ferramentas de EDM para produção de cavidades moldantes	i
Estudo comparativo de grafites para ferramentas de EDM para produção de cavidades moldantes	ii
Originalidade e Direitos de Autor.....	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras	xi
Lista de tabelas	xiv
Lista de siglas e acrónimos	xv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento do trabalho	1
1.2. Apresentação da empresa.....	1
1.3. Motivação.....	2
1.4. Objetivos	3
1.5. Estrutura do trabalho	4
2. Estado da Arte	6
2.1. Processo de EDM.....	6
2.1.1. Parâmetros influenciadores	9
2.1.2. Índices de performance	11
2.1. Materiais	15
2.1.1. Peça de trabalho	15
2.1.2. Ferramenta/Eléctrodo.....	15

2.1.3.	Dielétrico	18
3.	Metodologia.....	19
3.1.	Planeamento dos trabalhos	20
3.2.	Materiais utilizados	21
3.3.	Geometrias	22
3.3.1.	Peça de trabalho (chapa-teste)	22
3.3.2.	Eléctrodo-Rib	24
3.3.2.1.	Preparação (setup) do Eléctrodo-Rib no processo de EDM	25
3.3.3.	Eléctrodo-CX	27
3.3.3.1.	Preparação (setup) do Eléctrodo-CX no processo de EDM	27
3.4.	Equipamentos	29
3.5.	Parâmetros do processo de EDM.....	31
3.6.	Índices de performance específicos	33
3.6.1.	MRR – Taxa de remoção de material (1ªEletroerosão, 2ªEletroerosão e Global)	34
3.6.2.	SR – Rugosidade superficial (Rugosidade Ra, Rugosidade Rz e Classificação SR)	35
3.6.3.	DD – Desvio dimensional	36
3.6.3.1.	DD_Planeza e Classificação Planeza.....	40
3.6.3.2.	DD_Dimensão ao longo dos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico ao longo dos eixos X e Y	41
3.6.4.	C _{Ptot} – Custo total do processo e CEP – Custo específico do processo	43
3.6.5.	IPG – Índice de performance global.....	45
4.	Resultados e Discussão	46
4.1.	MRR.....	46
4.1.1.	MRR, geometria Rib	47
4.1.1.1.	MRR-Global; Geometria Rib.....	48
4.1.2.	MRR, geometria CX.....	49
4.1.2.1.	MRR-Global; Geometria CX.....	50

4.2. SR.....	52
4.2.1. Rugosidade Ra, geometria Rib.....	53
4.2.1. Rugosidade Rz, geometria Rib.....	55
4.2.2. Rugosidade Ra, geometria CX.....	56
4.2.3. Rugosidade Rz, geometria CX.....	58
4.2.4. Classificação SR.....	59
4.3. DD.....	60
4.3.1. Planeza	60
4.3.1.1. Planeza; Geometria Rib	61
4.3.1.2. Planeza; Geometria CX	62
4.3.2. Classificação Planeza	64
4.3.3. Dimensão nos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico nos eixos X e Y.....	65
4.3.3.1. Dimensão nos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico nos eixos X e Y - Geometria Rib	65
4.3.3.1. Dimensão nos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico nos eixos X e Y - Geometria CX	71
4.4. CPtot e CEP.....	77
4.4.1. CPtot e CEP - Geometria Rib.....	77
4.4.2. CPtot e CEP - Geometria CX.....	78
4.5. IPG.....	80
4.5.1. IPG - Geometria Rib	80
4.5.2. IPG - Geometria CX.....	82
5. Conclusões.....	84
5.1. Trabalhos futuros.....	86
Referências Bibliográficas	88
Anexos	91

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Diagrama esquemático de EDM de penetração (Kumar S. e Gupta T., 2023) [4]	8
Figura 2.2 - Diagrama esquemático de EDM por fio (Kumar S. e Gupta T., 2023) [4].....	8
Figura 2.3 - Média aritmética da Rugosidade Ra do perfil de rugosidade [10]	12
Figura 2.4 - Média das amplitudes máximas da Rugosidade Rz nos trechos Rzi [10]	12
Figura 2.5 - Quatro tipos de desgaste nos elétrodos no processo de EDM [15].....	18
Figura 3.1 - Fluxograma do processo de EDM	21
Figura 3.2 - a) CAD chapa-teste a castanho e da base do sistema de fixação Erowa a azul; b) chapa-teste fabricada, montada em base Erowa, antes da eletroerosão.	23
Figura 3.3 – a) CAD do Eléttrodo-Rib; b) Eléttrodo-rib; c) Centro de maquinagem CNC Fanuc	25
Figura 3.4 - Medição da geometria de referência do Eléttrodo-Rib	25
Figura 3.5 – a) CAD do Eléttrodo-CX; b) Eléttrodo-CX; c) Centro de maquinagem CNC Fanuc	27
Figura 3.6 - Máquina EDM do fabricante ONA, modelo NX6.....	29
Figura 3.7 – Máquina CMM, fabricante Renishaw	29
Figura 3.8 – Balança digital Kern, limite 1200 g, precisão 0,01 g.....	29
Figura 3.9 – a) Rugosímetro Mahr, modelo MarSurf PS10 medindo face vertical do Rib; b) Máquina de EDM Fio, fabricante FANUC; c) Rugosímetro medindo a face de Fundo da CX; d) Perfil de rugosidade da face medida	30
Figura 3.10 - a) Centrador Erowa montado na máquina EDM; b) Centrador Erowa montado na máquina CMM; c) Base Erowa (topo); d) Base Erowa com parafuso centrador (vista de baixo); e) Eléttrodo montado em base Erowa; f) chapa-teste (peça de trabalho) montada em base Erowa.....	31
Figura 3.11 - Níveis de medição CMM.....	36
Figura 3.12 - a) 12 pontos de medição por face lateral do Rib; b) 7 pontos de medição por face lateral da CX;	38
Figura 3.13 - Representação gráfica da medição de pontos discretos do Eléttrodo-Rib, do Rib da chapa-teste, do Eléttrodo-CX e da CX na chapa-teste.....	39
Figura 4.1 - MRR Rib 1ªEletroerosão	47

Figura 4.2 - MRR Rib 2ªEletroerosão	48
Figura 4.3 - MRR-Global; Geometria Rib	48
Figura 4.4 - MRR CX 1ªEletroerosão	49
Figura 4.5 - MRR CX 2ªEletroerosão	50
Figura 4.6 - MRR-Global; Geometria CX	51
Figura 4.7 – SR Rugosidade Ra Rib [μm]; Profundidade 3 mm	53
Figura 4.8 - SR Rugosidade Ra Rib [μm]; Profundidade 6 mm	54
Figura 4.9 - SR Rugosidade Ra Rib [μm]; Profundidade 12 mm	55
Figura 4.10 - SR Rugosidade Rz Rib [μm]; Profundidade 3, 6, 12 mm	56
Figura 4.11 - SR Rugosidade Ra CX [μm]; Profundidade 3 mm	56
Figura 4.12 - SR Rugosidade Ra CX [μm]; Profundidade 6 mm	57
Figura 4.13 – SR Rugosidade Ra CX [μm]; Profundidade 12 mm.....	58
Figura 4.14 – SR Rugosidade Rz CX [μm]; Profundidade 3, 6, 12 mm.....	59
Figura 4.15 - Classificação SR.....	59
Figura 4.16 – Planeza Rib; Profundidade 3 mm	61
Figura 4.17 - Planeza Rib; Profundidade 6 mm	62
Figura 4.18 - Planeza Rib; Profundidade 12 mm	62
Figura 4.19 - Planeza CX; Profundidade 3 mm	63
Figura 4.20 - Planeza CX; Profundidade 6 mm	63
Figura 4.21 - Planeza CX; Profundidade 12 mm	64
Figura 4.22 - Classificação Planeza	64
Figura 4.23 - DD Rib; Profundidade 3 mm; Dimensão	66
Figura 4.24 - DD Rib; Profundidade 3 mm; Centro Geométrico.....	66
Figura 4.25 - DD Rib; Profundidade 6 mm; Dimensão	67
Figura 4.26 - DD Rib; Profundidade 6 mm; Centro Geométrico.....	68
Figura 4.27 - DD Rib; Profundidade 12 mm; Dimensão e Centro Geométrico (1ªEletroerosão).....	69
Figura 4.28 - DD Rib; Profundidade 12 mm; Dimensão (2ªEletroerosão)	70

Figura 4.29 - DD Rib; Profundidade 12 mm; Centro Geométrico (2ªEletroerosão)	70
Figura 4.30 - DD CX; Profundidade 3 mm; Dimensão	71
Figura 4.31 - DD CX; Profundidade 3 mm; Centro Geométrico	72
Figura 4.32 - DD CX; Profundidade 6 mm; Dimensão e Centro Geométrico (1ªEletroerosão)	72
Figura 4.33 - DD CX; Profundidade 6 mm; Dimensão (2ªEletroerosão)	73
Figura 4.34 - DD CX; Profundidade 6 mm; Centro Geométrico (2ªEletroerosão)	74
Figura 4.35 - DD CX; Profundidade 12 mm; Dimensão e Centro Geométrico (1ªEletroerosão)	74
Figura 4.36 - DD CX; Profundidade 12 mm; Dimensão (2ªEletroerosão)	75
Figura 4.37 - DD CX; Profundidade 12 mm; Centro Geométrico (2ªEletroerosão)	76
Figura 4.38 - CPtot [€]; CEP [€/mm ³]; Geometria Rib	78
Figura 4.39 - CPtot [€]; CEP [€/mm ³]; Geometria CX	79
Figura 4.40 - - Índice de performance global (IPG); Profundidade 3 mm; Geometria Rib	80
Figura 4.41 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 6 mm; Geometria Rib...	81
Figura 4.42 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 12 mm; Geometria Rib.	81
Figura 4.43 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 3 mm; Geometria CX...	82
Figura 4.44 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 6 mm; Geometria CX...	82
Figura 4.45 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 12 mm; Geometria CX.	83

Lista de tabelas

Tabela 3.1 - Principais características do aço W.Nr.1.2343 [16].....	22
Tabela 3.2 - Tipos de grafite. Principais características técnicas [18].....	22
Tabela 3.3 - Descrição da quantidade de peças de trabalho (chapas-teste).....	23
Tabela 3.4 - Correções, na posição de eletroerosão, do Eléctrodo-Rib [mm]	26
Tabela 3.5 - Correções, na posição de eletroerosão, do Eléctrodo-CX [mm].....	28
Tabela 3.6 - Parâmetros do processo de EDM	32
Tabela 3.7 – Níveis de intensidade do gerador da ONA NX	33
Tabela 3.8 - Níveis de medição para eléctrodo e chapa-teste a 3, 6 e 12 mm de profundidade EDM.....	37
Tabela 4.1 – MRR; 1ªEletroerosão.....	46
Tabela 4.2 – MRR; 2ªEletroerosão.....	46
Tabela 4.3 - MRR-Global.....	46
Tabela 4.4 - SR Rugosidade Ra Profundidade 3, 6 e 12 [μm]	52
Tabela 4.5 - SR Rugosidade Rz Profundidade 3, 6, e 12 [μm]	52
Tabela 4.6 – Planeza a partir de um conjunto de pontos discretos [mm].....	60
Tabela 4.7 - Custo total do processo (CPtot) e Custo Específico do Processo (CEP)	77

Lista de siglas e acrónimos

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CEP	Custo específico do processo
CMM	<i>Coordinate Measuring Machine</i>
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
CP _{tot}	Custo do processo total
DC	<i>Direct Current</i>
Dd%	<i>Percentual Dimensional deviation</i>
DD	Desvio Dimensional
DG	Desvio Geométrico
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
FR	Furação Rápida
IPG	Índice de Performance Global
IPL	Instituto Politécnico de Leiria
MRR	<i>Material Removal Rate</i>
SEC	<i>Specific Energy consumption</i>
SEDM	<i>Sinking Electrical Discharge Machining</i>
SR	<i>Surface Roughness</i>
TW	<i>Tool Wear</i>
TWR	<i>Tool Wear Rate</i>
T_{WR}	<i>Tool Wear Ratio</i>
UEDM	<i>Ultrasonic Electrical Discharge Machining</i>
WEDM	<i>Wire Electrical Discharge Machining</i>
W.Nr.	<i>Werkstoffnummer</i>

Esta página foi intencionalmente deixada em branco

1. Introdução

1.1. Enquadramento do trabalho

A evolução das características de materiais de construção, nomeadamente a crescente dureza nos materiais metálicos e de matriz metálica (tornando-os difíceis de maquinar), exige a inerente evolução das tecnologias tradicionais de produção e maquinagem de componentes (tecnologias de arranque de apara por contato físico) na direção de tecnologias não tradicionais (tecnologias de maquinagem sem contato físico entre a ferramenta e a peça de trabalho) onde a dureza dos materiais não constitui um problema, de modo a ser possível a transformação de matéria-prima em componentes utilizáveis, de diferentes geometrias.

A eletroerosão, habitualmente referida como EDM (Maquinagem por descarga elétrica, do inglês – *Electrical Discharge Machining*) é uma dessas tecnologias de maquinagem não tradicionais, sendo que a dureza da peça de trabalho não é obstáculo para a maquinagem da mesma. Esta tecnologia consiste no uso de descargas elétricas provocando erosão na peça de trabalho. A principal limitação desta tecnologia produtiva é a condutividade elétrica do material a maquinar, ou seja, para materiais não condutores de corrente elétrica não é possível o uso desta tecnologia [1], [2].

Este trabalho aborda esta tecnologia, explicando o seu princípio de funcionamento e efetuando uma explanação dos principais parâmetros de produção e dos principais índices de performance a ela associados. Mediante o uso de ferramentas (elétrodos em grafite) de granulometrias diferentes é quantificada a variação nos índices de performance principais.

1.2. Apresentação da empresa

A empresa Moldetipo, localizada em Embra – Marinha Grande, produz moldes para indústria de injeção de polímeros, sendo as cavidades moldantes o componente onde a empresa emprega maior quantidade de recursos, seja em equipamento, horas de trabalho ou em investigação e desenvolvimento (I&D).

O departamento de EDM, local onde foi realizado o trabalho laboratorial deste estudo, desenha, modela, programa e executa a maquinagem de elétrodos em grafite, para serem usados no processo de eletroerosão. A grafite, matéria-prima produzida recorrendo à

tecnologia de pulverometalurgia, é fornecida externamente. Além da produção dos eletrodos, a Moldetipo, também executa trabalho de EDM por penetração (SEDM do inglês – *Sinking Electrical Discharge Machining*), EDM por fio (WEDM do inglês – *Wire Electrical Discharge Machining*) e Furação Rápida (FR).

A empresa Moldetipo utiliza, com muita frequência, no fabrico de cavidades moldantes para moldes de injeção de polímeros, quatro aços, a saber: o aço W.Nr.1.2343|DINX38CrMoV5-1 (classificação de acordo com a norma DIN17007|DIN17006, significando Número do Registo do Material – W.Nr. do alemão *Werkstoffnummer* e Instituto Alemão para a Estandarização – DIN do alemão *Deutsches Institut für Normung*), o aço W.Nr.1.2344|DIN40CrMoV5-1, o aço W.Nr.1.2311|DIN40CrMnMo7 e o aço W.Nr.1.2738HH|DIN40CrMnNiMo8-6-4. No presente trabalho, foi utilizado o aço W.Nr.1.2343 (esta nomenclatura abreviada será utilizada ao longo do presente trabalho), por ser o aço com maior frequência de utilização por parte da empresa Moldetipo.

1.3.Motivação

Todas as empresas deveriam proceder a estudos comparativos, na busca dos melhores fornecedores dos melhores componentes/peças/equipamentos ou matéria-prima para desenvolver a sua atividade, sob o ponto de vista da eficiência, nunca esquecendo o ponto de vista económico.

Pontualmente são executados, pela Moldetipo, mais concretamente pelo departamento de EDM, estudos comparativos de fornecedores de matéria-prima (em particular de grafite), principalmente quando existe alguma alteração na oferta de grafite, seja pela entrada ou saída de fornecedores do mercado ou pelo desenvolvimento de um novo tipo de grafite. Até à presente data, todos os estudos realizados foram entre grafites equivalentes (semelhante granulometria, taxa de remoção de material (MRR do inglês – *Material Removal Rate*), Nível VDI máximo atingível (rugosidade superficial) e custo específico), de diferentes fornecedores. Estes estudos foram realizados de modo empírico, com controlo de alguns índices de performance, a saber: tempo de maquinação, definição geométrica, inspeção visual do desgaste da ferramenta e comparação visual, com régua de rugosidades, da rugosidade superficial.

A falta de um estudo mais pormenorizado, rigoroso e científico entre grafites de granulometrias diferentes do mesmo fornecedor, bem como a falta de quantificação e

compreensão da variação dos índices de performance quando se utilizam ferramentas em grafite de granulometrias diferentes, motivou a realização deste estudo.

1.4. Objetivos

A intenção deste estudo foi a de comparar a performance de grafites de granulometrias diferentes dentro do mesmo fornecedor/fabricante, apurando vantagens e desvantagens, de modo rigoroso e científico.

Como ponto de partida para este estudo, assumem-se as premissas, por parte do fabricante da grafite em teste, de que as grafites de granulometria maior são indicadas para trabalhos de eletroerosão com necessidade de superior MRR sem grande preocupação com a rugosidade superficial (SR do inglês – *Surface Roughness*) ou desvio dimensional (DD) nas geometrias obtidas, mas com maior taxa de desgaste de ferramenta (TWR do inglês – *Tool Wear Rate*). Já as grafites de granulometria menor são indicadas para trabalhos de eletroerosão sem necessidade de uma elevada MRR, mas valorizando uma baixa SR e um baixo DD, com uma reduzida TWR [3]. Pretendeu-se, com este estudo, quantificar estas premissas do fabricante, tendo em conta a tipologia geométrica das peças que a Moldetipo fabrica.

Neste estudo foram executados ensaios usando três grafites com granulometrias diferentes, a saber:

- ISEM-8, 8 μm de dimensão média de partículas;
- ISO-63, 5 μm de dimensão média de partículas;
- TTK-5, 4 μm de dimensão média de partículas.

Neste momento é utilizado na Moldetipo apenas a grafite de maior granulometria, a ISEM-8, sendo, apenas pontualmente, adquirido a ISO-63 para trabalhos com exigência de melhor acabamento superficial.

Visto que a grafite utilizada é o de maior granulometria, com uma elevada TWR, é habitual a maquinagem de um segundo e por vezes terceiro e quarto eléctrodos, de modo a compensar o desgaste ocorrido. Esta situação ocorre principalmente em geometrias de menor largura, grande comprimento e grande profundidade (habitualmente chamado de “Rib”). Grafites de menor granulometria garantem uma melhor precisão geométrica, melhor SR, sofrendo uma

menor TWR, de acordo com o fabricante, sendo, porventura, possível diminuir o número de eletrodos necessários para obter a mesma geometria [3].

O objetivo principal proposto neste estudo foi a quantificação dos diversos índices de performance:

- MRR (1ªEletroerosão, 2ªEletroerosão e Global);
- SR (Rugosidade Ra, Rugosidade Rz e Classificação SR);
- DD (Planeza, Classificação Planeza, Dimensão e Centro Geométrico);
- Custo do Total do Processo (CP_{tot}), Custo Específico do Processo (CEP);
- Índice de Performance Global (IPG).

Esta quantificação permite determinar a partir de que dimensão de cavidade erodida compensa a utilização de grafites de melhor qualidade, nomeadamente grafites de granulometrias menores.

As geometrias erodidas escolhidas para os ensaios foram o Rib (geometria de elevado rácio entre o comprimento e largura, com profundidades variáveis) e a CX (geometria cúbica para encaixe de postigos de moldação, balancés e elementos móveis existentes em moldes para injeção de polímeros). As geometrias escolhidas refletem a tipologia de geometrias mais comumente erodidas na empresa Moldetipo.

As profundidades de eletroerosão avaliadas são de 3, 6 e 12 mm. A profundidade 3 mm é realizada para efeitos de referência. É efetuada uma eletroerosão de cada geometria (Rib e CX) independentemente das dimensões atingidas. A profundidade de 3 mm é o limite empírico imposto pela Moldetipo para a obrigatoriedade de usar somente um eletrodo por eletroerosão. Para esta profundidade, normalmente não é ponderada a utilização de um segundo eletrodo, exceto para ribs de espessura inferior a 0,8 mm de espessura, sendo que a menor espessura das geometrias escolhidas é de 3 mm.

1.5.Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco capítulos.

No capítulo 1, Introdução, é efetuado o enquadramento do trabalho efetuado, a apresentação da empresa, apresentação da motivação e dos objetivos que se pretenderam alcançar com este trabalho.

No capítulo 2, Estado da Arte, é feita uma explanação teórica sobre o processo de eletroerosão, seus parâmetros de processo e índices de performance. Abordam-se os materiais que se podem utilizar na produção de elétrodos e alguns aspetos referentes ao seu desgaste.

O capítulo 3, Metodologia, consiste na apresentação da metodologia e procedimentos específicos adotados para a realização deste trabalho, onde é definida a metodologia de trabalho, materiais utilizados, a definição das geometrias e procedimento de produção das ferramentas de trabalho (elétrodos) e peça de trabalho (chapa-teste), metodologia de medição, parâmetros de eletroerosão e índices de performance específicos do trabalho presente.

No capítulo 4, Resultados e Discussão, são apresentados os resultados obtidos no estudo e é efetuada a sua análise e discussão.

As Conclusões e propostas de trabalho futuro são apresentadas no capítulo 5.

2. Estado da Arte

A maquinação por descarga elétrica (EDM do inglês – *Electrical discharge machining*) é um dos processos não convencionais de remoção de material de peças metálicas, de matriz metálica ou com cargas metálicas, mais usado pela indústria, principalmente pela indústria metalomecânica. Constitui uma das opções mais utilizadas pela indústria para maquinar materiais duros e frágeis que dificilmente seriam maquinados por processos convencionais.

A origem desta tecnologia remonta à descoberta em 1770, por parte do químico inglês Joseph Priestly, do poder erosivo de descargas elétricas ou faíscas. Foi apenas em 1943 que, por autoria de B. R. Lazarenko e N. I. Lazarenko da Universidade de Moscovo, foi investigado o poder destrutivo, dito eletroerosão, de descargas elétricas ou faíscas para uso na indústria transformadora. O sistema EDM de B. R. Lazarenko e N. I. Lazarenko usava uma fonte de energia do tipo resistivo-capacitivo que foi largamente usada nas máquinas de EDM na época de 1950 e posteriormente usada como base para vários desenvolvimentos da tecnologia EDM [2].

Simultaneamente o trabalho desenvolvido por três americanos (Harold Stark, Victor Harding, e Jack Beaver), onde usavam descargas elétricas para remover brocas e torneiras partidas de válvulas hidráulicas, serviu de base para a máquina EDM de tubo de vácuo e para o servo sistema de circuito eletrônico que fornece automaticamente o correto espaço entre o eletrodo e a peça de trabalho (Gap) que permite a descarga elétrica sem existir contato físico entre o eletrodo e a peça de trabalho.

Após os anos 80 do século passado, com a aplicação do controlo numérico por computador (CNC do inglês – *Computer Numerical Control*) em máquinas de EDM, a tecnologia EDM sofreu enormes melhorias em termos de eficiência, com a alimentação e movimentação automática e autónoma de eletrodos no processo [2].

2.1. Processo de EDM

Esta tecnologia consiste no uso de descargas elétricas provocando erosão na peça de trabalho, bem como na ferramenta. Uma ferramenta (eletrodo, geralmente o cátodo) é aproximada da peça de trabalho (geralmente o ânodo), sem nunca entrar em contato físico, com uma diferença de potencial (voltagem) criado por um gerador de corrente direta (DC)

(corrente direta pulsante a uma frequência de 20.000 a 30.000 Hz), resultando na criação de um campo eletrostático ionizado no dielétrico.

Na distância correta, existe uma descarga elétrica entre o eletrodo e a peça de trabalho. Para que a descarga ocorra de modo estável e o processo seja o mais eficiente e eficaz possível, é essencial que o eletrodo e a peça de trabalho estejam mergulhados num líquido isolante, como óleo ou líquido dielétrico. A eficiência do processo é maximizada se se incorporar um mecanismo de limpeza forçada dos detritos no espaço entre o eletrodo e a peça de trabalho. A descarga elétrica, que promove a ionização do dielétrico, provoca um aquecimento muito rápido e elevado da peça a maquinar (entre 8000 e 12000 °C podendo chegar a 20000 °C), ou seja, existe a transformação de energia elétrica em energia térmica.

A energia térmica provoca a fusão e vaporização (erosão) do material da peça de trabalho. Os resultados gasosos da fusão e evaporação bem como da ionização do dielétrico e das impurezas aquecem, formando uma bolha ou uma ponte de plasma. A bolha expande até colapsar, e aí a passagem de corrente elétrica cessa e o dielétrico entra no espaço lavando/eliminando os detritos alojados na zona do Gap. Em conjunto com a erosão da peça de trabalho, também existe a erosão (desgaste) do eletrodo.

Quando o material da ferramenta e da peça de trabalho são o mesmo material, o eletrodo positivo (ânodo) sofre erosão mais rapidamente, então a peça de trabalho geralmente é ligada ao polo positivo [2], [4].

A **Figura 2.1** exemplifica uma montagem tradicional de todos os componentes principais necessários ao processo de eletroerosão de penetração (SEDM) [4].

Existem várias variantes da tecnologia EDM usadas pela indústria transformadora (e.g. EDM por fio (WEDM), FR, micro-furação (μ EDM), EDM Ultrassónico (UEDM), entre outras), sendo o WEDM uma das variantes mais utilizadas. WEDM consiste na utilização de um fio de um diâmetro reduzido (em torno de 0.25 mm) para realizar cortes de geometrias “passantes”, ou seja, cortes de geometrias que atravessam a peça de trabalho de um lado ao outro, com precisão elevada e acabamento superficial de qualidade.

A **Figura 2.2** exemplifica a montagem standard para WEDM [4].

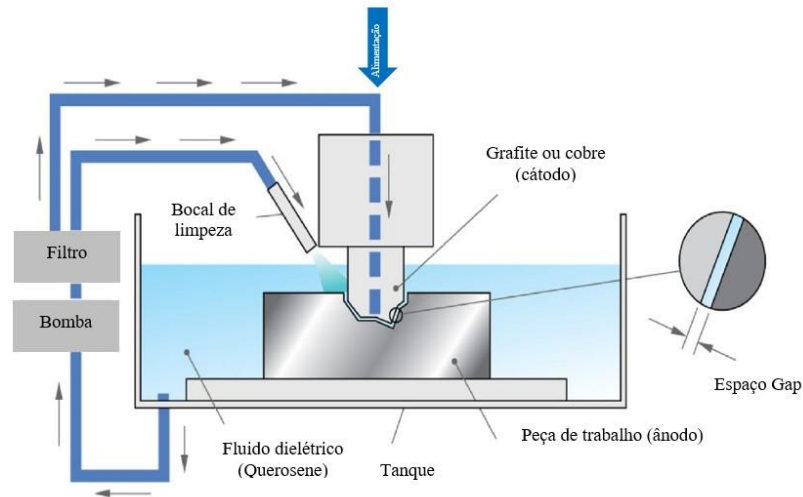


Figura 2.1 - Diagrama esquemático de EDM de penetração (Kumar S. e Gupta T., 2023) [4]

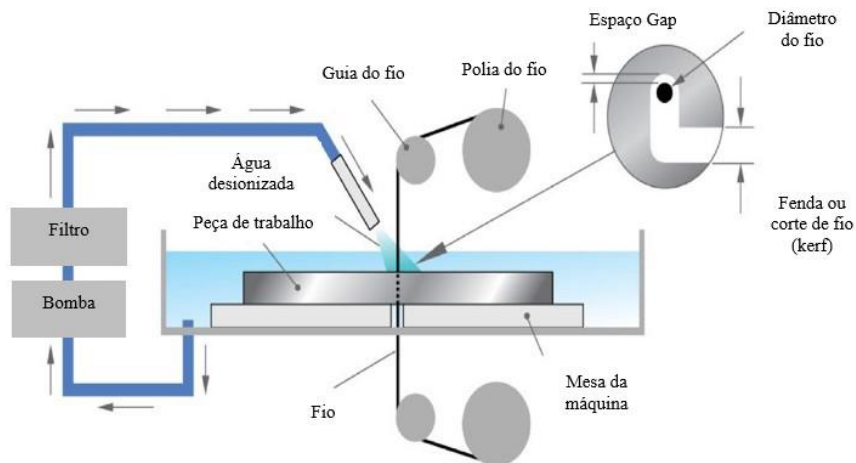


Figura 2.2 - Diagrama esquemático de EDM por fio (Kumar S. e Gupta T., 2023) [4]

O controlo do Gap é feito através do controlo da descarga elétrica, onde o sistema de controle aproxima o eletrodo da peça de trabalho à medida que a descarga deixa de existir, até um limite pré-determinado na programação do processo. A distância de Gap no momento que acontece a descarga depende de vários fatores e parâmetros, sendo os principais a diferença de potencial entre o eletrodo e a peça de trabalho (voltagem, também chamado de Servo ou Voltagem de servo) e as características e condições do dielétrico (e.g. ponto de ionização, viscosidade, constante dielétrica ou mesmo a concentração de impurezas metálicas existente no mesmo).

A geometria obtida depende da geometria do eletrodo sendo que ambos são o negativo um do outro. Esta tecnologia permite obter algumas geometrias que as tecnologias

convencionais de maquinagem não conseguem, seja a nível de Ribs de espessura reduzida (< 2 mm) e profundidade elevada (> 3 mm), seja a nível de definição geométrica como faces internas com raio de ligação inferior a 0,2 mm [1], [2], [4], [5].

2.1.1. Parâmetros influenciadores

Muitos são os parâmetros, fatores ou propriedades que influenciam o processo de EDM e sua performance, sejam eles elétricos, físicos, ambientais ou mecânicos [5], [6], [7], [8], [9].

Os principais parâmetros elétricos que influenciam o processo são [5], [6], [7], [8], [9]:

- Intensidade (I) – Indica os diferentes níveis de potência que podem ser obtidos do gerador. Cada nível tem um valor médio, em amperes, associado. Baixos pulsos energéticos fomentam o acabamento superficial de melhor qualidade (e.g. menor rugosidade R_a), enquanto elevados pulsos energéticos fomentam a MRR, e consequentemente a TWR.
- Tensão elétrica (U) – Indica os diferentes níveis de ionização no Gap. Tem um valor de diferença de potencial em volt associado. Valores elevados, até um certo nível, fomentam a MRR e consequentemente a TWR.
- Tempo de impulso ligado (T_{on}) – Representa o tempo, em microssegundos (variando entre 1 e 6500 μ segundos) em que o impulso elétrico está ligado. Parâmetro muito influenciador da MRR e da SR. Impulsos longos, até um certo ponto, aumentam a MRR, mas também provocam crateras de maior dimensão e consequentemente maior rugosidade.
- Tempo de pausa do impulso elétrico (T_{off}) – Representa o tempo, em microssegundos (variando entre 1 e 6500 μ segundos) em que o impulso elétrico está desligado. Uma pausa demasiado breve, em comparação ao T_{on} , pode induzir a formação de arco elétrico apesar de aumentar a MRR e uma pausa demasiado grande pode reduzir a MRR e aumentar a TWR.
- Servo – Parâmetro de referência em volt para o servo de eletroerosão. Permite que o sistema servo da máquina controle a distância entre o eletrodo e a peça de trabalho em que ocorre as descargas elétricas. Este valor depende do ponto de ionização específico do dielétrico utilizado. Para um mesmo Gap, quanto maior for o ponto de ionização do dielétrico maior terá de ser a voltagem do Servo.

- Polaridade – entre os mesmos materiais, no eletrodo e na peça de trabalho, geralmente é o ânodo que sofre o maior desgaste/erosão. Por esta razão, normalmente, a peça de trabalho é ligada ao ânodo (polo positivo) do sistema.

Os principais parâmetros físicos influenciadores do processo são [5], [6], [7], [8].:

- Propriedades físicas da peça de trabalho – o ponto de fusão, a resistência elétrica e a condutividade térmica são de grande importância. A baixa condutividade térmica favorece a MRR, mas prejudica a SR.
- Propriedades físicas do eletrodo – Um ponto de fusão elevado, resistência elétrica baixa e condutividade térmica elevada no eletrodo fomenta uma baixa TWR consequentemente uma boa definição geométrica de pormenor na peça de trabalho.
- Propriedades físicas do dielétrico – a viscosidade, ponto de ionização e o ponto de inflamação estão entre as propriedades mais importantes e influenciadoras do processo.

Fatores ambientais:

- Temperatura do dielétrico ou mesmo o nível de concentração e tipologia das impurezas presentes no dielétrico são de elevada importância para a eficiência do processo.

Os principais parâmetros mecânicos influenciadores do processo são [5], [6], [7], [8].:

- Tempo de retrocesso – tempo de retorno, em segundos, do eletrodo da zona de Gap, para limpeza e arrefecimento de componentes, por entrada e circulação de dielétrico. Um menor tempo de retrocesso impõe uma maior turbulência na entrada e saída do dielétrico, visto que a distância de retrocesso, geralmente, é constante. Ou seja, a velocidade de retrocesso aumenta, não podendo, no entanto, ser demasiado elevada com o risco de danificar o eletrodo quando este tem geometrias frágeis (e.g. Ribs de espessura reduzida).
- Tempo de trabalho – tempo efetivo em zona de descarga elétrica, em segundos. Um ligeiro aumento equivale a uma MRR superior sendo que progressivos aumentos leva a uma diminuição da mesma.

- Velocidade do líquido da limpeza forçada (jato de limpeza) – uma limpeza forçada ajuda na limpeza dos detritos na zona de Gap o que influencia a MRR e diminui a SR. Uma eficaz limpeza de detritos é essencial para a eficiência do processo.
- Estratégia de maquinagem – a escolha da tipologia de movimentos do eletrodo influencia a definição geométrica e dimensional obtida. Movimento ascendente alternativo é de elevada importância para a eliminação do material erodido (detritos). Orbitas esféricas na aproximação da cota final de eletroerosão, para compensação da redução volumétrica dada ao eletrodo na fabricação. Redução existente para facilitar ou mesmo possibilitar a circulação de dielétrico no Gap, evitando a prisão de detritos e consequente dano na geometria eletroerodida. Uma redução volumétrica maior permite um conjunto de parâmetros do processo maximizadores da MRR sem comprometer o DD, parâmetros esses que comportam uma distância de faísca (distância de Gap a que ocorre a descarga elétrica entre o eletrodo e a peça de trabalho) maior.

2.1.2. Índices de performance

Para a análise de qualquer tecnologia ou processo de fabricação é necessário a análise de uma série de indicadores, os índices de performance. Estes índices são reveladores dos resultados obtidos bem como da eficiência do processo. A análise do processo de EDM, de igual modo, faz uso destes índices para analisar o processo de eletroerosão.

Harris et al. [8], na sua investigação sobre o processo de EDM em ligas com memória de forma, faz uso dos índices de performance MRR (ver Eq. (2.1)), SR (Rugosidade Ra somente) (ver **Figura 2.3**) e TWR (ver Eq. (2.2)), para avaliação e caracterização do processo.

A MRR é calculada considerando a massa da peça de trabalho antes e depois do processo, de acordo com a Eq. (2.1).

$$MRR = \frac{m_{PT_A} - m_{PT_D}}{d_{PT}} = \frac{Vol}{t} \quad (2.1)$$

Onde:

- MRR = Taxa de remoção de material $\left[\frac{mm^3}{min}\right]$;
- m_{PT_A} = Massa da peça de trabalho antes do processo [g];
- m_{PT_D} = Massa da peça de trabalho depois do processo [g];

- dPT = Densidade da peça de trabalho [$\frac{g}{mm^3}$];
- t = tempo do processo [min];
- Vol = volume de material erodido [mm^3].

Tipicamente, por descarga elétrica, 10^{-6} a $10^{-4} mm^3$ de material é removido onde geralmente a MRR apresenta valores entre 2 e $400 mm^3/min$ [4].

A SR incorpora vários parâmetros que se podem observar. Dois dos mais importantes são a Rugosidade R_a e a Rugosidade R_z .

De acordo com a norma EN ISO 4287, Rugosidade R_a [μm] é a média aritmética dos valores absolutos dos desvios dos picos e vales do perfil de rugosidade em relação à linha média do mesmo perfil [10] (ver **Figura 2.3**).

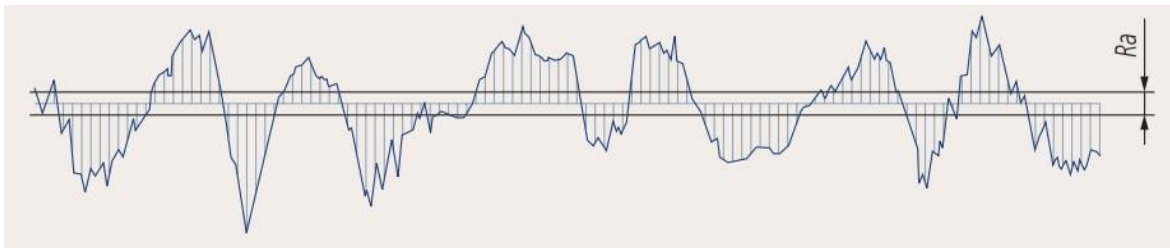


Figura 2.3 - Média aritmética da Rugosidade R_a do perfil de rugosidade [10]

De acordo com a norma EN ISO 4287, Rugosidade R_z [μm] é a média das amplitudes máximas entre o pico e o vale máximo de cada um dos 5 trechos de medição, considerados na extensão total L_t de medição do perfil de rugosidade. Os 5 trechos têm de extensão individual 0,8 mm e estão em posição central na L_t . A L_t tem de extensão máxima 4,8 mm [10] (ver **Figura 2.4**).

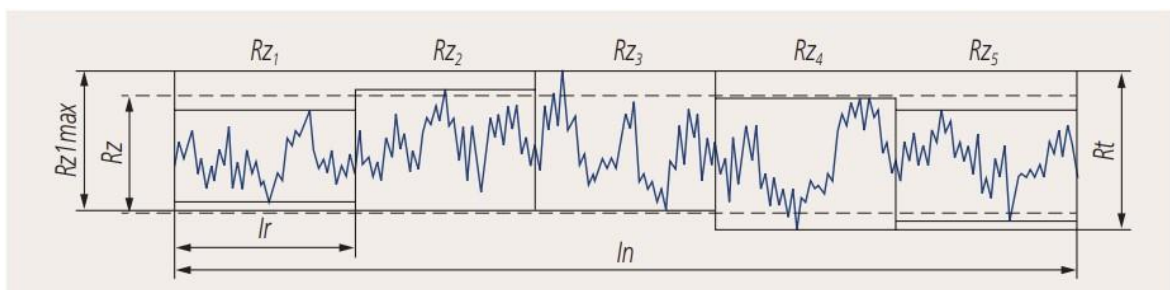


Figura 2.4 - Média das amplitudes máximas da Rugosidade R_z nos trechos R_{zi} [10]

A TWR é calculada tendo em conta a massa do eletrodo antes e depois da eletroerosão, de acordo com a Eq. (2.2).

$$TWR = \frac{TW}{t} = \frac{\frac{mE_A - mE_D}{dE}}{t} = \frac{mE_A - mE_D}{dE * t} \quad (2.2)$$

Onde:

- TWR = Taxa de desgaste da ferramenta $[\frac{mm^3}{min}]$;
- mE_A = Massa do eléctrodo antes do processo $[g]$;
- mE_D = Massa do eléctrodo depois do processo $[g]$;
- dE = Densidade do eléctrodo $[\frac{g}{mm^3}]$;
- t = tempo do processo em minutos.

Harane et al. [5], na sua investigação sobre o efeito de diferentes ferramentas/eléctrodos na furação de Waspaloy (superliga de níquel), analisa os índices de performance MRR, SR e o rácio de desgaste da ferramenta (TWR do inglês – *Tool Wear Ratio*) (ver Eq. (2.3)).

A TWR é determinada pelo rácio entre o volume de material erodido do eléctrodo e o volume de material erodido da peça de trabalho conforme a Eq. (2.3). Esses volumes são calculados a partir da massa dos componentes antes e depois do processo de eletroerosão.

$$TWR = \frac{V_E}{V_{PT}} = \frac{\frac{mE_A - mE_D}{dE}}{\frac{mPT_A - mPT_D}{dPT}} = \frac{(mE_A - mE_D) X dPT}{(mPT_A - mPT_D) X dE} \quad (2.3)$$

Onde:

- TWR = Rácio de desgaste da ferramenta $[adimensional]$;
- V_E = Volume de material erodido do eléctrodo $[mm^3]$;
- V_{PT} = Volume de material erodido da peça de trabalho $[mm^3]$;
- mE_A = Massa do eléctrodo antes do processo $[g]$;
- mE_D = Massa do eléctrodo depois do processo $[g]$;
- dE = Densidade do eléctrodo $[\frac{g}{mm^3}]$;
- mPT_A = Massa da peça de trabalho antes do processo $[g]$;
- mPT_D = Massa da peça de trabalho depois do processo $[g]$;
- dPT = Densidade da peça de trabalho $[\frac{g}{mm^3}]$.

Li W. e Kara S. [11] na sua investigação sobre a caracterização da eficiência energética no processo de EDM utiliza os índices MRR e consumo energético específico (SEC do inglês

– *Specific Energy Consumption*), para quantificar a eficiência energética do processo (ver Eq. (2.4)).

A SEC é calculada tendo em conta a energia consumida no processo e o volume de material erodido como representado na Eq. (2.4).

$$SEC = \frac{E}{V} = \frac{I * U * T_{on}}{\frac{m_{PT_A} - m_{PT_D}}{dPT}} \quad (2.4)$$

Onde:

- SEC = Consumo específico de energia [$\frac{J}{mm^3}$];
- E = Energia consumida [J];
- V = Volume de material erodido [mm^3];
- I = Corrente [A];
- U = Tensão [V];
- T_{on} = Tempo de impulso ligado [μ seg];
- m_{PT_A} = Massa da peça de trabalho antes do processo [g];
- m_{PT_D} = Massa da peça de trabalho depois do processo [g];
- dPT = Densidade da peça de trabalho [$\frac{g}{mm^3}$];

Ishfaq et al. [7], na sua investigação sobre fluidos dielétricos, analisa a MRR, a SR, o T_{WR} , o SEC e o desvio dimensional percentual da geometria erodida (Dd% - do inglês *Percentual Dimensional Deviation*) (ver Eq. (2.5)), de forma a tirar relações sobre as vantagens e desvantagens na utilização de dielétricos biodegradáveis.

O Dd% é calculado tendo em conta o volume da cavidade efetivamente obtida após eletroerosão e o volume da cavidade definido em projeto, de acordo com a Eq. (2.5).

$$Dd\% = \frac{D_{obt} - D_{def}}{D_{def}} * 100 \quad (2.5)$$

Onde:

- Dd% = Desvio dimensional percentual [%];
- D_{obt} = Volume dimensional obtido [mm^3];
- D_{def} = Volume dimensional definido em projeto [mm^3].

Ishfaq et al. calcula o volume da cavidade através da medição de pontos discretos ao longo do eletrodo (espelho da cavidade eletroerodida), usando uma máquina de medição por coordenadas (CMM – do inglês *Coordinate Measuring Machine*). Ishfaq et al. usa a média dos desvios dos pontos medidos, que incorpora nos seus cálculos [7].

2.1. Materiais

Em qualquer processo produtivo, as propriedades físicas e mecânicas do material da peça de trabalho, da ferramenta de fabrico e do meio envolvente (neste caso o dielétrico) (e.g. ponto de fusão, resistência elétrica, condutividade térmica entre outras) são de grande importância. O processo de EDM não é exceção.

2.1.1. Peça de trabalho

Para que o processo de EDM se possa realizar, o material da peça de trabalho tem de ser condutor de eletricidade. A dureza da peça não é impedimento para o sucesso do processo. Algumas propriedades do material, no entanto, têm influência no processo, tais como, condutividade térmica, ponto de fusão e resistência elétrica [4].

Os primeiros materiais onde foi aplicado o processo de EDM foram materiais metálicos condutores de eletricidade. Com o aumento da investigação na eletroerosão apareceram novos materiais onde é possível usar a eletroerosão. Materiais compósitos de matriz metálica ou de matriz polimérica com cargas metálicas, cerâmicas com cargas metálicas estão entre os mais recentes [2], [12].

Jha et al. [13] afirma que, para ligas metálicas, de ponto de fusão baixo, eletrodos metálicos devem ser utilizados, enquanto para ligas metálicas de elevado ponto de fusão o eletrodo em grafite apresenta melhores resultados.

2.1.2. Ferramenta/Eletrodo

Vários materiais podem ser usados como ferramenta/eletrodo no processo de EDM. Tendo a obrigatoriedade de serem condutores de eletricidade, serão tão mais eficientes quanto maior for a sua condutividade elétrica. Um elevado ponto de fusão e uma boa condutividade térmica no eletrodo diminui a TWR, melhorando a definição geométrica obtida [7], [14].

Os materiais/ligas mais frequentemente usados são: cobre, carbono (grafite), alumínio, latão (liga de cobre e zinco), bronze, cobre-tungsténio, tungsténio ou carboneto de tungsténio[5],

[13]. Ishfaq et al. [7] usou, no seu estudo comparativo de dielétricos, elétrodos de alumínio, latão, cobre e grafite onde identificou a influência do material dos diferentes elétrodos em combinação com sete diferentes tipos de dielétrico (seis deles biodegradáveis) no processo EDM. Harane et al. [5] usou elétrodos de cobre, latão e grafite para determinar a sua influência na furação por EDM da liga Waspaloy.

O processo de produção de elétrodos é um aspeto importante a ter em conta no processo de EDM. Elétrodos metálicos são obtidos por fusão e vazamento de minério para obtenção do lingote metálico que posteriormente sofre vários processos de transformação, entre eles a maquinagem por arranque de apara, normalmente recorrendo a um centro de maquinagem CNC. Metais de maior dureza (e.g. tungsténio) em comparação com metais de menor dureza (e.g. cobre) são mais difíceis de maquinar, necessitando ferramentas específicas, encarecendo a produção do eléctrodo final.

Um metal de maior dureza torna difícil ou mesmo impossível a reprodução de pormenores de reduzida dimensão. Para contrapor esta dificuldade a grafite é muito usada. Na sua grande maioria a grafite é obtida recorrendo à tecnologia de pulverometalurgia. A grafite, devido ao seu elevado ponto de fusão, possui uma baixa taxa de desgaste no processo de EDM, sendo que não funde, simplesmente sofre sublimação, passando do estado sólido diretamente para o estado gasoso. Contrariamente, o cobre, um outro material muito usado na eletroerosão, com uma baixa temperatura de fusão, sofre um desgaste prematuro. Em média a grafite é três vezes mais cara do que o cobre, mas tem melhor maquinabilidade, especialmente na reprodução de pormenores finos. A grafite tem propriedades mecânicas, principalmente a sua resistência, significativamente mais baixas do que os outros materiais metálicos, nomeadamente dureza ou a rigidez. No entanto, como o processo EDM envolve forças relativamente baixas, essas diferenças não são significativas para o processo. Devido a estas razões, a grafite é usada na maioria dos processos de EDM na indústria metalomecânica, havendo poucas situações onde não é viável o seu uso. Uma dessas situações é a maquinação de roscas finas, onde é difícil maquinar os filetes da rosca na grafite devido à sua fragilidade. Em elétrodos para roscas é necessário usar um material metálico como o cobre [13], [14].

Algumas propriedades físicas e mecânicas das ferramentas/elétrodos são relevantes para o processo de EDM, tais como [13], [14]:

- Granulometria (tamanho médio das partículas constituintes) – uma granulometria baixa garante melhores propriedades mecânicas da grafite. De acordo com o tamanho

médio de partículas, a grafite é classificada em angstrofino ($< 1 \mu\text{m}$), ultrafino (1 a 5 μm), superfino (6 a 10 μm), fino (11 a 20 μm) e médio (21 a 100 μm);

- Densidade – Uma grafite de elevada densidade tende a ser mais dura e resistente ao corte, causando maior desgaste nas ferramentas de corte.
- Dureza – intimamente ligada à granulometria (granulometria elevada, dureza reduzida), assume especial importância, pois quanto menor for a dureza, mais fácil será a sua maquinagem, com menor desgaste de ferramentas e conseqüentemente menor será o seu custo de produção;
- Resistência à flexão – geralmente, quanto menor for a granulometria, maior será a resistência à flexão da grafite. Este facto assume especial importância perante as forças provocadas pelo movimento do dielétrico (em eléctrodos de paredes finas e compridas) e manuseamento de forma inadequada, reduzindo a incidência de danos. Eléctrodos metálicos têm uma resistência à flexão superior à grafite, não constituindo problema para o eléctrodo as forças provocadas pelo movimento do dielétrico.
- Maquinabilidade – Em relação ao cobre (um dos materiais mais usados no processo de EDM), ou mesmo de outros eléctrodos metálicos, a grafite possui uma maquinabilidade superior, sendo possível reproduzir pormenores de forma mais precisa, contudo com algumas exceções (e.g. roscas finas, devido à sua fragilidade). Uma outra vantagem da grafite em relação ao cobre ou mesmo outros ligas metálicas, é a não produção de rebarbas aquando da sua maquinagem. Não sendo necessário a remoção de rebarbas, o custo de fabricação é menor.

A elevada temperatura do processo EDM a que o eléctrodo está sujeito, provoca um desgaste que pode ser prematuro. A escolha acertada de parâmetros de processo minimiza o desgaste. Um desses parâmetros é a polaridade que, normalmente, é negativa (cátodo) no eléctrodo para evitar o desgaste superior que ocorre quando é bombardeado por electrões em vez de catiões (iões positivos) [14].

Jha B. et al. [13] classificam o desgaste do eléctrodo em quatro tipos:

- Volumétrico;
- Canto (é o desgaste de maior intensidade, tendo a maior influência na geometria erodida);
- Final (Extremidade de ataque do eléctrodo);
- Lateral.

A **Figura 2.5** mostra os diferentes tipos de desgaste nos elétrodos no processo de EDM de acordo com a classificação efetuada por Jha B. et al. [13].

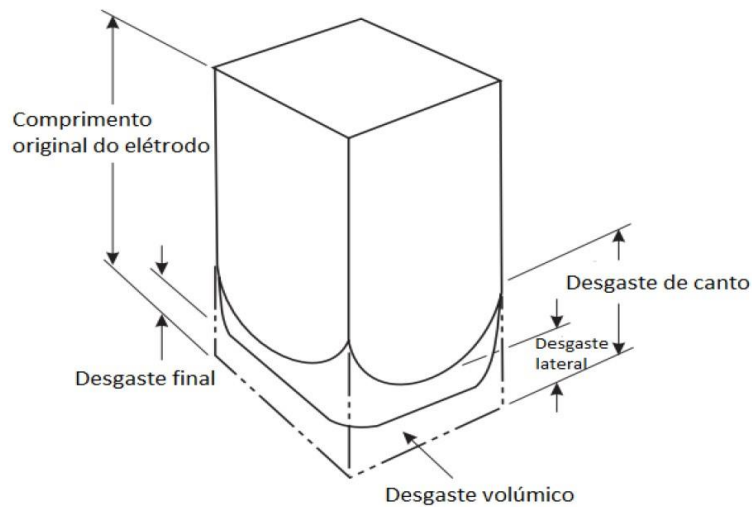


Figura 2.5 - Quatro tipos de desgaste nos elétrodos no processo de EDM [15]

2.1.3. Dielétrico

O fluido dielétrico tem como principais funções, no processo de EDM, as funções de isolante elétrico (exceto sob as condições concretas quando passa a ser o meio de criação de um canal de plasma ionizado no espaço Gap), estabilizador da descarga elétrica, arrefecimento do eletrodo e peça de trabalho e, principalmente, limpeza de detritos (material fundido da peça de trabalho e do eletrodo) do espaço de Gap [7], [14].

Os fluídos dielétricos mais usados são o querosene, óleo de querosene com mistura de pós e hidrocarbonetos diversos, e água desionizada. É possível usar também óleos vegetais (e.g. óleo de mostarda, azeite, óleo de girassol ou mesmo óleo de coco, entre outros) como Ishfaq et al. refere na sua investigação sobre dielétricos biodegradáveis, provando que na maquinagem de Inconel 600 (superliga de níquel) existe um aumento da MRR com o uso destes óleos vegetais biodegradáveis. Água desionizada é o fluido dielétrico normalmente usado nas variantes WEDM e FR [7], [14].

3. Metodologia

Os parâmetros do processo usados na eletroerosão de todas as geometrias foram os parâmetros standard usados habitualmente pela Moldetipo, independentemente do tipo de grafite utilizado. Todos os parâmetros foram os mesmos para todos os ensaios realizados, sendo que não são, necessariamente, os parâmetros otimizados para cada conjunto de condições de cada ensaio. Foi tomada a opção de realizar todas as eletroerosões com o mesmo conjunto de parâmetros devido à dificuldade logística e financeira de realizar eletroerosões com o mesmo conjunto de parâmetros para grupo de controlo e depois realizar as mesmas eletroerosões, mas com parâmetros otimizados para cada conjunto de condições.

Os ensaios realizados contemplam duas geometrias representativas da tipologia de geometrias realizadas no processo de EDM na Moldetipo: o Rib (geometria poliédrica quadrática onde o comprimento é maior do que a largura) e a CX (geometria cúbica). Ambas as geometrias foram realizadas com três profundidades distintas (3, 6 e 12 mm). As geometrias não têm furos passantes, ou seja, são geometrias com confinamento lateral e horizontal (inferior). O Rib constitui uma exceção, tendo confinamento no fundo (confinamento horizontal inferior) e em três laterais verticais apenas (confinamento lateral vertical parcial). O confinamento lateral vertical parcial tem como vantagem a melhor limpeza de detritos, que ocorre com a melhor circulação do dielétrico.

A escolha da geometria Rib prendeu-se com a necessidade de averiguar o sucesso geométrico e dimensional deste tipo de geometria. Um Rib é incluído na peça, normalmente, como forma de reforço estrutural da peça de plástico, para que não haja flexão e/ou rutura da peça em serviço. É necessário averiguar se a espessura do Rib, obtida após eletroerosão, está dentro da tolerância indicada pelos testes de esforço realizados na peça (ou seja, o desvio dimensional), caso contrário pode haver rutura do elemento de reforço Rib. Outro aspeto a ter em conta é a rugosidade superficial da peça. Por esta razão, neste trabalho é controlada a rugosidade das faces erodidas do Rib.

A escolha da geometria CX prendeu-se com a necessidade de controlar o desvio dimensional bem como da posição relativa do seu centro geométrico, sendo de elevada importância a planeza do fundo da caixa bem como das outras faces. As geometrias CX erodidas pelo departamento de eletroerosão da Moldetipo, na sua maioria tem como finalidade o encaixe de um postigo, balancé ou elemento móvel. Postigos, normalmente, representam geometrias

da zona moldante (zona que molda o polímero injetado) com pormenores finos. O deficiente encaixe do postigo, balancé ou elemento móvel pode comprometer a perfeição da superfície da peça injetada, seja pela existência de rebarbas ou por marcas indesejadas. A exatidão do posicionamento destes componentes é essencial pois, normalmente, representam geometrias de pequenos pormenores pertencentes à peça. A variação da posição do centro geométrico da CX é controlada neste trabalho.

Algumas das eletroerosões deste estudo foram repetidas, para melhor representação estatística, tais como a eletroerosão da grafite de maior granulometria na profundidade 3 mm, que foi repetida três vezes, ou a eletroerosão da grafite de menor granulometria, repetida duas vezes.

Por motivos logísticos e financeiros não foi possível proceder às repetições necessárias para validar estatisticamente alguns dos resultados, sendo alguns resultados apenas indicativos. Estas eletroerosões em falta remetem-se para um futuro trabalho.

Na estratégia de maquinagem foram programadas órbitas circulares descendentes e movimento alternado vertical como forma de melhorar o efeito de limpeza/eliminação de detritos. Com esta estratégia também é possível controlar melhor o arrefecimento da ferramenta/eléctrodo e peça de trabalho, a compensação da redução volumétrica dada ao eléctrodo na fabricação e a compensação do desgaste do eléctrodo. Neste estudo não foi usado fluxo direccionado de dieléctrico para limpeza.

Houve um esforço para que as fresas utilizadas na maquinagem dos eléctrodos fossem novas ou com um mínimo tempo de uso para minimizar a sua influência no processo. Os parâmetros de maquinagem foram iguais em todos os eléctrodos, dentro da mesma geometria, independentemente da grafite utilizada, não havendo diferença considerável entre maquinagens de grafites diferentes. Não foi abordado profundamente o processo de maquinagem dos eléctrodos, visto não ser esse o objetivo do trabalho presente.

3.1.Planeamento dos trabalhos

Com a intenção de otimizar os recursos, é imperativo um planeamento das tarefas minucioso e realista. Um planeamento temporal e financeiro permite o foco correto e atempado dos esforços empreendidos, bem como o não desperdício de tempo e dinheiro. Um fluxograma do processo de EDM na Moldetipo é disponibilizado na **Figura 3.1**.

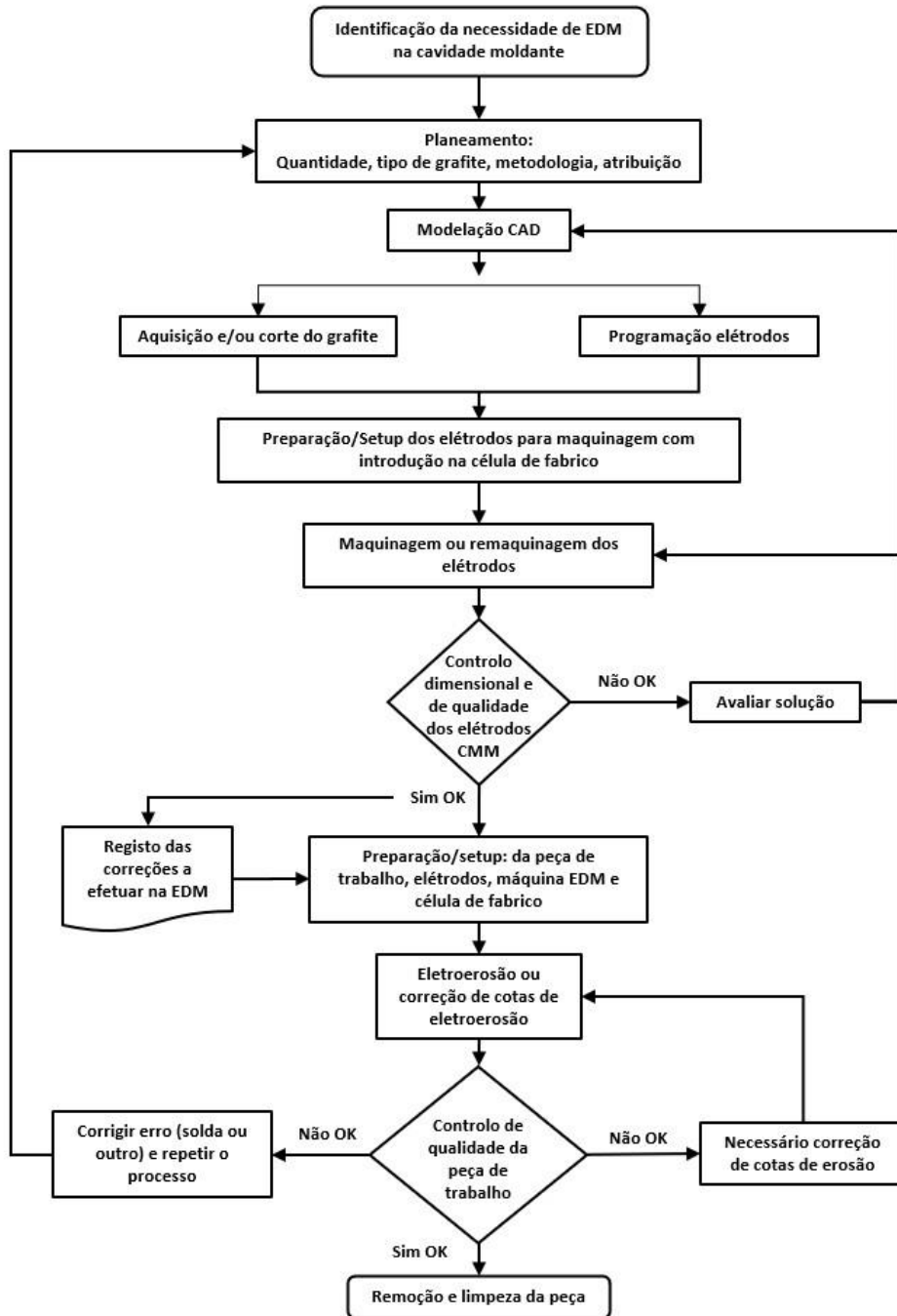


Figura 3.1 - Fluxograma do processo de EDM

3.2. Materiais utilizados

Um material utilizado frequentemente na produção de cavidades moldantes na indústria dos moldes é o aço W.Nr.1.2343, o qual foi utilizado nas chapas-teste deste trabalho. Este aço é fornecido no estado recozido com uma dureza de 185 HB e uma densidade de $7,85 \text{ g/cm}^3$.

A **Tabela 3.1** resume algumas das principais características deste aço [16]. Para a análise completa de todas as características técnicas deste aço consultar o **Anexo A**.

Tabela 3.1 - Principais características do aço W.Nr.1.2343 [16]

Material	W.Nr.1.2343					
Composição	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,38	1,00	0,40	5,00	1,30	0,40
Estado de fornecimento	Recozido					
Dureza	185 HB					
Condutibilidade térmica a 600 °C	30 W/m.K					

O presente trabalho investiga a prestação de três tipos de elétrodos de grafite com granulometrias diferentes: a ISEM-8 (grafite de referência), a ISO-63 e a TTK-5 (Grafites com dimensão média de partículas de 8, 5 e 4 μm respectivamente). As grafites em estudo são produzidas com recurso à tecnologia de pulverometalurgia [17]. A **Tabela 3.2** fornece as principais características técnicas das grafites testadas [18]. Para uma informação mais completa sobre as grafites em questão, consultar o **Anexo B**.

Tabela 3.2 - Tipos de grafite. Principais características técnicas [18]

Tipo	Tamanho de grão	Densidade	Dureza	Resistência elétrica	Tensão de flexão	Tensão de compressão	Tensão de cedência	Módulo de elasticidade (Módulo de Young)	Coefficiente de expansão térmico	Condutividade térmica
	[μm]	[g/cm^3]	[HSD]	[$\mu\Omega \cdot \text{m}$]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[$10^{-6}\text{m}/\text{K}$]	[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]
ISEM-8	8	1,78	63	13,4	52	106	34	10,1	5,6	90
ISO-63	5	1,78	76	15,0	65	135	46	12,0	5,6	70
TTK-5	4	1,78	80	15,5	80	150	53	11,6	5,7	80

Este estudo utiliza como fluido dielétrico, o hidrocarboneto de baixa viscosidade EDM Fluid 108 MP-SE. As suas principais características técnicas são: um ponto de inflamação de 106 °C, tensão de vapor de 0,04 hPa a 20 °C, densidade relativa de 0,767 kg/l a 15 °C e uma viscosidade de 3 cSt a 20 °C [19]. Para mais informações técnicas ver **Anexo C**.

3.3. Geometrias

3.3.1. Peça de trabalho (chapa-teste)

Recorrendo ao software de CAD/CAM CIMATRON (do inglês *Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing CIMATRON*), foram modeladas 27 chapas-teste, cada uma delas comportando 2 eletroerosões, uma de cada tipo de geometria (Rib e CX), de cada combinação grafite-profundidade de eletroerosão (e.g. chapa-teste número 1 para

grafite TTK-5, geometrias Rib e CX, a 12 mm de profundidade de eletroerosão – nomenclatura identificativa “C1T5H12”).

As dimensões da chapa-teste são 76x76x13 mm, sendo as mesmas para todas as 27 chapas-teste. As chapas-teste foram fixadas, individualmente, a uma base de um sistema normalizado de fixação do fabricante Erowa, que pode ser vista a azul na **Figura 3.2 a)**. A **Figura 3.2 a)**, a castanho (chapa superior), representa a chapa-teste modelada, com as geometrias Rib e CX a 3 mm de profundidade. As profundidades variam em três valores: 3, 6 e 12 mm. Para mais especificações consultar os desenhos técnicos **Anexo D**, para 3 mm de profundidade, **Anexo E**, para 6 mm, e **Anexo F** para 12 mm. A **Figura 3.2 b)** mostra a chapa-teste após fabricação, mas antes da eletroerosão.

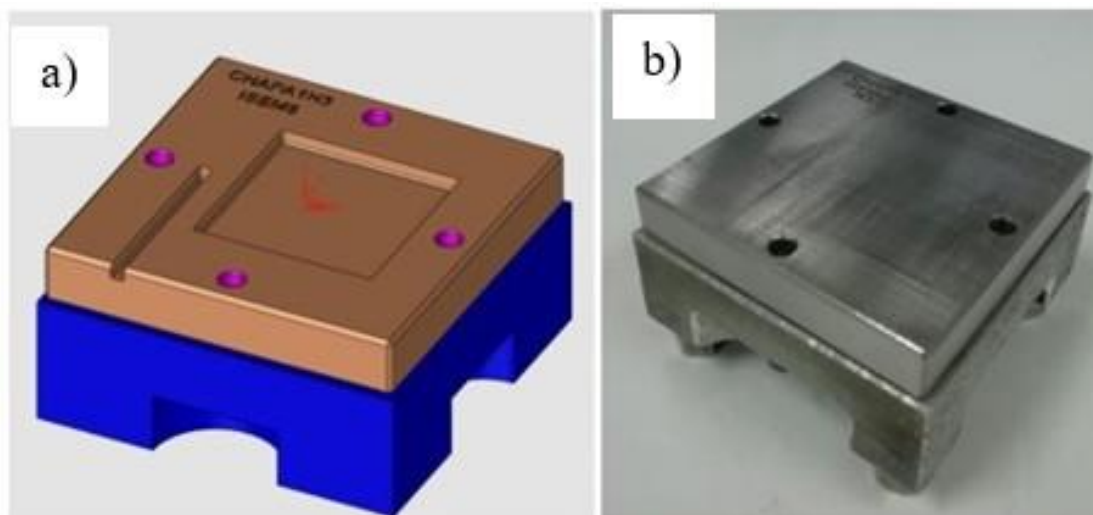


Figura 3.2 - a) CAD chapa-teste a castanho e da base do sistema de fixação Erowa a azul; b) chapa-teste fabricada, montada em base Erowa, antes da eletroerosão.

A **Tabela 3.3** apresenta a quantidade de chapas-teste que foram fabricadas para cada combinação grafite/profundidade de eletroerosão prevista.

Tabela 3.3 - Descrição da quantidade de peças de trabalho (chapas-teste)

Dimensões da chapa	Tipo de grafite	Profundidade de eletroerosão	Quantidade
76x76x13 mm	ISEM-8	3 mm	3 unidades
76x76x13 mm	ISEM-8	6 mm	3 unidades
76x76x13 mm	ISEM-8	12 mm	3 unidades
76x76x13 mm	ISO-63	3 mm	3 unidades
76x76x13 mm	ISO-63	6 mm	3 unidades
76x76x13 mm	ISO-63	12 mm	3 unidades
76x76x13 mm	TTK-5	3 mm	3 unidades
76x76x13 mm	TTK-5	6 mm	3 unidades
76x76x13 mm	TTK-5	12 mm	3 unidades

Para a produção da chapa-teste foram usados os processos de corte por serrote de fita, fresagem de desbaste (galgamento), furação, escariamento por fresadora convencional, criação de chanfros por máquina de chanfrar fixa, roscagem por roscadora de braço articulado, retificação por retificadora tangencial e marcação por laser. O controle dimensional foi realizado recorrendo a micrómetros, graminhos e paquímetros, tendo-se atingido as cotas modeladas dentro da tolerância de $\pm 0,02$ mm. A variação dimensional dentro da tolerância de $\pm 0,02$ mm, foi considerado como não influenciadora do processo. O protocolo de centragem da chapa-teste, na máquina EDM, foi elaborado para anular qualquer influência da variação dimensional das chapas-teste que tivesse resultado do seu fabrico.

3.3.2. Eléctrodo-Rib

O Eléctrodo-Rib representa uma geometria poliédrica quadrática de dimensões 42x3x15 mm. As faces verticais têm uma inclinação (saída) de 1° , medida desde a extremidade do Eléctrodo-Rib em direcção ao exterior (sentido geometria de referência) do eléctrodo. As arestas são boleadas com raio de 0,2 mm. As dimensões do Rib foram projetadas de modo a serem representativas das dimensões da geometria Rib standard utilizadas pela Moldetipo nas cavidades moldantes. É incluída uma geometria de referência (também chamada de mestra) de dimensões 50x18x5 mm permitindo o seu controlo dimensional e referencial recorrendo a uma máquina de medição por coordenadas (CMM). A **Figura 3.3 a)** mostra o CAD-3D (CAD-3Dimensões) do Eléctrodo-Rib que foi modelado. A **Figura 3.3 b)** ilustra o eléctrodo obtido com o parafuso de centragem do sistema de fixação Erowa. Para mais especificações consultar o desenho técnico no **Anexo G**. As fases de produção do Eléctrodo-Rib foram: modelação, programação, preparação (setup), maquinagem e controlo dimensional/referencial. Recorreu-se a um centro de maquinagem CNC do fabricante Fanuc (ver **Figura 3.3 c)**) para maquinagem do eléctrodo. Foi usada uma fresa de topo raso de 16 mm de diâmetro e uma fresa de topo esférico de 4 mm de diâmetro para o desbaste inicial, com acabamento feito recorrendo a uma fresa topo raso de 4 mm de diâmetro. Para maior detalhe sobre a estratégia de maquinagem CNC do Eléctrodo-Rib consultar o **Anexo H**.

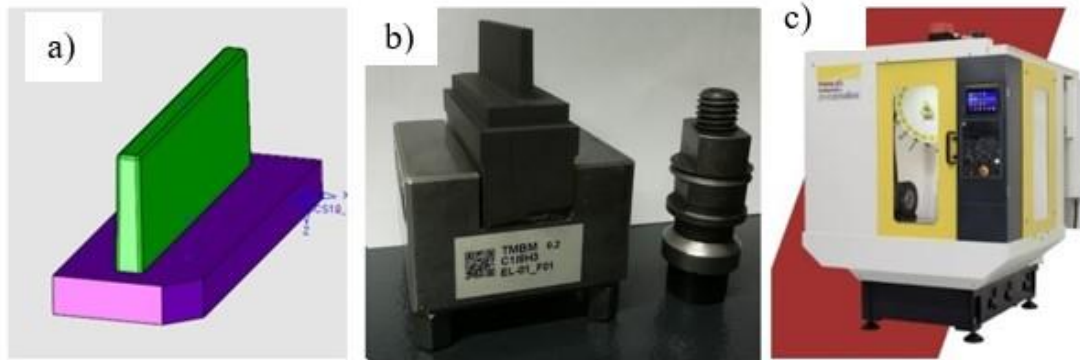


Figura 3.3 – a) CAD do Eléctrodo-Rib; b) Eléctrodo-rib; c) Centro de maquinagem CNC Fanuc

3.3.2.1. Preparação (setup) do Eléctrodo-Rib no processo de EDM

O controlo dimensional e referencial do Eléctrodo-Rib foi realizado de modo a poder efetuar as necessárias correções no posicionamento do eléctrodo no momento da eletroerosão. A **Figura 3.4** representa a medição efetuada pela máquina CMM da geometria de referência do Eléctrodo-Rib de grafite ISEM-8 de profundidade de eletroerosão 3 mm. Neste caso obteve-se valores que impuseram a obrigatoriedade de correção de +0,0014 mm no eixo X, -0,0021 mm no eixo Y, +54,7486 mm no eixo Z (base + geometria de referência - Gap) e +0,0104 mm no eixo C (rotação em torno do eixo Z – regra da mão direita) na posição de eletroerosão. A **Tabela 3.4** identifica todas as correções de todos os Eléctrodos-Rib existentes.



Figura 3.4 - Medição da geometria de referência do Eléctrodo-Rib

Tabela 3.4 - Correções, na posição de eletroerosão, do Eléctrodo-Rib [mm]

Correções Eléctrodo Rib 1º EL01-F01					
Chapa	X	Y	Z	C	GAP MEDIDO
C118H3	0,0014	-0,0021	54,7486	0,0104	0,1964
C218H3	0,0014	0,0012	54,7460	0,0125	0,1968
C318H3	-0,0027	0,0022	54,7479	0,0065	0,1967
C1163H3	-0,0115	0,0006	54,7454	-0,0045	0,1937
C2163H3	-0,0095	0,0072	54,7322	0,0047	0,1816
C3163H3	-0,0138	0,0104	54,7328	0,0078	0,1801
C1T5H3	0,0071	0,0026	54,7175	0,0055	0,1912
C2T5H3	-0,0017	0,0017	54,7260	-0,0021	0,1776
C3T5H3	-0,0203	0,0024	54,7309	0,0035	0,1834
C118H6	-0,0028	-0,0007	54,7528	0,0029	0,1990
C218H6	-0,0217	0,0020	54,7342	0,0030	0,1888
C318H6	-0,0221	0,0033	54,7342	-0,0004	0,1908
C1163H6	0,0048	0,0025	54,7481	0,0024	0,1923
C2163H6	-0,0184	0,0094	54,7280	0,0038	0,1821
C3163H6	-0,0216	0,0013	54,7336	0,0023	0,1830
C1T5H6	-0,0081	0,0000	54,7166	-0,0067	0,1890
C2T5H6	-0,0184	-0,0039	54,7268	0,0074	0,1831
C3T5H6	-0,0186	0,0095	54,7302	0,0042	0,1809
C118H12	0,0017	-0,0700	54,7514	-0,0025	0,2000
C218H12	-0,0095	-0,0007	54,7320	0,0030	0,1884
C318H12	-0,0189	0,0002	54,7341	-0,0029	0,1900
C1163H12	-0,0152	0,0010	54,7273	-0,0036	0,1932
C2163H12	-0,0189	0,0040	54,7311	-0,0006	0,1802
C3163H12	-0,0223	0,0014	54,7333	0,0037	0,1824
C1T5H12	-0,0041	-0,0019	54,7190	0,0007	0,1879
C2T5H12	-0,0125	-0,0049	54,7275	0,0049	0,1787
C3T5H12	-0,0103	-0,0065	54,7368	0,0058	0,1810
Correções Eléctrodo Rib 2º EL01-F02					
Chapa	X	Y	Z	C	GAP MEDIDO
C118H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C218H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C318H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C1163H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C2163H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C3163H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C1T5H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C2T5H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C3T5H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C118H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C218H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C318H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C1163H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C2163H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C3163H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C1T5H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C2T5H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C3T5H6	S/N	S/N	S/N	S/N	S/N
C118H12	-0,0002	0,0109	54,7504	-0,0034	0,2000
C218H12	-0,0231	0,0051	54,7345	0,0081	0,1894
C318H12	-0,0194	0,0020	54,7341	0,0001	0,1913
C1163H12	-0,0134	-0,0011	54,7272	-0,0022	0,1953
C2163H12	-0,0229	0,0054	54,7330	0,0044	0,1811
C3163H12	-0,0223	-0,0014	54,7301	0,0098	0,1823
C1T5H12	-0,0038	-0,0001	54,7171	-0,0038	0,1898
C2T5H12	-0,0122	-0,0048	54,7299	0,0025	0,1777
C3T5H12	-0,0280	0,0034	54,7283	0,0048	0,1846
S/N - SEM NECESSIDADE; N/A - NÃO APLICÁVEL					

3.3.3. Eléctrodo-CX

O Eléctrodo-CX representa uma geometria poliédrica quadrática de dimensões 40x40x15 mm. As faces verticais têm uma inclinação (saída) de 1°, medida desde a extremidade do Eléctrodo-CX em direção ao exterior (sentido geometria de referência) do eléctrodo. As arestas são boleadas com raio de 0,5 mm. As dimensões da CX foram projetadas de modo a serem representativas das dimensões da geometria CX standard utilizadas pela Moldetipo nas cavidades moldantes. É incluída uma geometria de referência de dimensões 48x48x5 mm permitindo o seu controlo dimensional e referencial recorrendo a uma máquina CMM. A **Figura 3.5 a)** mostra o CAD do Eléctrodo-CX que foi modelado. A **Figura 3.5 b)** apresenta o Eléctrodo-CX obtido com o parafuso de centragem do sistema de fixação Erowa. Para mais especificações consultar o desenho técnico no **Anexo I**. As fases de produção do Eléctrodo-CX seguiu os mesmos passos do Eléctrodo-Rib incluindo as opções de maquinagem. Para maior detalhe sobre a estratégia de maquinagem CNC do Eléctrodo-CX consultar o **Anexo J**. O controlo dimensional e referencial do Eléctrodo-CX seguiu o mesmo protocolo que foi descrito para o Eléctrodo-Rib.

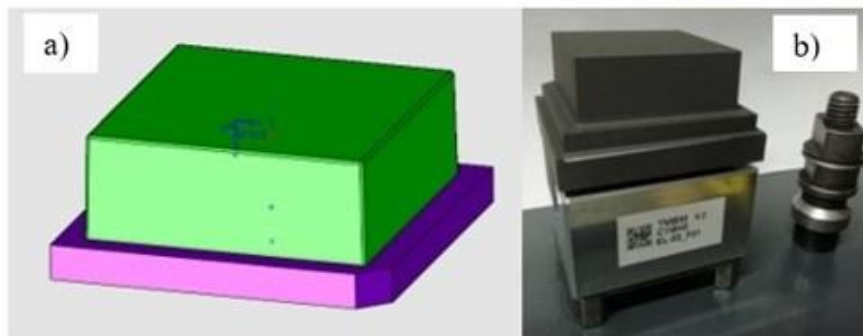


Figura 3.5 – a) CAD do Eléctrodo-CX; b) Eléctrodo-CX; c) Centro de maquinagem CNC Fanuc

3.3.3.1. Preparação (setup) do Eléctrodo-CX no processo de EDM

O controlo dimensional e referencial ao Eléctrodo-CX foi realizado de modo a poder efetuar as necessárias correções no posicionamento do Eléctrodo-CX no momento da eletroerosão. A **Tabela 3.5** identifica todas as correções de todos os Eléctrodos-CX existentes.

Tabela 3.5 - Correções, na posição de eletroerosão, do Eléctrodo-CX [mm]

CORREÇÕES ELÉCTRODO CX 1º EL02-F01					
Chapa	X	Y	Z	C	GAP MEDIDO
C1I8H3	0,0039	-0,0023	54,7521	-0,0110	0,1966
C2I8H3	0,0089	-0,0008	54,7512	0,0046	0,1978
C3I8H3	-0,0027	-0,0063	54,7203	-0,0004	0,2000
C1I63H3	-0,0074	-0,0002	54,7206	0,0011	0,1946
C2I63H3	-0,0046	0,0018	54,7283	-0,0161	0,1814
C3I63H3	-0,0058	0,0018	54,7282	-0,0178	0,1796
C1T5H3	-0,0130	0,0079	54,7345	-0,0042	0,1942
C2T5H3	-0,0120	0,0033	54,7307	0,0056	0,1796
C3T5H3	-0,0236	-0,0021	54,7289	-0,0170	0,1814
C1I8H6	0,0017	-0,0065	54,7508	0,0035	0,2000
C2I8H6	-0,0188	-0,0013	54,7331	0,0035	0,1881
C3I8H6	-0,0155	-0,0106	54,7311	-0,0146	0,1831
C1I63H6	-0,0040	-0,0046	54,7492	-0,0185	0,1978
C2I63H6	-0,0180	-0,0049	54,7285	-0,0163	0,1831
C3I63H6	-0,0242	-0,0035	54,7316	-0,0179	0,1835
C1T5H6	-0,0147	0,0040	54,7200	-0,0065	0,1944
C2T5H6	-0,0248	-0,0025	54,7293	-0,0043	0,1813
C3T5H6	-0,0296	-0,0006	54,7280	0,0029	0,1819
C1I8H12	-0,0005	-0,0010	54,7521	-0,0076	0,1995
C2I8H12	-0,0158	0,0039	54,7335	0,0010	0,1890
C3I8H12	-0,0295	-0,0027	54,7327	0,0060	0,1871
C1I63H12	-0,0166	0,0021	54,7279	-0,0189	0,1949
C2I63H12	-0,0191	-0,0058	54,7289	-0,0168	0,1832
C3I63H12	-0,0286	-0,0026	54,7291	0,0085	0,1815
C1T5H12	-0,0050	-0,0029	54,7141	-0,0106	0,1912
C2T5H12	-0,0155	-0,0094	54,7239	-0,0185	0,1764
C3T5H12	-0,0157	-0,0077	54,7243	-0,0237	0,1799
CORREÇÕES ELÉCTRODO CX 2º EL02-F02					
Chapa	X	Y	Z	C	GAP MEDIDO
C1I8H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C2I8H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C3I8H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C1I63H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C2I63H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C3I63H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C1T5H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C2T5H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C3T5H3	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
C1I8H6	0,0038	-0,0030	54,7510	-0,0039	0,1982
C2I8H6	-0,0158	-0,0059	54,7307	-0,0227	0,1866
C3I8H6	-0,0184	-0,0105	54,7327	-0,0223	0,1871
C1I63H6	0,0037	0,0073	54,7440	-0,0100	0,2000
C2I63H6	-0,0160	-0,0148	54,7297	-0,0143	0,1822
C3I63H6	-0,0178	-0,0082	54,7282	-0,0170	0,1828
C1T5H6	-0,0033	-0,0044	54,7182	-0,0180	0,1990
C2T5H6	-0,0130	-0,0117	54,7262	0,0053	0,1784
C3T5H6	-0,0209	0,0010	54,7312	-0,0182	0,1824
C1I8H12	0,0003	0,0107	54,7545	-0,0117	0,2000
C2I8H12	-0,0172	-0,0054	54,7290	0,0037	0,1856
C3I8H12	-0,0264	-0,0037	54,7335	-0,0153	0,1882
C1I63H12	-0,0105	-0,0059	54,7175	-0,0197	0,1939
C2I63H12	-0,0197	-0,0101	54,7265	0,0031	0,1819
C3I63H12	-0,0299	0,0012	54,7324	0,0038	0,1835
C1T5H12	-0,0125	0,0018	54,7147	-0,0101	0,1934
C2T5H12	-0,0175	-0,0047	54,7252	0,0031	0,1772
C3T5H12	-0,0140	-0,0070	54,7260	0,0013	0,1776
S/N - SEM NECESSIDADE; N/A - NÃO APLICÁVEL					

3.4. Equipamentos

As eletroerosões foram realizadas recorrendo a uma máquina EDM do fabricante ONA modelo NX6, como se pode ver na **Figura 3.6**.



Figura 3.6 - Máquina EDM do fabricante ONA, modelo NX6

Para a medição de pontos discretos e consequente cálculo da planeza de faces e desvios nas Dimensões e de Centro Geométrico (ou seja, do DD), foi usada uma máquina CMM do fabricante Renishaw (ver **Figura 3.7**).

A massa da peça de trabalho e dos elétrodos, utilizadas para o cálculo da MRR, foi apurada recorrendo a uma balança digital de marca Kern, com limite de 1200 g e precisão 0,01g (ver **Figura 3.8**).



Figura 3.7 – Máquina CMM, fabricante Renishaw



Figura 3.8 – Balança digital Kern, limite 1200 g, precisão 0,01 g

A SR [μm] é medida recorrendo a um rugosímetro de marca Mahr e modelo MarSurf PS10 (ver **Figura 3.9 a), c) e d)**). Devido à dimensão da sonda do rugosímetro, que impossibilitava a medição das faces eletroerodidas, nomeadamente na geometria Rib, devido à sua reduzida espessura de 3 mm, recorreu-se à máquina de EDM Fio (ver **Figura 3.9 b)**) para efetuar cortes, sem danificar as faces erodidas, possibilitando o acesso às mesmas pela sonda do rugosímetro. Na **Figura 3.9 c)**, a imagem representa a sonda do rugosímetro com a superfície (sólido cortado da chapa-teste eletroerodida) de fundo da geometria CX de 12 mm de profundidade de eletroerosão, que foi cortada ao longo dos seus limites através de WEDM. A **Figura 3.9 a)**, a imagem representa a sonda do rugosímetro medindo a rugosidade superficial da superfície vertical da geometria Rib de 12 mm de profundidade de eletroerosão. Também se pode ver na mesma imagem a restante chapa-teste cortada. Todas as superfícies, nas quais foi possível inserir a sonda do rugosímetro, foram testadas em três zonas igualmente espaçadas, ao longo da superfície, tendo-se registado o valor médio para as Rugosidades Ra e Rz, como pode ser observado no ecrã do rugosímetro da **Figura 3.9 d)**.

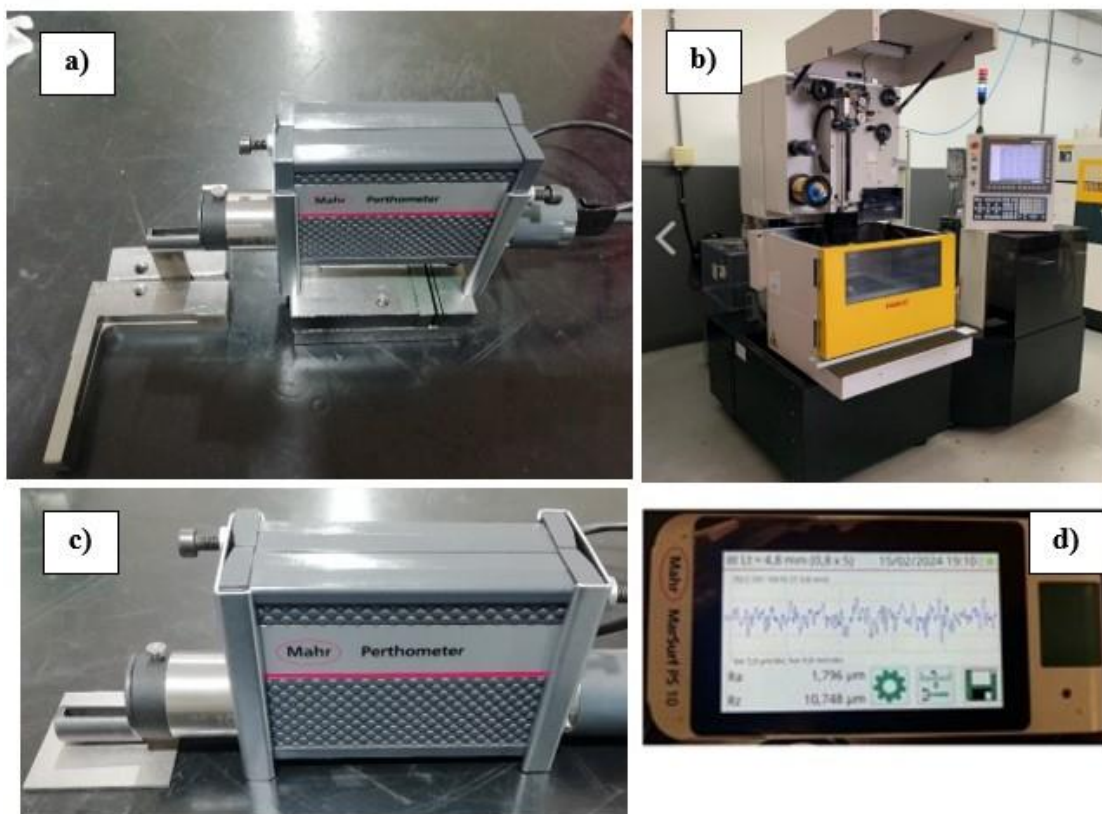


Figura 3.9 – a) Rugosímetro Mahr, modelo MarSurf PS10 medindo face vertical do Rib; b) Máquina de EDM Fio, fabricante FANUC; c) Rugosímetro medindo a face de Fundo da CX; d) Perfil de rugosidade da face medida

Para garantir o posicionamento correto, de acordo com o CAD dos elérodos e da peça de trabalho, na máquina EDM e na CMM foi utilizado um sistema de centragem Erowa (verificar **Figura 3.10**). A **Figura 3.10 a)** e **b)** mostram o centrador Erowa que se montou nas máquinas EDM e CMM. As **Figura 3.10 c)** e **Figura 3.10 d)** representam a base Erowa específica que foi usada na chapa-teste (vista de topo e fundo respetivamente). A **Figura 3.10 f)** representa a chapa-teste montada na sua base Erowa. A **Figura 3.10 e)** representa a base Erowa específica usada para os elérodos com, neste caso, o Elédrodo-Rib montado com o parafuso de acoplamento no lado direito.

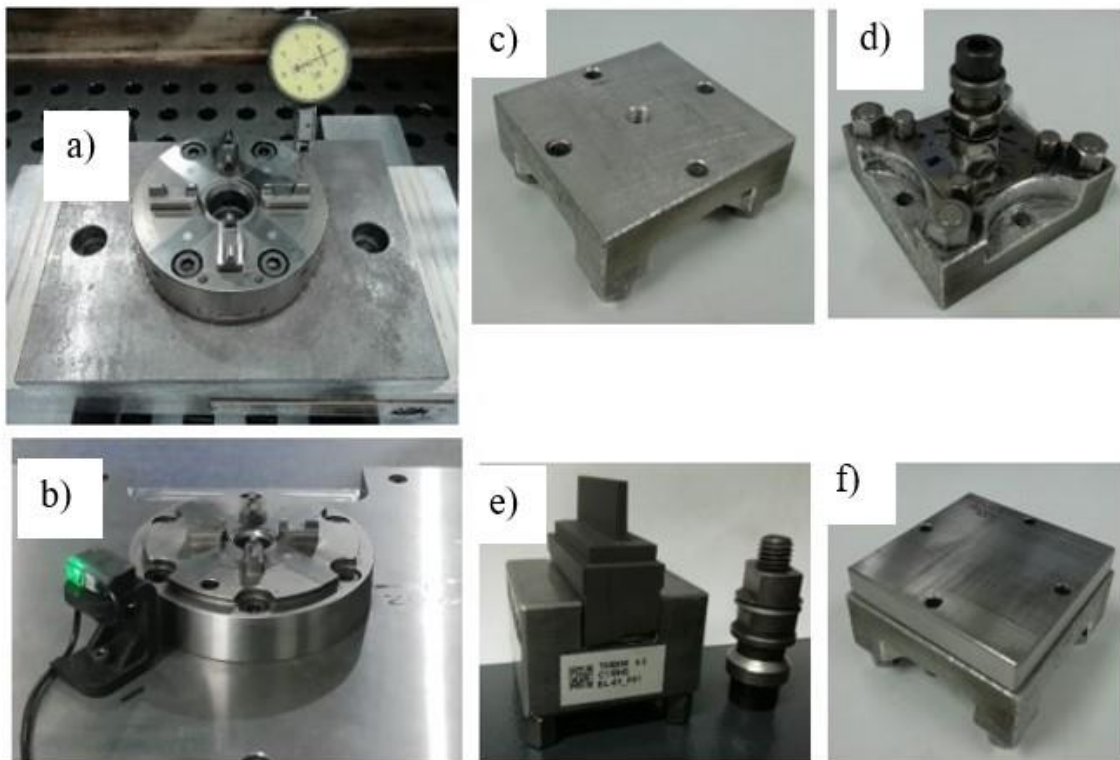


Figura 3.10 - a) Centrador Erowa montado na máquina EDM; **b)** Centrador Erowa montado na máquina CMM; **c)** Base Erowa (topo); **d)** Base Erowa com parafuso centrador (vista de baixo); **e)** Elédrodo montado em base Erowa; **f)** chapa-teste (peça de trabalho) montada em base Erowa.

3.5. Parâmetros do processo de EDM

Foram realizadas, em cada eletroerosão feita, correções à posição do elédrodo de acordo com os valores apresentados na **Tabela 3.4** (capítulo 3.3.2.1) para o Elédrodo-Rib, e na **Tabela 3.5** (capítulo 3.3.3.1) para o Elédrodo-CX.

Um índice usado no processo de EDM é o índice Nível VDI da Associação de Engenheiros Alemães (VDI do alemão - *Verein Deutscher Ingenieure*), da diretriz 3402, que indica o nível de rugosidade obtido. Para cálculo do Nível VDI é usada a Eq. (3.1) [6].

$$VDI = 20 * \log(10 * R_a) \quad (3.1)$$

(Rugosidade R_a em μm)

O **Anexo K** representa a tabela onde se relaciona a Rugosidade R_a com o Nível VDI estabelecido (e.g. Nível VDI 26 = Rugosidade R_a 2 μm).

Os Níveis VDI, ou seja, os níveis de rugosidade pretendidos e programados, estão descritos na **Tabela 3.6**. O Nível VDI final programado é o Nível VDI 26. Os parâmetros relativos a cada Nível VDI serão constantes até o eletrodo, no seu percurso de eletroerosão, alcançar a Cota Z limite (distância que falta percorrer até à posição final de eletroerosão). Após o eletrodo alcançar a Cota Z limite para cada Nível VDI, os parâmetros serão alterados automaticamente para os parâmetros no Nível VDI seguinte. Este procedimento é usado para aumentar a MRR, diminuindo o tempo de eletroerosão. Os parâmetros da **Tabela 3.6** foram usados em todas as eletroerosões realizadas neste estudo.

Tabela 3.6 - Parâmetros do processo de EDM

VDI	I	V	T. Impulso	T. Pausa	Servo	T. Retrocesso	T. Trabalho	Cota Z limite
	[Nível]	[V]	[μs]	[μs]	[V]	[s]	[s]	[mm]
38	9,0	120	100	13,0	20	0,30	0,80	0,200
37	9,0	120	50	6,4	20	0,30	0,50	0,167
34	9,0	120	25	6,4	30	0,30	0,50	0,137
33	8,0	160	25	6,4	30	0,30	0,50	0,112
32	7,0	160	25	5,0	30	0,30	0,50	0,087
30	6,0	200	25	6,4	30	0,30	0,50	0,072
29	5,0	200	25	6,4	30	0,30	0,50	0,062
27	5,0	200	13	5,0	35	0,30	0,40	0,052
26	4,0	200	13	6,4	35	0,30	0,40	0,042

No caso concreto da máquina EDM ONA NX6, o parâmetro de intensidade I é descrito por níveis, indicando os diferentes níveis de intensidade que podem ser obtidos do gerador. Cada nível tem um valor médio, em amperes, associado. A **Tabela 3.7** informa, para cada nível I qual o valor médio em Amperes [A].

Tabela 3.7 – Níveis de intensidade do gerador da ONA NX

Intensidade [Nível]	Valor médio [A]
1	0,5
2	1
3	2
4	4
5	6
6	8
7	12
8	14
9	24
10	32
11	48
12	64
13	96
14	128
15	192
16	256

Para limpeza de detritos e arrefecimento do eléctrodo e peça de trabalho foi implementado o movimento vertical alternativo do eléctrodo, permitindo a entrada do dielétrico. Para compensação da redução volumétrica dada ao eléctrodo na fabricação, foi implementada uma trajetória da ferramenta com recurso a órbitas circulares descendentes realizadas durante o percurso final de eletroerosão, mais concretamente nos 0,2 mm finais de acordo com os níveis descritos na **Tabela 3.6**.

3.6. Índices de performance específicos

Os índices de performance específicos calculados foram os seguintes:

- Taxa de remoção de material (MRR - 1ª Eletroerosão, 2ª Eletroerosão e Global);
- Rugosidade superficial (SR - Rugosidade Ra, Rugosidade Rz e Classificação SR);
- Desvio dimensional (DD - Planeza, Classificação Planeza, Dimensão em X, Y e Z; Centro Geométrico em X, Y e Z);
- Custo total do processo de eletroerosão por cavidade erodida (CP_{tot}) e Custo específico do processo (CEP);
- Índice de performance global (IPG).

Através da medição das massas dos elétrodos não foi possível aferir a TWR devido à porosidade da grafite (absorvente de dielétrico), o que impossibilitava a medição correta das massas dos elétrodos após eletroerosão. Havendo a possibilidade de determinar a TWR usando medições físicas, utilizando a máquina CMM, foi considerado que o eletrodo reconstruído digitalmente, através dos pontos discretos medidos, comportava uma incerteza elevada, não sendo fiável tirar conclusões fidedignas através deste método.

Para cálculo do desvio dimensional (DD), a reconstrução digital do eletrodo a partir de pontos discretos, medidos na máquina CMM (com o objetivo do cálculo do seu volume), comporta uma incerteza elevada, não oferecendo dados fiáveis. Com os pontos discretos medidos, são calculados valores absolutos de desvio, que se apresentam como DD. O eletrodo e a peça de trabalho são seccionados em diversos níveis horizontais e é quantificado, por nível, o DD – Dimensão ao longo dos eixos X, Y e Z, bem como o desvio do Centro Geométrico ao longo dos eixos X, Y. O desvio do Centro Geométrico ao longo do eixo Z não é apresentado sendo considerado, em vez deste índice, um deslocamento linear de toda a geometria em Z na proporção correspondente ao desvio da Dimensão em Z. Os valores calculados, quando em análise, devem ser analisados em módulo.

Devido à dificuldade do controlo individual do consumo energético por eletroerosão foram utilizadas duas variantes do índice SEC, as variantes CPtot e CEP, que incorporam um valor médio de consumo energético no valor-custo-hora. O CPtot e o CEP incorporam alguns dos parâmetros mais relevantes do processo ao nível dos custos: o tempo de produção do eletrodo (desde a modelação até à maquinagem), o tempo de eletroerosão e o custo da grafite.

3.6.1. MRR – Taxa de remoção de material (1ªEletroerosão, 2ªEletroerosão e Global)

A MRR é um dos índices de performance mais importantes na análise da performance do processo de EDM. O valor pretendido é o mais elevado possível.

A MRR é calculada considerando a massa da peça de trabalho antes e depois do processo de EDM, de acordo com a Eq.(2.1), equação usado por Harris et al. [8] na sua investigação sobre ligas com memória de forma (equação demonstrada no capítulo 2.1.2). O valor de densidade do material da peça de trabalho é fornecido pelo fornecedor ($7,85 \text{ g/cm}^3$ neste caso para o aço W.Nr. 1.2343).

Foi feito o cálculo da MRR para a 1ªEletroerosão e para a 2ªEletroerosão (quando necessária para a obtenção da geometria pretendida).

O objetivo das eletroerosões deste trabalho é alcançar uma determinada geometria, utilizando-se a quantidade de elétrodos que for necessário. Sendo assim, e para análise do processo completo, foi calculado um índice global para a MRR (MRR-Global), que incorpora as duas eletroerosões, a 1ªEletroerosão e a 2ªEletroerosão (quando existente). A MRR-Global é calculada somando a massa de material eletroerodido na 1ªEletroerosão com a massa do material eletroerodido na 2ªEletroerosão, dividindo pela soma dos tempos da 1ª e da 2ªEletroerosão. Nas eletroerosões onde foi necessário apenas um elétrodo, para obtenção da geometria pretendida, a MRR-Global assumiu o valor da MRR da 1ªEletroerosão.

3.6.2. SR – Rugosidade superficial (Rugosidade Ra, Rugosidade Rz e Classificação SR)

A rugosidade superficial é um importante índice na análise da qualidade superficial de um componente. Fatores como atrito, desgaste, lubrificação e resistência à fadiga, no funcionamento dos componentes, são grandemente influenciados pela rugosidade superficial. O valor pretendido para este índice é o menor possível.

Todas as superfícies foram testadas, pelo rugosímetro, em três zonas igualmente espaçadas, na zona média da superfície, tendo-se registado o valor médio para a Rugosidade Ra e para a Rugosidade Rz. Ambos os valores registados são dados pelo equipamento rugosímetro utilizado. Foi calculado um valor para as faces verticais (F.Verticais) e outro para a face horizontal (Fundo), devido à grande diferença de valores encontrada.

Tendo em conta que não existiu uma clara e inequívoca tendência sobre qual das grafites é melhor no que diz respeito à rugosidade superficial obtida (verificar resultados no capítulo 4.2 onde se verifica a disparidade de resultados), houve a necessidade de contabilizar (soma algébrica) quantos melhores resultados foram obtidos por cada grafite em todas as faces controladas (faces Fundo e F.Verticais), quer na Rugosidade Ra quer na Rz. Para este efeito foi criado o índice Classificação SR. O universo de eletroerosões contemplado para a contabilização de melhores resultados consiste em eletroerosões com combinação das várias características: dois tipos de faces (Fundo e F.Verticais), duas geometrias (Rib e CX), 3 profundidades de eletroerosão (3, 6 e 12 mm) e dois parâmetros de rugosidade (Ra e Rz). Totalizam-se assim 24 combinações possíveis (e.g. primeira combinação: face Fundo,

geometria Rib, profundidade de eletroerosão 3 mm e rugosidade Ra; segunda combinação: face F.Verticais, geometria Rib, profundidade de eletroerosão 3 mm e rugosidade Ra; ...; vigésima quarta combinação).

O valor médio de referência do Nível VDI 26, para a Rugosidade Ra, o qual foi o programado na eletroerosão, foi de 2 μm .

3.6.3. DD – Desvio dimensional

Os valores ótimos para este índice de performance são aqueles que mais se aproximam de zero, quer para a Planeza, Dimensão ou Centro Geométrico.

Foram efetuadas medições, em máquina CMM, de acordo com um conjunto de níveis. A **Figura 3.11** mostra como estão distribuídos os níveis de medição em relação ao eletrodo e à chapa-teste. Na **Figura 3.11** a chapa-teste está em cima, na posição relativa de eletroerosão em relação ao eletrodo.

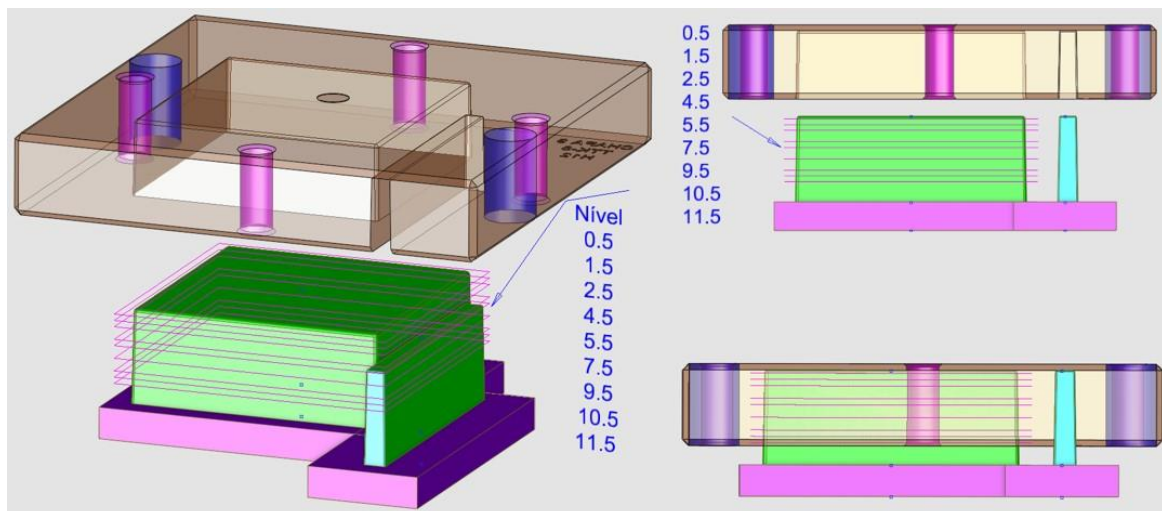


Figura 3.11 - Níveis de medição CMM.

A **Tabela 3.8** identifica os níveis de medição efetivamente medidos, no eléctrodo e na chapa-teste, nas profundidades de eletroerosão 3, 6 e 12 mm.

Tabela 3.8 - Níveis de medição para eléctrodo e chapa-teste a 3, 6 e 12 mm de profundidade EDM

Eléctrodo	Eléctrodo	Chapa		
		Profundidade de eletroerosão		
		3 mm	6 mm	12 mm
Níveis	Distância a partir da face de topo (extremidade) do eléctrodo	Distância a partir do fundo da cavidade erodida		
Nível 0.5	0,5 mm	N/M	N/M	N/M
Nível 1.5	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm
Nível 2.5	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm	2,5 mm
Nível 3.5	N/M	N/M	3,5 mm	N/M
Nível 4.5	4,5 mm	N/M	4,5 mm	4,5 mm
Nível 5.5	N/M	N/M	5,5 mm	N/M
Nível 7.5	7,5 mm	N/M	N/M	7,5 mm
Nível 9.5	N/M	N/M	N/M	9,5 mm
Nível 10.5	N/M	N/M	N/M	10,5 mm
Nível 11.5	11,5 mm	N/M	N/M	11,5 mm
N/M - Não Medido				

O nível menor é o nível da extremidade do eléctrodo, ou seja, de fundo de caixa na chapa-teste. O nível maior é o nível que está à distância maior da extremidade do eléctrodo, correspondendo ao nível de saída da geometria erodida na chapa-teste. Sendo assim temos, o Nível 1.5 e o Nível 2.5 para a profundidade 3 mm, Nível 1.5 e o Nível 5.5 para a profundidade 6 mm, e Nível 1.5 e o Nível 11.5 para a profundidade 12 mm. A importância destes dois níveis deve-se ao facto de ser nestes níveis onde se verifica os valores mais elevados de DD_Dimensão.

Para as faces longitudinais do Eléctrodo-Rib e do Rib na chapa-teste foram medidos 12 pontos por nível horizontal (igualmente espaçados), 2 pontos por nível nas faces transversais e 24 na face da extremidade de ataque do eléctrodo bem como no fundo da caixa na chapa-teste (igualmente distribuídos). Diversas iterações de medição foram realizadas sendo esta iteração a que melhor reflete as variações dimensionais pertinentes na avaliação da espessura do Rib (confirmar na **Figura 3.12 a**), face da extremidade de ataque do eléctrodo não representado).

Para as faces do Eléctrodo-CX e da CX na chapa-teste foram medidos 7 pontos por nível horizontal (igualmente espaçados) e 49 na face da extremidade de ataque do eléctrodo bem como no fundo da caixa (igualmente distribuídos pelas faces correspondentes). Diversas iterações de medição foram realizadas sendo esta iteração a que melhor reflete as variações

dimensionais pertinentes à geometria existente (confirmar na **Figura 3.12 b**), face da extremidade de ataque do eletrodo não representado).

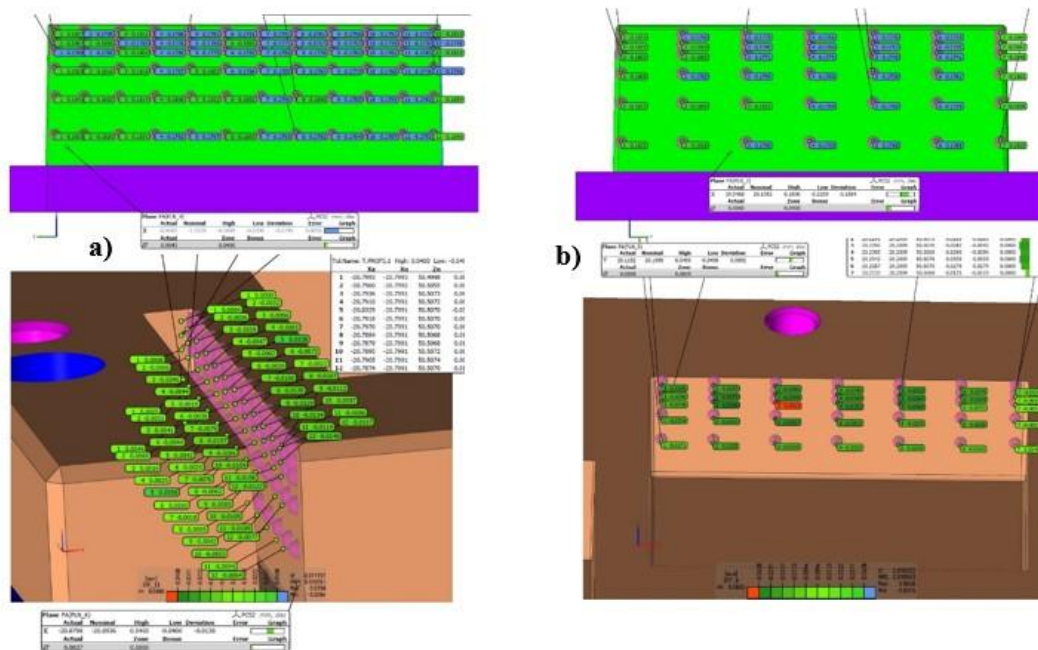


Figura 3.12 - a) 12 pontos de medição por face lateral do Rib; b) 7 pontos de medição por face lateral da CX;

A **Figura 3.13** (a título de exemplo), representa, graficamente, os desvios dimensionais dos pontos medidos pela CMM, ocorridos após a primeira eletroerosão do Eléctrodo-Rib, Rib da chapa-teste, Eléctrodo-CX e CX da chapa-teste.

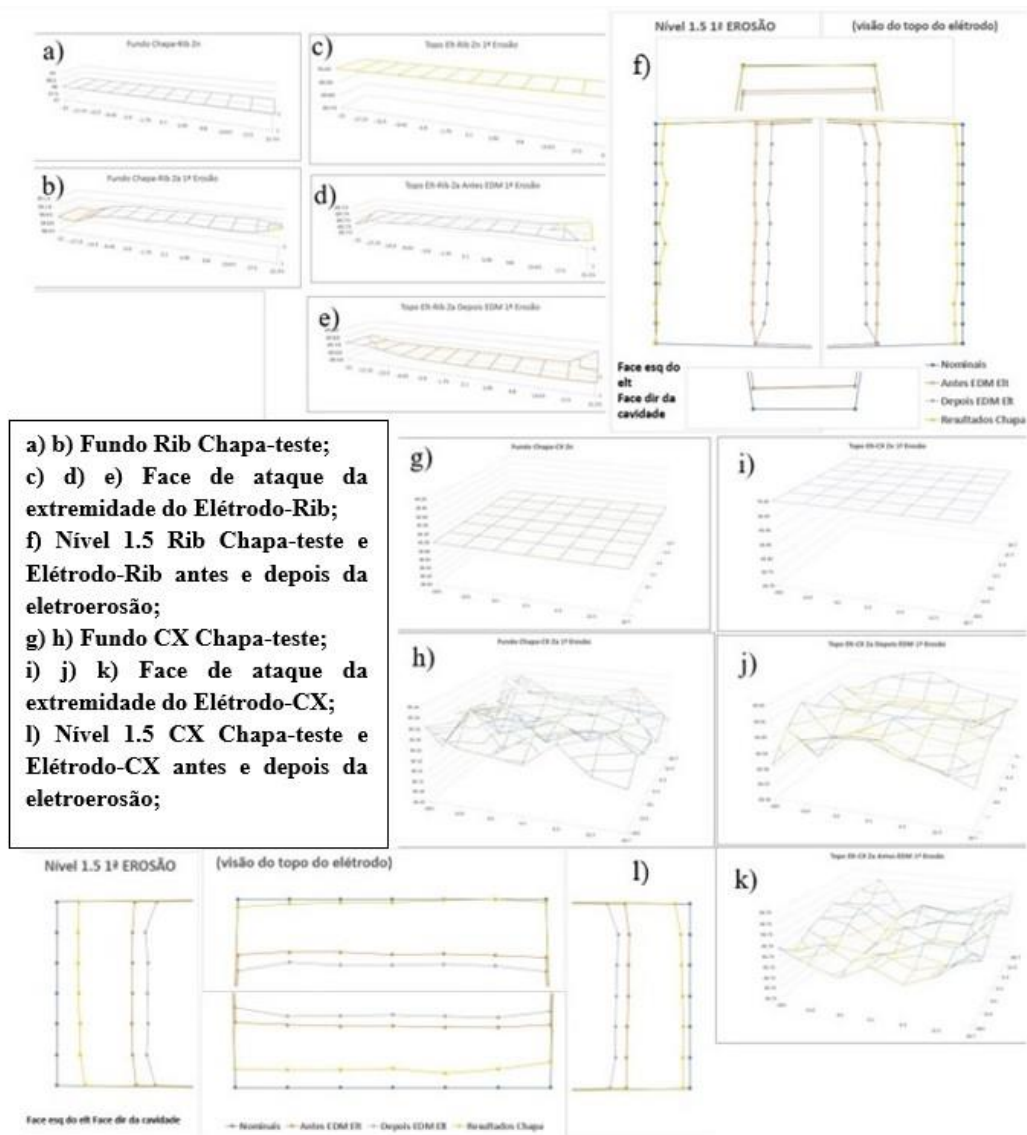


Figura 3.13 - Representação gráfica da medição de pontos discretos do Eléctrodo-Rib, do Rib da chapa-teste, do Eléctrodo-CX e da CX na chapa-teste

A **Figura 3.13 a) e b)** representa o valor nominal do Fundo do Rib na chapa-teste (ou seja, valores modelados em CAD) e valores depois da eletroerosão respetivamente. A **Figura 3.13 c), d) e e)** representam a face de ataque da extremidade do Eléctrodo-Rib nos seus valores nominais, antes e depois da eletroerosão. A **Figura 3.13 f)** representa o resultado da medição de pontos discretos, da geometria Rib da chapa-teste e do Eléctrodo-Rib, em valor nominal, antes e depois da eletroerosão no Nível 1.5. A **Figura 3.13 g) e h)** representa o Fundo da CX na chapa-teste na sua representação nominal e depois da eletroerosão respetivamente. A **Figura 3.13 i), j) e k)** representam a face de ataque da extremidade do Eléctrodo-CX, nos seus valores nominais, antes e depois da eletroerosão respetivamente. A **Figura 3.13 l)** representa o Nível 1.5 da geometria CX na chapa-teste e Eléctrodo-CX, em valor nominal, antes e depois da eletroerosão. Para verificação mais pormenorizada das medições dos

elétrodos e das chapas-teste, a título de exemplo, consultar os seguintes anexos: **Anexo L – Relatório de medição CMM do Eléctrodo-Rib antes da eletroerosão**, **Anexo M – Relatório de medição CMM do Eléctrodo-CX antes da eletroerosão**, **Anexo N – Relatório de medição CMM da peça C1T5H12-Chapa-teste-Rib-2ªEletroerosão**, e **Anexo O – Relatório de medição CMM da peça C1T5H12-Chapa-teste-CX-2ªEletroerosão**.

3.6.3.1. DD_Planeza e Classificação Planeza

A planeza de uma superfície é um indicador da qualidade superficial de um componente quando em comparação da superfície obtida com a superfície projetada em desenho CAD. O valor pretendido para este índice é o menor possível, tendo-se estipulado, para ser considerado conforme, um máximo de 0,08 mm. Qualquer desvio superior a este valor iria comprometer a geometria pretendida e sua função. No Rib podia comprometer a integridade estrutural da peça após injeção e na CX podia comprometer a montagem do postigo de moldação (sendo essa a função da CX).

Através dos pontos discretos, medidos pela CMM, é calculado o seu desvio em relação a um plano de referência. De acordo com a Norma ISO-1101-2017 [20], a partir dos pontos medidos é calculado um plano de referência o qual é usado para cálculo dos desvios e conseqüente cálculo da planeza. Matematicamente consiste na diferença entre o maior desvio positivo e o menor desvio negativo. Este trabalho utiliza como plano de referência o plano nominal vertical obtido do CAD da chapa-teste, plano esse inclinado 1° em relação ao plano vertical. No caso do plano de Fundo o plano retirado do CAD é horizontal, ou seja, sem inclinação. Os desvios dos pontos em relação ao plano de referência nominal são calculados usando a Eq. (3.2).

$$D_{dXn \text{ ou } dYn \text{ ou } dZn} = C_a - C_n; \text{ (coordenada } X, Y \text{ ou } Z, \text{ conforme o caso)} \quad (3.2)$$

Onde:

- $D_{dXn \text{ ou } dYn \text{ ou } dZn}$ = Desvio do ponto medido em relação ao seu homólogo nominal, na coordenada pretendida, X, Y ou Z [mm];
- C_a = Cota atual, do ponto discreto, medida pela CMM [mm];
- C_n = Cota nominal, do ponto discreto, modelada em CAD [mm];

Os valores registados para a planeza da 1ªEletroerosão não são finais. A planeza foi calculada somente após a obtenção da geometria pretendida, seja após o uso de um só eléctrodo ou após

o uso de dois eletrodos. Para os casos onde, para atingir a geometria pretendida, apenas foi necessário o uso de um só eletrodo, o valor final de planeza é o valor da 1ª Eletroerosão. Para os casos onde, para atingir a geometria pretendida, foi necessário o uso de um segundo eletrodo, o valor final de planeza é o valor da 2ª Eletroerosão. Para o cálculo da planeza foi usada a Eq. (3.3).

$$Pln = D_{m\acute{a}x_pos} - D_{m\acute{a}x_neg} ; \text{ (desvios da face em análise)} \quad (3.3)$$

Onde:

- Pln = Planeza da face em análise [mm];
- $D_{m\acute{a}x_pos}$ = Desvio máximo positivo do ponto medido em relação ao seu homólogo nominal na coordenada do eixo perpendicular à face medida (coordenada X das faces perpendiculares ao eixo X, coordenada Y das faces perpendiculares ao eixo Y, e coordenada Z nas faces perpendiculares ao eixo Z) [mm];
- $D_{m\acute{a}x_neg}$ = Desvio máximo negativo do ponto medido em relação ao seu homólogo nominal na coordenada do eixo perpendicular à face medida (coordenada X das faces perpendiculares ao eixo X, coordenada Y das faces perpendiculares ao eixo Y, e coordenada Z nas faces perpendiculares ao eixo Z) [mm].

Tendo em conta que não existiu uma clara e inequívoca tendência, havendo uma disparidade de resultados, sobre qual das grafites é melhor no que diz respeito à Planeza, houve a necessidade de contabilizar (soma algébrica) quantos melhores resultados foram obtidos por cada grafite em todas as faces controladas (faces Fundo e F.Verticais). Para este efeito foi criado o índice Classificação Planeza.

O universo de eletroerosões utilizado na contabilização dos melhores resultados resulta da combinação das várias características: dois tipos de faces (Fundo e F.Verticais), duas geometrias (Rib e CX) e 3 profundidades de eletroerosão (3, 6 e 12 mm). Ou seja, um total de 12 combinações (e.g. primeira combinação: face Fundo, geometria Rib, profundidade de eletroerosão 3 mm; segunda combinação: face F.Verticais, geometria Rib, profundidade de eletroerosão 3 mm; ...).

3.6.3.2. DD_Dimensão ao longo dos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico ao longo dos eixos X e Y

Para apuramento do DD_Dimensão X, Y ou Z da geometria (DD_{dX} ou dY ou dZ) nos níveis especificados foi utilizada a Eq. (3.4), enquanto para o cálculo do DD_Centro Geométrico

ao longo do eixo X, Y (DD_{cX} ou cY) foi utilizada a Eq. (3.5). O valor de cota usado no cálculo é a média dos valores de cota medidos em cada percurso de medição. Os valores finais calculados, quando em análise, foram analisados em módulo sendo o sinal (positivo ou negativo) apenas indicador do sentido do desvio (positivo – sentido exterior da geometria, negativo – sentido interior da geometria). Para cálculo do índice foram usadas as faces opostas uma à outra. No caso da não existência de face oposta apenas é usada a face existente. O desvio do Centro Geométrico ao longo do eixo Z não é apresentado sendo considerado, em vez deste índice, um deslocamento linear de toda a geometria em Z na proporção correspondente ao desvio da Dimensão em Z.

$$DD_{dX \text{ ou } dY \text{ ou } dZ} = -(C_a - C_n) + (C_{afO} - C_{nfO}); \text{ (Dimensão X, Y, Z, conforme o caso)} \quad (3.4)$$

Onde:

- $DD_{dX \text{ ou } dY \text{ ou } dZ}$ = Desvio dimensional absoluto da dimensão X, Y ou Z, conforme o caso, da geometria erodida [mm];
- C_a = Cota atual, da face, medida pela CMM [mm];
- C_n = Cota nominal, da face, modelada em CAD [mm];
- C_{afO} = Cota atual da face oposta medida pela CMM [mm];
- C_{nfO} = Cota nominal da face oposta modelada em CAD [mm];

$$DD_{cX \text{ ou } cY} = \frac{(C_a - C_n) + (C_{afO} - C_{nfO})}{2}; \text{ (Centro Geométrico X ou Y, conforme o caso)} \quad (3.5)$$

Onde:

- $DD_{cX \text{ ou } cY}$ = Desvio do Centro Geométrico em X ou Y, conforme o caso, da geometria erodida [mm];
- C_a = Cota atual, do ponto discreto, medida pela CMM [mm];
- C_n = Cota nominal, do ponto discreto, modelada em CAD [mm];
- C_{afO} = Cota atual da face oposta medida pela CMM [mm];
- C_{nfO} = Cota nominal da face oposta modelada em CAD [mm];

Para as geometrias escolhidas neste estudo, o Rib e a CX, o desvio máximo permitido para a Dimensão é de +/- 0,08 mm, com a exceção da Dimensão ao longo do eixo Z que é de +/- 0,04 mm. O limite superior, sendo ultrapassado, habitualmente é considerado como dano na peça de trabalho, levando a uma avaliação de prejuízo e eventuais medidas corretivas. O

limite inferior, sendo ultrapassado, impõe o uso de um segundo eletrodo de modo a alcançar as dimensões desejadas. O desvio máximo permitido para o Centro Geométrico é de +/- 0,04 mm.

Para a geometria CX, especialmente quando é destinado ao encaixe de um postigo, o desvio do Centro Geométrico é importante devido à sua influência no alinhamento com a sua contraparte no molde. A variação da Dimensão da CX não é muito prejudicial à montagem de um componente pois a afinação do encaixe, normalmente, é feita no componente. Um Rib que vê a sua espessura reduzida devido a uma variação negativa exagerada na Dimensão, é um Rib que, potencialmente, irá comprometer a integridade estrutural da peça de plástico. A variação do Centro Geométrico do Rib, em si, quando não em demasia ($< 0,2$ mm), não causa constrangimento à integridade estrutural da peça de plástico.

3.6.4. CP_{tot} – Custo total do processo e CEP – Custo específico do processo

O custo de uma operação industrial tem uma importância muito elevada no processo produtivo de qualquer bem ou serviço. O custo da operação de eletroerosão não é exceção. O valor que se pretende para o CP_{tot} e para o CEP é o menor possível.

O CP_{tot} de eletroerosão por cavidade/geometria erodida é usado, neste trabalho, como principal índice de performance de comparação entre eletroerosões que utilizam grafites diferentes. Os índices CP_{tot} e o CEP foram calculados tendo em conta a quantidade de eletricidade, de tempo (humano e mecânico) e de material despendido na sua execução. De grande importância, o CP_{tot} e o CEP indicam a eficiência financeira do processo. O tempo humano e mecânico bem como a quantidade de material/grafite usado foi quantificado, mas a quantidade de eletricidade não foi quantificada estando incorporada no valor do custo por hora da secção de eletroerosão da empresa Moldetipo. Resumindo, o CP_{tot} e o CEP incorporam vários valores, a saber (valores em euros):

- Custo de maquinagem CNC do eletrodo, que inclui o tempo de modelação, programação e maquinagem CNC do eletrodo (C_{CNC});
- Custo de maquinagem EDM da peça de trabalho (C_{EDM});
- Custo da grafite em bruto (C_G).

O valor do custo por hora da maquinaria CNC e EDM foi arbitrado como 40 euros, valor médio para CNC e EDM. Este valor incorpora todos os custos setoriais que a empresa auferi para exercer a sua atividade, incluindo o valor acrescentado bruto.

Para determinar o CP_{tot} foi usada a Eq. (3.6). Para o cálculo do “custo CNC” (C_{CNC}) foi usada a Eq. (3.7). Já para o cálculo do “custo EDM” (C_{EDM}) foi usada a Eq. (3.8). No caso do valor do custo do grafite (C_G) foi utilizada a Eq. (3.9). O CEP por geometria erodida foi calculado recorrendo à Eq. (3.10).

$$CP_{tot} = C_{CNC} + C_{EDM} + C_G \quad (3.6)$$

$$C_{CNC} = T_{CNC} \times C_{HM-CNC} \quad (3.7)$$

$$C_{EDM} = T_{EDM} \times C_{HM-EDM} \quad (3.8)$$

$$C_G = Vol \times C_{dm} \quad (3.9)$$

$$CEP = \frac{(C_{CNC} + C_{EDM} + C_G)}{V_O} = \frac{(C_{CNC} + C_{EDM} + C_G)}{\frac{mPT_A - mPT_D}{dPT}} \quad (3.10)$$

Onde:

- CP_{tot} = Custo total do processo de eletroerosão por cavidade erodida [€];
- C_{CNC} = Custo do tempo de maquinaria do eléctrodo [€];
- C_{EDM} = Custo do tempo de maquinaria EDM [€];
- C_G = Custo do grafite [€].
- T_{CNC} = Tempo de maquinaria do eléctrodo [h] – hora;
- C_{HM-CNC} = Custo de maquinaria CNC por hora [$\frac{€}{h}$].
- T_{EDM} = Tempo de maquinaria EDM [h] – hora;
- C_{HM-EDM} = Custo de maquinaria EDM por hora [$\frac{€}{h}$].
- C_G = Custo do grafite [€];
- Vol = Volume do stock de grafite necessário para o eléctrodo [dm^3];
- C_{dm} = Valor tabelado para o decímetro cúbico do grafite em questão [$\frac{€}{dm^3}$].
- CEP = Custo específico do processo [€];
- V_O = Volume de material erodido obtido [mm^3];
- mPT_A = Massa da peça de trabalho antes do processo [g];
- mPT_D = Massa da peça de trabalho depois do processo [g];
- dPT = Densidade da peça de trabalho [$\frac{g}{mm^3}$];

3.6.5. IPG – Índice de performance global

Para análise global do processo, após o uso de grafites de granulometria diferente, foi necessário o cálculo de um índice global, o IPG. Este índice pretende-se positivo e o mais elevado possível. O IPG é um índice que revela a média da variação percentual dos diversos índices de performance entre a eletroerosão de base (eletroerosão standard – eletroerosão com a grafite ISEM-8) e as eletroerosões com as restantes grafites em estudo (ISO-63 e TTK-5). Nos diversos índices de performance a primeira eletroerosão, a eletroerosão com a grafite ISEM-8, é assumida como a base standard, ou seja, com valor de variação percentual zero. É calculada a variação percentual existente entre a ISEM-8 e a ISO-63 e de igual modo entre a ISEM-8 e a TTK-5. Os fatores/índices incluídos no IPG foram considerados de igual peso relativo. Foi considerado que uma variação de igual valor, de qualquer índice, teria a mesma probabilidade de contribuir para o insucesso da operação. Para o cálculo do IPG foi usada a Eq. (3.11).

$$IPG = \frac{(MRRGlb + RaFd + RaF.Vrt + RzFd + RzV.Vrt + PlzFd + PlzF.Vrt + CPtot\% + CEP\%)}{9} \quad (3.11)$$

Onde:

- IPG = Índice de performance Global [%];
- *MRRGlb* = variação percentual da MRR-Global, entre grafites [%];
- *RaFd* = variação percentual da SR Rugosidade Ra, da face Fundo, entre grafites [%];
- *RaF.Vrt* = variação percentual da SR Rugosidade Ra das F.Verticais [%];
- *RzFd* = variação percentual da SR Rugosidade Rz da face Fundo entre grafites [%];
- *RzF.Vrt* = variação percentual SR Rugosidade Rz das F.Verticais entre grafites [%];
- *PlzFd* = variação percentual do índice SR Planeza da face Fundo entre grafites [%];
- *PlzF.Vrt* = variação percentual da SR Planeza das F.Verticais entre grafites [%];
- *CPtot%* = variação percentual do Custo do Total do Processo entre grafites [%];
- *CEP%* = variação percentual do Custo Específico do Processo entre grafites [%].

Os índices DD_Dimensão e DD_Centro Geométrico não foram incluídos no IPG por várias razões. Os valores apurados (das grafites ISO-63 e TTK-5) ficaram abaixo dos desvios máximos permitidos. As variações percentuais, por vezes atingindo 454 % (ISO-63 Geometria CX Nível 1.5 Centro Geométrico X, de |-0.005 mm| ISEM-8 para |0.028 mm| ISO-63), não são indicadores reais da variação de performance do processo devido à magnitude dos valores. O DD_Centro Geométrico é influenciado pela máquina EDM e sua capacidade de executar órbitas circulares de modo rigoroso.

4. Resultados e Discussão

4.1. MRR

A MRR foi calculada para as diversas eletroerosões feitas neste trabalho e é apresentada na **Tabela 4.1** para a primeira eletroerosão (1ªEletroerosão) e na **Tabela 4.2** para a segunda eletroerosão (2ªEletroerosão), quando aplicável. A **Tabela 4.3** apresenta os valores usados para o cálculo da MRR-Global.

Tabela 4.1 – MRR; 1ªEletroerosão

PEÇA	Prof. [mm]	Grafite	TEMP O RIB [min]	VOLUME ERODIDO RIB [mm ³]	MRR RIB 1ª [mm ³ /min]	TEMPO CX [min]	VOLUME ERODIDO CX [mm ³]	MRR CX 1ª [mm ³ /min]
I8H3	3	ISEM-8	21,04	352,14	16,74	74,94	4673,08	62,36
I63H3	3	ISO-63	20,16	355,13	17,66	67,84	4728,85	69,79
T5H3	3	TTK-5	21,88	361,54	16,52	74,78	4676,28	62,67
I8H6	6	ISEM-8	41,23	735,26	17,84	118,05	9448,08	80,07
I63H6	6	ISO-63	50,86	843,59	16,58	116,53	9367,31	80,40
T5H6	6	TTK-5	47,92	742,31	15,55	115,98	9451,28	81,49
I8H12	12	ISEM-8	106,73	1500,00	14,05	196,55	18982,05	96,58
I63H12	12	ISO-63	116,83	1523,08	13,04	210,30	19093,59	90,79
T5H12	12	TTK-5	123,37	1528,21	12,39	205,53	19147,44	93,16
S/N - SEM NECESSIDADE; N/A - NÃO APLICÁVEL								

Tabela 4.2 – MRR; 2ªEletroerosão

PEÇA	Prof. [mm]	Grafite	TEMPO RIB [min]	VOLUME ERODIDO RIB [mm ³]	MRR RIB 2ª [mm ³ /min]	TEMPO CX [min]	VOLUME ERODIDO CX [mm ³]	MRR CX 2ª [mm ³ /min]
I8H3	3	ISEM-8	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
I63H3	3	ISO-63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
T5H3	3	TTK-5	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
I8H6	6	ISEM-8	S/N	S/N	S/N	19,79	128,85	6,58
I63H6	6	ISO-63	S/N	S/N	S/N	21,81	138,46	6,34
T5H6	6	TTK-5	S/N	S/N	S/N	22,13	128,21	5,79
I8H12	12	ISEM-8	14,31	17,95	1,26	23,62	298,72	12,70
I63H12	12	ISO-63	17,22	25,64	1,49	24,80	203,85	8,22
T5H12	12	TTK-5	20,15	30,77	1,53	25,08	221,79	8,84
S/N - SEM NECESSIDADE; N/A - NÃO APLICÁVEL								

Tabela 4.3 - MRR-Global

PEÇA	Prof. [mm]	Grafite	TEMPO RIB [min]	VOLUME ERODIDO RIB [mm ³]	MRR RIB [mm ³ /min]	TEMPO CX [min]	VOLUME ERODIDO CX [mm ³]	MRR CX [mm ³ /min]
I8H3	3 mm	ISEM-8	21,04	352,14	16,74	74,94	4673,08	62,35
I63H3	3 mm	ISO-63	20,16	355,13	17,62	67,84	4728,85	69,70
T5H3	3 mm	TTK-5	21,88	361,54	16,52	74,78	4676,28	62,54
I8H6	6 mm	ISEM-8	41,23	735,26	17,84	137,84	9576,92	69,48
I63H6	6 mm	ISO-63	50,86	843,59	16,59	138,34	9505,77	68,71
T5H6	6 mm	TTK-5	47,92	742,31	15,49	138,12	9579,49	69,36
I8H12	12 mm	ISEM-8	121,04	1517,95	12,54	220,17	19280,77	87,57
I63H12	12 mm	ISO-63	134,05	1548,72	11,55	235,10	19297,44	82,08
T5H12	12 mm	TTK-5	143,52	1558,97	10,86	230,62	19369,23	83,99
S/N - SEM NECESSIDADE; N/A - NÃO APLICÁVEL								

Na 1ªEletroerosão, na geometria Rib, o valor mais elevado foi conseguido pela grafite ISEM-8 na profundidade 6 mm, obtendo-se 17,84 mm³/min. No caso da 2ªEletroerosão o valor mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, na profundidade 12 mm, com 1,53 mm³/min. No índice MRR-Global o valor mais elevado foi obtido pela ISEM-8 na profundidade 6 mm com 17,84 mm³/min.

Na 1ªEletroerosão, na geometria CX, o valor mais elevado foi conseguido pela grafite TTK-8 na profundidade 12 mm obtendo 93,16 mm³/min. No caso da 2ªEletroerosão o valor mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, na profundidade 12 mm, com 12,70 mm³/min. No índice MRR-Global o valor mais elevado foi obtido pela ISEM-8 na profundidade 12 mm com 87,57 mm³/min.

4.1.1. MRR, geometria Rib

Para a profundidade de 3 mm o eléctrodo de grafite ISO-63 obteve o valor mais elevado, de 17,66 mm³/min (ver gráfico da **Figura 4.1**). O valor da grafite ISO-63 foi 5,5 % e 6,9 % mais elevado do que a grafite ISEM-8 e da grafite TTK-5 respetivamente (16,74 mm³/min e 16,52 mm³/min respetivamente).

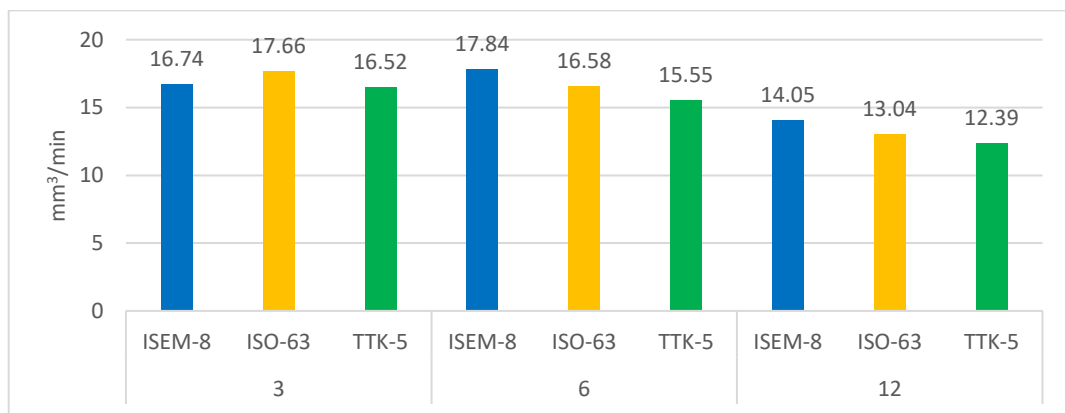


Figura 4.1 - MRR Rib 1ªEletroerosão

Nas profundidades 6 e 12 mm da geometria Rib, na sua primeira eletroerosão, a grafite com melhor prestação foi a ISEM-8 com 17,84 mm³/min e 14,05 mm³/min respetivamente. Na profundidade de 6 mm a prestação da ISEM-8 foi 7,6 % e 14,73 % superior à grafite ISO-63 (16,58 mm³/min) e TTK-5 (15,55 mm³/min) respetivamente. Na profundidade de 12 mm a prestação da ISEM-8 foi 7,75 % e 13,40 % superior à grafite ISO-63 (13,04 mm³/min) e TTK-5 (12,39 mm³/min) respetivamente.

Apenas na eletroerosão de profundidade de 12 mm, para obter a geometria pretendida, foi necessário o uso de um segundo elétrodo (ver gráfico da **Figura 4.2**). A grafite com melhor prestação foi a TTK-5, obtendo o valor de 1,53 mm³/min, superior em 2,68 % e 21,43 % à grafite ISO-63 (1,49 mm³/min) e à ISEM-8 (1,26 mm³/min) respetivamente.

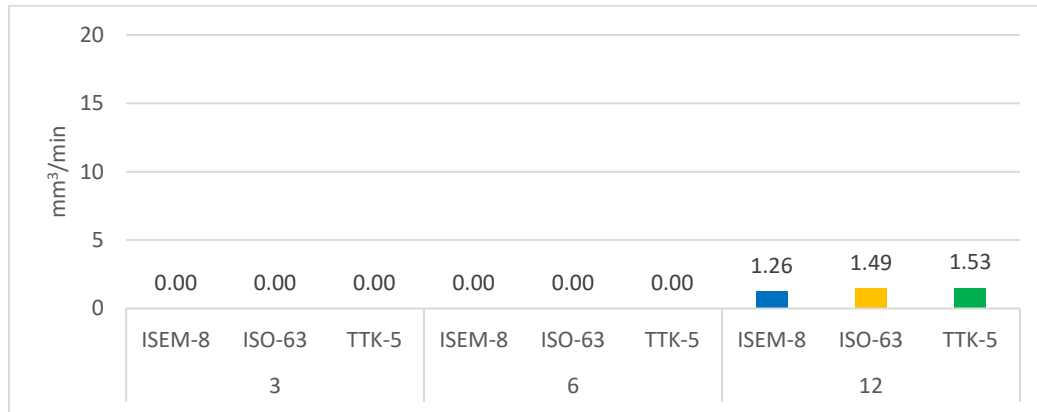


Figura 4.2 - MRR Rib 2ª Eletroerosão

4.1.1.1. MRR-Global; Geometria Rib

No índice MRR-Global (ver **Figura 4.3**), na profundidade 3 mm, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISO-63 obtendo 17,66 mm³/min, sendo 5,26 % mais elevado do que a grafite ISEM-8 (16,74 mm³/min) e 6,66 % mais elevado do que a grafite TTK-5 (16,52 mm³/min).

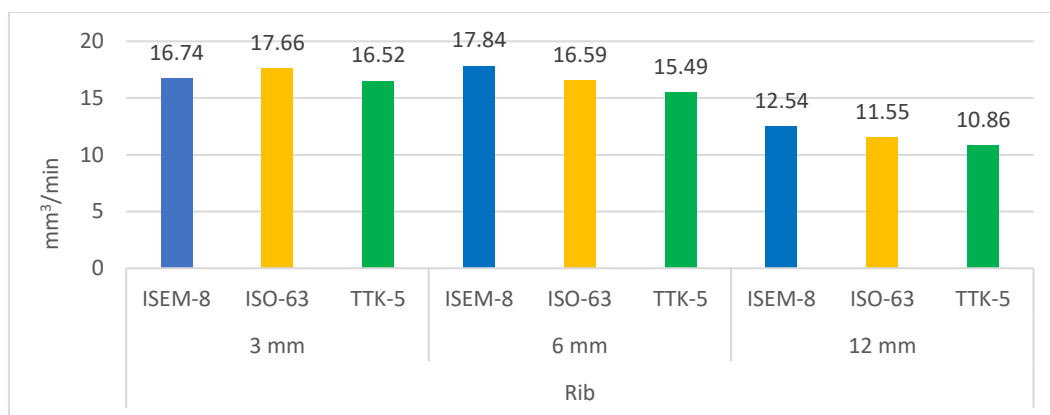


Figura 4.3 - MRR-Global; Geometria Rib

Na profundidade 6 mm, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISEM-8 obtendo 17,84 mm³/min, sendo 7,53 % mais elevado do que a grafite ISO-63 (16,59 mm³/min) e 15,17 % mais elevado do que a grafite TTK-5 (15,49 mm³/min).

Na profundidade 12 mm, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISEM-8 obtendo 12,54 mm³/min, sendo 8,57 % mais elevado do que a grafite ISO-63 (11,55 mm³/min) e 15,47 % mais elevado do que a grafite TTK-5 (10,86 mm³/min).

Com exceção da grafite ISO-63 na profundidade de 3 mm (tendo obtido o valor mais elevado), todos os resultados obtidos são coerentes com o que é afirmado pelo fabricante da grafite, ou seja, grafites de granulometria superior conduzem a uma MRR superior (ISEM-8 > ISO-63 > TTK-5). Esta afirmação é verdadeira para a 1ªEletroerosão, bem como para a MRR-Global. Na 2ªEletroerosão vemos uma tendência contrária (TTK-5>ISO-63>ISEM-8). Isto é justificado pelo maior desgaste da ferramenta de menor granulometria (TTK-5), sofrido na 1ªEletroerosão, “deixando” mais material para ser erodido na 2ªEletroerosão de forma a obter a geometria pretendida. Na 2ªEletroerosão a TTK-5 tem o maior valor de MRR pois foi a eletroerosão que maior volume de material erodiu, 30,77 mm³ em oposição à grafite ISO-63 com 25,64 mm³ e ISEM-8 com 17,95 mm³.

4.1.2. MRR, geometria CX

Na geometria CX, para a profundidade de 3 mm, a grafite ISO-63 obteve o valor mais elevado com 69,79 mm³/min (ver **Figura 4.4**). A grafite ISO-63 foi 11,91% e 11,36 % mais elevada do que a grafite ISEM-8 e TTK-5, com 62,36 e 62,67 mm³/min, respetivamente.

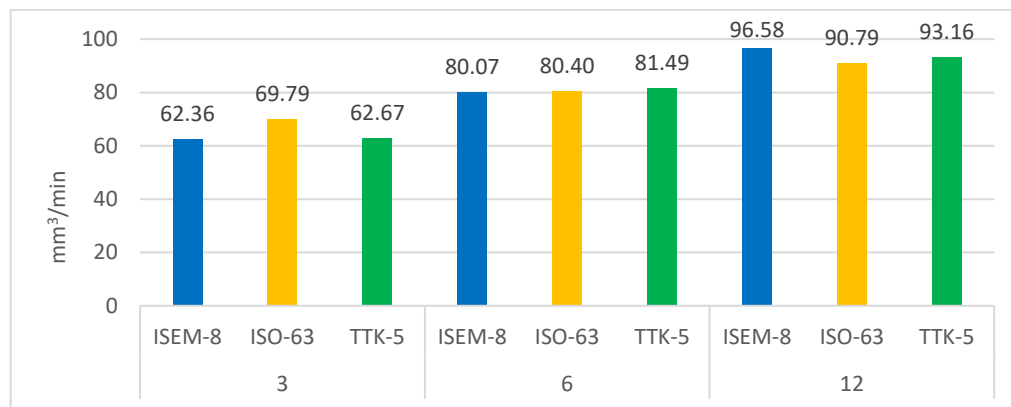


Figura 4.4 - MRR CX 1ªEletroerosão

Na profundidade de 6 mm, na 1ªEletroerosão, a grafite com a melhor prestação foi a TTK-5 com 81,49 mm³/min, 1,36% e 1,77 % superior à grafite ISO-63 (80,40 mm³/min) e à ISEM-8 (80,07 mm³/min) respetivamente.

Na profundidade de 12 mm, na 1ªEletroerosão, a grafite com a melhor prestação foi a ISEM-8 com 96,58 mm³/min seguido da TTK-5 com 93,16 mm³/min e da ISO-63 com 90,79

mm³/min, A diferença percentual foi de 3,67 % e 6,38 % superior em relação à grafite TTK-5 e ISEM-8 respectivamente.

Nas profundidades 6 e 12 mm, da 2ªEletroerosão, a grafite com melhor MRR foi a ISEM-8 com 6,58 mm³/min e 12,70 mm³/min respectivamente (ver gráfico da **Figura 4.5**). No caso da profundidade de 6 mm o valor da MRR foi superior em 3,79 % e 13,64 % ao valor da grafite ISO-63 (6,34 mm³/min) e TTK-5 (5,79 mm³/min) respectivamente. Para 12 mm o valor foi superior em 43,66 % e 54,5 % às grafites TTK-5 (8,84 mm³/min) e ISO-63 (8,22 mm³/min) respectivamente.

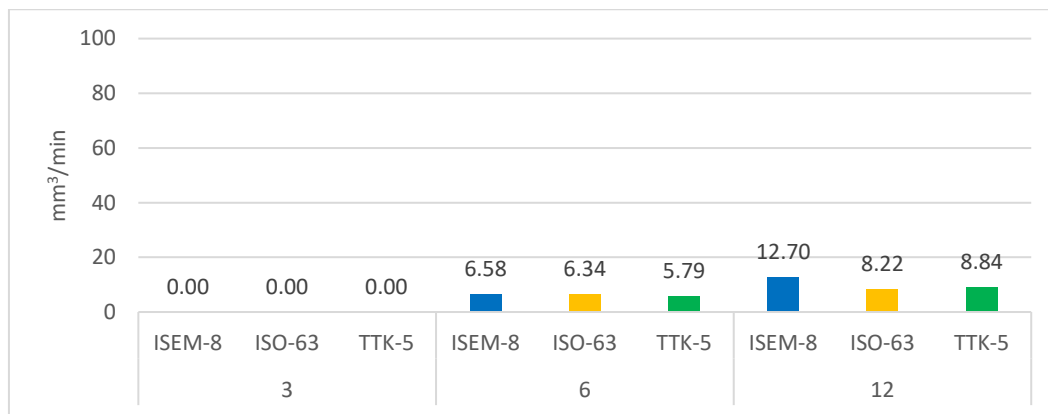


Figura 4.5 - MRR CX 2ªEletroerosão

4.1.2.1. MRR-Global; Geometria CX

No índice MRR-Global (ver **Figura 4.6**), na profundidade 3 mm, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISO-63 obtendo 69,79 mm³/min. A grafite ISO-63 foi 11,91% e 11,36 % mais elevada do que a grafite ISEM-8 e TTK-5, com 62,36 e 62,67 mm³/min, respectivamente.

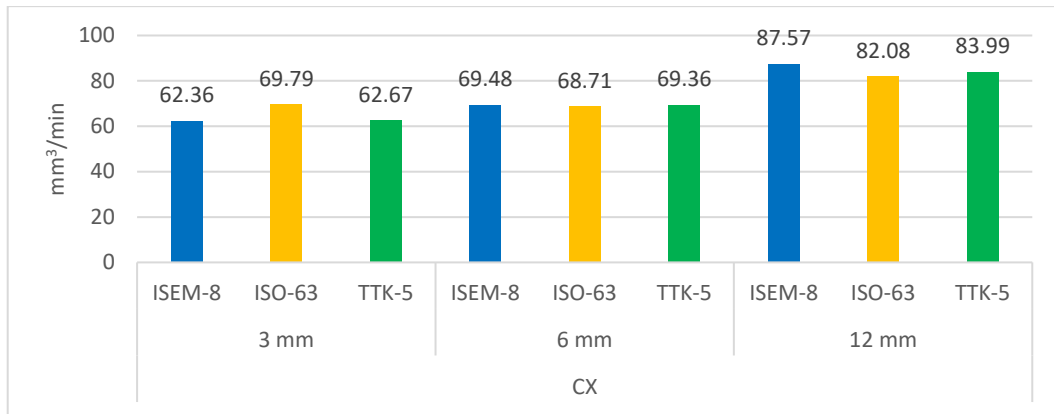


Figura 4.6 - MRR-Global; Geometria CX

Na profundidade 6 mm, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISEM-8 obtendo 69,48 mm³/min, sendo apenas 0,17 % mais elevado do que a grafite TTK-5 (69,36 mm³/min) e 1,12 % mais elevado do que a grafite ISO-63 (68,71 mm³/min).

Na profundidade 12 mm, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISEM-8 obtendo 87,57 mm³/min, sendo 4,26 % mais elevado do que a grafite TTK-5 (83,99 mm³/min) e 6,68 % mais elevado do que a grafite ISO-63 (82,08 mm³/min).

À semelhança da geometria Rib na profundidade 3 mm a grafite ISO-63, na geometria CX, obteve o melhor resultado de MRR. O facto de na CX a zona de eletroerosão ser circundada e no Rib não o ser não afetou a variação da MRR entre grafites. Na profundidade 6 mm os resultados entre grafites foram semelhantes não havendo tendências assinaláveis, apesar da ISEM-8 (grafite de maior granulometria) ter obtido o maior resultado. Na profundidade de 12 mm a grafite com maior granulometria obteve a maior MRR em concordância com o defendido pelo fabricante.

Na geometria CX, nas profundidades de eletroerosão 6 e 12 mm, em todos os eléctrodos, houve necessidade do uso de um segundo eléctrodo para a obtenção da geometria desejada.

4.2.SR

Os valores médios da Rugosidade Ra após a última eletroerosão, por superfície, geometria, profundidade e grafite são apresentados na **Tabela 4.4**.

Tabela 4.4 - SR Rugosidade Ra Profundidade 3, 6 e 12 [µm]

Peça	Prof. [mm]	Grafite	Rib Fundo	Rib Vertical	CX Fundo	CX Vertical
I8H3	3	ISEM-8	2,492	1,756	3,017	1,728
I63H3	3	ISO-63	2,652	1,845	2,889	1,905
T5H3	3	TTK-5	2,394	1,760	2,713	1,890
I8H6	6	ISEM-8	2,870	1,780	3,387	1,972
I63H6	6	ISO-63	2,968	1,832	3,216	1,858
T5H6	6	TTK-5	3,054	1,736	2,873	1,833
I8H12	12	ISEM-8	2,650	2,075	2,748	2,487
I63H12	12	ISO-63	2,785	1,892	3,112	2,467
T5H12	12	TTK-5	3,062	2,135	2,189	2,665

A Rugosidade Ra menos elevada nas faces verticais (F.Verticais) foi obtida pela grafite ISEM-8 na profundidade 3 mm, geometria CX, com 1,728 µm e a Rugosidade Ra mais elevada pela grafite TTK-5 na profundidade 12 mm, geometria CX, com 2,665 µm. Na face horizontal (Fundo) a Rugosidade Ra menos elevada foi obtida pela grafite TTK-5, na profundidade 12 mm, geometria CX, com 2,189 µm e a mais elevada pela grafite ISEM-8 na profundidade 6 mm, geometria CX, com 3,387 µm.

Os valores médios para a Rugosidade Rz após a última eletroerosão, por superfície, geometria, profundidade e grafite são apresentados na **Tabela 4.5**.

Tabela 4.5 - SR Rugosidade Rz Profundidade 3, 6, e 12 [µm]

Peça	Prof. [mm]	Grafite	Rib Fundo	Rib Vertical	CX Fundo	CX Vertical
I8H3	3	ISEM-8	14,639	10,761	16,294	10,603
I63H3	3	ISO-63	15,528	11,083	15,481	11,698
T5H3	3	TTK-5	15,639	11,056	15,418	11,496
I8H6	6	ISEM-8	17,252	10,780	18,564	12,334
I63H6	6	ISO-63	17,705	11,430	18,487	11,341
T5H6	6	TTK-5	16,904	10,894	16,441	11,424
I8H12	12	ISEM-8	14,992	11,904	15,310	14,360
I63H12	12	ISO-63	14,597	12,030	17,483	13,954
T5H12	12	TTK-5	18,096	11,929	12,235	15,332

A Rugosidade Rz menos elevada nas F.Verticais foi obtida pela grafite ISEM-8 na profundidade 3 mm, geometria CX, com 10,603 μm e a mais elevada pela grafite TTK-5 na profundidade 12 mm, geometria CX, com 15,332 μm . Na face horizontal (Fundo) a Rugosidade Rz menos elevada foi obtida pela grafite TTK-5 na profundidade 12 mm, geometria CX, com 12,235 μm e a maior Rugosidade Rz pela grafite ISEM-8 na profundidade 6 mm, geometria CX, com 18,564 μm .

4.2.1. Rugosidade Ra, geometria Rib

Na profundidade de eletroerosão de 3 mm (ver **Figura 4.7**), na face de fundo da geometria (Fundo), o menor valor foi obtido pela grafite TTK-5 com 2,394 micrómetro (μm), o que era espectável devido à qualidade inerente a uma grafite ultrafina com a menor granulometria de todas as grafites testadas. A grafite TTK-5 obteve uma rugosidade 3,93 % menor do que a grafite ISEM-8 (2,492 μm) e 9,73 % menor do que a grafite ISO-63 (2,652 μm).

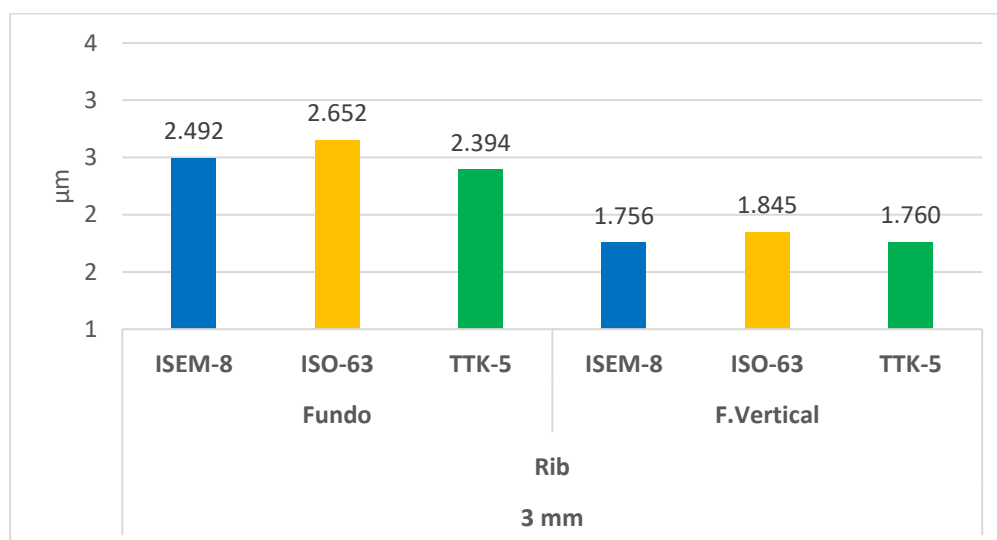


Figura 4.7 – SR Rugosidade Ra Rib [μm]; Profundidade 3 mm

Na profundidade de eletroerosão de 3 mm, nas F.Verticais, o menor valor foi obtido pela grafite ISEM-8 com 1,756 μm , com uma diferença residual de apenas 4 nm (0,004 μm) em relação à TTK-5, a grafite de menor granulometria. A grafite ISEM-8 obteve uma rugosidade 0,23 % menor do que a grafite TTK-5 (1,760 μm) e 4,61 % menor do que a grafite ISO-63 (1,845 μm).

Na profundidade de eletroerosão de 6 mm (ver **Figura 4.8**), na face Fundo, o menor valor foi obtido pela grafite ISEM-8 com 2,870 μm , o que não era espectável devido a ser a grafite de granulometria mais elevada das três grafites testadas, ou seja, com uma maior

granulometria seria expectável obter uma rugosidade mais elevada. A grafite ISEM-8 obteve uma rugosidade 3,30 % menor do que a grafite ISO-63 (2,968 μm) e 6,02 % menor do que a grafite TTK-5 (3,054 μm).

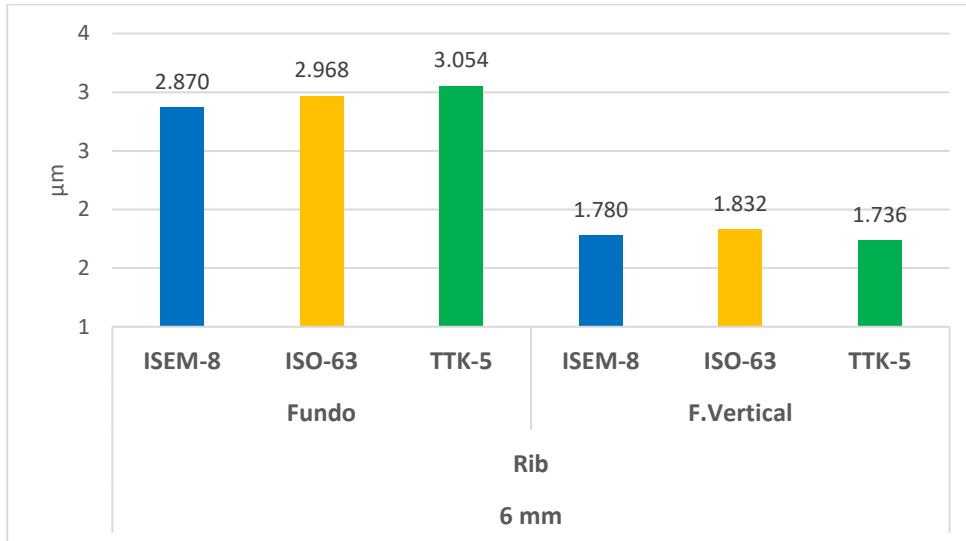


Figura 4.8 - SR Rugosidade Ra Rib [μm]; Profundidade 6 mm

Na profundidade de eletroerosão de 6 mm, nas F.Verticais o menor valor foi obtido pela grafite TTK-5 com 1,736 μm . A grafite TTK-5 obteve uma rugosidade 2,47 % menor do que a grafite ISEM-8 (1,780 μm) e 5,24 % menor do que a grafite ISO-63 (1,832 μm).

De salientar a semelhança de valores nas F.Verticais entre as profundidades 3 e 6 mm, sendo possível deduzir, nesta situação, que o incremento na profundidade de eletroerosão verificado não afeta consideravelmente a rugosidade das F.Verticais, apenas afetando a face Fundo.

Na profundidade de eletroerosão de 12 mm (ver **Figura 4.9**), na face Fundo, o menor valor foi obtido pela grafite ISEM-8 com 2,650 μm , o que, à semelhança do que aconteceu na profundidade 6 mm, não era espectável devido à sua granulometria. A grafite ISEM-8 obteve uma rugosidade 4,85 % menor do que a grafite ISO-63 (2,785 μm) e 13,46 % menor do que a grafite TTK-5 (3,062 μm).

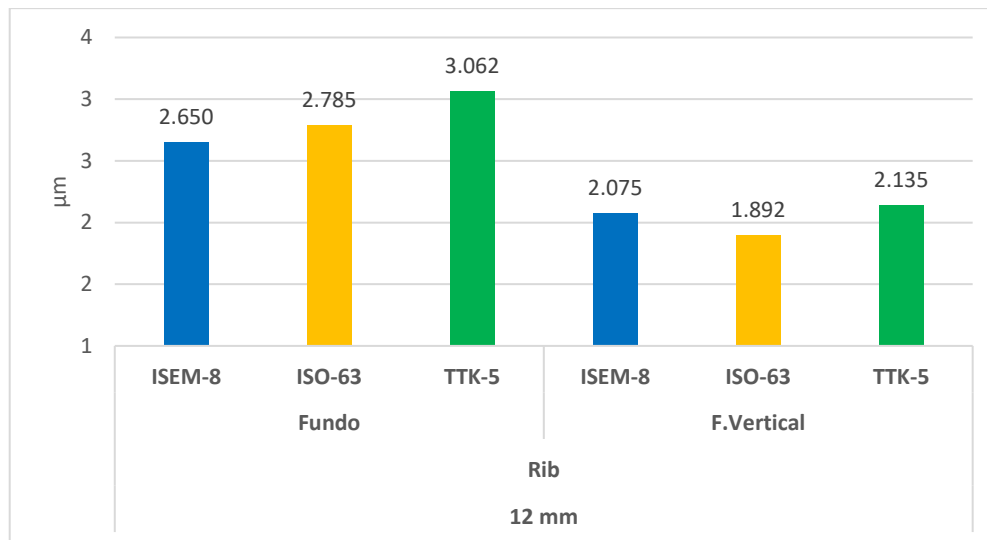


Figura 4.9 - SR Rugosidade Ra Rib [μm]; Profundidade 12 mm

Na profundidade de eletroerosão de 12 mm, nas F.Verticais o menor valor foi obtido pela grafite ISO-63 com 1,892 μm . A grafite ISO-63 obteve uma rugosidade 8,82 % menor do que a grafite ISEM-8 (2,075 μm) e 11,38 % menor do que a grafite ISO-63 (2,135 μm).

De salientar, entre as profundidades 6 e 12 mm, o aumento de todos os valores de rugosidade. O aumento da rugosidade com o aumento da profundidade de eletroerosão deve-se a uma maior dificuldade de remoção/limpeza de detritos do espaço entre a ferramenta e a peça de trabalho em profundidades de eletroerosão superiores.

4.2.1. Rugosidade Rz, geometria Rib

Na face Fundo (barra do lado esquerdo de cada grafite específica no gráfico de barras da **Figura 4.10**) a grafite ISEM-8 obteve a menor Rugosidade Rz apenas na profundidade de eletroerosão de 3 mm, obtendo o valor de 14,639 μm . Na profundidade 6 mm o melhor resultado, ou seja, o menor resultado, foi obtido pela grafite TTK-5 com 16,904 μm . Na profundidade 12 mm o melhor resultado foi obtido pela grafite ISO-63 com 14,597 μm .

Nas F.Verticais (barra do lado direito de cada grafite específica no gráfico de barras da **Figura 4.10**) a grafite ISEM-8 obteve o melhor resultado nas três profundidades de eletroerosão com 10,761 μm para a profundidade de 3 mm, 10,780 μm para a profundidade 6 mm e 11,904 μm para a profundidade de 12 mm.

Para análise de todos os resultados, consultar a **Figura 4.10**.

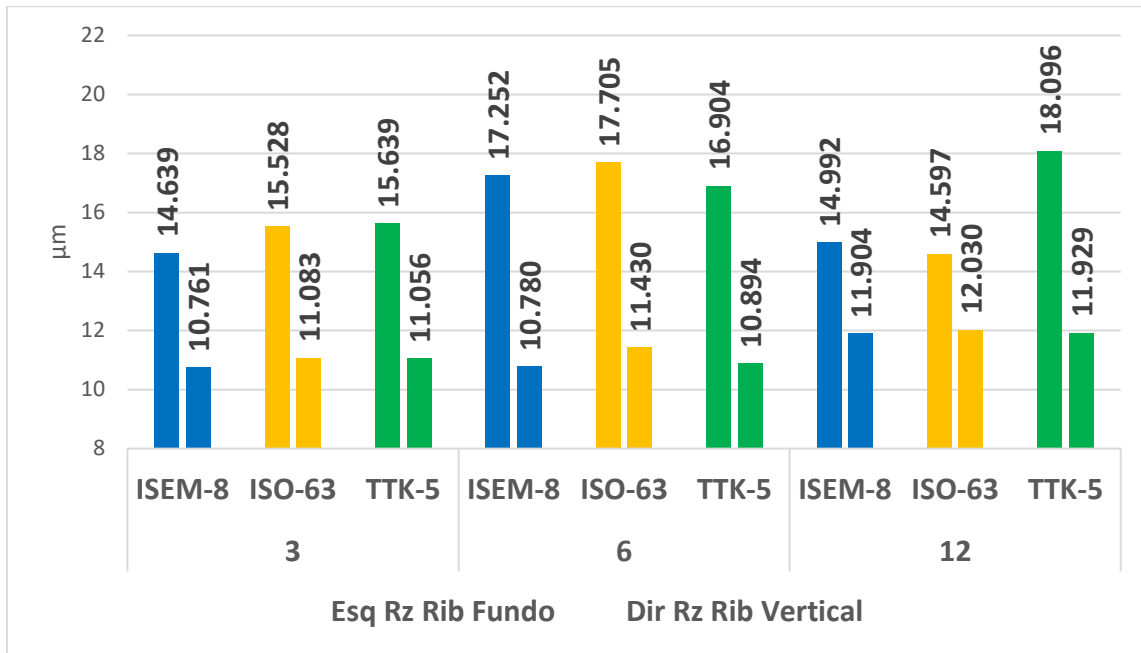


Figura 4.10 - SR Rugosidade Rz Rib [µm]; Profundidade 3, 6, 12 mm

4.2.2. Rugosidade Ra, geometria CX

Na profundidade de eletroerosão de 3 mm (ver **Figura 4.11**), na face Fundo, o menor valor de Rugosidade Ra foi obtido pela grafite TTK-5 com 2,713 µm. A grafite TTK-5 obteve uma rugosidade 6,09 % menor do que a grafite ISO-63 (2,889 µm) e 10,08 % menor do que a grafite ISEM-8 (3,017 µm). Nas F.Verticais, o menor valor foi obtido pela grafite ISEM-8 com 1,728 µm. A grafite ISEM-8 obteve uma rugosidade 8,57 % menor do que a grafite TTK-5 (1,890 µm) e 9,29 % menor do que a grafite ISO-63 (1,905 µm).

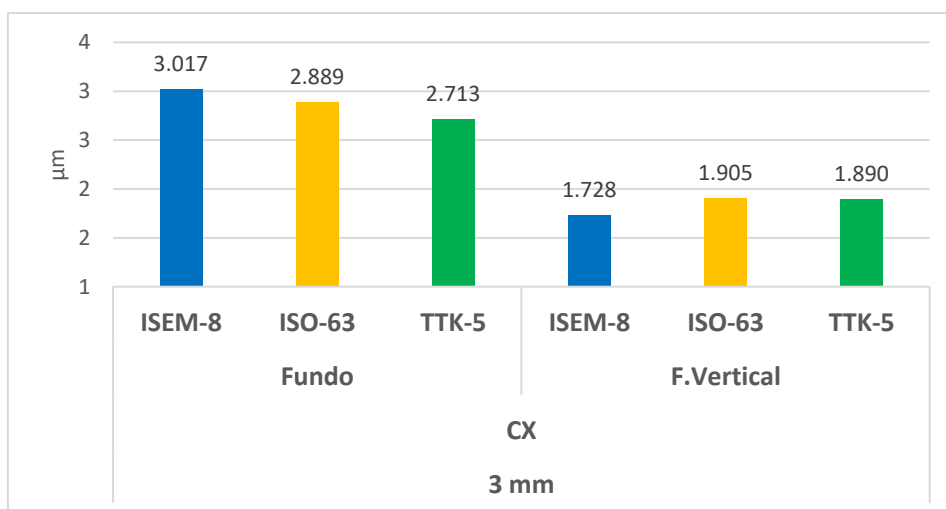


Figura 4.11 - SR Rugosidade Ra CX [µm]; Profundidade 3 mm

Na profundidade de eletroerosão de 6 mm (ver **Figura 4.12**), na face Fundo, o menor valor foi obtido pela grafite TTK-5 com 2,873 μm , tal como era esperado. A grafite TTK-5 obteve uma rugosidade 10,67 % menor do que a grafite ISO-63 (3,216 μm) e 15,18 % menor do que a grafite ISEM-8 (3,387 μm). Nas F.Verticais o menor valor foi obtido pela grafite TTK-5 com 1,833 μm . A grafite TTK-5 obteve uma rugosidade 1,35 % menor do que a grafite ISO-63 (1,858 μm) e 7,05 % menor do que a grafite ISEM-8 (1,972 μm).

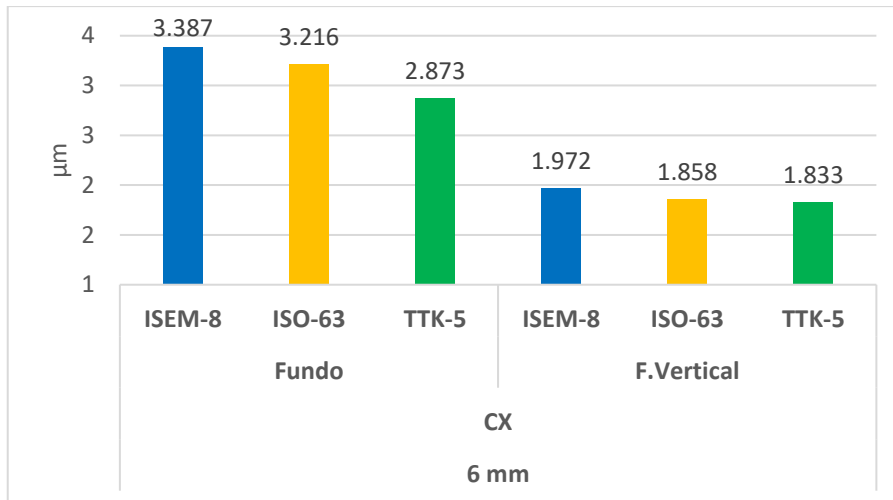


Figura 4.12 - SR Rugosidade Ra CX [μm]; Profundidade 6 mm

Na profundidade de eletroerosão de 12 mm (ver **Figura 4.13**), na face Fundo, o menor valor foi obtido pela grafite TTK-5 com 2,189 μm . A grafite TTK-5 obteve uma rugosidade 20,34% menor do que a grafite ISEM-8 (2,748 μm) e 29,66 % menor do que a grafite ISO-63 (3,112 μm). Salienta-se a elevada diferença percentual entre o menor valor obtido pela TTK-5 e o valor mais elevado obtido pela ISO-63 de 29,66 %. Nas F.Verticais o menor valor foi obtido pela grafite ISO-63 com 2,467 μm . A grafite ISO-63 obteve apenas uma diferença residual de 0,8 % para o segundo menor valor obtido pela ISEM-8 com 2,487 μm e um valor 7,43 % menor do que a grafite TTK-5 (2,665 μm), o valor mais elevado de rugosidade.

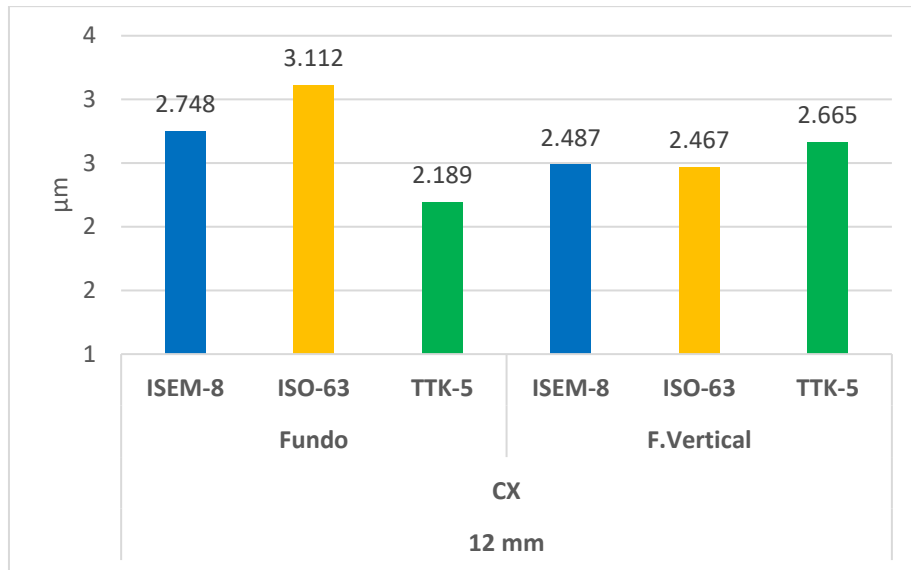


Figura 4.13 – SR Rugosidade Ra CX [μm]; Profundidade 12 mm

4.2.3. Rugosidade Rz, geometria CX

Na face Fundo (barra do lado esquerdo de cada grafite específica no gráfico de barras da **Figura 4.14**) a grafite TTK-5 obteve a menor Rugosidade Rz nas profundidades de eletroerosão 3 e 6 mm, obtendo os valores de 15,418 e 16,441 μm respectivamente. Na profundidade 12 mm o melhor resultado foi obtido pela grafite ISEM-8 com 15,310 μm , ainda que com margem diminuta de apenas 0,012 μm em relação ao segundo melhor resultado, a grafite TTK-5 com 15,332 μm .

Nas F.Verticais (barra do lado direito de cada grafite específica no gráfico de barras da **Figura 4.14**) a grafite ISEM-8 obteve o melhor resultado na profundidade 3 mm com 10,603 μm . No caso da profundidade 6 mm o melhor resultado, 11,341 μm , foi obtido pela grafite ISO-63. Já no caso da profundidade 12 mm a posição de melhor resultado, com 12,235 μm , foi ocupada pela grafite TTK-5.

Para análise de todos os resultados consultar a **Figura 4.14**.

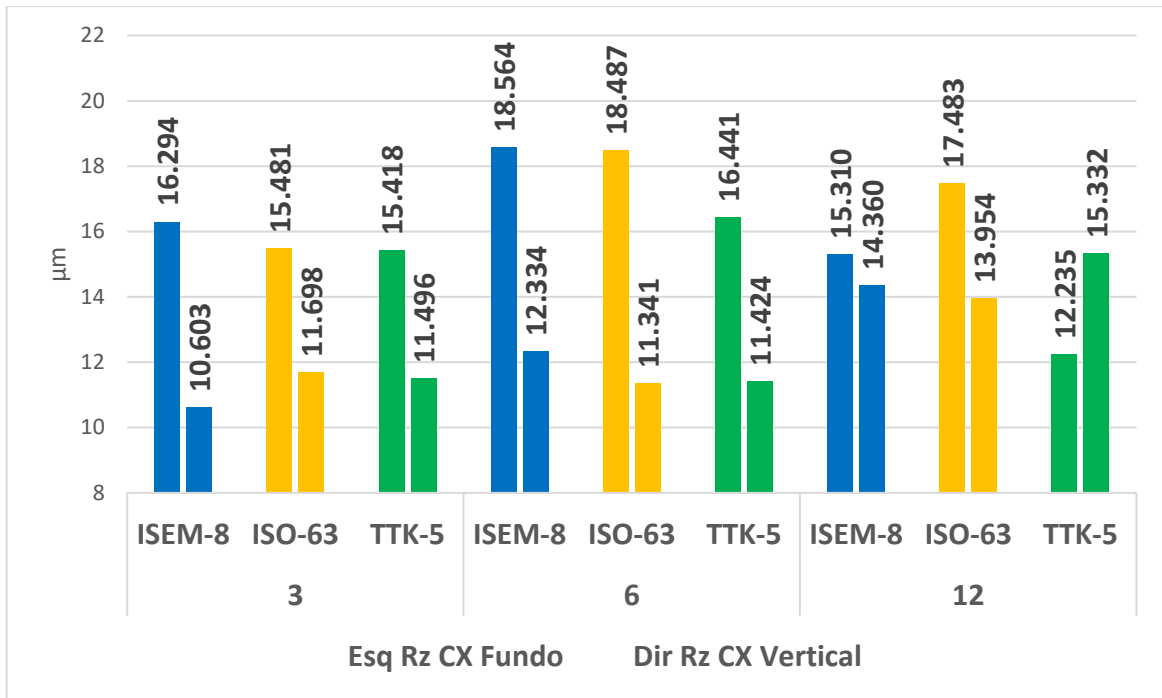


Figura 4.14 – SR Rugosidade Rz CX [µm]; Profundidade 3, 6, 12 mm

4.2.4. Classificação SR

Tendo em conta que não existe uma clara e inequívoca tendência sobre qual das grafites é melhor no que diz respeito à rugosidade superficial obtida, houve a necessidade de contabilizar quantos melhores resultados foram obtidos por cada grafite em todas as faces controladas (faces Fundo e F.Verticais) relativos à Rugosidade Ra e Rz (verificar **Figura 4.15**).

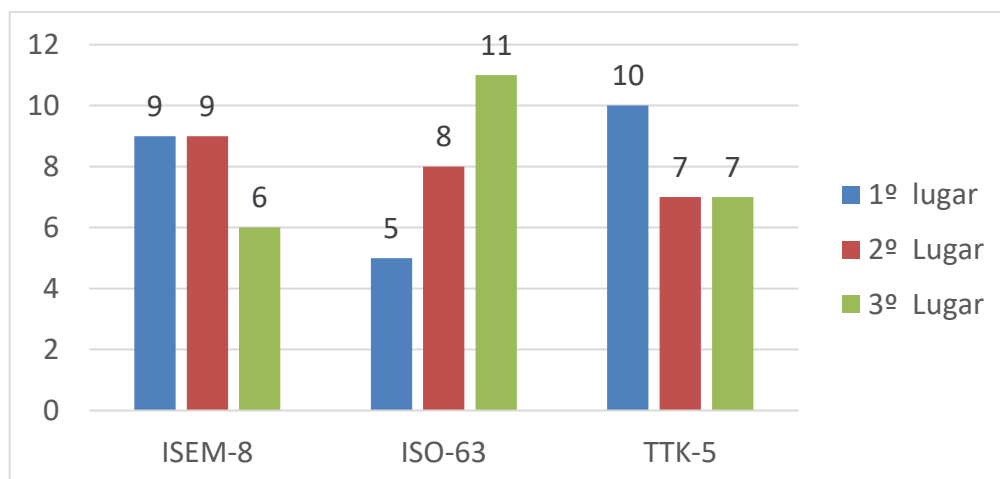


Figura 4.15 - Classificação SR

A grafite TTK-5 é a melhor escolha tendo obtido 10 primeiros lugares, 7 segundos lugares e 7 terceiros lugares. A segunda melhor escolha, sendo a mais equilibrada, temos a ISEM-8

com 9 primeiros, 9 segundos e 6 terceiros. Por último temos a pior escolha com apenas 5 primeiros, a ISO-63, tendo obtido também 8 segundos e 11 terceiros lugares no ranking da rugosidade superficial.

De salientar que em todas as eletroerosões, exceto a grafite TTK-5 na profundidade 12 mm da geometria CX, a Rugosidade Ra e Rz da face de Fundo foi sempre superior à rugosidade das F.Verticais. Isto deveu-se principalmente à deficiente limpeza dos detritos, que existe sempre, em geometrias completamente circundadas.

Podemos, com base nos valores apresentados, afirmar que uma geometria quando circundada pelas 5 faces (4 faces laterais e uma de fundo) em comparação com uma geometria circundada por apenas 4 faces (3 laterais e uma de fundo) obtém, em média global, valores de Rugosidade Ra e Rz superiores. Isto deve-se a uma maior dificuldade de eliminação/limpeza de detritos do espaço entre a ferramenta e a peça de trabalho. Estas afirmações são corroboradas pelos valores obtidos, a saber: Rib (circundada por 4 faces) obteve uma Rugosidade Ra global de 2,319 μm e uma Rugosidade Rz global de 13,734 μm ; CX obteve 2,501 μm para a Rugosidade Ra e 14,347 μm para a Rugosidade Rz.

4.3.DD

4.3.1. Planeza

Todos os resultados dos cálculos efetuados relativos à Planeza se encontram na **Tabela 4.6**, quer para a 1ªEletroerosão quer para a 2ªEletroerosão.

Tabela 4.6 – Planeza a partir de um conjunto de pontos discretos [mm]

Peça	Profundidade	Grafite	Planeza Rib				Planeza CX			
			1ª eletroerosão		2ª eletroerosão		1ª eletroerosão		2ª eletroerosão	
			Fundo	F. Verticais	Fundo	F. Verticais	Fundo	F. Verticais	Fundo	F. Verticais
I8H3	3 mm	ISEM-8	0,0175	0,0207	N/A	N/A	0,0362	0,0192	N/A	N/A
I63H3	3 mm	ISO-63	0,0144	0,0175	N/A	N/A	0,0407	0,0214	N/A	N/A
T5H3	3 mm	TTK-5	0,0314	0,0164	N/A	N/A	0,0423	0,0191	N/A	N/A
I8H6	6 mm	ISEM-8	0,0356	0,0250	S/N	S/N	0,0335	0,0350	0,0391	0,0281
I63H6	6 mm	ISO-63	0,0377	0,0230	S/N	S/N	0,0871	0,0623	0,0379	0,0258
T5H6	6 mm	TTK-5	0,0327	0,0185	S/N	S/N	0,0410	0,0344	0,0215	0,0425
I8H12	12 mm	ISEM-8	0,1471	0,0286	0,0121	0,0337	0,0912	0,0506	0,0361	0,0375
I63H12	12 mm	ISO-63	0,1112	0,0368	0,0153	0,0256	0,0506	0,0542	0,0566	0,0443
T5H12	12 mm	TTK-5	0,0947	0,0445	0,0139	0,0284	0,0257	0,0652	0,0147	0,0305

S/N - SEM NECESSIDADE; N/A - NÃO APLICÁVEL

Na 1ªEletroerosão a grafite ISEM-8, na profundidade 12 mm, na face Fundo, obteve o valor planeza mais elevado com 0,1471 mm. O menor valor, atingindo 0,0144 mm, foi obtido pela

grafite ISO-63, na profundidade 3 mm, na face Fundo. Os valores de 1ªEletroerosão, tal como foi dito anteriormente, não são vinculativos e finais para análise da conformidade da planeza das faces. A conformidade das faces é determinada após a obtenção da geometria pretendida.

Na 2ªEletroerosão, o menor valor foi obtido pela grafite ISEM-8, na profundidade 12 mm, na Face Fundo com 0,0121 mm. Curiosamente foi a mesma que obteve o valor de planeza mais elevado na 1ªEletroerosão. O valor mais elevado foi obtido pela grafite ISO-63 na profundidade 12 mm, na face Fundo com 0,0566 mm. De salientar que todos os valores finais de planeza obtidos estão abaixo do valor máximo estipulado de 0,08 mm, tendo sido considerados em conformidade com o pretendido.

4.3.1.1. Planeza; Geometria Rib

Na profundidade 3 mm (ver **Figura 4.16**), na face Fundo, o menor valor (0,0144 mm) foi obtido pela grafite ISO-63, tendo sido 17,71 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0175 mm) e 58,14 % menor do que a TTK-5 (0,0344 mm). O menor valor, nas F.Verticais, foi obtido pela grafite TTK-5 com 0,0164 mm, tendo sido 6,29 % menor do que a grafite ISO-63 (0,0175 mm) e 20,77 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0207 mm).

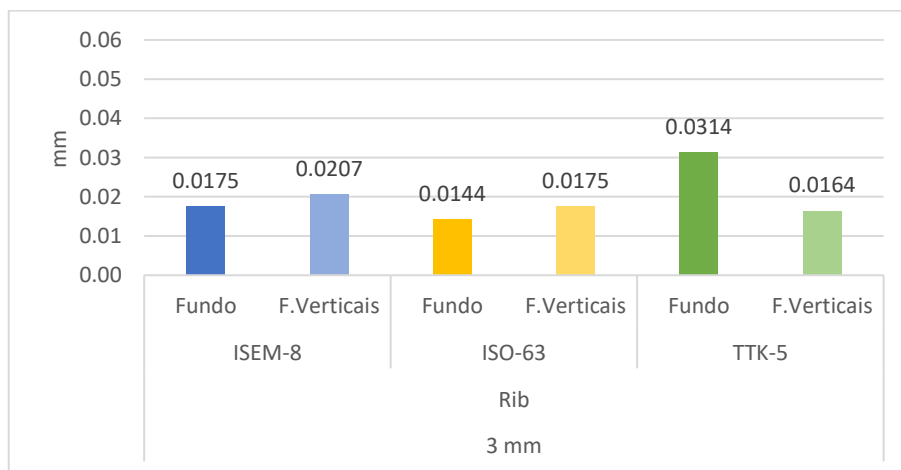


Figura 4.16 – Planeza Rib; Profundidade 3 mm

Na profundidade 6 mm (ver **Figura 4.17**), onde não foi necessário a aplicação de um segundo eléctrodo para obtenção da geometria planeada, na face Fundo, o menor valor (0,0327 mm) foi obtido pela grafite TTK-5, tendo sido 8,15 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0356 mm) e 13,26 % menor do que a ISO-63 (0,0377 mm). O menor valor das F.Verticais foi obtido pela grafite TTK-5 com 0,0185 mm, tendo sido 19,57 % menor do que a grafite ISO-63 (0,0230 mm) e 26,00 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0250 mm).

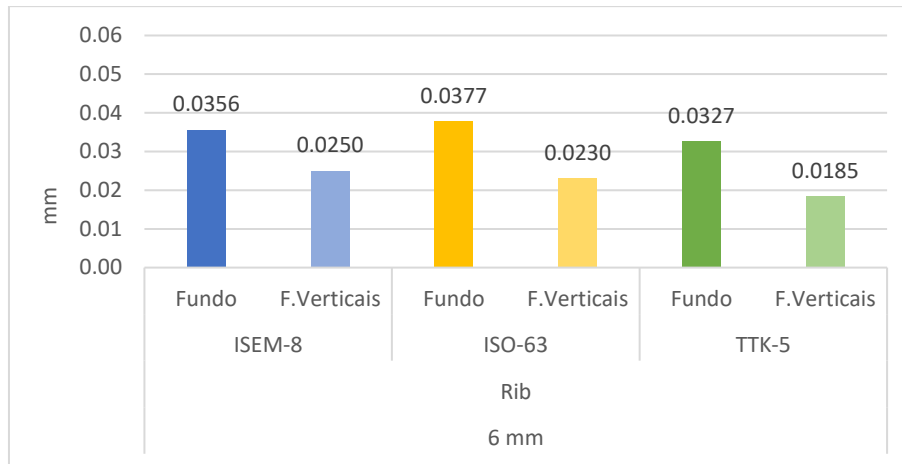


Figura 4.17 - Planeza Rib; Profundidade 6 mm

Na profundidade 12 mm (ver **Figura 4.18**), onde foi necessário a aplicação de um segundo eletrodo para a obtenção da geometria pretendida (consequentemente apenas a segunda eletroerosão foi analisada), na face Fundo, o menor valor (0,0121 mm) foi obtido pela grafite ISEM-8, tendo sido 12,95 % menor do que a grafite TTK-5 (0,0139 mm) e 20,92 % menor do que a ISO-63 (0,0153 mm). O menor valor das faces F.Verticais foi obtido pela grafite ISO-63 com 0,0256 mm, tendo sido 9,86 % menor do que a grafite TTK-5 (0,0284 mm) e 24,04 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0337 mm).

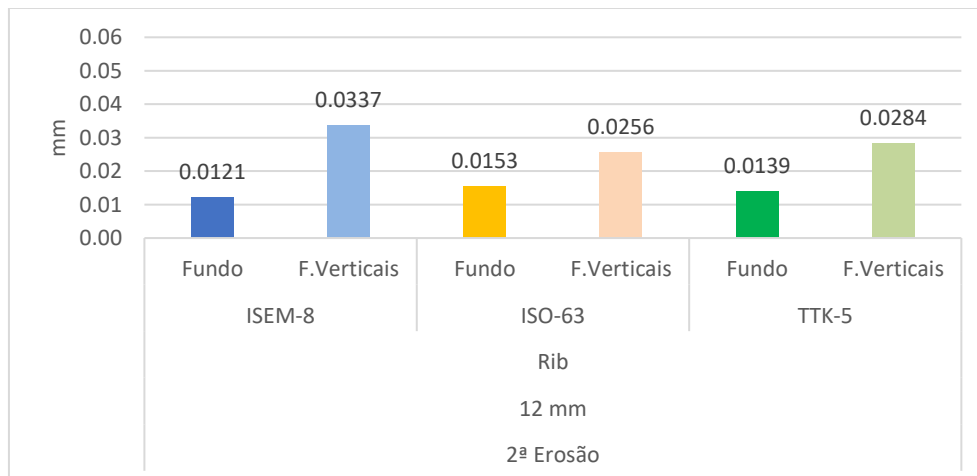


Figura 4.18 - Planeza Rib; Profundidade 12 mm

4.3.1.2. Planeza; Geometria CX

Na profundidade 3 mm (ver **Figura 4.19**), na face Fundo, o menor valor (0,0362 mm) foi obtido pela grafite ISEM-8, tendo sido 11,06 % menor do que a grafite ISO-63 (0,0407 mm) e 14,42 % menor do que a TTK-5 (0,0423 mm). O menor valor das F.Verticais foi obtido pela grafite TTK-5 com 0,0191 mm, com a pouca expressiva diferença de 0,52 % em relação

ao segundo melhor valor, a grafite ISEM-8 (0,0192 mm). O valor de TTK-5 foi 10,75 % menor do que a grafite ISO-63 (0,0214 mm).

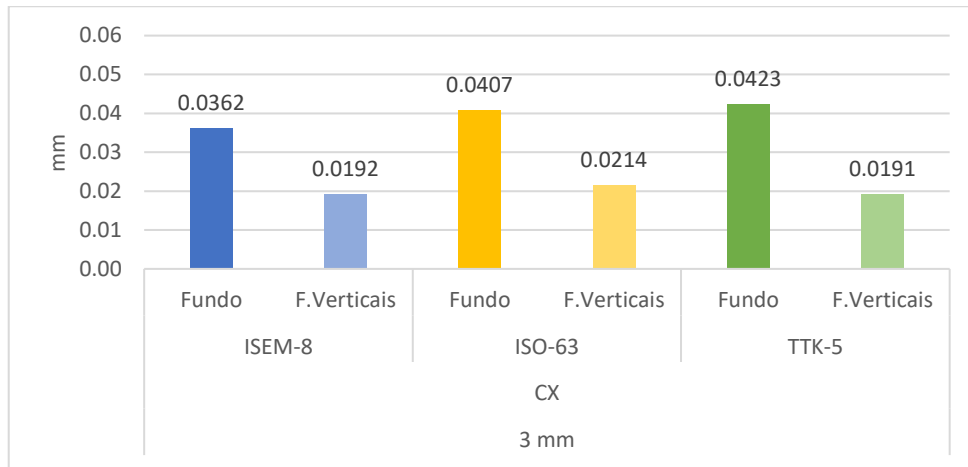


Figura 4.19 - Planeza CX; Profundidade 3 mm

Na profundidade 6 mm (ver **Figura 4.20**), onde foi necessário a aplicação de um segundo eletrodo para a obtenção da geometria pretendida (consequentemente apenas a segunda eletroerosão foi analisada), na face Fundo, o menor valor (0,0215 mm) foi obtido pela grafite TTK-5, tendo sido 43,27 % menor do que a grafite ISO-63 (0,0379 mm) e 45,01 % menor do que a ISEM-8 (0,0391 mm). O menor valor das faces F.Verticais foi obtido pela grafite ISO-63 com 0,0258 mm, tendo sido 8,19 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0281 mm) e 39,29 % menor do que a grafite TTK-5 (0,0425 mm).

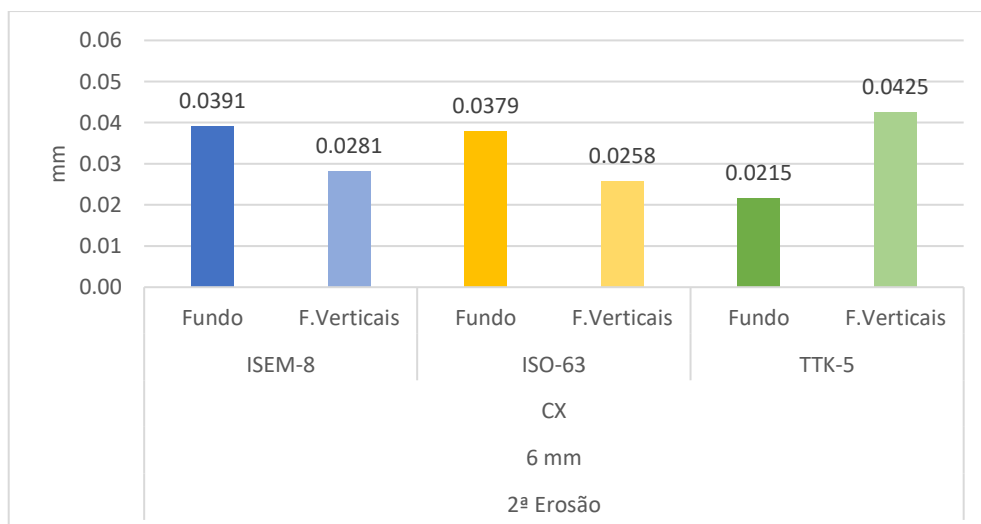


Figura 4.20 - Planeza CX; Profundidade 6 mm

Na profundidade 12 mm (ver **Figura 4.21**), onde foi necessário a aplicação de um segundo elétrodo para a obtenção da geometria pretendida (consequentemente apenas a segunda eletroerosão foi analisada), na face Fundo, o menor valor foi obtido pela grafite TTK-5 (0,0147 mm), tendo sido 59,28 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0361 mm) e 74,03 % menor do que a ISO-63 (0,0566 mm). O menor valor das F.Verticais foi obtido pela grafite TTK-5 com 0,0305 mm, tendo sido 18,67 % menor do que a grafite ISEM-8 (0,0375 mm) e 31,15 % menor do que a grafite ISO-63 (0,0443 mm).

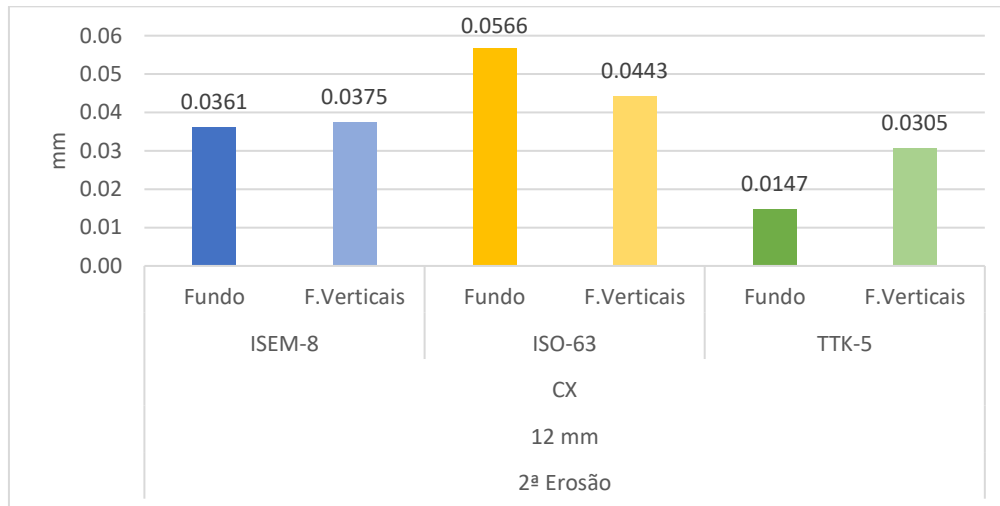


Figura 4.21 - Planeza CX; Profundidade 12 mm

4.3.2. Classificação Planeza

Perante a disparidade de resultados nos valores de Planeza apurados, e à semelhança do que aconteceu na SR, a quantidade de melhores resultados obtidos por cada grafite em todas as faces controladas (faces Fundo e F.Verticais) é apresentado na **Figura 4.22**.

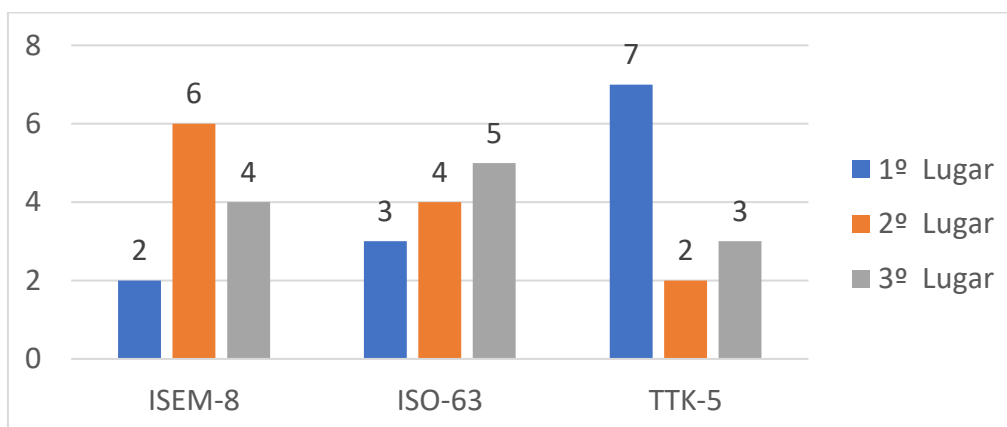


Figura 4.22 - Classificação Planeza

A grafite TTK-5 é a melhor escolha tendo obtido 7 primeiros lugares, 2 segundos lugares e 3 terceiros lugares. A ISO-63, segunda melhor escolha, obteve 3 primeiros lugares, 4 segundos lugares e 5 terceiros lugares. A ISEM-8, a pior escolha no que diz respeito à Planeza, obteve 2 primeiros lugares, 6 segundos lugares e 4 terceiros lugares.

4.3.3. Dimensão nos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico nos eixos X e Y

Os desvios da Dimensão nos eixos X, Y e Z e do Centro Geométrico, nos eixos X e Y são apresentados neste capítulo. Os eixos X e Y, em cada profundidade, estão descritos apenas em dois níveis, os níveis mais importantes. O desvio do Centro Geométrico ao longo do eixo Z não é apresentado sendo considerado, em vez deste índice, um deslocamento linear de toda a geometria em Z na proporção correspondente ao desvio da Dimensão em Z. Os valores calculados, quando em análise, devem ser analisados em módulo, sendo que valores positivos significam geometria maior do que a geometria projetada em CAD e valores negativos significam geometria menor do que a geometria projetada em CAD.

4.3.3.1. Dimensão nos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico nos eixos X e Y - Geometria Rib

Todos os desvios da Dimensão do Rib na profundidade 3 mm estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio dimensional mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, na dimensão ao longo do eixo X (Dimensão X) do Nível 1.5, atingindo o valor de 0,0243 mm, e o menos elevado pela grafite TTK-5 na dimensão ao longo do eixo Z (Dimensão Z) com o valor -0,0013 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.23**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 2.5.

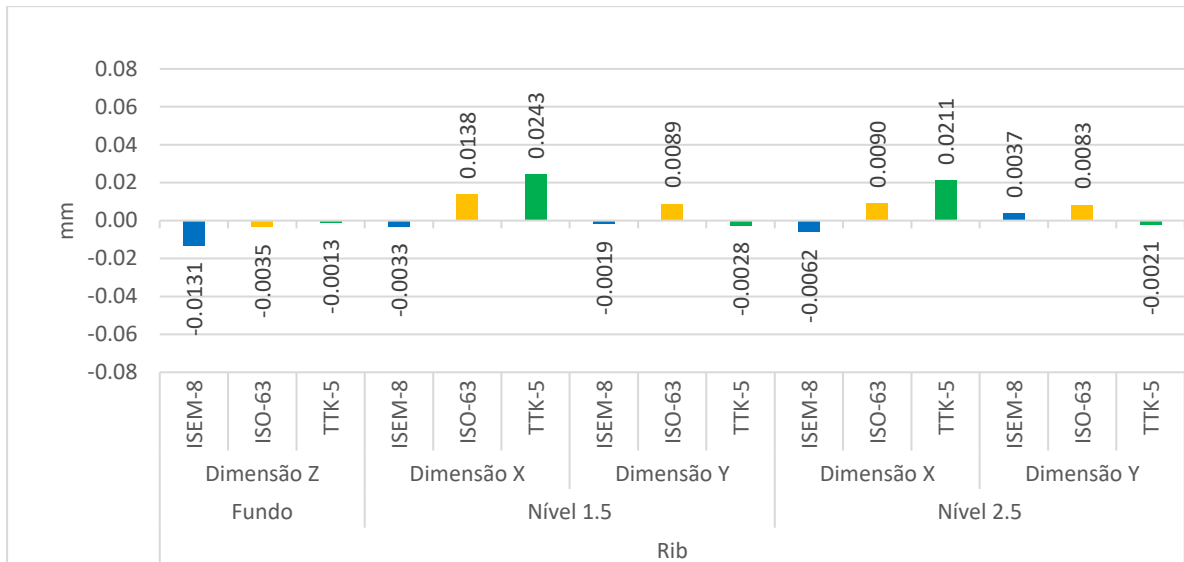


Figura 4.23 - DD Rib; Profundidade 3 mm; Dimensão

Todos os desvios do Centro Geométrico do Rib na profundidade 3 mm estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, no Centro Geométrico ao longo do eixo X (Centro Geométrico X) do Nível 2.5, atingindo o valor de -0,0180 mm, e o desvio menos elevado pela grafite ISEM-8 no Centro Geométrico ao longo do eixo Y (Centro Geométrico Y) com o valor -0,0010 mm. Para análise completa de todos os desvios do Centro Geométrico consultar a **Figura 4.24**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 2.5.

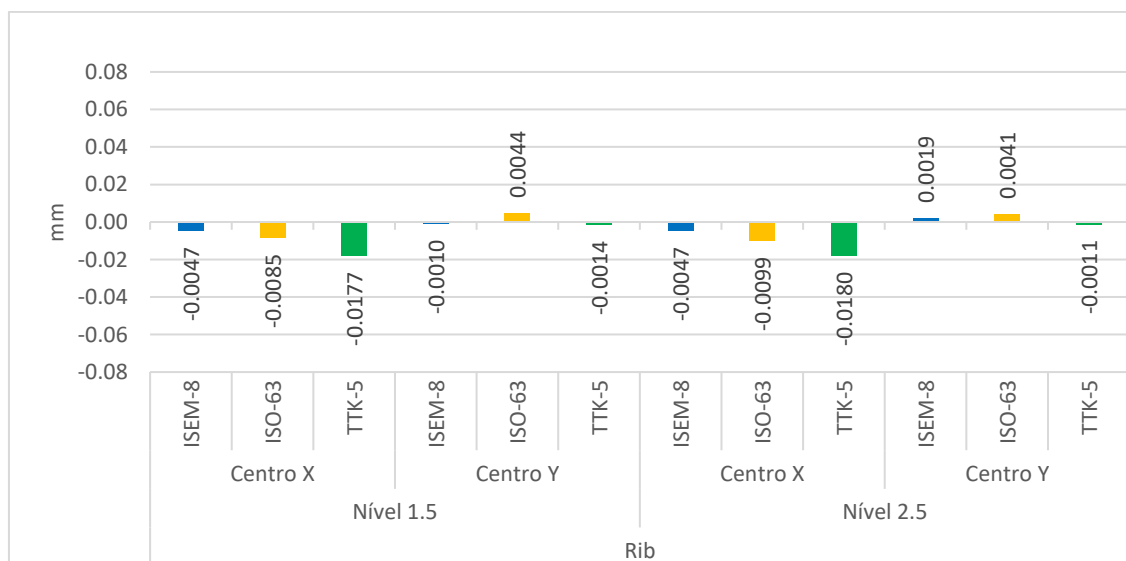


Figura 4.24 - DD Rib; Profundidade 3 mm; Centro Geométrico

Todos os desvios da Dimensão do Rib na profundidade 6 mm estão dentro dos limites máximos permitidos, não tendo sido necessário o uso de um segundo elétrodo para atingir a geometria pretendida. O desvio dimensional mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, na Dimensão Z, atingindo o valor de -0,0316 mm. O menor valor de desvio foi obtido pela grafite ISEM-8 no desvio da Dimensão ao longo do eixo Y (Dimensão Y) no Nível 1.5 com o valor 0,0012 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.25**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 5.5.

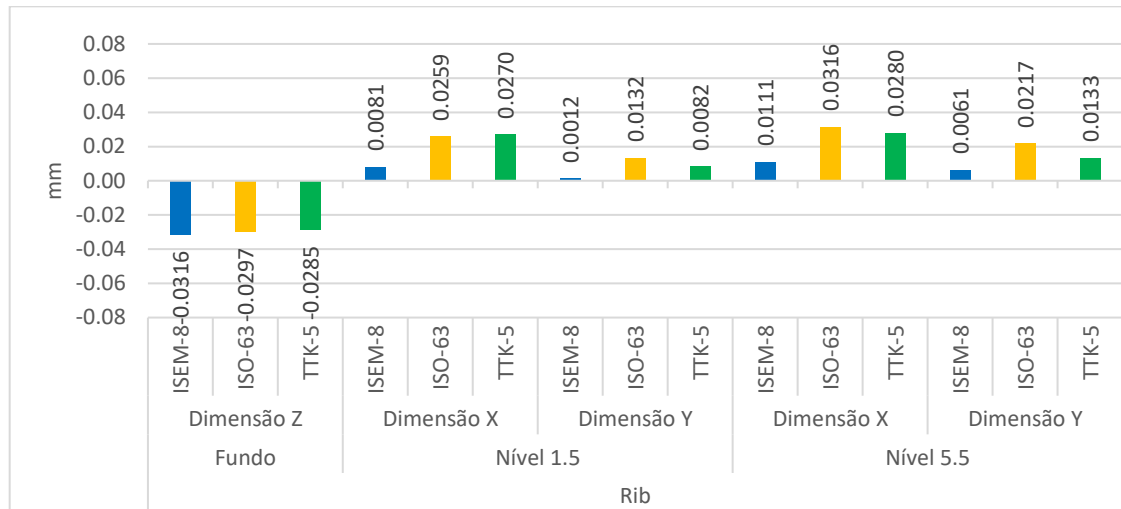


Figura 4.25 - DD Rib; Profundidade 6 mm; Dimensão

Todos os desvios do Centro Geométrico do Rib na profundidade 6 mm estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, no Centro Geométrico X do Nível 5.5, atingindo o valor de 0,0111 mm, e o menos elevado pela ISEM-8 no Centro Geométrico X e Centro Geométrico Y do Nível 1.5 com o valor -0,0006 e 0,0006 mm respetivamente. Para análise completa de todos os desvios do Centro Geométrico consultar a **Figura 4.26**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 5.5.

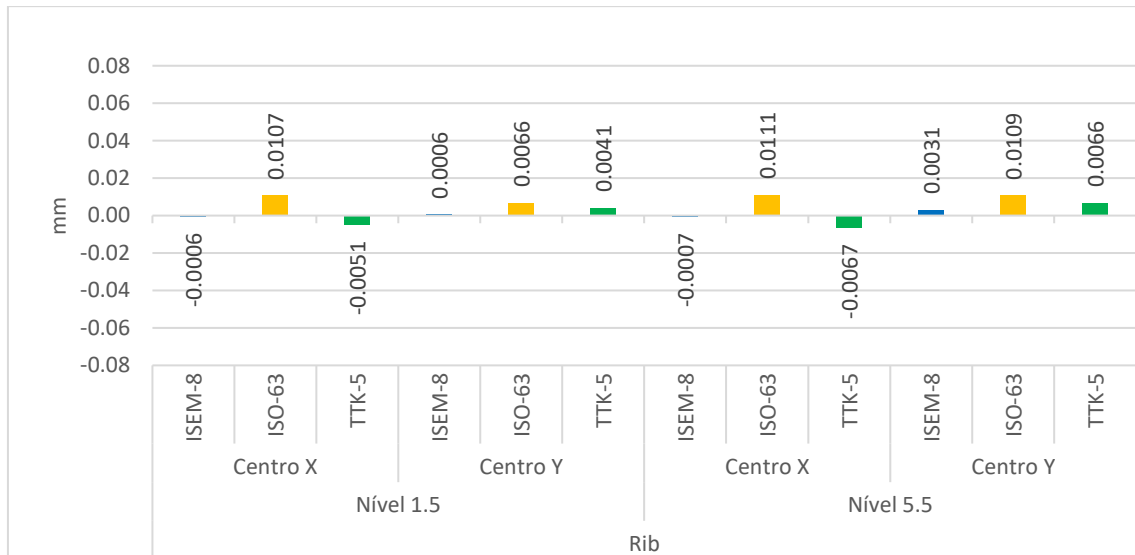


Figura 4.26 - DD Rib; Profundidade 6 mm; Centro Geométrico

Na 1ª Eletroerosão, na profundidade 12 mm da geometria Rib, foram obtidos desvios superiores ao permitido, o que impôs o uso de um segundo eletrodo em todas as eletroerosões feitas. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, na Dimensão Y do Nível 1.5, atingindo o valor de -0,0890 mm. O valor de desvio menos elevado foi obtido pela grafite TTK-5 na Dimensão X do Nível 11.5, com o valor -0,0001 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.27**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 11.5.

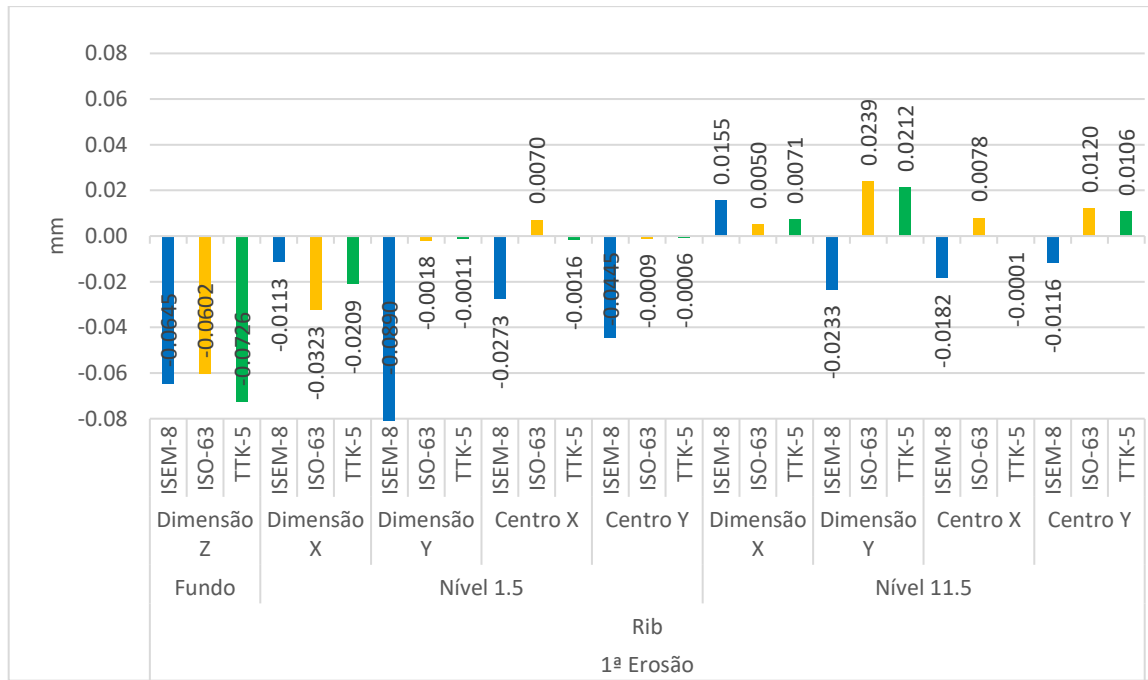


Figura 4.27 - DD Rib; Profundidade 12 mm; Dimensão e Centro Geométrico (1ªEletroerosão)

Na 2ªEletroerosão, todos os desvios da Dimensão do Rib na profundidade 12 mm estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio dimensional mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, na Dimensão X no Nível 1.5, atingindo o valor de 0,0327 mm. O desvio menos elevado foi obtido pela grafite ISO-63 na Dimensão Z com o valor 0,0008 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.28**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 11.5.

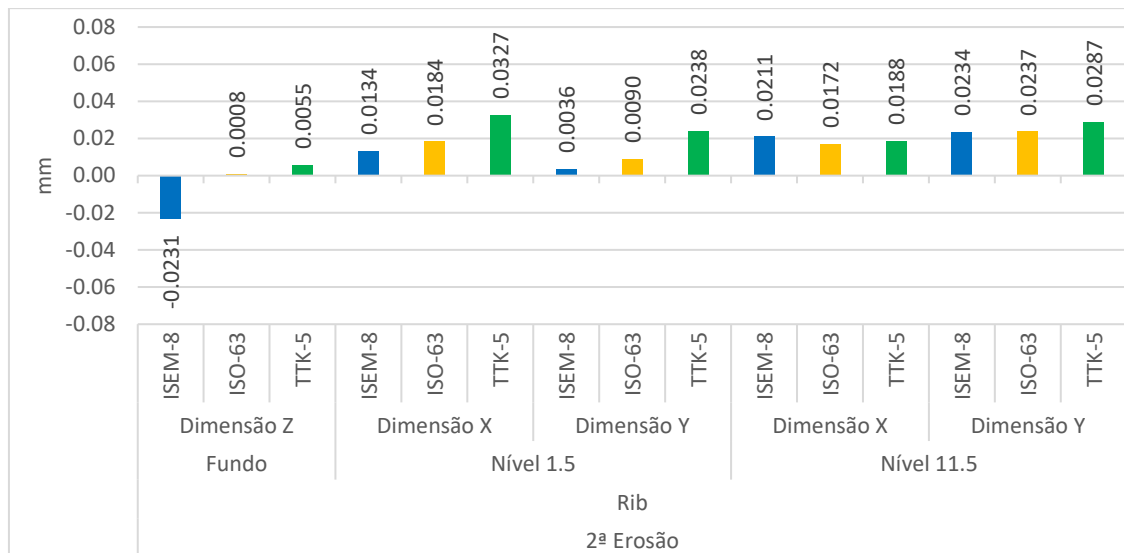


Figura 4.28 - DD Rib; Profundidade 12 mm; Dimensão (2ªEletroerosão)

Na 2ªEletroerosão, todos os desvios do Centro Geométrico do Rib na profundidade 12 mm estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, no Centro Geométrico Y do Nível 11.5, atingindo o valor de 0,0144 mm, e o menos elevado pela ISEM-8 no Centro Geométrico X no Nível 1.5 com o valor 0,0001 mm. Para análise completa de todos os desvios do Centro Geométrico consultar a **Figura 4.29**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 11.5.

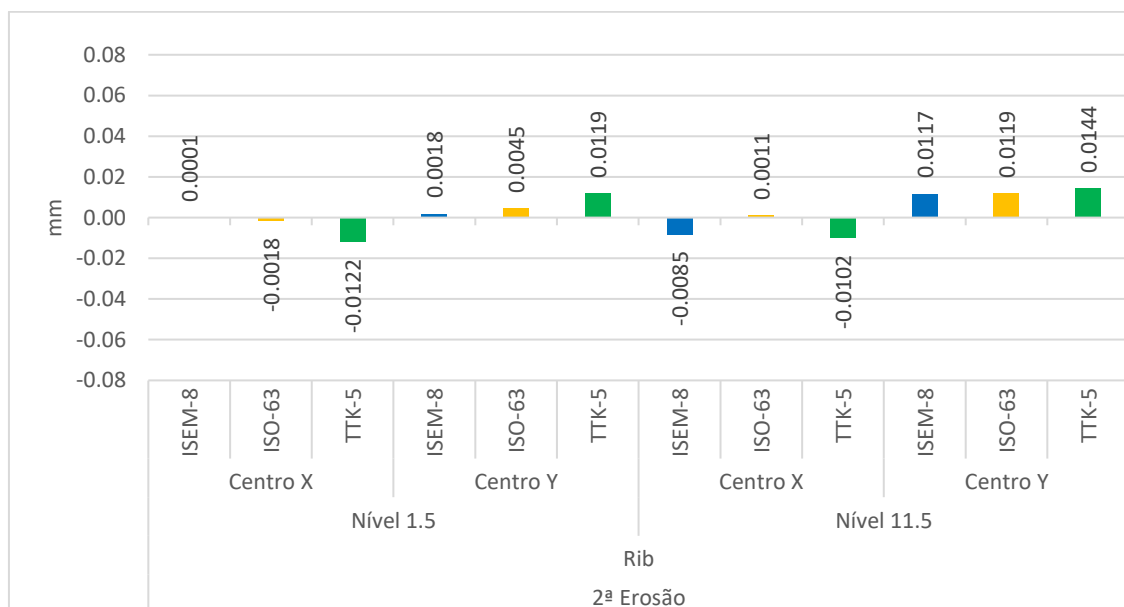


Figura 4.29 - DD Rib; Profundidade 12 mm; Centro Geométrico (2ªEletroerosão)

Por observação dos gráficos correspondentes aos desvios da Dimensão, podemos observar uma tendência. À medida que a profundidade de eletroerosão aumenta, ocorre um aumento dos desvios da Dimensão X e Y no sentido positivo, de quase todas as grafites, com ênfase

no nível mais elevado. A mesma tendência se verifica entre a 1ªEletroerosão e a 2ªEletroerosão para a Dimensão X e para a Dimensão Y, apesar de todos os valores se manterem inferiores aos desvios máximos permitidos.

4.3.3.1. Dimensão nos eixos X, Y e Z e Centro Geométrico nos eixos X e Y - Geometria CX

O desvio dimensional mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8 na Dimensão Z, atingindo o valor de -0,0595 mm, e o menos elevado pela grafite TTK-5 na Dimensão X no Nível 2.5 com o valor 0,0008 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.30**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 2.5.

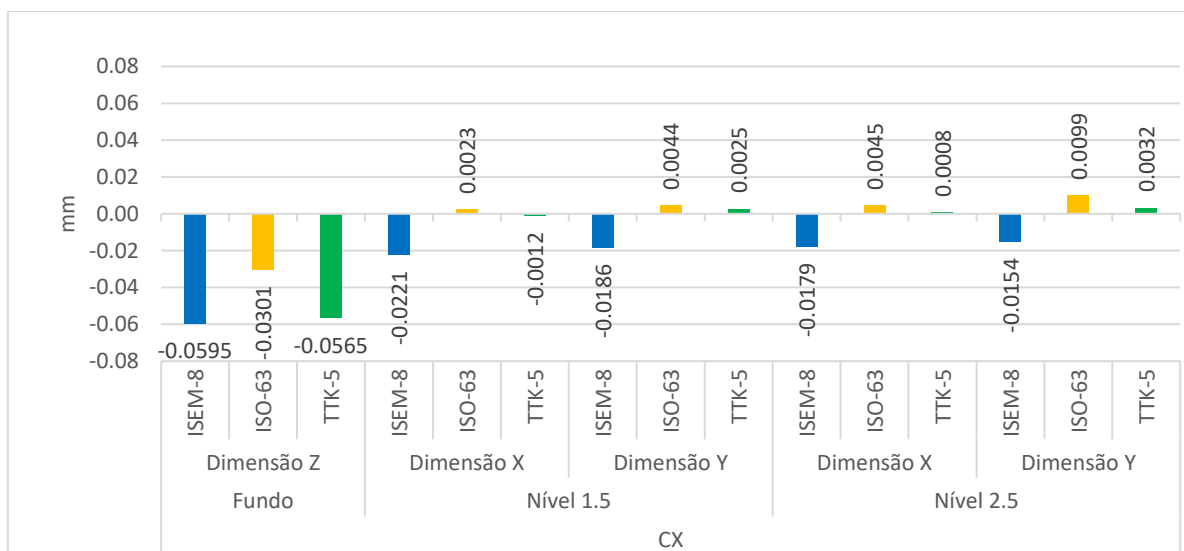


Figura 4.30 - DD CX; Profundidade 3 mm; Dimensão

As eletroerosões de profundidade 3 mm foram realizadas recorrendo apenas a um eléctrodo, independentemente da geometria atingida. Uma Dimensão da CX em duas grafites foram consideradas não conformes, devido a ter sido ultrapassado o desvio máximo permitido ao longo do eixo Z (+/- 0,04 mm). Ou seja, nas grafites ISEM-8 e TTK-5, na Dimensão Z, obteve-se um desvio de -0,0595 mm e -0,0565 mm respetivamente.

Todos os desvios do Centro Geométrico da CX na profundidade 3 mm estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8 no Centro Geométrico Y do Nível 2.5, atingindo o valor de 0,0195 mm, e o menor pela grafite ISEM-8 no Centro Geométrico X do Nível 1.5 com o valor -0,0019 mm. Para análise completa de todos os desvios do Centro Geométrico consultar a **Figura 4.31**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 2.5.

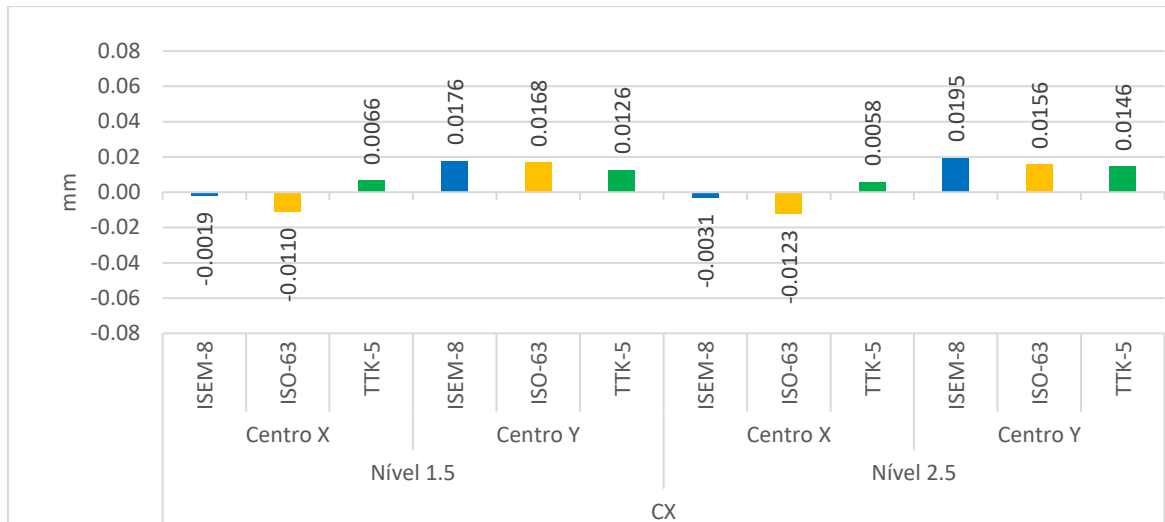


Figura 4.31 - DD CX; Profundidade 3 mm; Centro Geométrico

Na 1ª Eletroerosão, na profundidade 6 mm da geometria CX, foram obtidos desvios superiores ao permitido, o que impôs o uso de um segundo eletrodo em todas as eletroerosões feitas. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, na Dimensão Z, atingindo o valor de -0,0748 mm. O desvio menos elevado foi obtido pela grafite TTK-5 na Dimensão X no Nível 1.5 com o valor -0,0004 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.32**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 5.5.

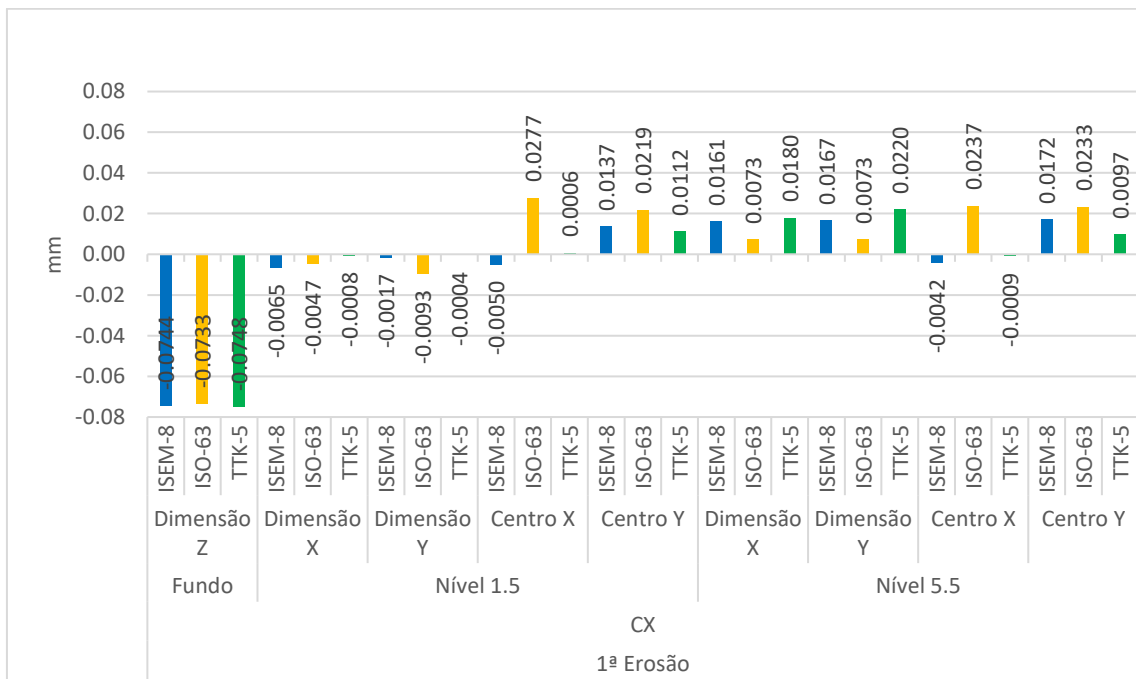


Figura 4.32 - DD CX; Profundidade 6 mm; Dimensão e Centro Geométrico (1ª Eletroerosão)

Na 2ª Eletroerosão, todos os desvios da Dimensão da CX, na profundidade 6 mm, estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISO-63, na Dimensão Y do Nível 5.5, atingindo o valor de 0,0386 mm. O desvio menos elevado foi obtido pela grafite TTK-5 na Dimensão X no Nível 1.5 com o valor -0,0007 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.33**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 5.5.

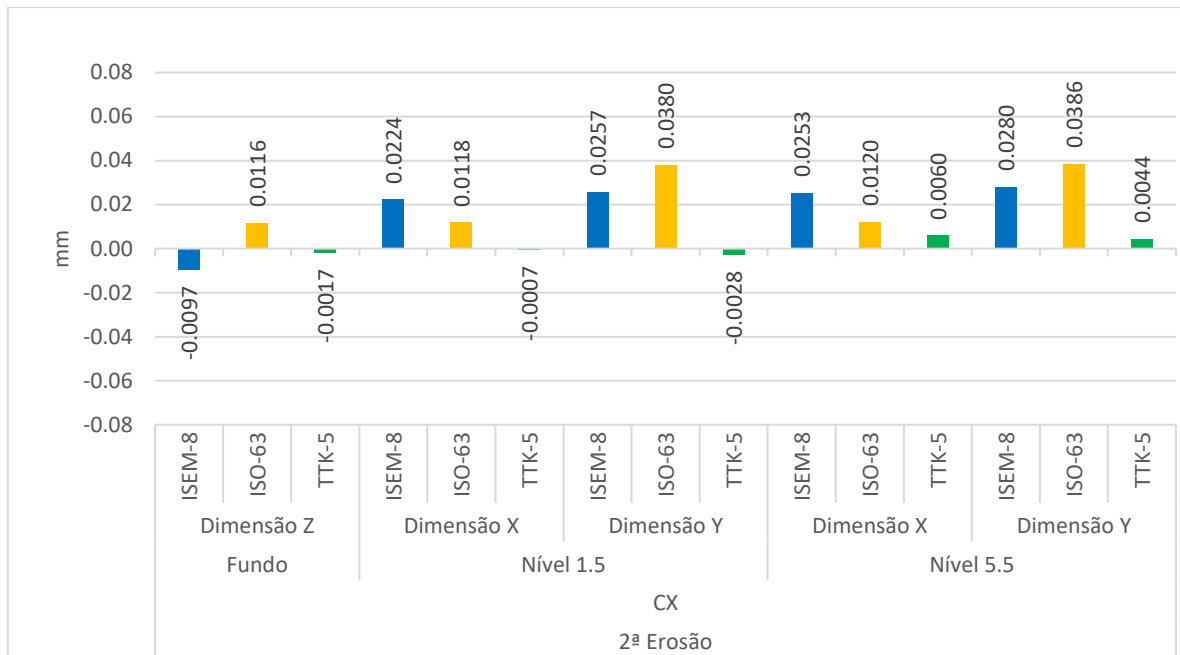


Figura 4.33 - DD CX; Profundidade 6 mm; Dimensão (2ª Eletroerosão)

Todos os desvios do Centro Geométrico da CX na profundidade 6 mm, estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite TTK-5, no Centro Geométrico Y do Nível 5.5, atingindo o valor de 0,0263 mm, e o menos elevado pela ISEM-8 no Centro Geométrico X no Nível 1.5 com o valor -0,0018. Para análise completa de todos os desvios das Centro Geométrico consultar a **Figura 4.34**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 5.5.

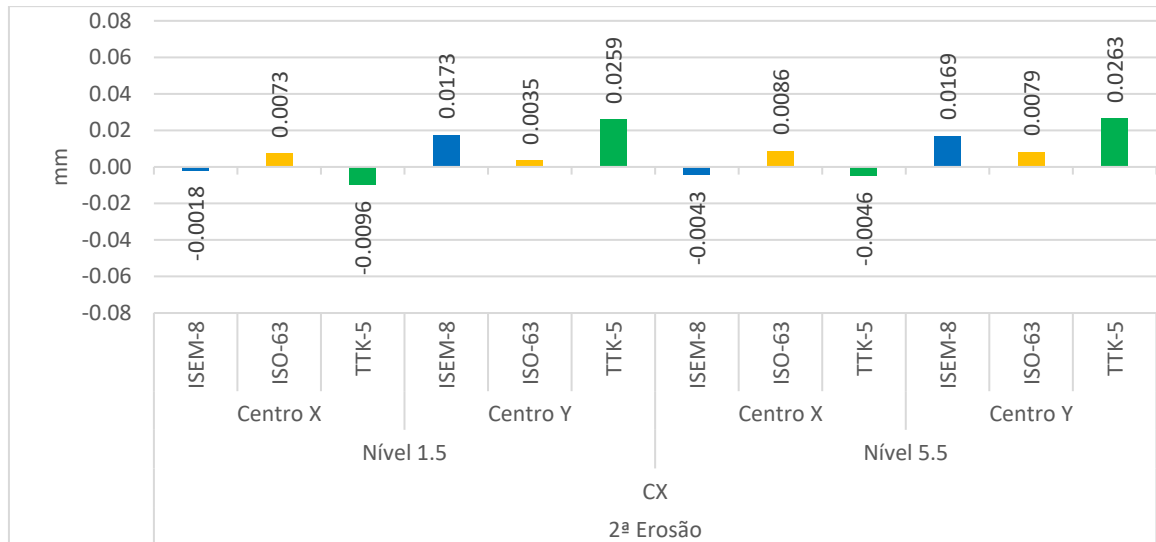


Figura 4.34 - DD CX; Profundidade 6 mm; Centro Geométrico (2ªEletroerosão)

A 1ªEletroerosão na profundidade 12 mm obteve desvios superiores ao permitido, o que impôs o uso de um segundo eléctrodo em todas as eletroerosões feitas. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, na Dimensão Z, atingindo o valor de -0,1515 mm. O valor de desvio menor foi obtido pela grafite ISO-63 na Dimensão Y no Nível 11.5 com o valor 0,0001 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.35**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 11.5.

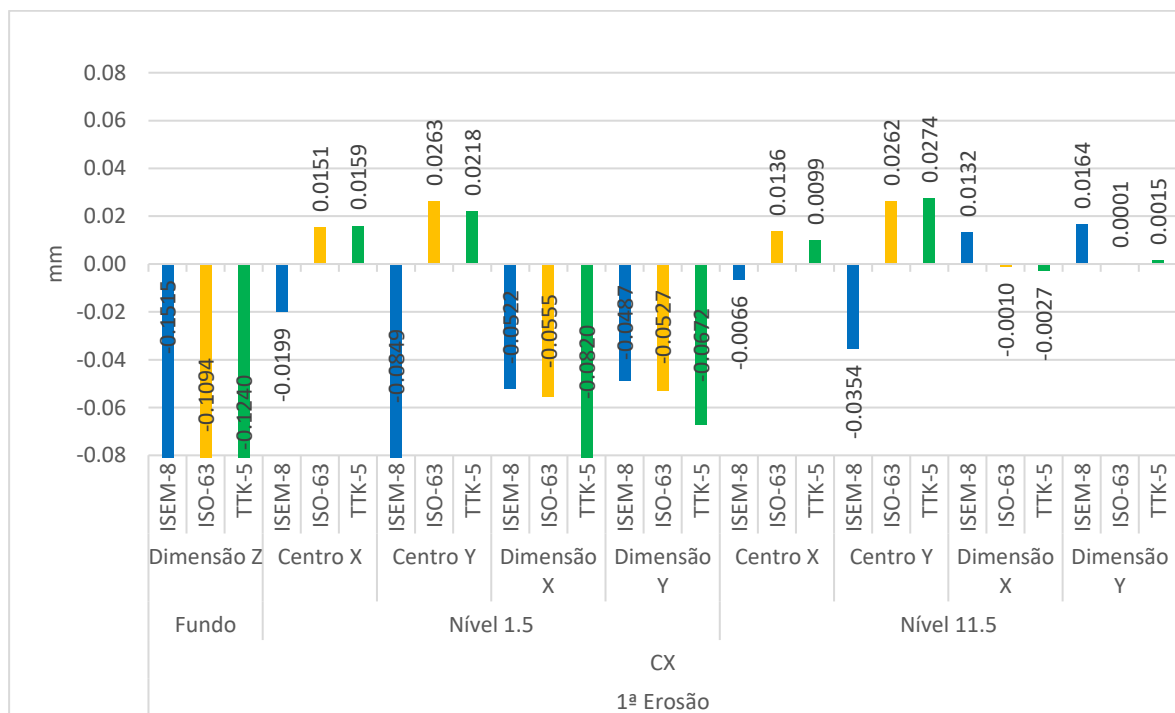


Figura 4.35 - DD CX; Profundidade 12 mm; Dimensão e Centro Geométrico (1ªEletroerosão)

Na 2ªEletroerosão, na geometria CX de profundidade 12 mm, todos os desvios estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, na Dimensão Y no Nível 11.5, atingindo o valor de 0,0354 mm. O menor valor de desvio foi obtido pela grafite ISEM-8 na Dimensão X no Nível 1.5 com o valor de -0,0007 mm. Para análise completa de todos os desvios dimensionais consultar a **Figura 4.36**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 11.5.

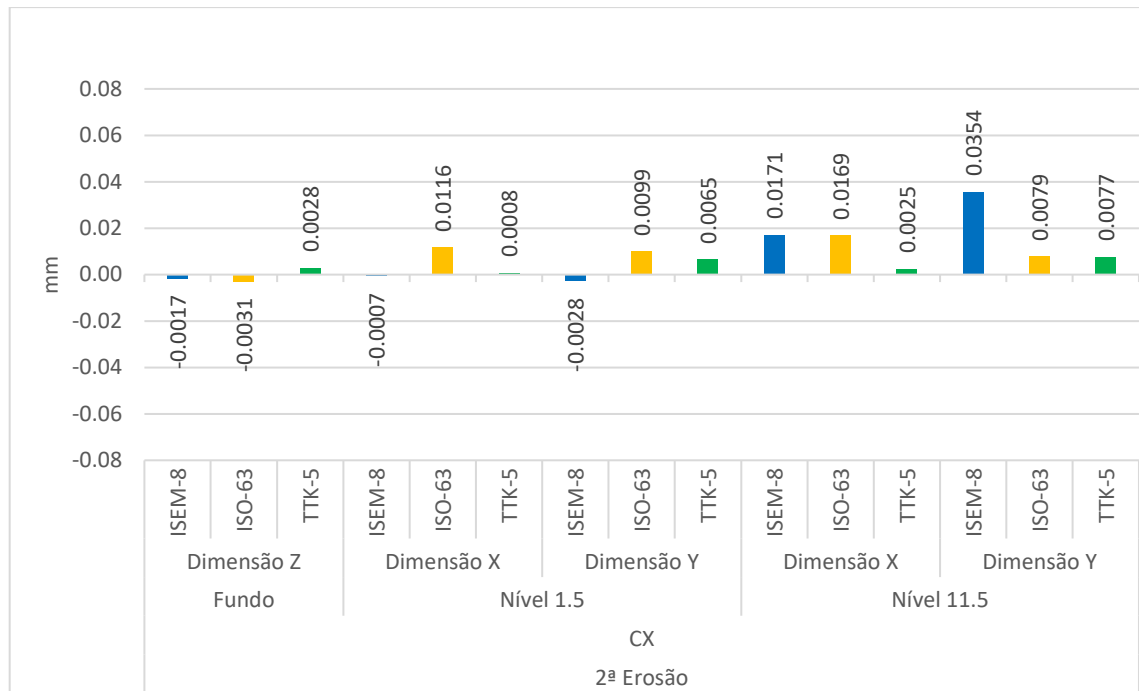


Figura 4.36 - DD CX; Profundidade 12 mm; Dimensão (2ªEletroerosão)

Todos os desvios do Centro Geométrico da CX na profundidade 12 mm, estão dentro dos limites máximos permitidos. O desvio mais elevado foi obtido pela grafite ISEM-8, no Centro Geométrico Y do Nível 1.5, atingindo o valor de 0,0259 mm, e o menor pela ISO-63 no Centro Geométrico X no Nível 1.5 com o valor 0,0034 mm. Para análise completa de todos os desvios das Centro Geométrico consultar a **Figura 4.37**, onde está representado o Nível 1.5 e o Nível 11.5.

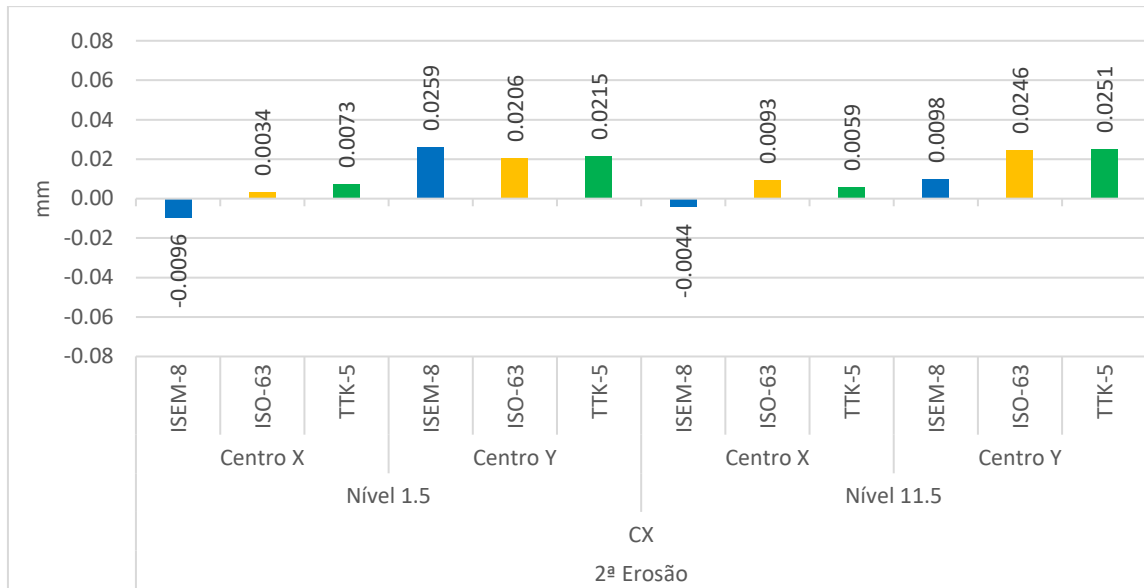


Figura 4.37 - DD CX; Profundidade 12 mm; Centro Geométrico (2ªEletroerosão)

Os valores dos desvios apresentados para a geometria CX não apresentam nenhuma tendência a ser considerada. Na eletroerosão do último eletrodo usado, todos os valores de desvios ficaram abaixo dos desvios máximos permitidos. A exceção verificou-se para a Dimensão Z, e consequente movimento linear em Z da geometria CX na profundidade 3 mm para as grafites ISEM-8 e TTK-5.

Por observação dos gráficos relativos aos desvios da Dimensão, podemos identificar um aumento da Dimensão X e Y, da profundidade de eletroerosão 3 mm para 6 mm, de quase todas as grafites. O mesmo não se verifica da profundidade 6 para a 12 mm.

4.4. CP_{tot} e CEP

A **Tabela 4.7** resume os resultados obtidos pelo cálculo do CP_{tot} e CEP resultante das eletroerosões realizadas.

Tabela 4.7 - Custo total do processo (CP_{tot}) e Custo Específico do Processo (CEP)

Custo total [CP_{tot} - €] e Custo Específico do Processo [CEP - €/mm³]						
Peça	Prof. [mm]	Grafite	C. total Rib	CEP Rib	C. total CX	CEP CX
I8H3	3	ISEM-8	26,40	0,075	67,46	0,014
I63H3	3	ISO-63	27,50	0,077	67,20	0,014
T5H3	3	TTK-5	29,96	0,083	74,98	0,016
I8H6	6	ISEM-8	39,86	0,054	122,41	0,013
I63H6	6	ISO-63	47,97	0,057	130,84	0,014
T5H6	6	TTK-5	47,32	0,064	136,99	0,014
I8H12	12	ISEM-8	100,12	0,066	177,29	0,009
I63H12	12	ISO-63	112,16	0,072	195,35	0,010
T5H12	12	TTK-5	121,09	0,078	198,66	0,010

4.4.1. CP_{tot} e CEP - Geometria Rib

Na profundidade de eletroerosão 3 mm (ver **Figura 4.38**) o menor valor de CP_{tot} foi obtido pela grafite ISEM-8, com 26,40 €, tendo sido 4,00 % menor do que a grafite ISO-63 (27,50 €) e 11,88 % menor do que a grafite TTK-5 (29,96 €). O CEP obtido foi de 0,075 €, 0,077 € e 0,083 € para a grafite ISEM-8, ISO-63 e TTK-5 respetivamente.

Na profundidade de eletroerosão 6 mm, o menor valor de CP_{tot} foi obtido pela grafite ISEM-8 com 39,86 €, tendo sido 15,77 % menor do que a grafite TTK-5 (47,32 €) e 16,91 % menor do que a grafite ISO-63 (47,97 €). O CEP obtido foi de 0,054 €, 0,057 € e 0,064 € para a grafite ISEM-8, ISO-63 e TTK-5 respetivamente. O facto de a grafite ISO-63 ter obtido o CP_{tot} mais elevado, mas ter apenas o segundo valor mais elevado de CEP, deve-se ao facto de a grafite ter obtido o valor de volume erodido mais elevado das três grafites (843,5897 mm³ em comparação a 735,2564 mm³ da ISEM-8 e 742,3077 mm³ da TTK-5).

Na profundidade de eletroerosão 12 mm, a grafite que obteve o menor valor de CP_{tot} foi a grafite ISEM-8, com 100,12 €, tendo sido 10,73 % menor do que a grafite ISO-63 (112,16 €) e 17,32 % menor do que a grafite TTK-5 (121,09 €). O CEP obtido foi de 0,066 €, 0,072 € e 0,078 € para a grafite ISEM-8, ISO-63 e TTK-5 respetivamente.

Para uma análise mais profunda do CP_{tot} e CEP da geometria Rib consultar a **Figura 4.38**.

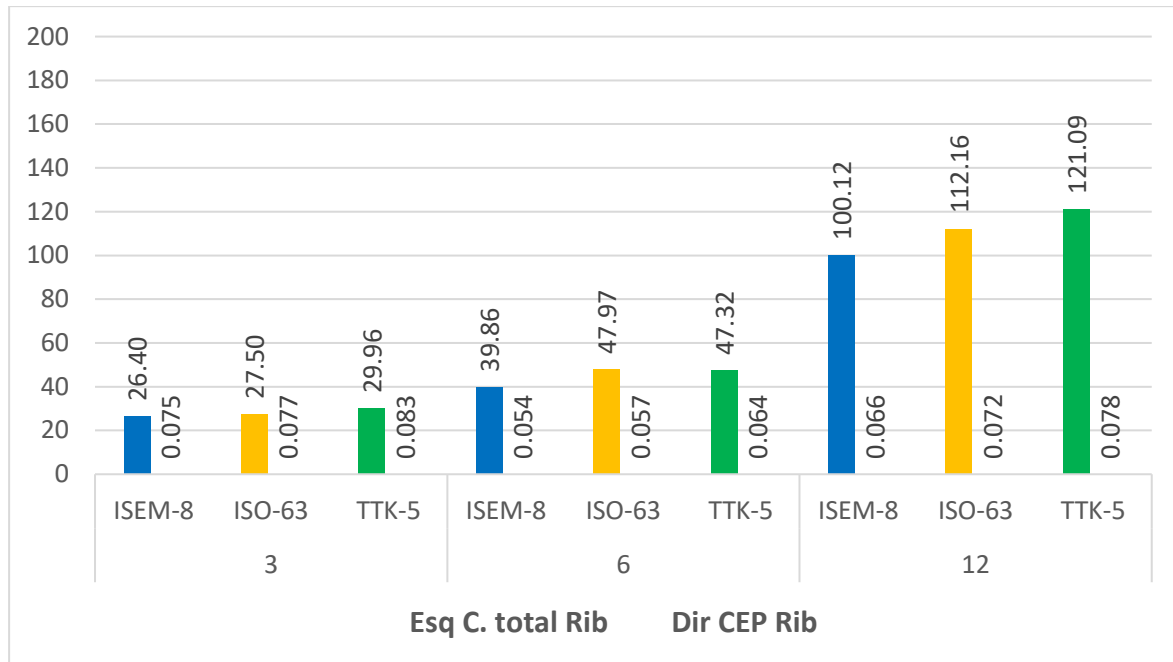


Figura 4.38 – CP_{tot} [€]; CEP [€/mm³]; Geometria Rib

4.4.2. CP_{tot} e CEP - Geometria CX

Na profundidade de eletroerosão 3 mm (ver **Figura 4.39**) a grafite que obteve o menor valor de CP_{tot} foi a grafite ISO-63, com 67,20 €, tendo sido apenas 0,39 % menor do que a grafite ISEM-8 (67,46 €) e 10,38 % menor do que a grafite TTK-5 (29,96 €). O CEP obtido foi de 0,0142 €, 0,0144 € e 0,0159 € para a grafite ISO-63, ISEM-8 e TTK-5 respetivamente.

Na profundidade de eletroerosão 6 mm, a grafite ISEM-8 obteve o menor valor de CP_{tot} com 122,41 €, tendo sido 6,44 % menor do que a grafite ISO-63 (130,84 €) e 10,64 % menor do que a grafite TTK-5 (136,99 €). O CEP calculado foi de 0,0128 €, 0,0138 € e 0,0143 € para a grafite ISEM-8, ISO-63 e TTK-5 respetivamente.

Na profundidade de eletroerosão 12 mm, a grafite ISEM-8 obteve o menor valor de CP_{tot} com 177,29 € tendo sido 9,24 % menor do que a grafite ISO-63 (195,35 €) e 10,76 % menor do que a grafite TTK-5 (198,66 €). O CEP obtido foi de 0,0092 €, 0,0101 € e 0,0103 € para a grafite ISEM-8, ISO-63 e TTK-5 respetivamente.

Para uma análise mais profunda do CP_{tot} e CEP da geometria CX consultar a **Figura 4.39**.

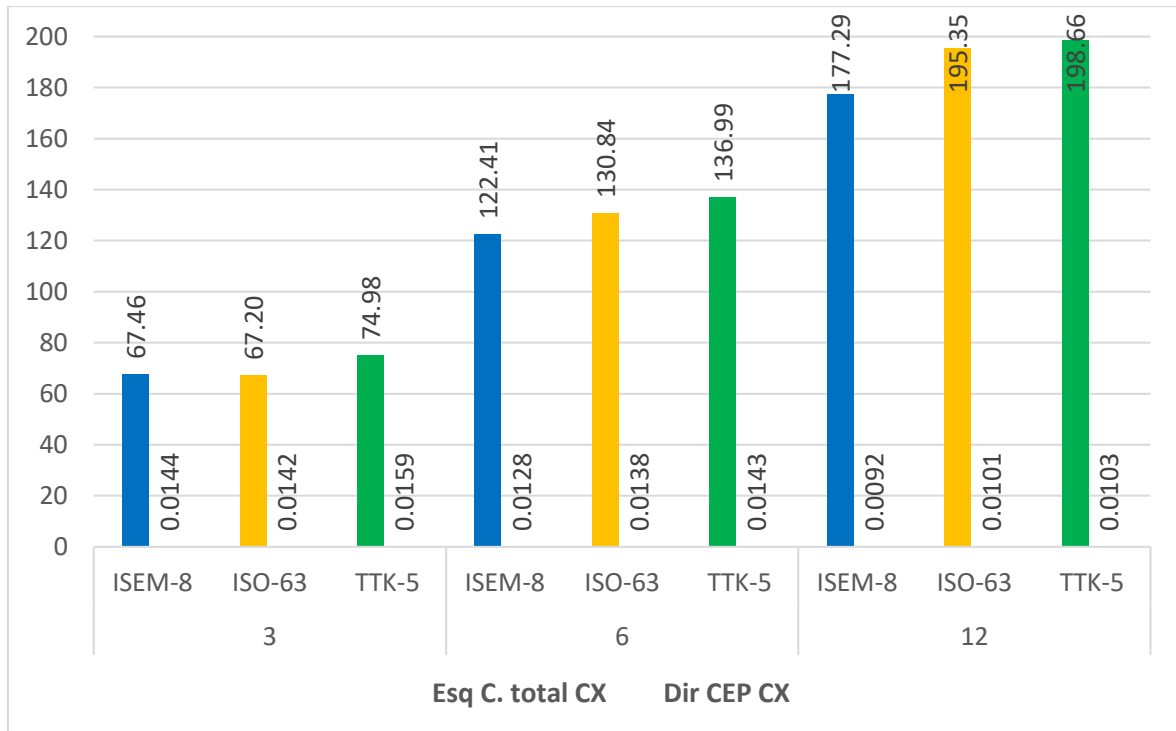


Figura 4.39 - C_{Ptot} [€]; CEP [€/mm³]; Geometria CX

Foi possível identificar uma tendência de custos ascendente da grafite de maior granulometria, a ISEM-8, até à grafite de menor granulometria, a TTK-5, passando pela grafite intermédia, a ISO-63. Esta tendência apenas teve duas exceções de pequena diferença, a grafite TTK-5 na profundidade 6 mm no Rib obtendo o segundo melhor resultado, e a grafite ISO-63 obtendo o melhor valor (mais baixo). Podemos assim afirmar que quanto menor a granulometria, mais dispendiosa é a eletroerosão para uma dada geometria.

4.5. IPG

4.5.1. IPG - Geometria Rib

Na geometria Rib, na profundidade 3 mm, o uso da grafite ISO-63 permitiu uma variação positiva em 1,19 % no IPG em comparação com o uso da grafite ISEM-8. O uso da grafite TTK-5 impôs um decréscimo no IPG na ordem dos 10,01 %, em comparação com o uso da grafite ISEM-8 (ver **Figura 4.40**).

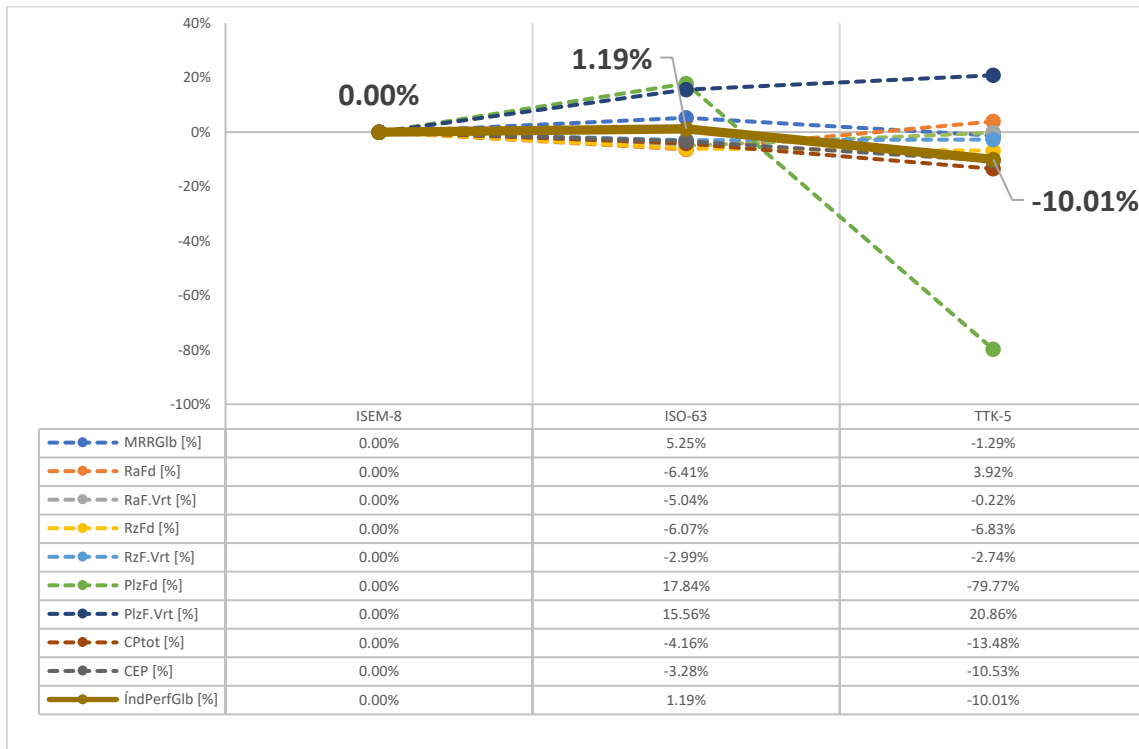


Figura 4.40 - - Índice de performance global (IPG); Profundidade 3 mm; Geometria Rib

Na profundidade 6 mm, o uso das grafites ISO-63 e TTK-5 conduziu a uma variação negativa de 5,03 % e 2,00 % respectivamente no IPG em comparação com o uso da grafite ISEM-8 (ver **Figura 4.41**).

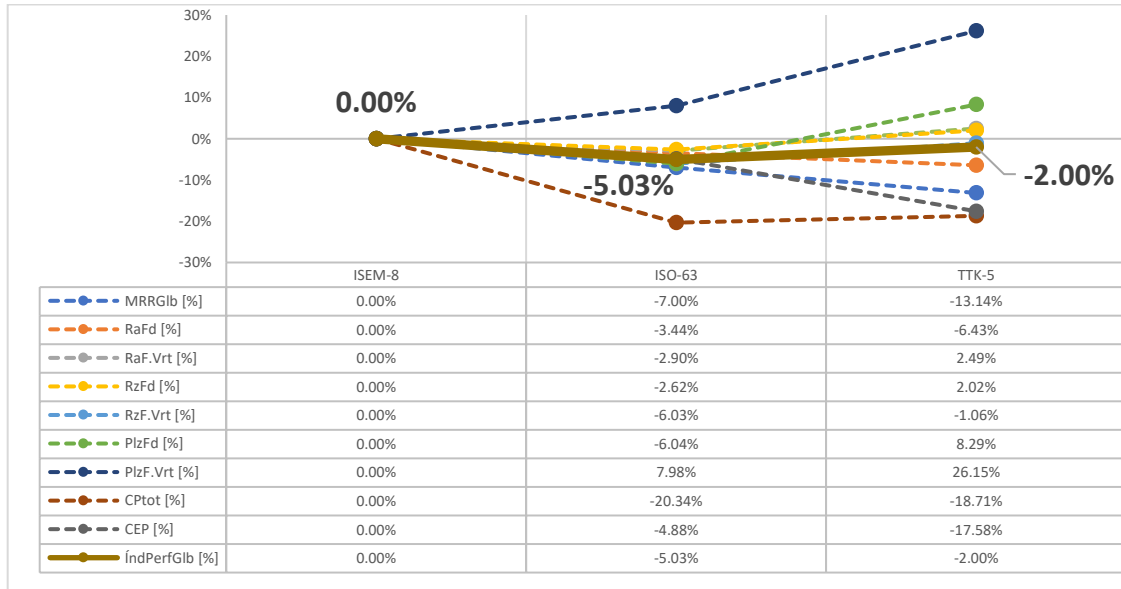


Figura 4.41 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 6 mm; Geometria Rib

Na profundidade 12 mm, o uso das grafites ISO-63 e TTK-5 conduziram a uma variação negativa de 2,91 % e 10,00 % respectivamente no IPG em comparação com o uso da grafite ISEM-8 (ver **Figura 4.42**).

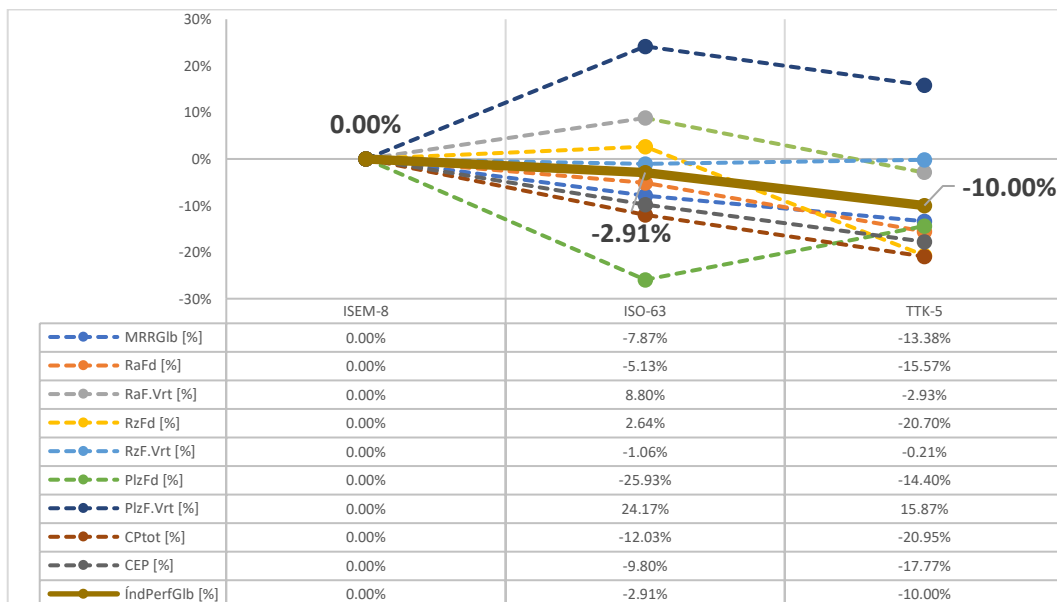


Figura 4.42 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 12 mm; Geometria Rib

4.5.2. IPG - Geometria CX

Para a geometria CX, na profundidade 3 mm, o uso das grafites ISO-63 e TTK-5 impuseram uma variação negativa de 2,44 % e 4,40 % respectivamente, em comparação com o uso da grafite ISEM-8 (ver **Figura 4.43**).

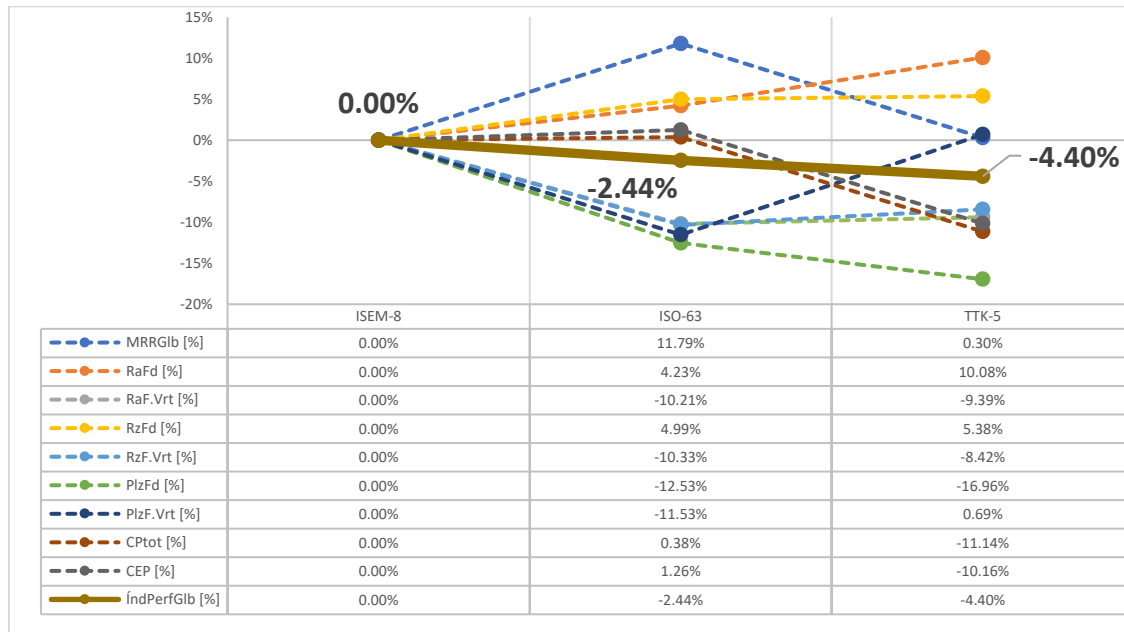


Figura 4.43 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 3 mm; Geometria CX

Na profundidade 6 mm, o uso das grafites ISO-63 e TTK-5 levaram a uma variação positiva de 1,66 % e 1,20 % respectivamente, em comparação com o uso da grafite ISEM-8 (ver **Figura 4.44**).

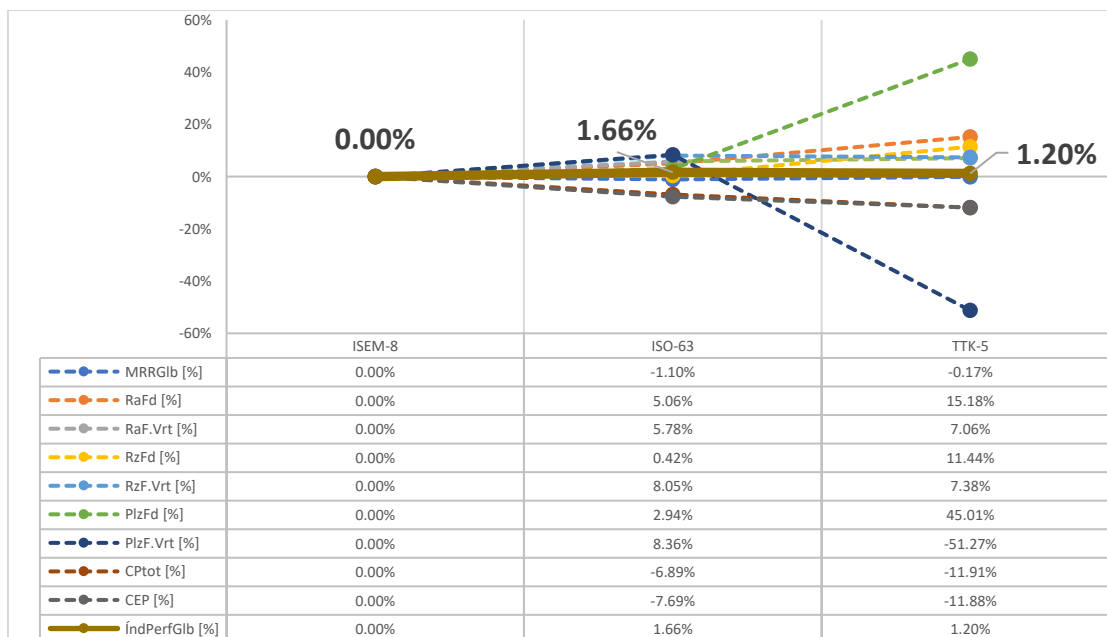


Figura 4.44 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 6 mm; Geometria CX

Na profundidade 12 mm, o uso das grafites ISO-63 provocou uma variação negativa de 13,88 % em comparação com o uso da grafite ISEM-8. Já o uso da grafite de menor granulometria, a TTK-5 (4 µm), resultou na variação positiva do IPG em 8,53 % (ver Figura 4.45).

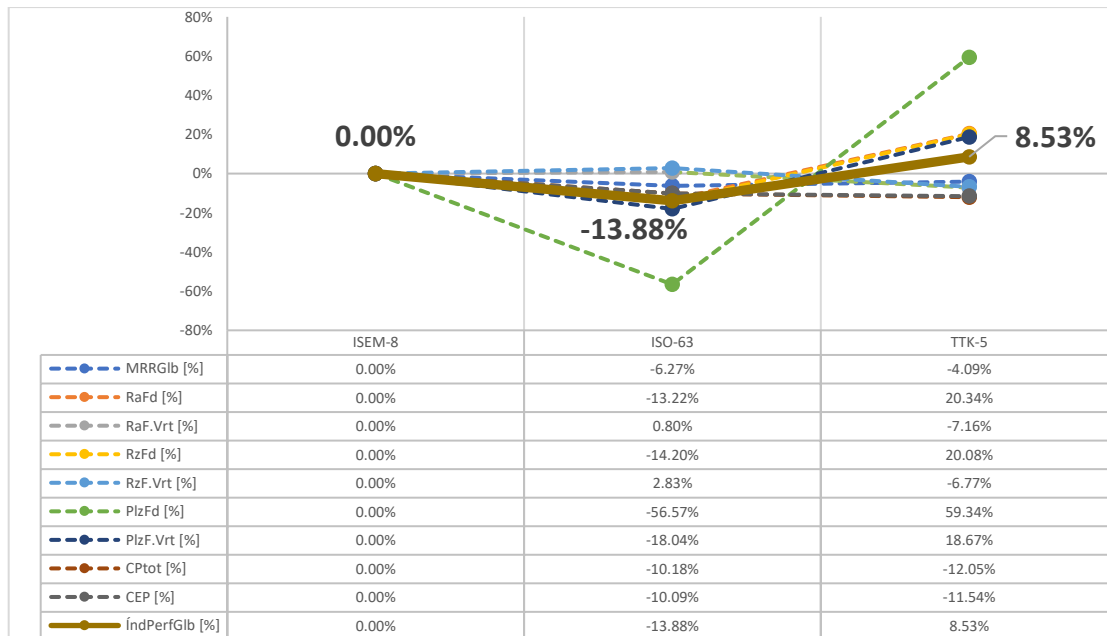


Figura 4.45 - Índice de performance global (IPG); Profundidade 12 mm; Geometria CX

De um modo geral identificou-se uma tendência de variação negativa do IPG com o uso de grafites de menor granulometria. No entanto, identificam-se algumas variações positivas. A variação positiva de 1,19 % na profundidade 3mm da geometria Rib pela grafite ISO-63. Na profundidade de 6 mm, da geometria CX, após o uso das grafites ISO-63 e TTK-5, de 1,66 % e 1,20 % respectivamente. E na profundidade 12 mm da geometria CX, a TTK-5 provocou a maior variação positiva no IPG, 8,53 %.

5. Conclusões

A necessidade de efetuar estudos comparativos, por parte das empresas, na busca dos melhores fornecedores dos melhores componentes/peças/equipamentos ou matéria-prima para desenvolver a sua atividade é de elevada importância. Este trabalho procurou colmatar esta necessidade abordando o processo de EDM, comparando a performance de ferramentas de grafite com três granulometrias diferentes. Foi feito o controle do número de elétrodos necessários para a obtenção da geometria pretendida bem como o controle dos índices de performance: MRR, SR, DD, CP_{tot}, CEP e IPG. As performances das diversas grafites foram comparadas apurando vantagens.

A grafite de maior granulometria (ISEM-8) foi usada como grafite standard no processo de eletroerosão. Em todas as eletroerosões de profundidade 3 mm das geometrias Rib e CX, por defeito e independentemente da geometria obtida, apenas foi utilizado um elétrodo em cada tipo de grafite, sendo que apenas em duas situações (geometria CX, face Fundo, grafites ISEM-8 e TTK-5) não foi atingida a cota pretendida da geometria planeada. Em todas as eletroerosões de profundidade 6 mm, na geometria Rib, apenas foi necessário a utilização de um elétrodo para atingir a geometria pretendida. Na geometria CX da mesma profundidade, para todas as grafites, houve a necessidade de utilizar um segundo elétrodo para se obter a geometria pretendida. Em todas as eletroerosões de profundidade 12 mm, nas duas geometrias Rib e CX, e em todas as grafites, houve necessidade de usar um segundo elétrodo para atingir a geometria pretendida. Isto ocorreu principalmente devido ao desgaste final (desgaste da extremidade) do elétrodo, ou seja, principalmente foi a face Fundo da geometria erodida que não atingia a cota desejada. Perante os resultados podemos afirmar que, em comparação com o uso da grafite ISEM-8, o uso das duas grafites de menores granulometrias em estudo (ISO-63 e TTK-5) não permitiram a redução do número mínimo de elétrodos necessário para atingir a geometria desejada.

No índice MRR-Global a grafite ISO-63, na profundidade 3 mm das geometrias Rib e CX, obteve o melhor resultado, com 17,62 mm³/min e 69,70 mm³/min respectivamente. Na profundidade 6 das geometrias Rib e CX, o melhor resultado foi ocupado pela grafite ISEM-8, com 17,84 e 69,48 mm³/min respectivamente. Na profundidade 12 mm das geometrias Rib e CX, o melhor resultado foi obtido pela grafite ISEM-8, com 12,54 e 87,57 mm³/min

respetivamente. Aconselha-se o uso da grafite ISO-63 com o objetivo de MRR máximo, em profundidades de 3 mm, em geometrias semelhantes.

A grafite TTK-5 é a melhor escolha em relação à Classificação SR (melhores resultados de Rugosidade Ra e Rz), com 10 melhores resultados e 7 segundos melhores. A segunda melhor escolha, mas mais equilibrada, é a grafite ISEM-8, com 9 melhores resultados e 9 segundos melhores resultados. A vantagem da grafite de menor granulometria já era esperada, tendo sido aqui provada (apesar da diminuta vantagem em relação à segunda melhor opção) com base no número de melhores resultados, estando esta em linha com o referido pelo fabricante. Podemos, com base nos valores obtidos, afirmar que, uma geometria quando circundada pelas 5 faces (4 faces laterais e uma de fundo) em comparação com uma geometria circundada por apenas 4 faces (3 laterais e uma de fundo) obtém, em média global, valores de Rugosidade Ra e Rz superiores. Em particular, para o Rib (circundada por 4 faces) obteve-se uma Rugosidade Ra global de 2,319 μm e uma Rugosidade Rz global de 13,734 μm , em comparação aos valores de 2,501 μm e 14,347 μm para a CX (circundada por 5 faces), respetivamente. Isto deve-se a uma maior dificuldade de eliminação de detritos do espaço entre a ferramenta e a peça de trabalho.

A grafite TTK-5 é a melhor escolha para minimizar o DD_Planeza, tendo obtido 7 melhores resultados e apenas 2 segundos melhores resultados. A grafite ISEM-8 é a segunda melhor opção, sendo a mais equilibrada, com 6 melhores e 4 segundos lugares. Os índices DD_Dimensão e DD_Centro Geométrico, em todas as eletroerosões, ficaram dentro dos limites pretendidos. A exceção ocorreu nas grafites ISEM-8 e TTK-5, na profundidade 3 mm na geometria CX. A exceção não foi assinalada como não conforme pois pertence à eletroerosão standard, pré-determinada como eletroerosão com um só elétrodo, independentemente da geometria obtida.

A grafite ISEM-8 (grafite menos onerosa) obteve, em 90% das eletroerosões, o menor CP_{tot} e o menor CEP, o que seria de esperar visto o uso de grafites de menor granulometria não ter permitido baixar o número de elétrodos necessários à obtenção da geometria pretendida. Menor número de elétrodos usados significou um menor tempo de eletroerosão com um menor custo de matéria-prima.

A eletroerosão com a grafite ISEM-8 foi usada como ponto de partida para comparação, entre grafites da performance global do processo (variação 0 %). O Índice de Performance Global (IPG) foi positivo em 1,19 %, na geometria Rib na profundidade 3 mm, quando foi

usada a grafite ISO-63. Apesar da margem ser diminuta, é aconselhado o uso da grafite ISO-63 para a geometria Rib com profundidades até 3 mm. Salienta-se, no entanto, que, este resultado e todos os restantes resultados no IPG foram obtidos a partir de eletroerosões, utilizando 3 tipos diferentes de grafite com 3 granulometrias distintas, mas com os mesmos parâmetros de eletroerosão, sendo que não são, necessariamente, os parâmetros otimizados para cada tipo de grafite, tendo em conta a habitual finalidade com que são utilizados (ISEM-8 para elevada MRR e TTK-5 para baixa SR, com a ISO-63 utilizada para um resultado intermédio). Na geometria CX, na profundidade 6 mm, a variação no IPG foi positiva após o uso das grafites ISO-63 e TTK-5 em 1,66 e 1,20 % respetivamente, pelo que se aconselha o uso da grafite ISO-63 ou da TTK-5 em substituição da ISEM-8, sendo que a grafite ISO-63 é menos onerosa. Na profundidade 12 mm a TTK-5 originou a maior variação positiva no IPG, 8,53 %. Tendo em conta todos os índices de performance, aconselha-se o uso da grafite TTK-5 para profundidades próximas de 12 mm, na geometria CX, sob os parâmetros que se utilizaram neste estudo. Todas as outras eletroerosões provocaram variações negativas entre 0 e 15 % no IPG, não se aconselhando o uso de outras grafites além da ISEM-8, considerando os parâmetros de eletroerosão do estudo efetuado.

Devido à falta de uma amostra em número suficiente (repetição de um mínimo de 3 eletroerosões para cada conjunto de condições), o IPG não tem validade estatística sendo apenas indicativo. As restantes eletroerosões, para validar estatisticamente o IPG, bem como os outros índices, remetem-se para um futuro trabalho.

5.1. Trabalhos futuros

Os índices de performance da tecnologia de EDM têm muita variabilidade. Para que surjam tendências nos índices de performance, existe a necessidade de efetuar algumas repetições da mesma eletroerosão, sob os mesmos parâmetros, assegurando assim a sua validade estatística. Algumas das eletroerosões deste estudo foram repetidas, tais como a eletroerosão da grafite ISEM-8 na profundidade 3 mm, que foi repetida três vezes, ou a eletroerosão da grafite TTK-5, repetida duas vezes na profundidade 6 mm. Um maior número de eletroerosões para cada combinação grafite-profundidade-geometria (no mínimo 3) seria um trabalho a ter em consideração no futuro.

Outro trabalho de elevada importância para a indústria dos moldes é a definição do VDI máximo atingível para cada tipo de grafite. Aconselha-se a realização de eletroerosões, com

as três grafites deste estudo, nas profundidades de 3, 6 e 12 mm, sob os parâmetros relativos ao VDI 17 (VDI máximo aconselhado para a grafite TTK-5), averiguando desta forma a rugosidade máxima possível de ser obtida para cada grafite, monitorizando também a sua performance.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Muthuramalingam and B. Mohan, “A review on influence of electrical process parameters in EDM process”, doi: 10.1016/j.acme.2014.02.009Get.
- [2] K. H. Ho and S. T. Newman, “State of the art electrical discharge machining (EDM),” *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 43, no. 13, pp. 1287–1300, 2003, doi: 10.1016/S0890-6955(03)00162-7.
- [3] Toyo Tanso, “Electrical discharge machining (EDM).” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.toyotanso.com/Products/application/edm.html>
- [4] S. Kumar and T. Gupta, “A review of electrical discharge machining (EDM) and its optimization techniques,” *Mater Today Proc*, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.186.
- [5] P. P. Harane, S. Wojciechowski, and D. R. Unune, “Investigating the effect of different tool electrodes in electric discharge drilling of Waspaloy on process responses,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 2542–2557, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.08.015.
- [6] ONA Espanha, *Manual Tecnologia ONA NX*. 2015.
- [7] K. Ishfaq, N. Ahmad, M. A. Maqsood, M. U. Hameed, L. Lamberti, and C. I. Pruncu, “A systematic study to achieve cleaner and sustainable manufacturing process by using bio-degradable dielectrics,” *Sustainable Materials and Technologies*, vol. 37, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.susmat.2023.e00685.
- [8] W. B. Jefrin Harris, A. V. Dehaleesan, S. Sampath, and A. V. Krishnan, “A state-of-the-art review on electric discharge machining of shape memory alloys,” *Mater Today Proc*, vol. 72, pp. 2518–2527, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.538.
- [9] A. M. Deris, A. M. Zain, R. Sallehuddin, and S. Sharif, “Experimental study of surface roughness in Electric Discharge Machining (EDM) based on Grey Relational Analysis”, doi: 10.1051/01015.
- [10] Mitutoyo, “QUICK GUIDE TO SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT Reference guide for laboratory and workshop.” Accessed: Mar. 14, 2024. [Online].

- Available: https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/1984_Surf_Roughness_PG.pdf
- [11] W. Li and S. Kara, “Characterising energy efficiency of Electrical Discharge Machining (EDM) processes,” in *Procedia CIRP*, Elsevier B.V., 2015, pp. 263–268. doi: 10.1016/j.procir.2015.01.039.
- [12] L. Selvarajan, J. Rajavel, V. Prabakaran, B. Sivakumar, and G. Jeeva, “A Review Paper on EDM Parameter of Composite material and Industrial Demand Material Machining,” 2018. [Online]. Available: www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings
- [13] B. Jha, K. Ram, and M. Rao, “An overview of technology and research in electrode design and manufacturing in sinking electrical discharge machining,” 2011. [Online]. Available: www.jestr.org
- [14] D. Vinagre, “Estudo do Processo de Eletroerosão na Produção de Cavidades Moldantes.”
- [15] E. Jamenson C., *Electrical Discharge Machining*. Michigan, USA: Society of Manufacturing Engineers, 2001.
- [16] Ramada, “2343.” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-para-ferramentas-de-trabalho-a-quente/2343.html>
- [17] Toyo Tanso, “Isotropic Graphite (Special Graphite).” Accessed: Mar. 15, 2024. [Online]. Available: https://www.toyotanso.com/Products/Special_graphite/manufacturing-process.html
- [18] Toyo Tanso, “Property Data.” Accessed: Mar. 16, 2024. [Online]. Available: https://www.toyotanso.com/Products/Special_graphite/data.html
- [19] L. Graphite and S. R. L. Steelfluid, “FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA - Propriedades físicas e químicas.”
- [20] “Geometrical product specifications (GPS)-Geometrical tolerancing-Tolerances of form, orientation, location and run-out COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT,” 2017, [Online]. Available: www.iso.orgTehSTANDARDPREVIEW

- [21] Uddholm, “Vidar 1.” Accessed: Mar. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.ramada.pt/pt/produtos/acos/aa-os-para-ferramentas-de-trabalho-a-quente/vidar-1.html>

Anexos

Anexo A - Ficha técnica do aço W.Nr.1.2343 [21]	92
Anexo B - Ficha técnica de grafites da Toyo Tanso [17]	94
Anexo C – Ficha de dados de segurança – Propriedades físicas e químicas do fluido dielétrico EDM Fluid 108 MP-SE	95
Anexo D – Desenho técnico da peça de trabalho com eletroerosão a 3 mm de profundidade (ChapaH3)	97
Anexo E – Desenho técnico da peça de trabalho com eletroerosão a 6 mm de profundidade (ChapaH6)	98
Anexo F – Desenho técnico da peça de trabalho com eletroerosão a 12 mm de profundidade (ChapaH12)	99
Anexo G – Desenho técnico do Elétrodo-Rib	100
Anexo H – Opções técnicas da maquinagem do Elétrodo-Rib	101
Anexo I – Desenho técnico do Elétrodo-Caixa	102
Anexo J – Opções técnicas da maquinagem do Elétrodo-Caixa	103
Anexo K – Rugosidade dos regimes VDI de eletroerosão (Fonte: Manual tecnologia ONA NX)	104
Anexo L – Relatório de medição CMM do Elétrodo-Rib antes da eletroerosão.....	105
Anexo M – Relatório de medição CMM do Elétrodo-CX antes da eletroerosão.....	112
Anexo N – Relatório de medição CMM da peça C1T5H12-Chapa-teste-Rib-2ªEletroerosão	121
Anexo O – Relatório de medição CMM da peça C1T5H12-Chapa-teste-CX-2ªEletroerosão	129

Anexo A - Ficha técnica do aço W.Nr.1.2343 [21]

UDDEHOLM VIDAR™ 1

GENERAL

Uddeholm Vidar 1 is a chromium-molybdenum-vanadium-alloyed steel which is characterized by:

- good high-temperature strength
- good toughness and ductility
- good machinability and polishability
- good through-hardening properties
- good size stability during hardening

Typical analysis %	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,38	1,0	0,4	5,0	1,3	0,4
Standard specification	AISI H11, B H11, W-Nr. 1.2343, AFNOR Z38 CDV 5, UNI X37 CrMoV 51 KU, UNE X37 CrMoV 5					
Delivery condition	Soft annealed to approx. 185 HB					
Colour code	Orange/light blue					

PROPERTIES

MECHANICAL PROPERTIES

Tensile strength at room temperature.

Hardness	44 HRC	48 HRC
Tensile strength, Rm	1 400	1 620
Yield point, Rp0,2	1 150	1 380

HIGH-TEMPERATURE STRENGTH AT ELEVATED TEMPERATURES

Hardness 48 HRC.

Testing temperature	Rm MPa	Rp0,2 MPa
200°C (390°F)	1 490	1 250
400°C (750°F)	1 370	1 120
500°C (930°C)	1 190	910
550°C (1020°F)	1 170	790
600°C (1110°F)	880	600

HEAT TREATMENT

SOFT ANNEALING

Protect the steel and heat through to 650°C (1202°F). Then cool in furnace at 10°C (20°F) per hour to 650°C (1202°F), then freely in air.

STRESS RELIEVING

After rough machining the tool should be heated through to 650°C (1202°F), holding time 2 hours. Cool slowly to 500°C (932°F), then freely in air.

HARDENING

Preheating temperature: 600–850°C (1112–1562°F) (normally two preheating steps).

Austenitizing temperature: 990–1010°C (1814–1850°F), normally 990–1000°C (1814–1832°F).

Soaking time: 30–45 minutes. Soaking time = time at austenitizing temperature after the tool is fully heated through.

Protect the tool against decarburization and oxidation during austenitizing.

QUENCHING MEDIA

- High speed gas/circulating atmosphere
- Vacuum (high speed gas with sufficient positive pressure)
- Martempering bath (salt or fluidized bed) at 500–550°C (932–1022°F)
- Martempering bath (salt or fluidized bed) at 180–220°C (356–428°F)
- Warm oil

Note 1: Temper the tool as soon as its temperature reaches 50–70°C (122–158°F).

Note 2: In order to obtain the optimum properties for the tool, the cooling rate should be fast, but not at a level that gives excessive distortion or cracks.

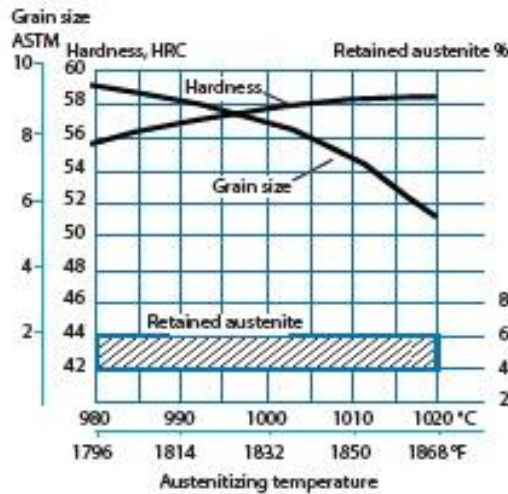
This information is based on our present state of knowledge and is intended to provide general notes on our products and their uses. It should not therefore be construed as a warranty of specific properties of the products described or a warranty for fitness for a particular purpose.

Classified according to EU Directive 1999/45/EC. For further information see our "Material Safety Data Sheets".

Edition: 2, 04.2009

© UDDEHOLM AB
No part of this publication may be reproduced or transmitted for commercial purposes without permission of the copyright holder.

HARDNESS, GRAIN SIZE AND RETAINED AUSTENITE AS A FUNCTION OF AUSTENITIZING TEMPERATURE



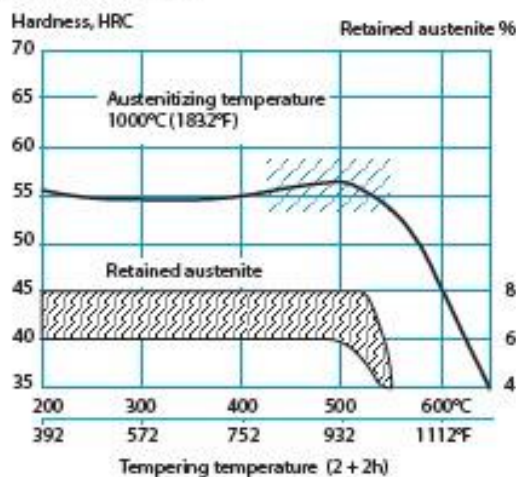
TEMPERING

Choose the tempering temperature according to the hardness required by reference to the tempering graph below. Temper twice with intermediate cooling to room temperature. Lowest tempering temperature 180°C (356°F). Holding time at temperature minimum 2 hours.

Tempering in the range of 425–550°C (797–1022°F) for the intended final hardness will result in a lower toughness.

TEMPERING GRAPH

Air cooling of specimen 15 x 15 x 40 mm (0,6" x 0,6" x 1,6")



NITRIDING AND NITROCARBURIZING

Nitriding and nitrocarburizing result in a hard surface layer which is very resistant to wear and erosion. The nitrided layer is, however, brittle and may crack or spall when exposed to mechanical or thermal shock, the risk increasing with layer thickness. Before nitriding, the tool should be hardened and tempered at a temperature at least 50°C (120°F) above the nitriding temperature.

Nitriding in ammonia gas at 510°C (950°F) or plasma nitriding in a 75% hydrogen/25% nitrogen at 480°C (896°F) both result in a surface hardness of 1100 HV_{0,2}. In general, plasma nitriding is the preferred method because of better control over nitrogen potential; in particular, formation of the so-called "white layer", which is not recommended of hot work service, can readily be avoided. However, careful gas nitriding can give perfectly acceptable results.

Uddeholm Vidar 1 can also be nitrocarburized in either gas or salt bath. The surface hardness after nitrocarburizing is 900–1000 HV_{0,2}.

DEPTH OF NITRIDING

Process	Time	Depth*	
		mm	inch
Gas nitriding at 510°C (950°F)	10 h	0,12	0,0047
	30 h	0,20	0,0079
Plasma nitriding at 480°C (895°F)	10 h	0,14	0,0055
	30 h	0,19	0,0075
Nitrocarburizing - in gas at 580°C (1075°F) - in salt bath at 580°C (1075°F)	2,5 h	0,12	0,0047
	1 h	0,07	0,0028

* Depth of case = distance from surface where hardness is 50 HV_{0,2} over base hardness

FURTHER INFORMATION

Please contact your local Uddeholm office for further information on the selection, heat treatment, application and availability of Uddeholm tool steels. For more information, please visit www.uddeholm.com

Anexo B - Ficha técnica de grafites da Toyo Tanso [17]

Isotropic Graphite (Special Graphite)										
Grade	Bulk Density	Hardness	Electrical Resistivity	Flexural Strength	Compressive Strength	Tensile Strength	Young's Modulus	Coefficient of Thermal Expansion	Thermal Conductivity	Standard Size
	Mg/m ³	HSD	$\mu\Omega\cdot m$	MPa	MPa	MPa	GPa	10 ⁻⁶ /K	W/(m·K)	(mm)
IG-11	1.77	51	11.0	39	78	25	9.8	4.5	120	305X620X1000 Φ585X1050
IG-12	1.78	55	12.5	39	88	28	10.8	4.7	100	305X620X1000 Φ585X1050
IG-15	1.90	60	9.5	54	103	29	11.8	4.8	140	230X620X1000
IG-43	1.82	55	9.2	54	90	37	10.8	4.8	140	300X540X850
IG-45	1.88	55	9.0	60	110	40	12.0	4.9	140	300X540X850
IG-56	1.77	57	12.2	43	88	27	10.3	4.7	100	1050X1050X450 Φ740X730
IG-70	1.83	58	10.0	47	103	31	11.8	4.6	130	305X620X1000 Φ460X1050
IG-82	1.82	64	15.3	53	113	40	10.9	5.1	85	230x540x1000 φ790x790
ISEM-1	1.68	45	13.5	36	69	20	8.8	4.2	90	305X620X1000
ISEM-2	1.78	55	11.0	41	83	25	9.8	4.6	120	305X620X1000
ISEM-3	1.85	60	10.0	49	103	29	11.8	5.0	130	305X620X1000
ISEM-8	1.78	63	13.4	52	106	34	10.1	5.6	90	305X620X1050
ISO-63	1.78	76	15.0	65	135	46	12.0	5.6	70	230X540X1000
ISO-68	1.82	80	15.5	76	172	54	13.2	5.6	70	230X540X1000
TTK-4	1.78	72	14.0	73	135	49	10.9	5.0	90	210X510X950
TTK-5	1.78	80	15.5	80	150	53	11.6	5.7	80	210X510X950
TTK-8	1.77	78	15.0	80	155	55	12.0	5.3	80	100X400X700
TTK-9	1.77	90	18.0	92	180	67	13.0	5.8	70	100X400X700
SIC-6	1.85	60	10.0	49	103	29	11.8	5.0	130	305X620X1000
HPG-51	1.78	73	14.3	75	140	50	11.0	5.1	90	210X510X950
HPG-53	1.78	81	15.7	80	156	55	11.8	5.8	80	210X510X950
HPG-59	1.91	88	13.5	100	210	74	12.7	5.7	95	100X500X950
HPG-61	1.77	80	15.1	83	161	58	12.2	5.2	80	100X400X700
HPG-63	1.77	92	18.2	96	167	70	13.3	5.9	70	100X400X700
FE-8	1.64	108	49	69	-	-	-	-	-	-
Grade	Mg/m ³	HSD	$\mu\Omega\cdot m$	MPa	MPa	MPa	GPa	10 ⁻⁶ /K	W/(m·K)	(mm)
	Bulk Density	Hardness	Electrical Resistivity	Flexural Strength	Compressive Strength	Tensile Strength	Young's Modulus	Coefficient of Thermal Expansion	Thermal Conductivity	Standard Size

1. The figures above are typical values, and are not guaranteed.
 2. The measurement temperature range for the coefficient of thermal expansion is 350 to 450°C.
 3. Unit conversion: $\mu\Omega\cdot m = \mu\Omega\cdot cm \times 0.01$ MPa=kgf/cm² $\times 0.098$ GPa=kgf/mm² $\times 0.0098$ W/(m·K) =kcal/h·m°C $\times 1.16$
 4. There are other product sizes in addition to those described above. Contact Toyo Tanso for details.

Anexo C – Ficha de dados de segurança – Propriedades físicas e químicas do fluido dielétrico EDM Fluid 108 MP-SE



Versão: 3.3
Revisão 16
Data: 07-12-2021

Em conformidade com o regulamento (UE) 2015/830 Anexo II

FICHA DE DADOS DE SEGURANÇA

SECÇÃO 1: IDENTIFICAÇÃO DA SUBSTANCIA/MISTURA E DA SOCIEDADE/EMPRESA

1.1. Identificação do produto:

1.1.1 Tipo de produto químico: Mistura

1.1.2 Nome Comercial: EDM Fluid 108 MP-SE

1.2 Utilizações identificadas relevantes da substância ou mistura e utilizações desaconselhadas

1.2.1 Utilizações identificadas: Fluido dielétrico para erosão por penetração

1.2.2 Categoria de utilização principal:

Distribuição (ERC2, ERC1, PROC1, PROC2, PROC3, PROC4, PROC8a, PROC8b, PROC9, PROC15)
Formulação e (re)embalagem de substâncias similares ou em mistura (ERC2, PROC1, PROC2, PROC3, PROC4, PROC5, PROC8a, PROC8b, PROC9, PROC14, PROC15)
Uso industrial como/em fluidos funcionais (SU3, ERC7, ERC5, ERC4, PROC1, PROC2, PROC3, PROC4, PROC5, PROC7, PROC8a, PROC8b, PROC9, PROC10, PROC13, PROC15, PROC19, PROC28)
Uso profissional como/em fluidos funcionais (SU22, ERC9a, ERC9b, PROC1, PROC2, PROC3, PROC4, PROC5, PROC7, PROC8a, PROC9b, PROC9, PROC10, PROC11, PROC13, PROC15, PROC19, PROC20, PROC28)
Uso industrial em metais/prensa de metais em rolo (SU3, ERC7, ERC5, ERC4, PROC1, PROC2, PROC3, PROC4, PROC5, PROC7, PROC8a, PROC8b, PROC9, PROC10, PROC13, PROC15, PROC19, PROC28)
Uso profissional em metais/prensa de metais em rolo (SU22, ERC9a, ERC9b, PROC1, PROC2, PROC3, PROC4, PROC5, PROC7, PROC8a, PROC8b, PROC9, PROC10, PROC11, PROC13, PROC15, PROC19, PROC28)

1.2.3 Utilizações desaconselhadas:

Desaconselha-se a utilização deste produto em aplicações que não as identificadas nesta ficha.

1.3 Identificação do fornecedor/fabricante:

Fornecedor:
Graphite Technologies Moldes, Lda
Zona Industrial Casal da Lebre
Rua da Finlândia – Lote 27
2430-028 Marinha Grande

Telefone: 244 572 380
Fax: 244 572 389
E-mail: qualidade@graphite-technologies.com

Fabricante:

Steelfluid, S.R.L.
Corso Torino, 2/10
16129 Genova-Italia
E-mail: steelfluid@steelfluid.it
Endereço e-mail do técnico competente: info@steelfluid.it
Tel. +39 010-540691

1.4 Número de Telefone de Emergência

Número de Telefone de Emergência: 112
Centro de envenenamento: 800 250 250

SECÇÃO 2: IDENTIFICAÇÃO DOS PERIGOS

2.1 Classificação da substância ou mistura

2.1.1 Classificação em conformidade com o Regulamento (CE) n.º 1272/2008



Versão: 3.3
Revisão: 16
Data: 07-12-2021

Em conformidade com o regulamento (UE) 2015/830 Anexo II

Não faça descargas do produto em águas superficiais, sistemas de esgotos ou sarjetas.

SECÇÃO 9: PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

9.1 Informação sobre as propriedades físicas e químicas de base

9.1.1 Aspeto

Estado físico (a 20 °C e a 101,3 kPa): líquido, límpido

Cor: incolor

9.1.2 Odor: inodoro

9.1.3 Limiar olfativo: sem dados disponíveis

9.1.4 pH: N.A

9.1.5 Ponto de fusão/Ponto de congelação: sem dados disponíveis

9.1.6 Ponto de ebulição inicial e intervalo de ebulição: sem dados disponíveis

9.1.7 Ponto de inflamação: 106°C

9.1.8 Velocidade de evaporação: sem dados disponíveis

9.1.9 Inflamabilidade (sólidos, gases): não aplicável (o produto é líquido)

9.1.10 Limite inferior de explosividade/inflamabilidade: sem dados disponíveis

9.1.11 Limite superior de explosividade/inflamabilidade: sem dados disponíveis

9.1.12 Tensão de vapor: 0,04 hPa; 20°C

9.1.13 Densidade de vapor: sem dados disponíveis

9.1.14 Densidade relativa: 0,767 kg/l a 15°C

9.1.15 Hidrosolubilidade: insolúvel

9.1.16 Coeficiente de partição n-otanol/água: sem dados disponíveis

9.1.17 Temperatura de autoignição: sem dados disponíveis

9.1.18 Temperatura de decomposição: sem dados disponíveis

9.1.19 Viscosidade: 3 cSt a 20°C

9.1.20 Propriedades explosivas: não

9.1.21 Propriedades oxidantes: não

9.2 Outras informações

9.2.1 Liposolubilidade: solúvel nos principais solventes orgânicos

9.3 Outros dados

Cor Saybolt (ASTM D 156): > +30

Cor Hazen/Apha (ASTM D1209): 4

Índice de refração a 20 °C (ASTM D 1218): 1,429

Ponto de inflamação (ASTM D 93): 106 °C

N.B.: Os dados indicados nesta ficha são valores médios típicos e não especificações de limites.

SECÇÃO 10: ESTABILIDADE E REATIVIDADE

10.1 Reatividade

Dos dados disponíveis não consta que o produto apresente riscos específicos.

10.2 Estabilidade química

O produto deve ser considerado:

- Estável sob condições normais, mas pode tornar-se instável em condições específicas (ver secções 10.3 e 10.4)

10.3 Possibilidade de reações perigosas

O produto reage em contacto com agentes oxidantes fortes.

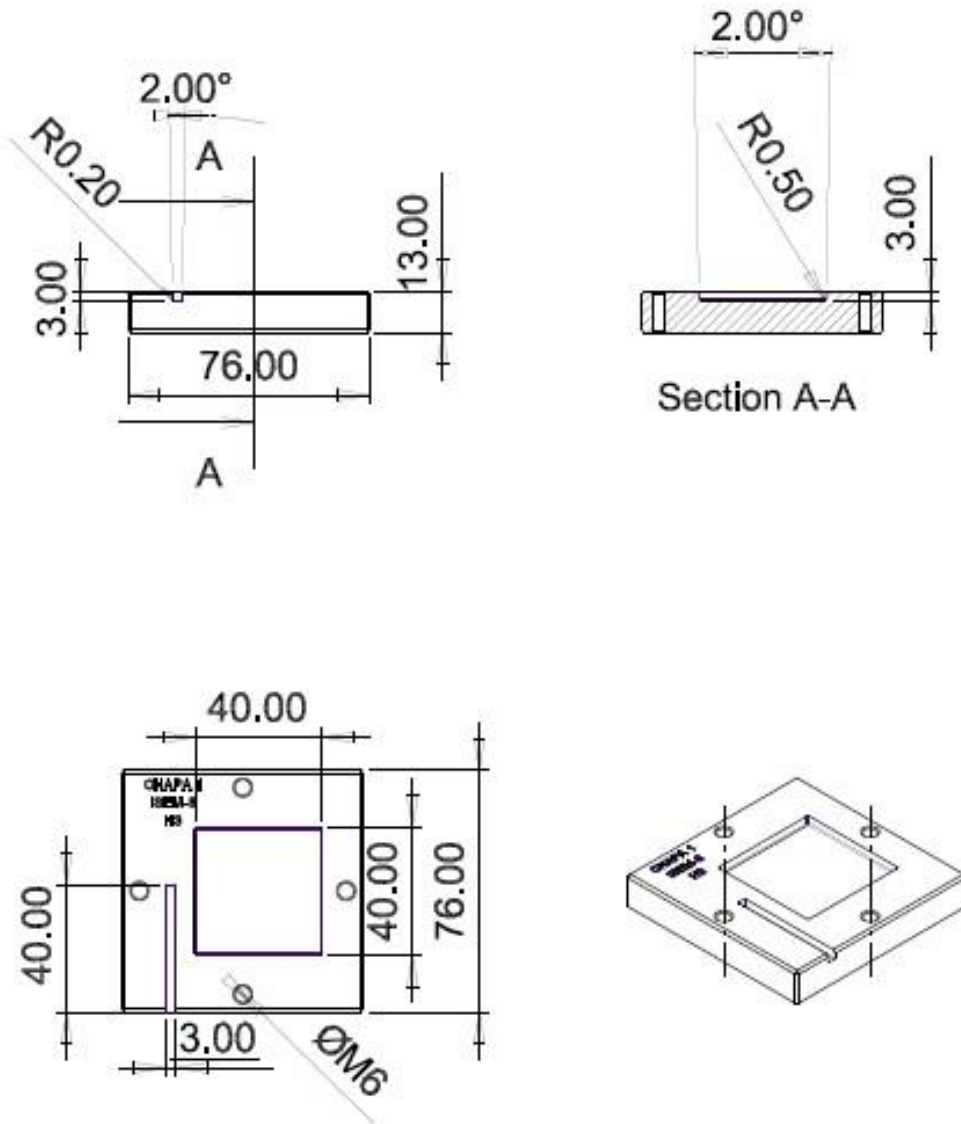
10.4 Condições a evitar

Calor, chamas e faíscas.

10.5 Materiais incompatíveis

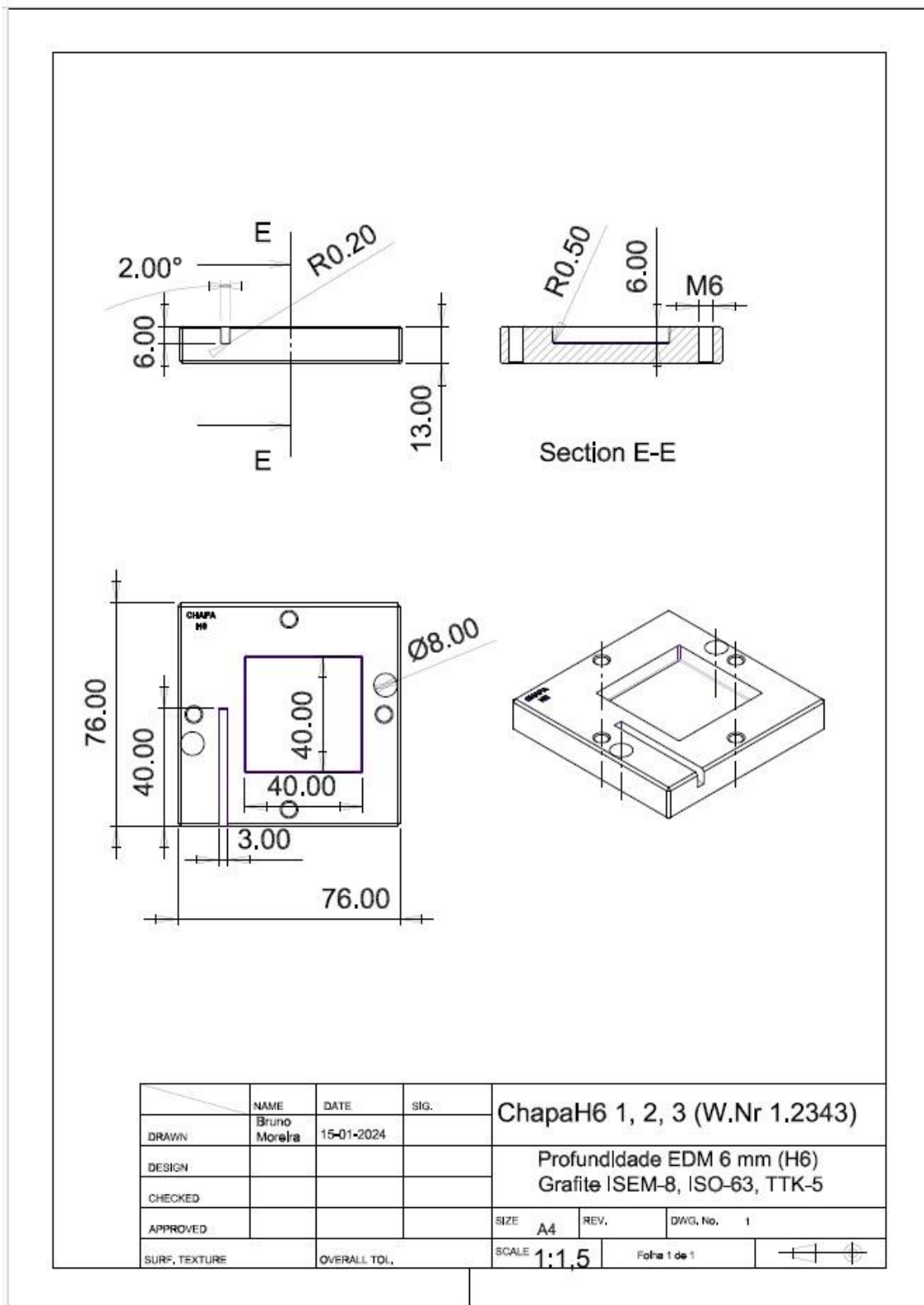
Evitar o contacto com: agentes oxidantes fortes.

Anexo D – Desenho técnico da peça de trabalho com eletroerosão a 3 mm de profundidade (ChapaH3)

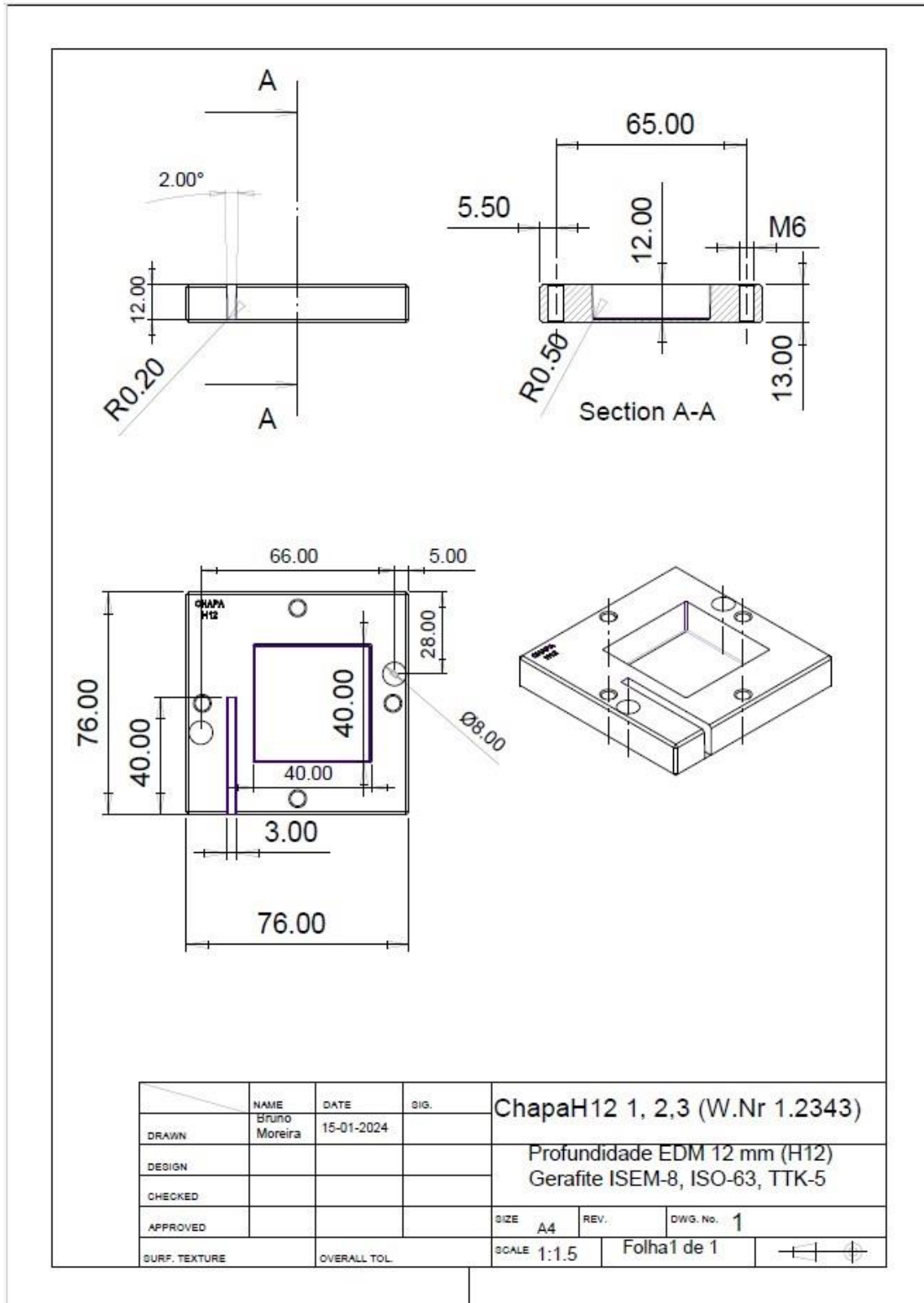


	NAME	DATE	SIG.	Chapa 1, 2, 3 (W.NR.1.2343)		
DRAWN		22-11-2023				
DESIGN	Bruno Moreira			Profundidade EDM 3 mm (H3) Grafito ISEM-8, ISO-63, TTK-63		
CHECKED						
APPROVED				SIZE A4	REV.	DWG. No. 1
SURF. TEXTURE	OVERALL TOL.			SCALE 1:2	Folha 1 de 01 folhas	

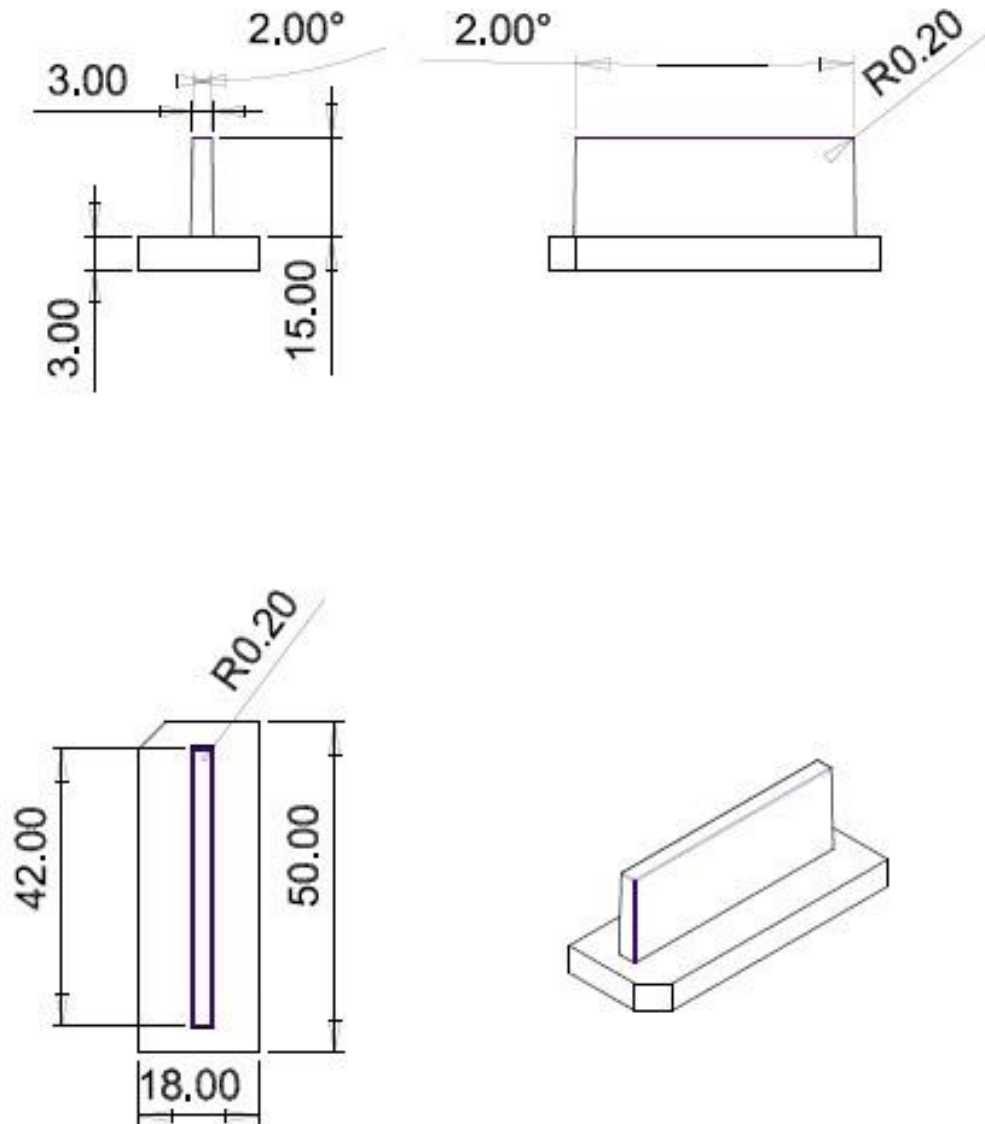
Anexo E – Desenho técnico da peça de trabalho com eletroerosão a 6 mm de profundidade (ChapaH6)



Anexo F – Desenho técnico da peça de trabalho com eletroerosão a 12 mm de profundidade (ChapaH12)





Anexo G – Desenho técnico do Eléctrodo-Rib



	NAME	DATE	SIG.	Eléctrodo-Rib		
DRAWN		22-11-2023				
DESIGN	BRUNO Moreira					
CHECKED				SIZE	REV.	DWG. No.
APPROVED				A4		1
SURF. TEXTURE	OVERALL TO.			SCALE	Folha 1 de D1 folhas	
				1:1		

Anexo H – Opções técnicas da maquinagem do Eléctrodo-Rib

	Programador:	jose.antonio	
	Electrodo:	tmbm-c1i8h3-el-01_nc	
	Localização:	Y:\Moldes\Moldes_Testes\Bruno Moreira	
	Data:	16/11/2023 - 8:06	
Observações:			

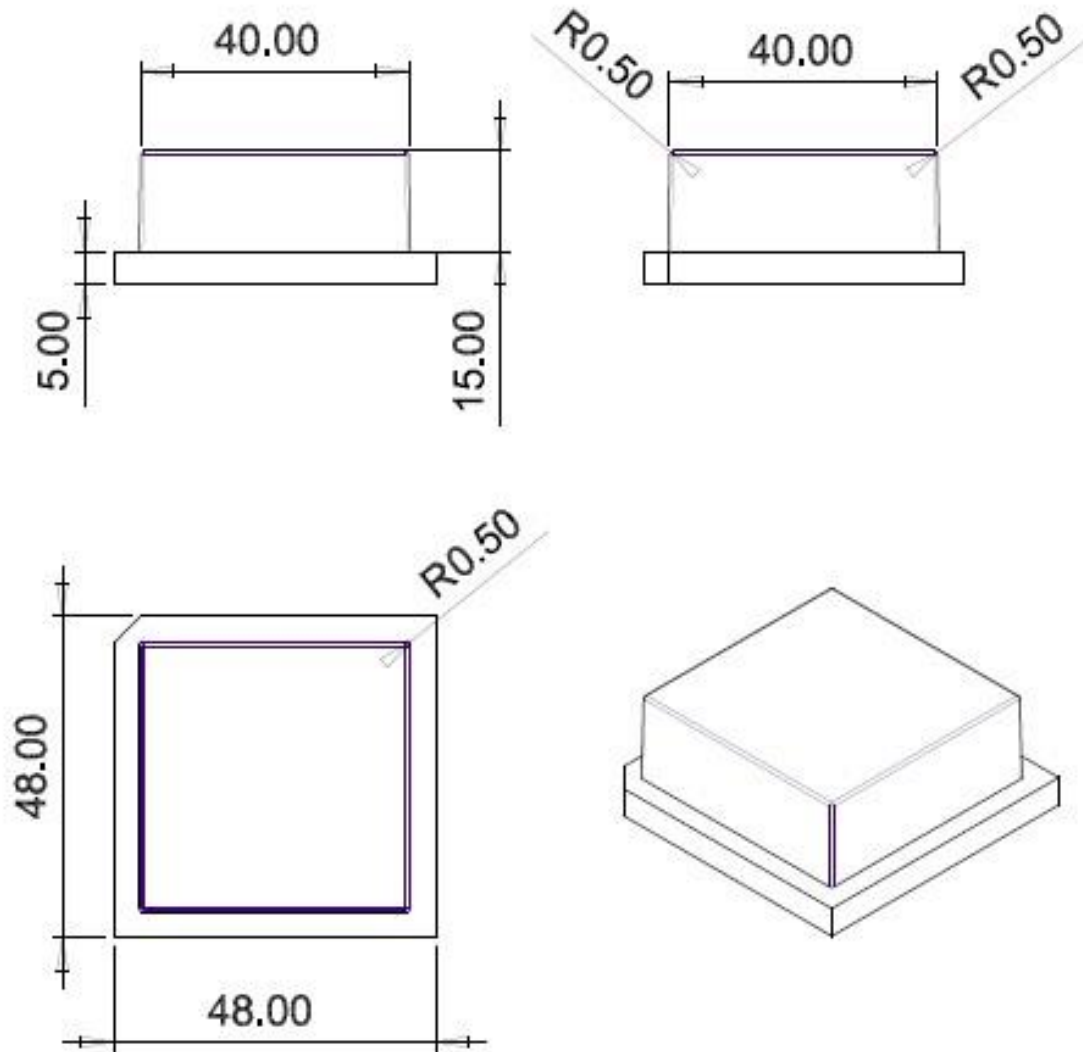
Operations


Programa	Tipo	TE	T	Cutter Name	Cut.L	Clear L	Min.Z	Incr.Z	Incr.X Y	Gap 2D	Gap 3D	Tempo	Obs.
tmbm-c1i8h3-e	VOLUME MILLING-ROUGH SPIRAL_4	F	1	TR\$16 DESB	2	125	50	0.75	13			00:01:44	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH MILL BY LIMIT ANGLE_7	F	9	ESF\$4 ACAB	15	30	68.799		0.18	0	0.21	00:00:31	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH MILL BY LIMIT ANGLE_8	F	8	TR\$4 ACAB	15	40	55.5	0.14		0	0.21	00:02:35	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH HORIZ. PLANAR AREAS_9	F	8	TR\$4 ACAB	15	40	54.79		2.4	0	0.21	00:00:06	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH MILL BY LIMIT ANGLE_10	F	8	TR\$4 ACAB	15	40	50	0.14		0	0.21	00:01:14	

Estatísticas:



No. de Operações	5	Tempo Feed	00:05:41
No. De ferramentas	3	Tempo Total	00:06:11

Anexo I – Desenho técnico do Eléttrodo-Caixa



	NAME	DATE	SIG.	Eléttrodo-Caixa			
DRAWN		22-11-2023					Grafite ISEM-8, ISO-63, TTK-5
DESIGN	Bruno Macedo			SIZE	REV.	DWG. No.	
CHECKED				SIZE	A4	REV.	DWG. No.
APPROVED				SCALE	1:1	SHEET 1 OF 1 SHEETS	
SURF. TEXTURE		OVERALL TO.					

Anexo J – Opções técnicas da maquinação do Eléctrodo-Caixa

	Programador:	jose.antonio
	Electrodo:	tmbm-c1i8h3-el-02_nc
	Localização:	Y:\Moldes\Moldes_Testes\Bruno Moreira
	Data:	16/11/2023 - 8:12
Observações:		
		

Operations

Programa	Tipo	TE	T	Cutter Name	CutL	Clear L	Min.Z	Incr.Z	Incr.X Y	Gap 2D	Gap 3D	Tempo	Obs.
tmbm-c1i8h3-e	VOLUME MILLING-ROUGH SPIRAL_4	F	1	TR\$16 DESB	2	125	50	0.75	13			00:02:31	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH MILL BY LIMIT ANGLE_7	F	9	ESF\$4 ACAB	15	30	67.994		0.18	0	0.21	00:02:36	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH MILL BY LIMIT ANGLE_8	F	8	TR\$4 ACAB	15	40	55.5	0.14		0	0.21	00:04:15	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH HORIZ. PLANAR AREAS_9	F	8	TR\$4 ACAB	15	40	54.79		2.4	0	0.21	00:00:05	
tmbm-c1i8h3-e	SURFACE MILLING-FINISH MILL BY LIMIT ANGLE_10	F	8	TR\$4 ACAB	15	40	50	0.14		0	0.21	00:01:43	

Estatísticas:

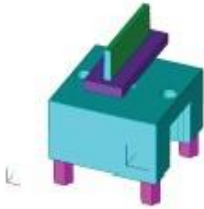
No. de Operações	5	Tempo Feed	00:10:38
No. De ferramentas	3	Tempo Total	00:11:09

Anexo K – Rugosidade dos regimes VDI de eletroerosão (Fonte: Manual tecnologia ONA NX)

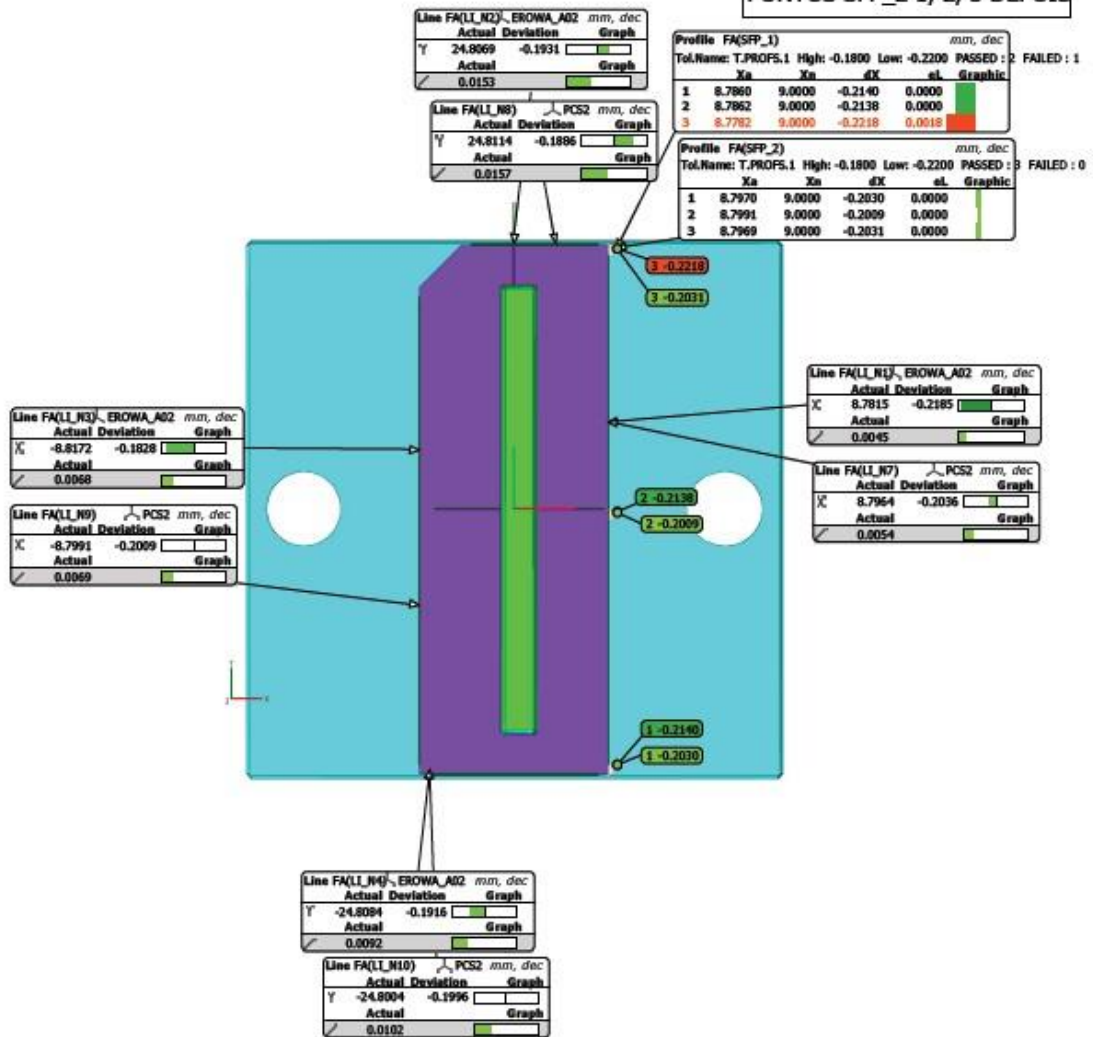
VDI 3402	Ra=CLA μm	Ra=CLA μinch	ISO 1302
0	0,10	4	N3
1	0,11	4,4	▽▽▽▽
2	0,12	4,8	
3	0,14	5,6	
4	0,16	6,4	
5	0,18	7,2	
6	0,20	8	N4
7	0,22	8,8	
8	0,25	10	
9	0,28	11,2	
10	0,32	12,8	
11	0,35	14	
12	0,40	16	N5
13	0,45	18	
14	0,50	20	
15	0,56	22,4	
16	0,63	25,2	
17	0,70	28	
18	0,80	32	
19	0,90	36	N6
20	1,00	40	▽▽▽
21	1,12	44,8	
22	1,26	50,4	
23	1,40	56	
24	1,60	63	
25	1,80	72	N7
26	2,00	80	
27	2,2	88	
28	2,5	100	
29	2,8	112	
30	3,2	125	N8
31	3,5	140	
32	4,0	160	
33	4,5	180	
34	5,0	200	
35	5,6	224	
36	6,3	250	N9
37	7	280	▽▽
38	8	320	
39	9	360	
40	10	400	
41	11,2	448	
42	12,6	500	N10
43	14	560	▽
44	16	640	
45	18	720	

Anexo L – Relatório de medição CMM do Eléctrodo-Rib antes da eletroerosão

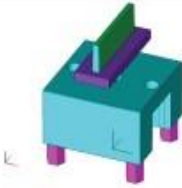
Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBH	Part number : CITSH12	Electrode: EL-01-F02 ELETRODO RIB	
Description: ANTES DE ERODIR 2ª EROSAO			Date of measurement : 02/02/2024 07:34:15 Page 1



**CORREÇÕES INICIAIS
À POSIÇÃO DO ELÉTRODO**
 X: -0.0038
 Y: -0.0001
 Z: +54.7171
 C: -0.0038
 GAP MEDIDO: +0.1898
 LINHA 1, 2, 3, 4 ANTES
 PONTOS SFP_1 1, 2, 3 ANTES
 LINHA 7, 8, 9, 10 DEPOIS
 PONTOS SFP_2 1, 2, 3 DEPOIS

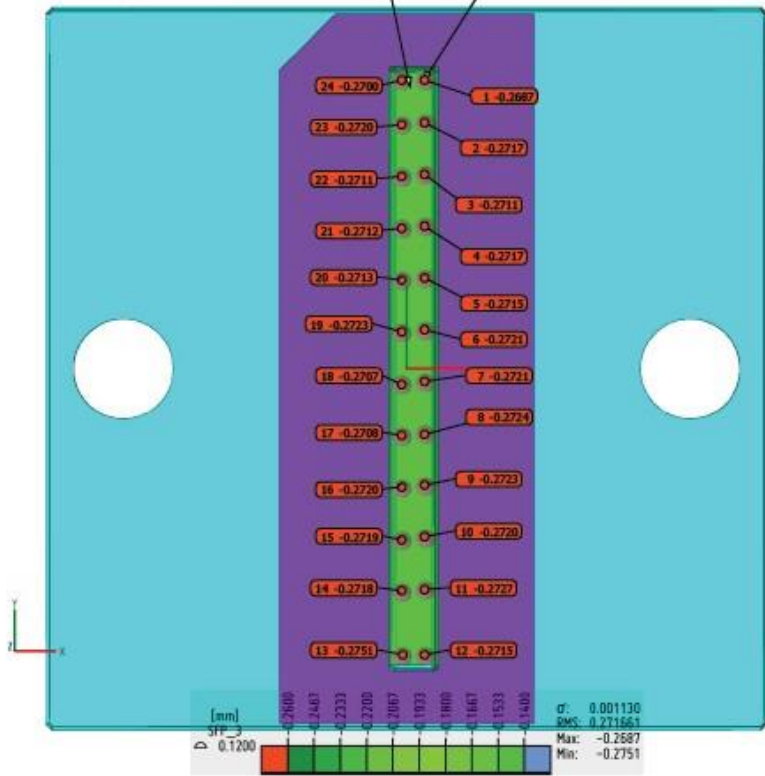


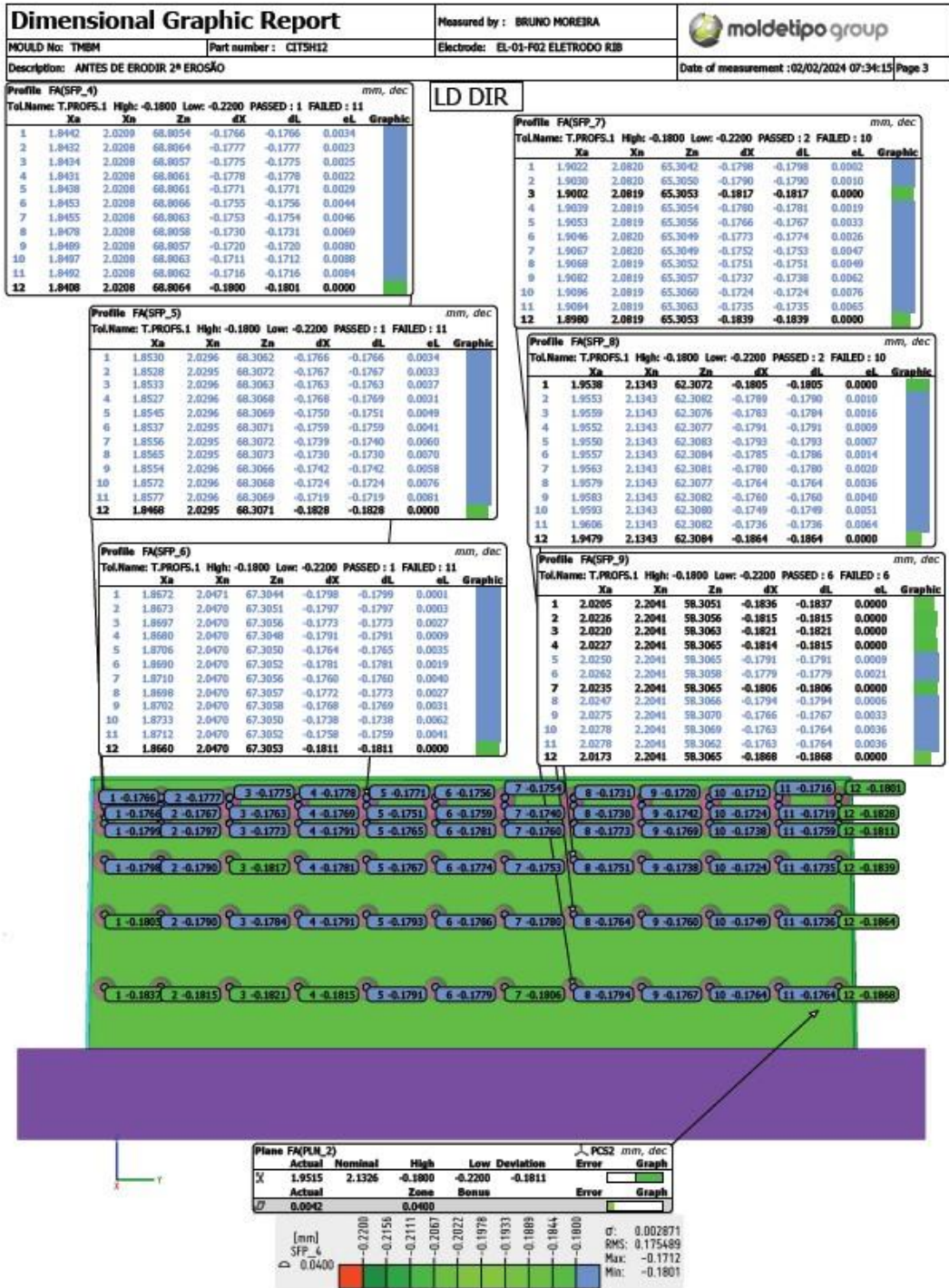
Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : CIT5H12	Electrode: EL-01-F02 ELETRODO RIB	
Description: ANTES DE ERODIR 2ª EROSIÃO			Date of measurement : 02/02/2024 07:34:15 Page 2




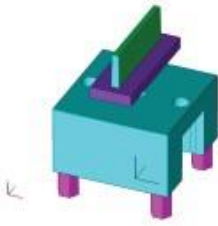
Plane FA(PLN_1)	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	PCS2	mm, dec
Z	69.7284	70.0000	-0.1400	-0.2600	-0.2716	-0.0116	Graph
D	0.0014	0.0400					Graph

Profile FA(SFP_3)							mm, dec
TolName	Zn	Zn	dZ	dL	nl	Graphic	
1	69.7313	70.0000	-0.2687	-0.2687	0.0087		
2	69.7283	70.0000	-0.2717	-0.2717	0.0117		
3	69.7289	70.0000	-0.2711	-0.2711	0.0111		
4	69.7283	70.0000	-0.2717	-0.2717	0.0117		
5	69.7285	70.0000	-0.2715	-0.2715	0.0115		
6	69.7279	70.0000	-0.2721	-0.2721	0.0121		
7	69.7279	70.0000	-0.2721	-0.2721	0.0121		
8	69.7276	70.0000	-0.2724	-0.2724	0.0124		
9	69.7277	70.0000	-0.2723	-0.2723	0.0123		
10	69.7280	70.0000	-0.2720	-0.2720	0.0120		
11	69.7273	70.0000	-0.2727	-0.2727	0.0127		
12	69.7285	70.0000	-0.2715	-0.2715	0.0115		
13	69.7249	70.0000	-0.2751	-0.2751	0.0151		
14	69.7282	70.0000	-0.2718	-0.2718	0.0118		
15	69.7281	70.0000	-0.2719	-0.2719	0.0119		
16	69.7280	70.0000	-0.2720	-0.2720	0.0120		
17	69.7292	70.0000	-0.2708	-0.2708	0.0108		
18	69.7293	70.0000	-0.2707	-0.2707	0.0107		
19	69.7277	70.0000	-0.2723	-0.2723	0.0123		
20	69.7287	70.0000	-0.2713	-0.2713	0.0113		
21	69.7288	70.0000	-0.2712	-0.2712	0.0112		
22	69.7289	70.0000	-0.2711	-0.2711	0.0111		
23	69.7288	70.0000	-0.2720	-0.2720	0.0120		
24	69.7300	70.0000	-0.2700	-0.2700	0.0100		



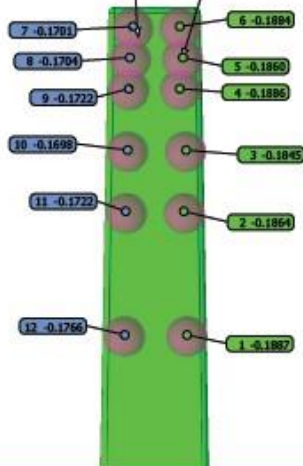


Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: THBM	Part number : CITSH12	Electrode: EL-01-F02 ELETRODO RDB	
Description: ANTES DE ERODIR 2ª EROSIÃO			Date of measurement : 02/02/2024 07:34:15 Page 4



Plane FA(PLN_3)						PCS2 mm, dec	
	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	Error	Graph
Y	20.9497	21.1326	-0.1800	-0.2200	-0.1829		
Z	0.0045	0.0400					

Profile FA(SFP_10)								mm, dec
ToIName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 6 FAILED : 6								
	Ya	Yb	Za	dY	dL	et	Graphic	
1	20.9981	21.1868	59.2991	-0.1887	-0.1887	0.0000		
2	20.9305	21.1169	63.3005	-0.1864	-0.1864	0.0000		
3	20.8975	21.0820	65.3029	-0.1845	-0.1845	0.0000		
4	20.8586	21.0471	67.3011	-0.1885	-0.1886	0.0000		
5	20.8436	21.0296	68.3038	-0.1860	-0.1860	0.0000		
6	20.8238	21.0122	69.3011	-0.1894	-0.1894	0.0000		
7	20.8422	21.0122	69.3011	-0.1700	-0.1701	0.0099		
8	20.8593	21.0296	68.3020	-0.1703	-0.1704	0.0096		
9	20.8749	21.0471	67.3012	-0.1722	-0.1722	0.0078		
10	20.9123	21.0820	65.3021	-0.1697	-0.1698	0.0102		
11	20.9448	21.1170	63.2999	-0.1721	-0.1722	0.0078		
12	21.0102	21.1867	59.3012	-0.1766	-0.1766	0.0034		



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-01-F02 ELETRODO RIB	
Description: ANTES DE ERODIR 2ª FROSAO			Date of measurement : 02/02/2024 07:34:13 Page 5

LD ESQ

Profile FA(SFP_11)
TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 2 FAILED : 10

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-0.8305	-1.0121	69.3056	0.1816	-0.1816	0.0000	
2	-0.8328	-1.0121	69.3060	0.1793	-0.1793	0.0007	
3	-0.8343	-1.0121	69.3059	0.1778	-0.1778	0.0022	
4	-0.8332	-1.0121	69.3071	0.1789	-0.1789	0.0011	
5	-0.8343	-1.0121	69.3069	0.1778	-0.1778	0.0022	
6	-0.8349	-1.0121	69.3069	0.1772	-0.1772	0.0028	
7	-0.8352	-1.0121	69.3065	0.1769	-0.1769	0.0031	
8	-0.8358	-1.0121	69.3064	0.1763	-0.1763	0.0037	
9	-0.8373	-1.0121	69.3061	0.1748	-0.1748	0.0052	
10	-0.8364	-1.0121	69.3071	0.1757	-0.1758	0.0042	
11	-0.8374	-1.0121	69.3068	0.1747	-0.1747	0.0053	
12	-0.8295	-1.0121	69.3068	0.1826	-0.1826	0.0000	

Profile FA(SFP_14)
TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 6 FAILED : 6

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-0.8980	-1.0820	65.3048	0.1839	-0.1839	0.0000	
2	-0.9004	-1.0819	65.3051	0.1816	-0.1816	0.0000	
3	-0.9026	-1.0819	65.3053	0.1794	-0.1794	0.0006	
4	-0.9012	-1.0820	65.3048	0.1808	-0.1808	0.0000	
5	-0.9012	-1.0820	65.3049	0.1808	-0.1808	0.0000	
6	-0.9014	-1.0819	65.3056	0.1806	-0.1806	0.0000	
7	-0.9026	-1.0819	65.3052	0.1793	-0.1794	0.0006	
8	-0.9025	-1.0819	65.3054	0.1795	-0.1795	0.0005	
9	-0.9025	-1.0820	65.3051	0.1794	-0.1794	0.0006	
10	-0.9037	-1.0820	65.3050	0.1783	-0.1783	0.0017	
11	-0.9044	-1.0820	65.3048	0.1775	-0.1775	0.0025	
12	-0.8987	-1.0819	65.3057	0.1833	-0.1833	0.0000	

Profile FA(SFP_12)
TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 0 FAILED : 12

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-0.8502	-1.0296	68.3059	0.1793	-0.1794	0.0006	
2	-0.8516	-1.0296	68.3065	0.1780	-0.1780	0.0020	
3	-0.8523	-1.0296	68.3066	0.1773	-0.1773	0.0027	
4	-0.8535	-1.0295	68.3077	0.1760	-0.1760	0.0040	
5	-0.8534	-1.0295	68.3074	0.1761	-0.1762	0.0038	
6	-0.8518	-1.0296	68.3069	0.1777	-0.1777	0.0023	
7	-0.8534	-1.0295	68.3073	0.1761	-0.1761	0.0039	
8	-0.8542	-1.0296	68.3067	0.1753	-0.1753	0.0047	
9	-0.8540	-1.0295	68.3076	0.1755	-0.1755	0.0045	
10	-0.8543	-1.0295	68.3075	0.1752	-0.1752	0.0048	
11	-0.8573	-1.0295	68.3075	0.1722	-0.1723	0.0077	
12	-0.8497	-1.0295	68.3074	0.1798	-0.1799	0.0001	

Profile FA(SFP_15)
TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 9 FAILED : 3

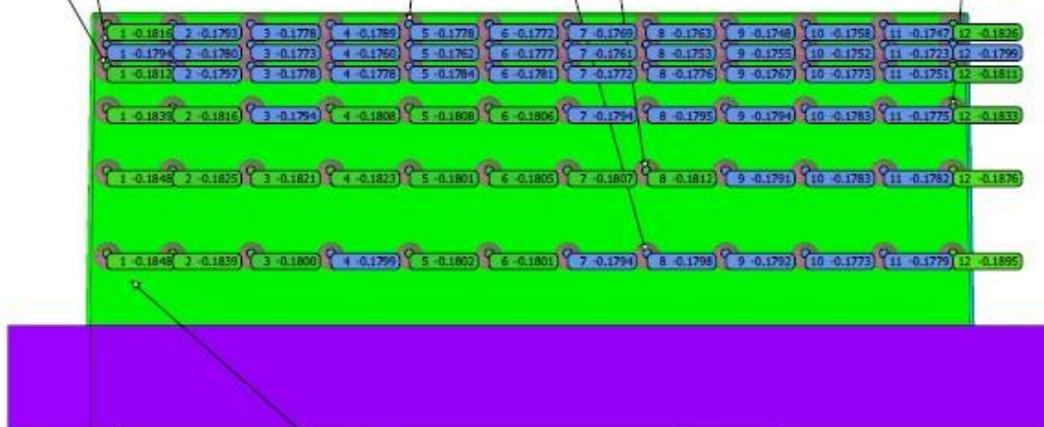
	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-0.9495	-1.1343	62.3066	0.1848	-0.1848	0.0000	
2	-0.9518	-1.1343	62.3073	0.1825	-0.1825	0.0000	
3	-0.9522	-1.1343	62.3072	0.1821	-0.1821	0.0000	
4	-0.9520	-1.1343	62.3081	0.1823	-0.1823	0.0000	
5	-0.9542	-1.1343	62.3077	0.1801	-0.1801	0.0000	
6	-0.9538	-1.1343	62.3077	0.1805	-0.1805	0.0000	
7	-0.9536	-1.1343	62.3074	0.1807	-0.1807	0.0000	
8	-0.9531	-1.1343	62.3077	0.1812	-0.1812	0.0000	
9	-0.9552	-1.1343	62.3071	0.1791	-0.1791	0.0009	
10	-0.9559	-1.1343	62.3082	0.1783	-0.1783	0.0017	
11	-0.9561	-1.1343	62.3082	0.1781	-0.1782	0.0018	
12	-0.9467	-1.1343	62.3081	0.1875	-0.1876	0.0000	

Profile FA(SFP_13)
TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 2 FAILED : 10

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-0.8658	-1.0471	67.3042	0.1812	-0.1812	0.0000	
2	-0.8673	-1.0470	67.3058	0.1797	-0.1797	0.0003	
3	-0.8693	-1.0470	67.3056	0.1777	-0.1778	0.0022	
4	-0.8693	-1.0470	67.3060	0.1778	-0.1778	0.0022	
5	-0.8687	-1.0470	67.3056	0.1784	-0.1784	0.0016	
6	-0.8690	-1.0470	67.3052	0.1780	-0.1781	0.0019	
7	-0.8699	-1.0470	67.3052	0.1771	-0.1772	0.0028	
8	-0.8694	-1.0470	67.3059	0.1778	-0.1778	0.0024	
9	-0.8704	-1.0470	67.3056	0.1767	-0.1767	0.0033	
10	-0.8698	-1.0470	67.3053	0.1772	-0.1773	0.0027	
11	-0.8720	-1.0470	67.3052	0.1751	-0.1751	0.0049	
12	-0.8660	-1.0470	67.3050	0.1810	-0.1811	0.0000	

Profile FA(SFP_16)
TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 6 FAILED : 6

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-1.0193	-1.2041	58.3057	0.1848	-0.1848	0.0000	
2	-1.0202	-1.2041	58.3059	0.1839	-0.1839	0.0000	
3	-1.0241	-1.2041	58.3059	0.1800	-0.1800	0.0000	
4	-1.0242	-1.2041	58.3057	0.1799	-0.1799	0.0001	
5	-1.0240	-1.2041	58.3057	0.1802	-0.1802	0.0000	
6	-1.0240	-1.2041	58.3061	0.1801	-0.1801	0.0000	
7	-1.0247	-1.2041	58.3065	0.1794	-0.1794	0.0006	
8	-1.0244	-1.2041	58.3064	0.1797	-0.1798	0.0002	
9	-1.0249	-1.2041	58.3063	0.1792	-0.1792	0.0008	
10	-1.0269	-1.2041	58.3058	0.1772	-0.1773	0.0027	
11	-1.0262	-1.2041	58.3058	0.1779	-0.1779	0.0021	
12	-1.0146	-1.2041	58.3066	0.1895	-0.1895	0.0000	




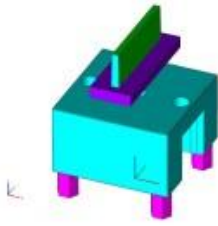
Plane FA(PLN_4)

	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	PCS2 Error	Graph
X	-0.9569	-1.1326	-0.1800	-0.2200	-0.1757	0.0043	
Z	0.0039		Zone	Bonus			

(mm)	-0.2200	-0.2156	-0.2111	-0.2067	-0.2022	-0.1978	-0.1933	-0.1889	-0.1844	-0.1800
SFP_11										
0.0400										

σ: 0.002471
RMS: 0.177827
Max: -0.1747
Min: -0.1826

Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : CITSH12	Electrode: EL-01-F02 ELETRODO R18	
Description: ANTES DE ERODIR 2ª EROSIÃO		Date of measurement : 02/02/2024 07:34:15	



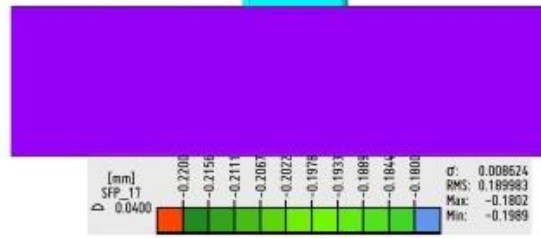
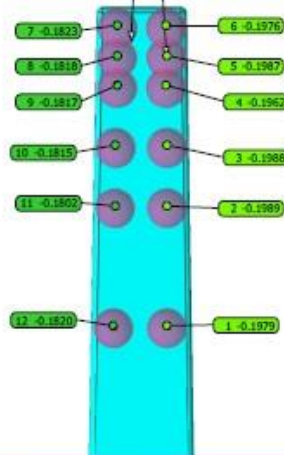
Profile FA(SFP_17) mm, dec

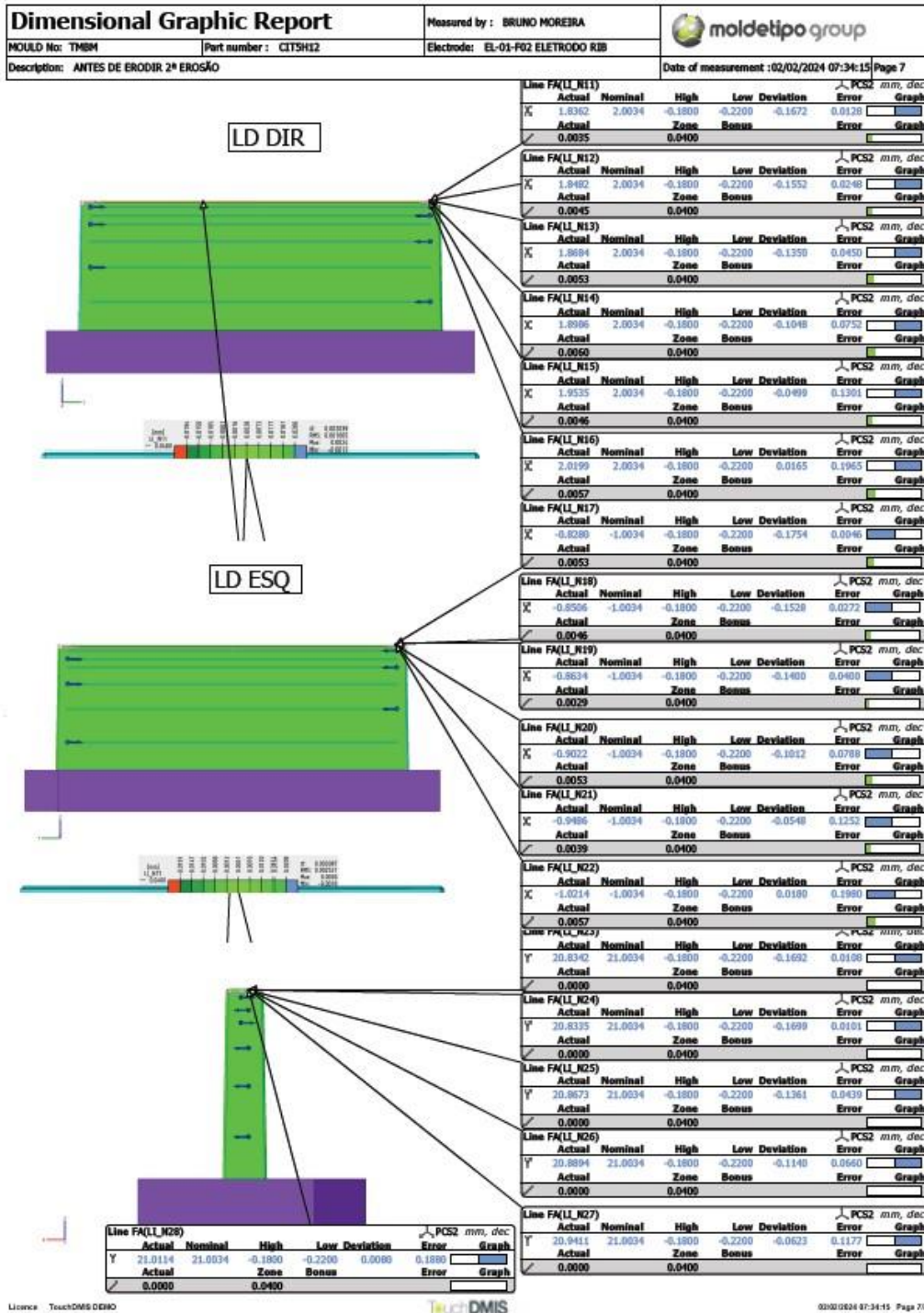
Tot.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 12 FAILED : 0

	Ys	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	-20.9889	-21.1868	59.3009	0.1979	-0.1979	0.0000		
2	-20.9181	-21.1169	63.3006	0.1989	-0.1989	0.0000		
3	-20.8832	-21.0820	65.3032	0.1988	-0.1988	0.0000		
4	-20.8509	-21.0471	67.3026	0.1962	-0.1962	0.0000		
5	-20.8310	-21.0296	68.3037	0.1986	-0.1987	0.0000		
6	-20.8146	-21.0122	69.3012	0.1976	-0.1976	0.0000		
7	-20.8299	-21.0122	69.3010	0.1823	-0.1823	0.0000		
8	-20.8479	-21.0296	68.3023	0.1818	-0.1818	0.0000		
9	-20.8654	-21.0471	67.3017	0.1817	-0.1817	0.0000		
10	-20.9006	-21.0820	65.3018	0.1814	-0.1815	0.0000		
11	-20.9367	-21.1170	63.2996	0.1802	-0.1802	0.0000		
12	-21.0048	-21.1868	59.3008	0.1820	-0.1820	0.0000		

Plane FA(PLN_5) mm, dec

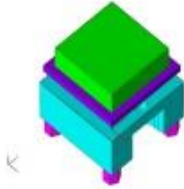
	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	PCC2	Error	Graph
Y	-20.9367	-21.1326	-0.1800	-0.2200	-0.1959			
Z	0.0028	0.0400						



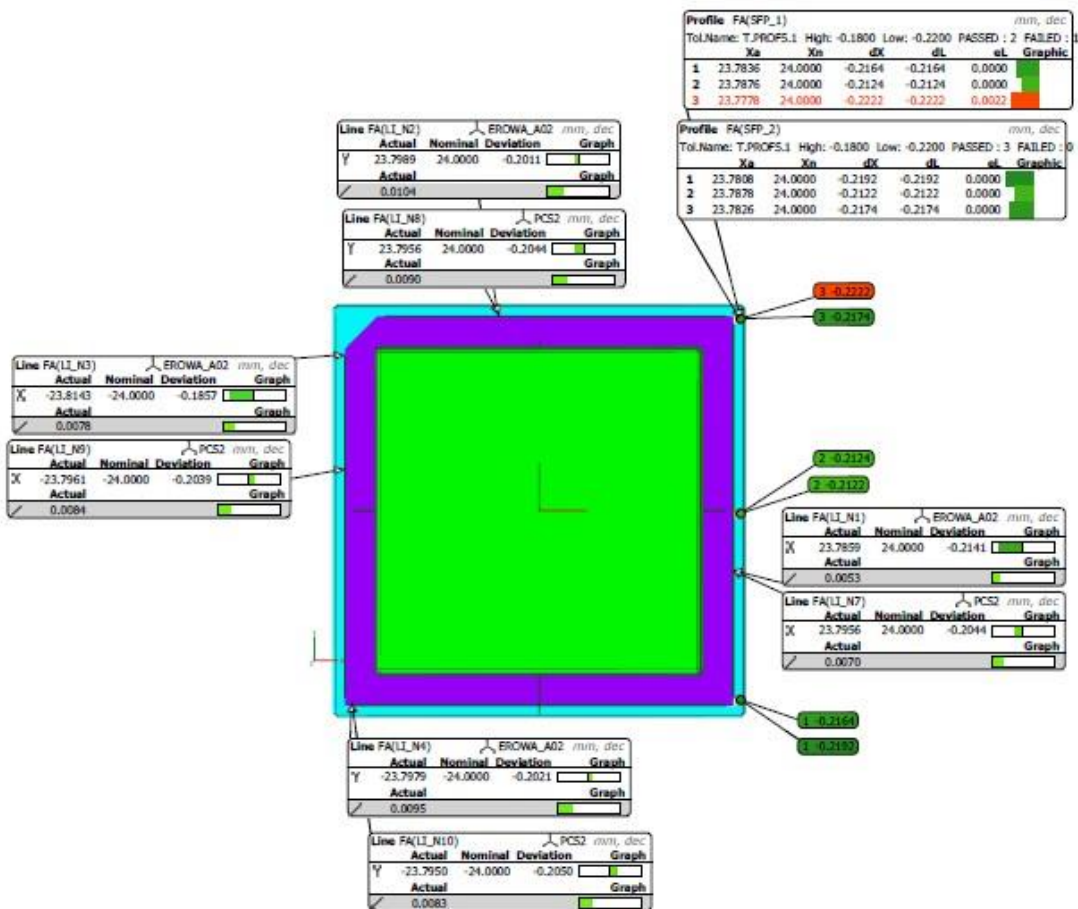



Anexo M – Relatório de medição CMM do Eléctrodo-CX antes da eletroerosão

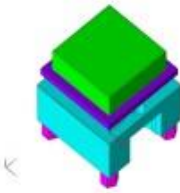
Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : CJT5H12	Electrode: EL-02-F02 CAIXA	Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25 Page 1
Description: ANTES DE EROSÃO 2ª EROSÃO			



**CORREÇÕES INICIAIS
À POSIÇÃO DO ELÉTRODO**
 X: -0.0125
 Y: +0.0018
 Z: +54.7147
 C: -0.0101
 GAP MEDIDO: +0.1934
 LINHA 1, 2, 3, 4 ANTES
 LINHA 7, 8, 9, 10 DEPOIS
 PONTOS SFP_1 1, 2, 3 ANTES
 PONTOS SFP_2 1, 2, 3 DEPOIS




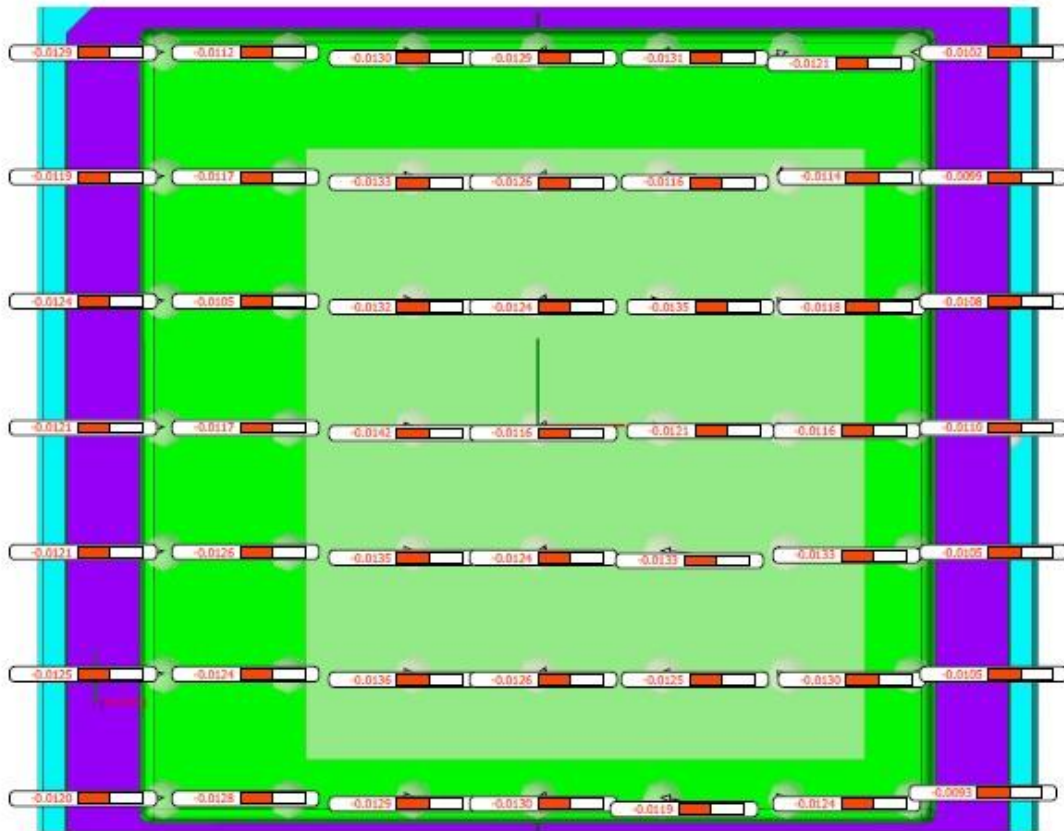
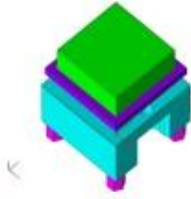
Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CADXA	
Description: ANTES DE EROSIÃO 2ª EROSIÃO		Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25 Page 2	



PLN_1	
Actual	Nominal
69.7269	70.0000
Actual	
0.0012	



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-02-F02 CADXA	
Description: ANTES DE EROSÃO 2ª EROSÃO			Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25 Page 3



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : CITSH12	Electrode: EL-02-F02 CAIDA	
Description: ANTES DE EROSAO 2ª EROSAO		Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25	Page 4

FACE 1 LD DIR

Profile FA(SFP_3) mm, dec
 TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 3 FAILED : 4

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	19.8372	20.0173	69.0096	-0.1801	-0.1802	0.0000	
2	19.8372	20.0173	69.0104	-0.1801	-0.1801	0.0000	
3	19.8394	20.0173	69.0097	-0.1779	-0.1779	0.0021	
4	19.8396	20.0173	69.0100	-0.1776	-0.1777	0.0023	
5	19.8422	20.0173	69.0103	-0.1750	-0.1751	0.0049	
6	19.8424	20.0173	69.0096	-0.1749	-0.1749	0.0051	
7	19.8292	20.0173	69.0104	-0.1881	-0.1881	0.0000	

Profile FA(SFP_4) mm, dec
 TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 3 FAILED : 4

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	19.8526	20.0347	68.0112	-0.1821	-0.1821	0.0000	
2	19.8548	20.0347	68.0124	-0.1799	-0.1799	0.0001	
3	19.8547	20.0347	68.0132	-0.1800	-0.1801	0.0000	
4	19.8561	20.0347	68.0123	-0.1786	-0.1786	0.0014	
5	19.8590	20.0347	68.0125	-0.1757	-0.1757	0.0043	
6	19.8594	20.0347	68.0130	-0.1753	-0.1753	0.0047	
7	19.8484	20.0347	68.0123	-0.1863	-0.1864	0.0000	

Profile FA(SFP_5) mm, dec
 TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 2 FAILED : 5

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	19.9061	20.0871	65.0112	-0.1810	-0.1810	0.0000	
2	19.9074	20.0871	65.0112	-0.1797	-0.1797	0.0003	
3	19.9085	20.0871	65.0117	-0.1786	-0.1786	0.0014	
4	19.9095	20.0871	65.0119	-0.1776	-0.1776	0.0024	
5	19.9117	20.0871	65.0133	-0.1753	-0.1754	0.0046	
6	19.9125	20.0871	65.0115	-0.1746	-0.1746	0.0054	
7	19.9009	20.0871	65.0121	-0.1862	-0.1862	0.0000	

Profile FA(SFP_7) mm, dec
 TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 4 FAILED : 3

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	19.9568	20.1394	62.0123	-0.1826	-0.1826	0.0000	
2	19.9588	20.1394	62.0130	-0.1806	-0.1806	0.0000	
3	19.9609	20.1394	62.0137	-0.1786	-0.1786	0.0014	
4	19.9594	20.1394	62.0133	-0.1800	-0.1801	0.0000	
5	19.9632	20.1394	62.0135	-0.1762	-0.1762	0.0038	
6	19.9630	20.1394	62.0135	-0.1764	-0.1764	0.0036	
7	19.9519	20.1394	62.0131	-0.1875	-0.1876	0.0000	

Profile FA(SFP_5) mm, dec
 TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 2 FAILED : 5

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	19.8720	20.0522	67.0098	-0.1802	-0.1802	0.0000	
2	19.8734	20.0522	67.0107	-0.1788	-0.1788	0.0012	
3	19.8737	20.0522	67.0115	-0.1785	-0.1785	0.0015	
4	19.8756	20.0522	67.0107	-0.1765	-0.1766	0.0034	
5	19.8772	20.0522	67.0110	-0.1750	-0.1750	0.0050	
6	19.8757	20.0522	67.0115	-0.1765	-0.1765	0.0035	
7	19.8654	20.0522	67.0108	-0.1868	-0.1868	0.0000	

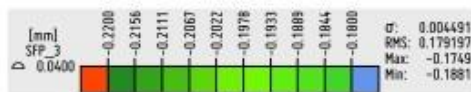
Profile FA(SFP_8) mm, dec
 TolName: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 4 FAILED : 3

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	20.0265	20.2093	58.0111	-0.1828	-0.1828	0.0000	
2	20.0251	20.2093	58.0110	-0.1842	-0.1842	0.0000	
3	20.0283	20.2093	58.0117	-0.1809	-0.1809	0.0000	
4	20.0297	20.2093	58.0120	-0.1795	-0.1796	0.0004	
5	20.0317	20.2093	58.0113	-0.1775	-0.1776	0.0024	
6	20.0320	20.2093	58.0116	-0.1772	-0.1773	0.0027	
7	20.0217	20.2092	58.0121	-0.1876	-0.1876	0.0000	



Plane FA(PLN_2) PCS2 mm, dec

	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	Error	Graph
Xc	19.9453	20.1352	-0.1800	-0.2200	-0.1899		
Lr	0.0041	0.0400	Bonus				



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : CITSH12	Electrode: EL-02-FO2 CAIXA	
Description: ANTES DE EROSAO 2ª EROSAO		Date of measurement :02/02/2024 08:39:25	

FACE 2 TOPO

Profile FA(SFP_9) mm, dec

Tol:Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 1 FAILED : 6

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	19.8322	20.0173	69.0094	-0.1851	-0.1852	0.0000		
2	19.8379	20.0173	69.0102	-0.1794	-0.1794	0.0006		
3	19.8387	20.0173	69.0105	-0.1786	-0.1786	0.0014		
4	19.9403	20.0173	69.0103	-0.1770	-0.1770	0.0030		
5	19.9421	20.0173	69.0106	-0.1751	-0.1752	0.0048		
6	19.9412	20.0173	69.0102	-0.1760	-0.1761	0.0039		
7	19.9413	20.0173	69.0104	-0.1759	-0.1760	0.0040		

Profile FA(SFP_12) mm, dec

Tol:Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 3 FAILED : 4

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	19.9004	20.0871	65.0113	-0.1866	-0.1867	0.0000		
2	19.9065	20.0871	65.0114	-0.1806	-0.1806	0.0000		
3	19.9083	20.0871	65.0122	-0.1767	-0.1789	0.0012		
4	19.9097	20.0871	65.0127	-0.1774	-0.1774	0.0026		
5	19.9141	20.0871	65.0119	-0.1730	-0.1730	0.0070		
6	19.9107	20.0871	65.0136	-0.1764	-0.1764	0.0036		
7	19.9046	20.0871	65.0129	-0.1825	-0.1825	0.0000		

Profile FA(SFP_10) mm, dec

Tol:Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 2 FAILED : 5

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	19.8486	20.0347	68.0097	-0.1862	-0.1862	0.0000		
2	19.8565	20.0347	68.0113	-0.1782	-0.1782	0.0019		
3	19.8556	20.0347	68.0117	-0.1791	-0.1791	0.0009		
4	19.8596	20.0347	68.0107	-0.1752	-0.1752	0.0048		
5	19.8627	20.0347	68.0108	-0.1720	-0.1721	0.0079		
6	19.8608	20.0347	68.0113	-0.1739	-0.1739	0.0061		
7	19.8542	20.0347	68.0108	-0.1806	-0.1806	0.0000		

Profile FA(SFP_13) mm, dec

Tol:Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 3 FAILED : 4

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	19.9541	20.1394	62.0120	-0.1854	-0.1854	0.0000		
2	19.9549	20.1394	62.0129	-0.1845	-0.1846	0.0000		
3	19.9601	20.1394	62.0134	-0.1793	-0.1793	0.0007		
4	19.9603	20.1394	62.0130	-0.1791	-0.1791	0.0009		
5	19.9639	20.1394	62.0133	-0.1755	-0.1755	0.0045		
6	19.9656	20.1394	62.0139	-0.1738	-0.1738	0.0062		
7	19.9577	20.1394	62.0129	-0.1817	-0.1817	0.0000		

Profile FA(SFP_11) mm, dec

Tol:Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 3 FAILED : 4

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	19.8662	20.0522	67.0114	-0.1859	-0.1860	0.0000		
2	19.8716	20.0522	67.0115	-0.1806	-0.1806	0.0000		
3	19.8730	20.0522	67.0123	-0.1791	-0.1792	0.0008		
4	19.8750	20.0522	67.0111	-0.1772	-0.1772	0.0028		
5	19.8784	20.0522	67.0118	-0.1738	-0.1738	0.0062		
6	19.8777	20.0521	67.0124	-0.1744	-0.1745	0.0055		
7	19.8722	20.0522	67.0117	-0.1800	-0.1800	0.0000		

Profile FA(SFP_14) mm, dec

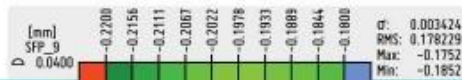
Tol:Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 5 FAILED : 2

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	et	Graphic
1	20.0241	20.2093	58.0104	-0.1852	-0.1852	0.0000		
2	20.0260	20.2093	58.0114	-0.1833	-0.1833	0.0000		
3	20.0265	20.2093	58.0106	-0.1827	-0.1828	0.0000		
4	20.0289	20.2093	58.0108	-0.1804	-0.1804	0.0000		
5	20.0316	20.2093	58.0116	-0.1776	-0.1777	0.0023		
6	20.0348	20.2093	58.0108	-0.1745	-0.1745	0.0055		
7	20.0277	20.2093	58.0113	-0.1815	-0.1816	0.0000		

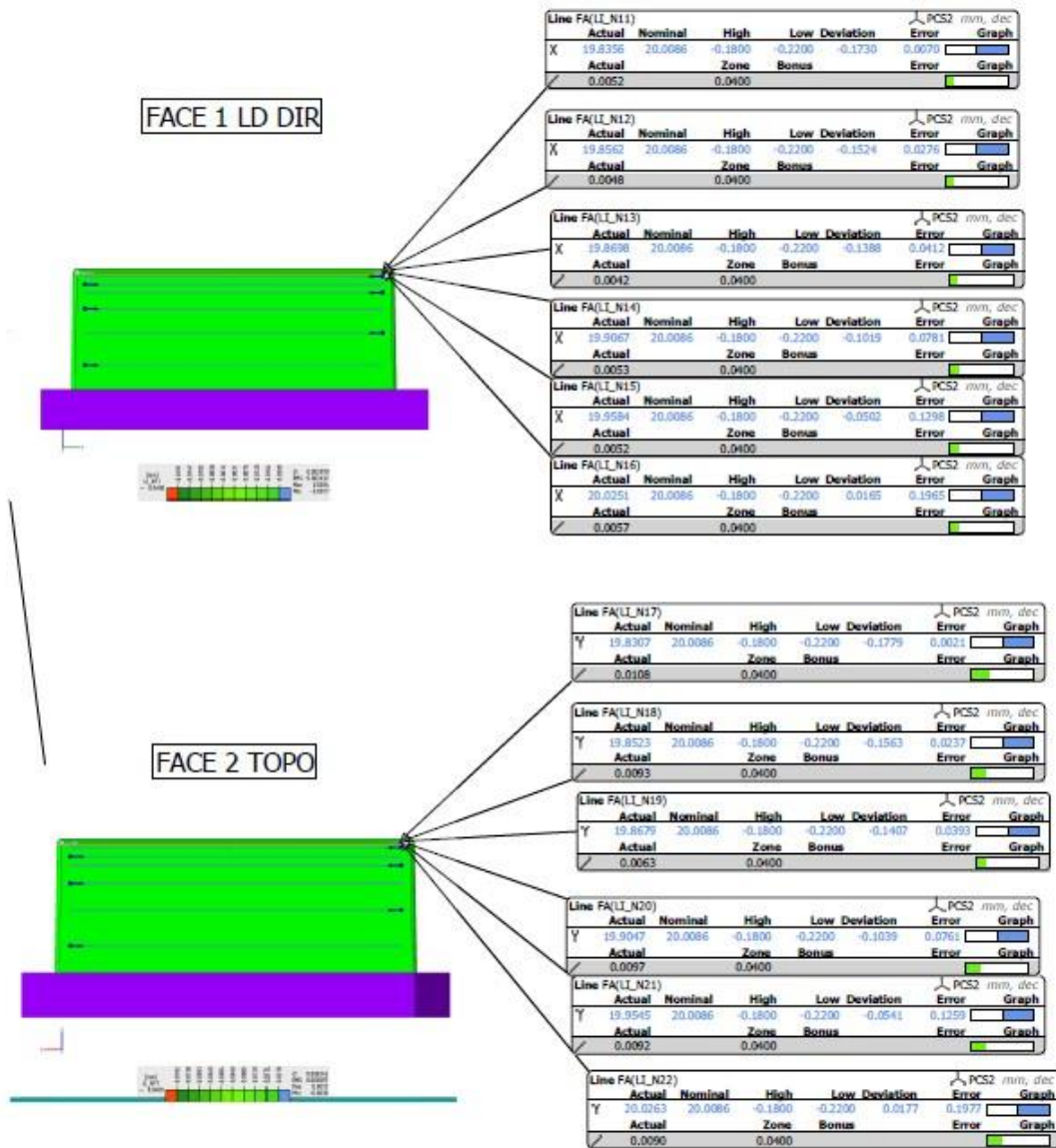


Plane FA(PLN_3) PCS2 mm, dec

	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	Error	Graph
Y	19.9560	20.1352	-0.1800	-0.2200	-0.1794	0.0016	
Z	0.8070	0.9400					



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CADXA	
Description: ANTES DE EROSAO 2ª EROSAO			Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25 Page 6



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-02-F02 CADA	
Description: ANTES DE EROSAO 2ª EROSAO		Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25	Page 7

FACE 3 LD ESQ

Profile FA(SFP_15)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-19.8239	-20.0173	69.0108	0.1934	-0.1934	0.0000	
2	-19.8267	-20.0172	69.0123	0.1905	-0.1905	0.0000	
3	-19.8291	-20.0172	69.0122	0.1882	-0.1882	0.0000	
4	-19.8268	-20.0172	69.0118	0.1905	-0.1905	0.0000	
5	-19.8292	-20.0173	69.0113	0.1881	-0.1881	0.0000	
6	-19.8295	-20.0172	69.0122	0.1877	-0.1877	0.0000	
7	-19.8225	-20.0172	69.0118	0.1947	-0.1948	0.0000	

Profile FA(SFP_18)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-19.8974	-20.0871	65.0120	0.1897	-0.1897	0.0000	
2	-19.8961	-20.0871	65.0123	0.1910	-0.1910	0.0000	
3	-19.8991	-20.0871	65.0125	0.1880	-0.1880	0.0000	
4	-19.8994	-20.0870	65.0130	0.1876	-0.1877	0.0000	
5	-19.9008	-20.0871	65.0128	0.1862	-0.1862	0.0000	
6	-19.9018	-20.0871	65.0126	0.1853	-0.1853	0.0000	
7	-19.8959	-20.0870	65.0130	0.1912	-0.1912	0.0000	

Profile FA(SFP_16)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-19.8411	-20.0348	68.0089	0.1936	-0.1936	0.0000	
2	-19.8462	-20.0347	68.0106	0.1885	-0.1886	0.0000	
3	-19.8468	-20.0347	68.0100	0.1879	-0.1880	0.0000	
4	-19.8465	-20.0347	68.0096	0.1882	-0.1883	0.0000	
5	-19.8497	-20.0347	68.0107	0.1850	-0.1851	0.0000	
6	-19.8508	-20.0347	68.0100	0.1839	-0.1840	0.0000	
7	-19.8395	-20.0347	68.0098	0.1953	-0.1953	0.0000	

Profile FA(SFP_19)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 7 FAILED : 0

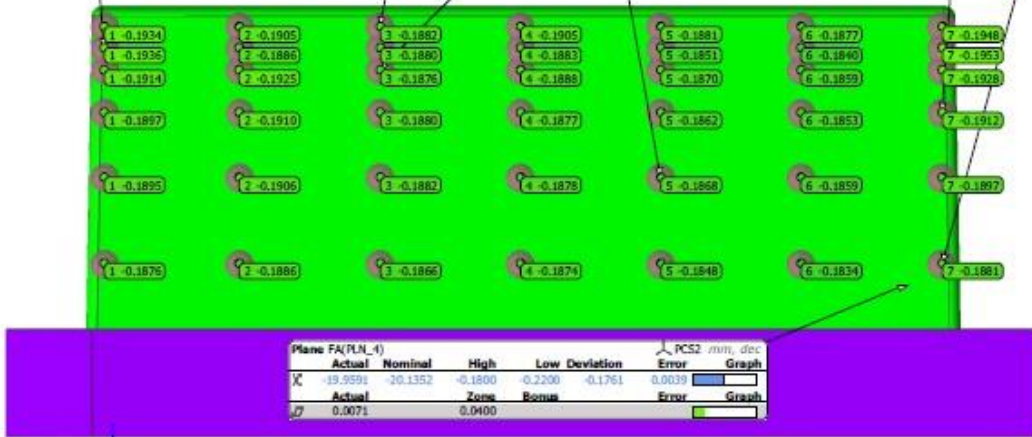
	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-19.9500	-20.1394	62.0117	0.1894	-0.1895	0.0000	
2	-19.9488	-20.1394	62.0135	0.1906	-0.1906	0.0000	
3	-19.9512	-20.1394	62.0134	0.1882	-0.1882	0.0000	
4	-19.9516	-20.1394	62.0131	0.1878	-0.1878	0.0000	
5	-19.9526	-20.1394	62.0141	0.1868	-0.1868	0.0000	
6	-19.9535	-20.1394	62.0136	0.1859	-0.1859	0.0000	
7	-19.9498	-20.1394	62.0132	0.1896	-0.1897	0.0000	

Profile FA(SFP_17)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-19.8608	-20.0522	67.0119	0.1913	-0.1914	0.0000	
2	-19.8596	-20.0521	67.0126	0.1925	-0.1925	0.0000	
3	-19.8646	-20.0521	67.0126	0.1876	-0.1876	0.0000	
4	-19.8634	-20.0522	67.0123	0.1888	-0.1888	0.0000	
5	-19.8652	-20.0521	67.0129	0.1869	-0.1870	0.0000	
6	-19.8663	-20.0521	67.0127	0.1858	-0.1859	0.0000	
7	-19.8594	-20.0521	67.0124	0.1928	-0.1928	0.0000	

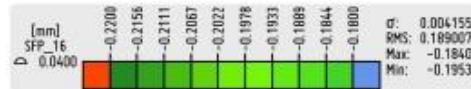
Profile FA(SFP_20)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: -0.1800 Low: -0.2200 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	-20.0217	-20.2093	58.0118	0.1876	-0.1876	0.0000	
2	-20.0206	-20.2092	58.0123	0.1886	-0.1886	0.0000	
3	-20.0227	-20.2092	58.0130	0.1865	-0.1866	0.0000	
4	-20.0219	-20.2092	58.0126	0.1873	-0.1874	0.0000	
5	-20.0245	-20.2092	58.0123	0.1848	-0.1848	0.0000	
6	-20.0258	-20.2092	58.0121	0.1834	-0.1834	0.0000	
7	-20.0212	-20.2092	58.0125	0.1881	-0.1881	0.0000	



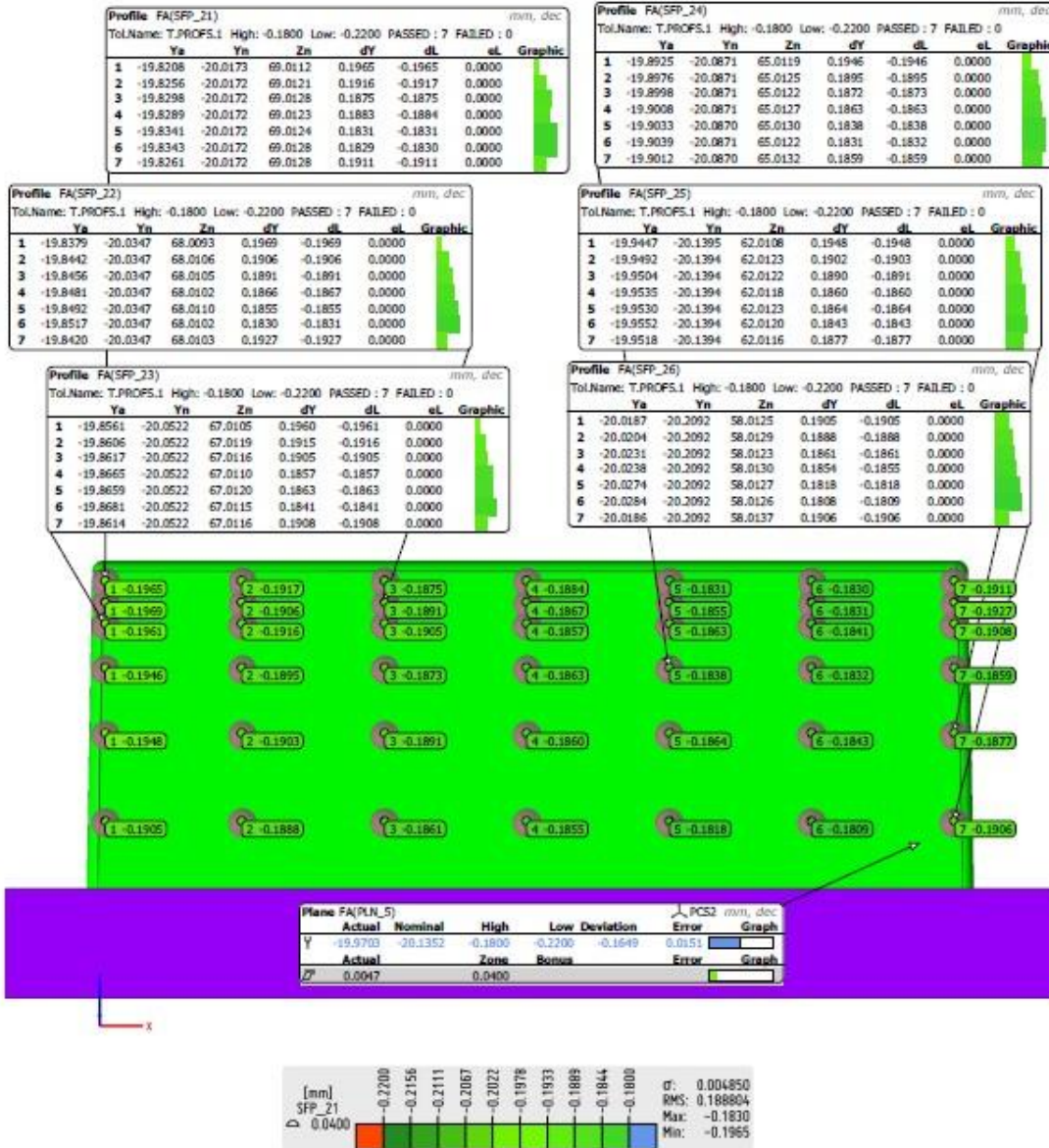
Plane FA(LM_4)

	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	PCSD Error	Graph
X	-19.9599	-20.1352	-0.1800	-0.2200	-0.1761	0.0029	
Z	0.0071	0.0400					

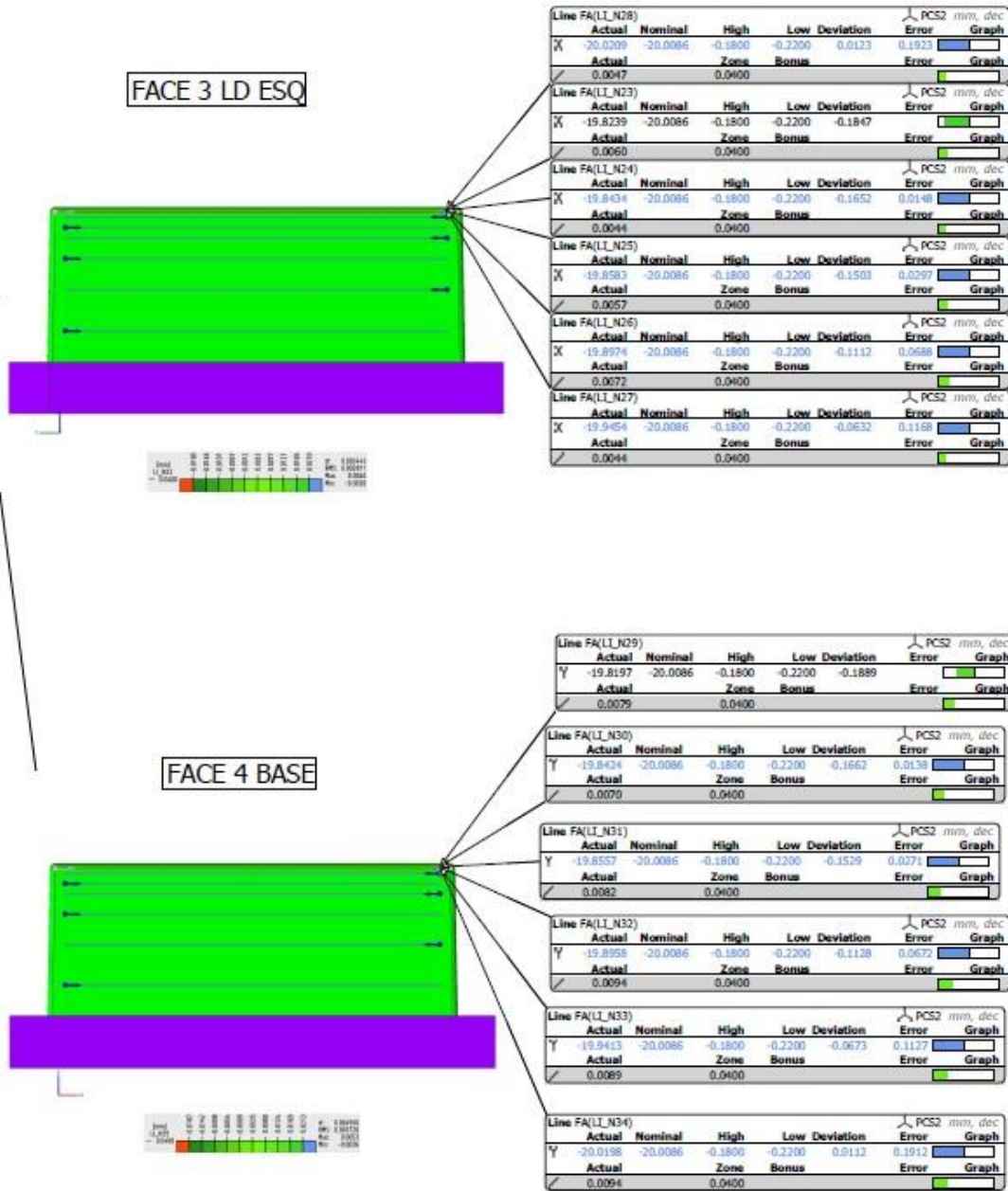


Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMSM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-02-F02 CADA	
Description: ANTES DE EROSAO 2ª EROSAO			Date of measurement : 02/02/2024 08:39:25 Page 8

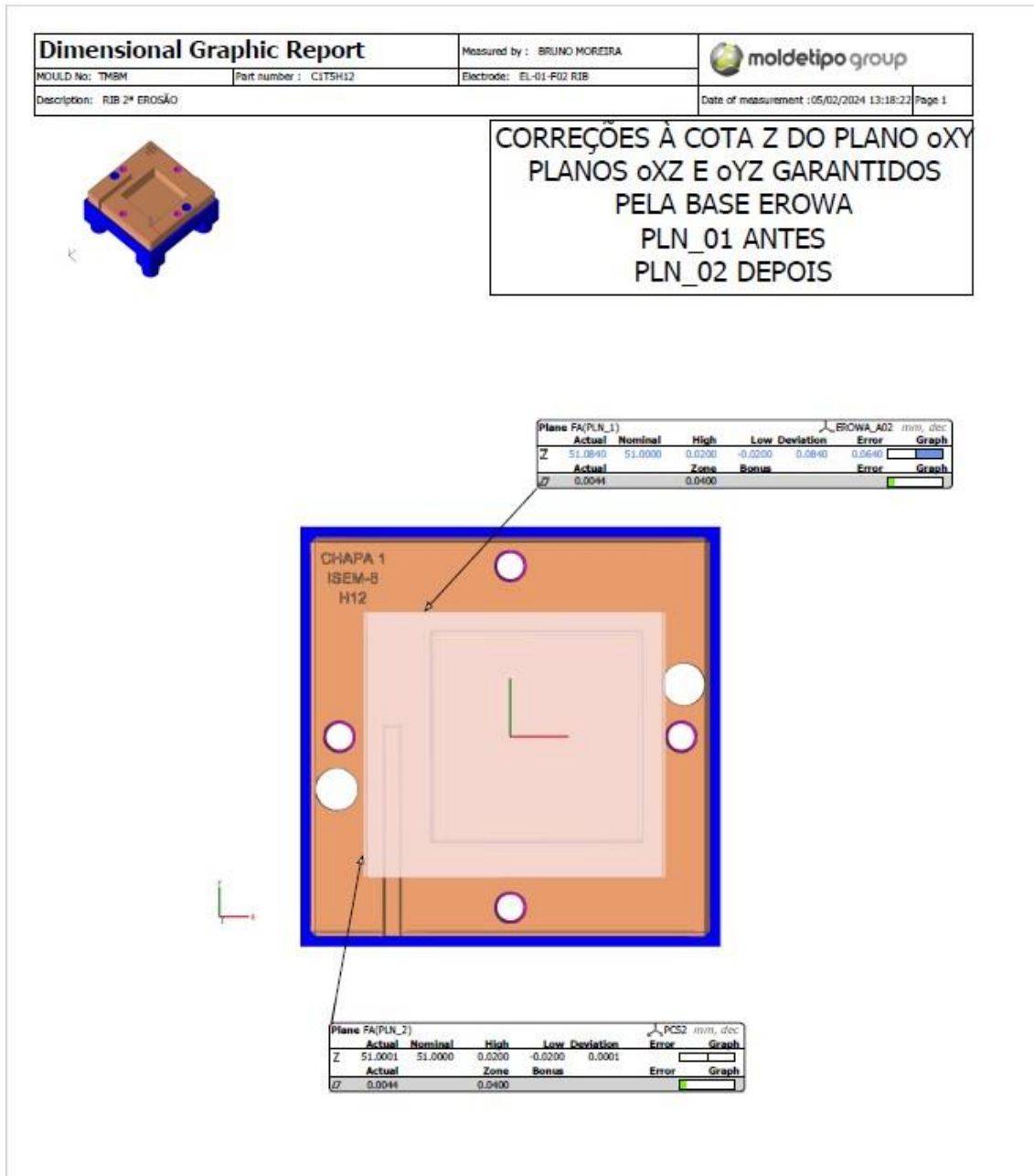
FACE 4 BASE

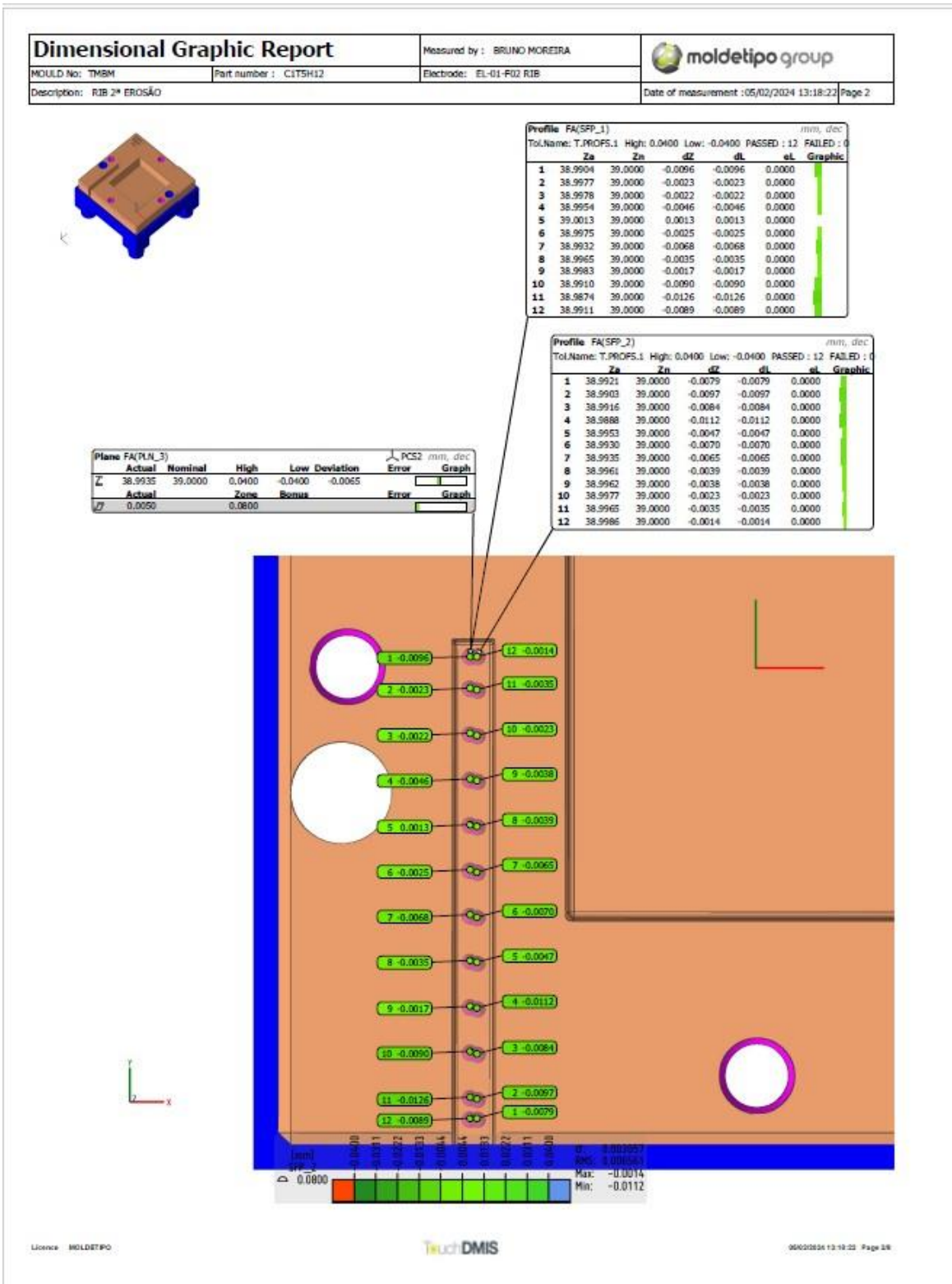


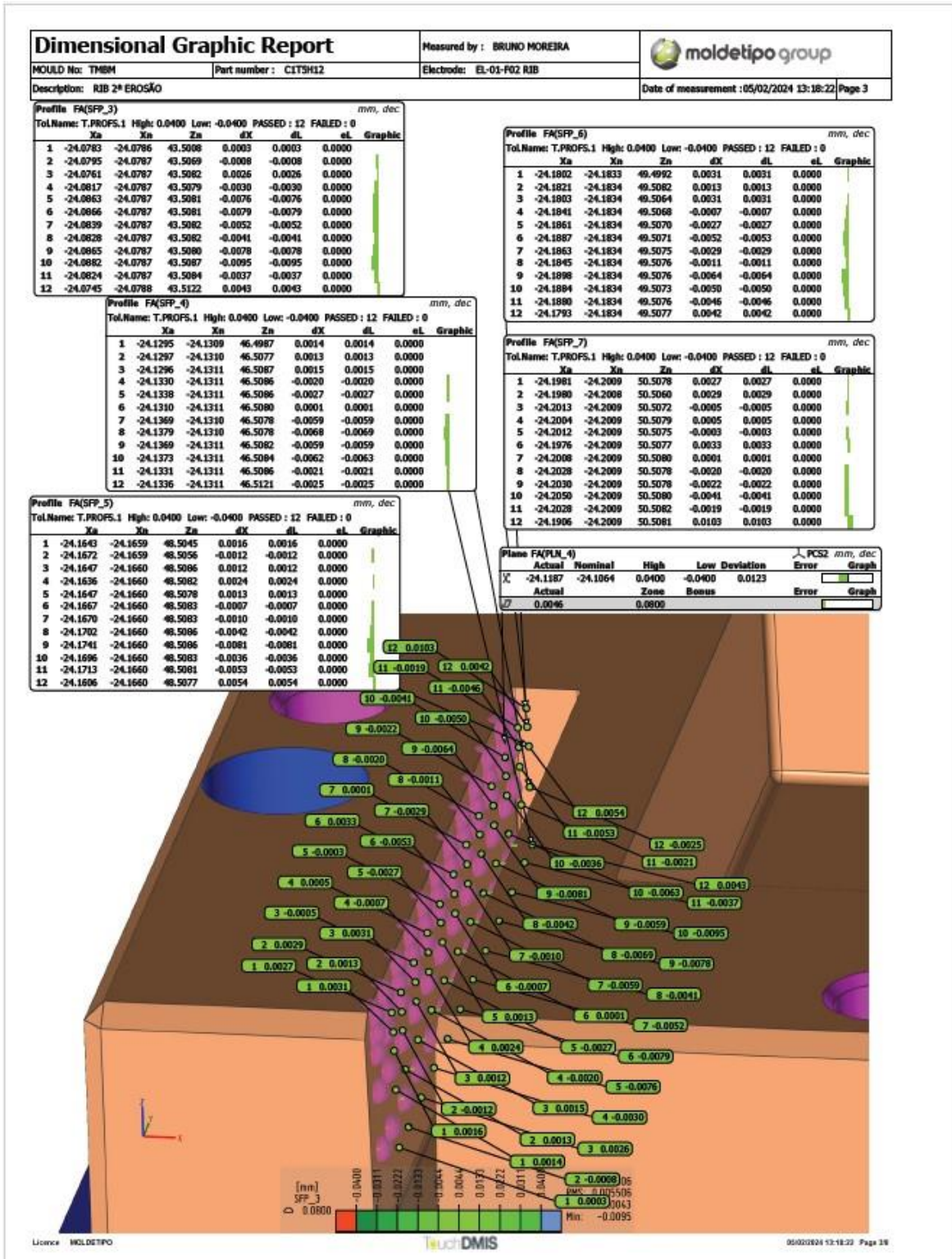
Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CADXA	
Description: ANTES DE EROSAO 2ª EROSAO			Date of measurement :02/02/2024 08:39:25 Page 9



Anexo N – Relatório de medição CMM da peça C1T5H12-Chapa-teste-Rib-2ªEletroerosão







Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMSM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-01-F02 RIB	
Description: RIB 2ª EROSAO			Date of measurement : 05/02/2024 13:18:22 Page 4



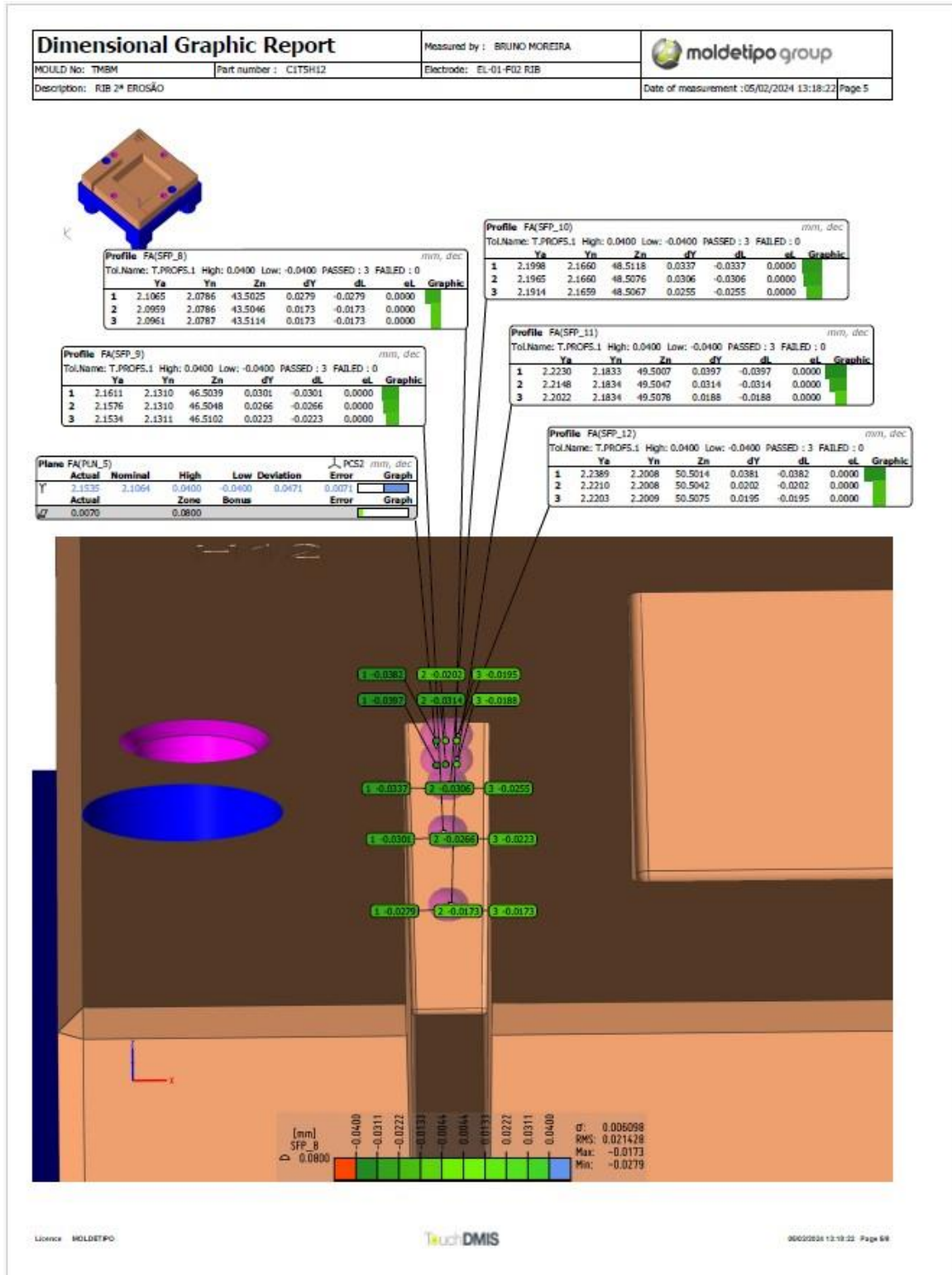
Profile FA(SFP_18)
Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 12 FAILED : 0 mm, dec

	Xa	Xb	Za	dX	dL	eL	Graphic
1	-24.0227	-24.0263	40.5057	0.0036	0.0036	0.0000	
2	-24.0266	-24.0263	40.5070	-0.0003	-0.0003	0.0000	
3	-24.0310	-24.0263	40.5095	-0.0046	-0.0046	0.0000	
4	-24.0334	-24.0263	40.5093	-0.0071	-0.0071	0.0000	
5	-24.0321	-24.0263	40.5094	-0.0057	-0.0057	0.0000	
6	-24.0350	-24.0263	40.5094	-0.0087	-0.0087	0.0000	
7	-24.0356	-24.0263	40.5086	-0.0092	-0.0093	0.0000	
8	-24.0328	-24.0263	40.5087	-0.0065	-0.0065	0.0000	
9	-24.0354	-24.0263	40.5089	-0.0091	-0.0091	0.0000	
10	-24.0312	-24.0263	40.5087	-0.0048	-0.0048	0.0000	
11	-24.0285	-24.0263	40.5088	-0.0022	-0.0022	0.0000	
12	-24.0222	-24.0264	40.5130	0.0042	0.0042	0.0000	

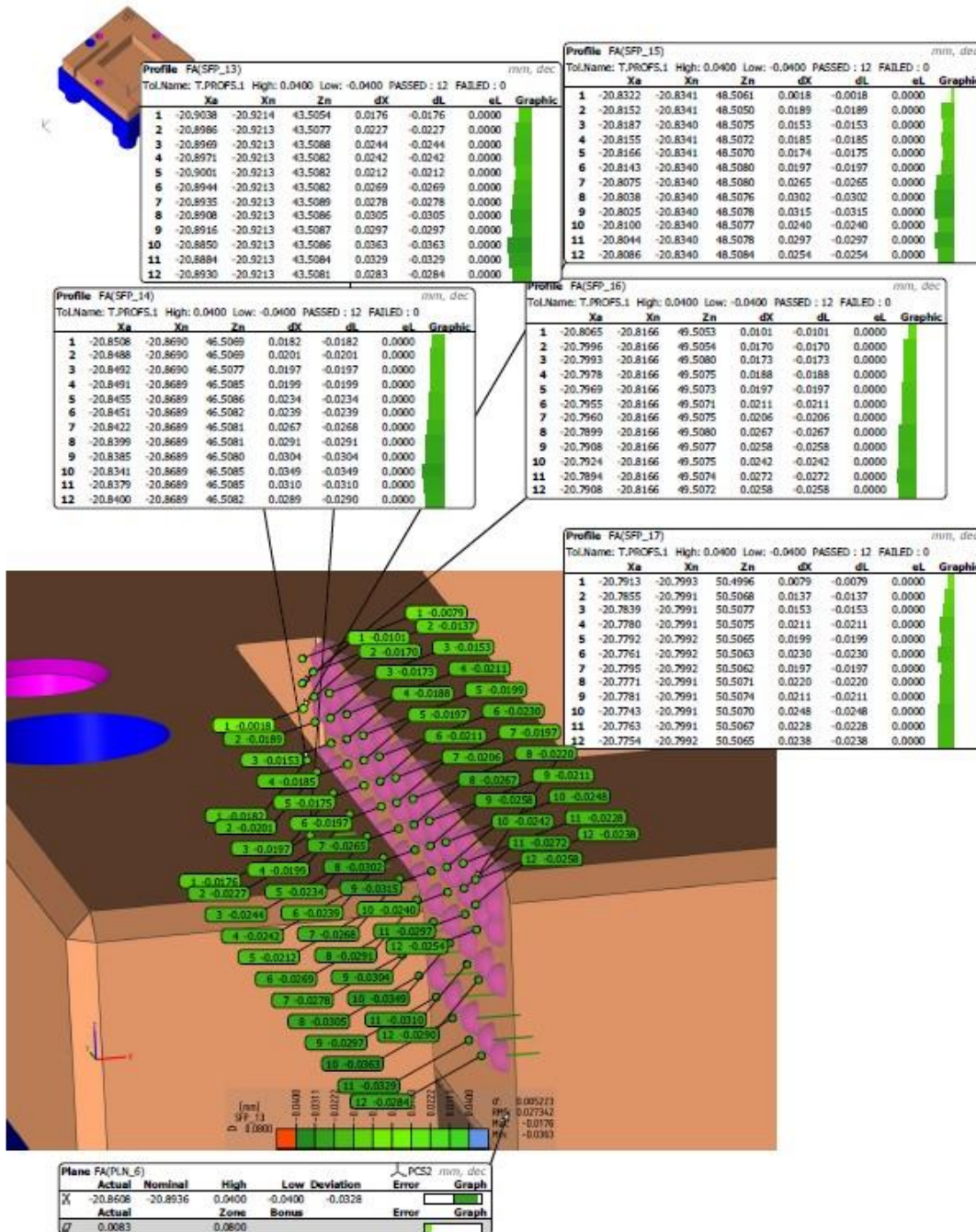
Profile FA(SFP_19)
Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 12 FAILED : 0 mm, dec

	Xa	Xb	Za	dX	dL	eL	Graphic
1	-24.0427	-24.0436	41.5000	0.0009	0.0009	0.0000	
2	-24.0474	-24.0438	41.5075	-0.0036	-0.0036	0.0000	
3	-24.0467	-24.0438	41.5086	-0.0029	-0.0029	0.0000	
4	-24.0508	-24.0438	41.5074	-0.0070	-0.0070	0.0000	
5	-24.0484	-24.0438	41.5074	-0.0047	-0.0047	0.0000	
6	-24.0510	-24.0438	41.5076	-0.0072	-0.0072	0.0000	
7	-24.0512	-24.0438	41.5081	-0.0074	-0.0074	0.0000	
8	-24.0471	-24.0438	41.5079	-0.0033	-0.0033	0.0000	
9	-24.0455	-24.0438	41.5082	-0.0017	-0.0017	0.0000	
10	-24.0495	-24.0438	41.5082	-0.0058	-0.0058	0.0000	
11	-24.0487	-24.0438	41.5086	-0.0049	-0.0049	0.0000	
12	-24.0394	-24.0438	41.5110	0.0044	0.0044	0.0000	

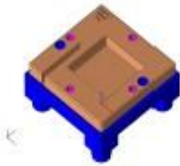




Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-01-F02 R1B	
Description: RIB 2ª EROSAO		Date of measurement : 05/02/2024 13:18:22	Page 7



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-01-F02 RIB	
Description: RIB 2ª EROSAO			Date of measurement : 05/02/2024 13:18:22 Page 8



Profile FA(SFP_20)

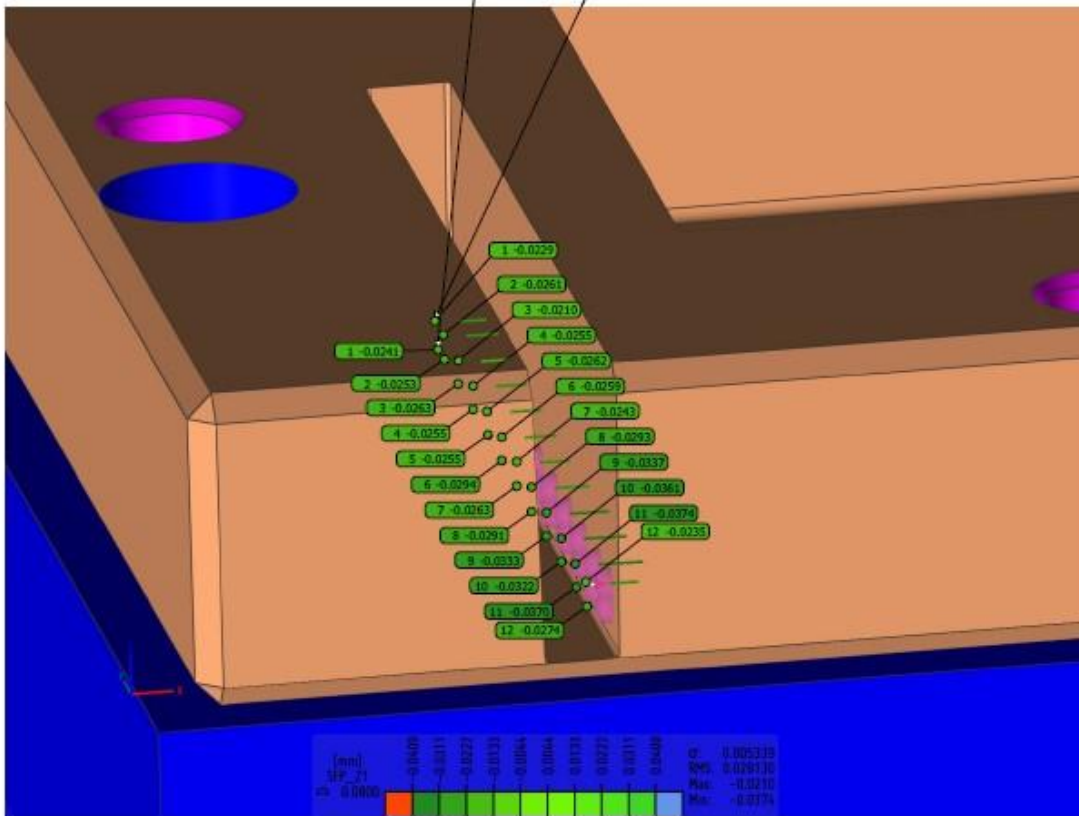
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 12 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	et	Graphic
1	-20.9493	-20.9733	40.5284	0.0241	-0.0241	0.0000	
2	-20.9484	-20.9737	40.5041	0.0253	-0.0253	0.0000	
3	-20.9473	-20.9737	40.5074	0.0263	-0.0263	0.0000	
4	-20.9481	-20.9737	40.5091	0.0255	-0.0255	0.0000	
5	-20.9481	-20.9737	40.5094	0.0255	-0.0255	0.0000	
6	-20.9443	-20.9736	40.5096	0.0294	-0.0294	0.0000	
7	-20.9473	-20.9736	40.5099	0.0263	-0.0263	0.0000	
8	-20.9446	-20.9737	40.5091	0.0291	-0.0291	0.0000	
9	-20.9403	-20.9737	40.5087	0.0333	-0.0333	0.0000	
10	-20.9415	-20.9737	40.5094	0.0322	-0.0322	0.0000	
11	-20.9366	-20.9736	40.5097	0.0370	-0.0370	0.0000	
12	-20.9463	-20.9737	40.5095	0.0274	-0.0274	0.0000	


Profile FA(SFP_21)

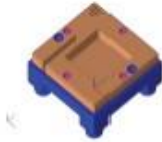
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 12 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	et	Graphic
1	-20.9334	-20.9563	41.5054	0.0229	-0.0229	0.0000	
2	-20.9301	-20.9562	41.5079	0.0261	-0.0261	0.0000	
3	-20.9352	-20.9562	41.5081	0.0210	-0.0210	0.0000	
4	-20.9308	-20.9562	41.5079	0.0254	-0.0255	0.0000	
5	-20.9300	-20.9562	41.5086	0.0262	-0.0262	0.0000	
6	-20.9303	-20.9562	41.5091	0.0259	-0.0259	0.0000	
7	-20.9319	-20.9562	41.5091	0.0243	-0.0243	0.0000	
8	-20.9269	-20.9562	41.5090	0.0293	-0.0293	0.0000	
9	-20.9225	-20.9562	41.5090	0.0337	-0.0337	0.0000	
10	-20.9201	-20.9562	41.5097	0.0361	-0.0361	0.0000	
11	-20.9188	-20.9562	41.5089	0.0374	-0.0374	0.0000	
12	-20.9327	-20.9562	41.5089	0.0235	-0.0235	0.0000	



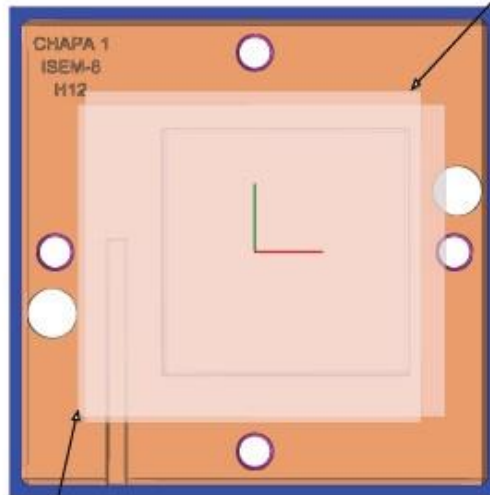
Anexo O – Relatório de medição CMM da peça C1T5H12-Chapa-teste-CX-2ªEletroerosão

Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CAIXA	
Description: CADA 2ª EROSAO			Date of measurement : 05/02/2024 12:04:51 Page 1




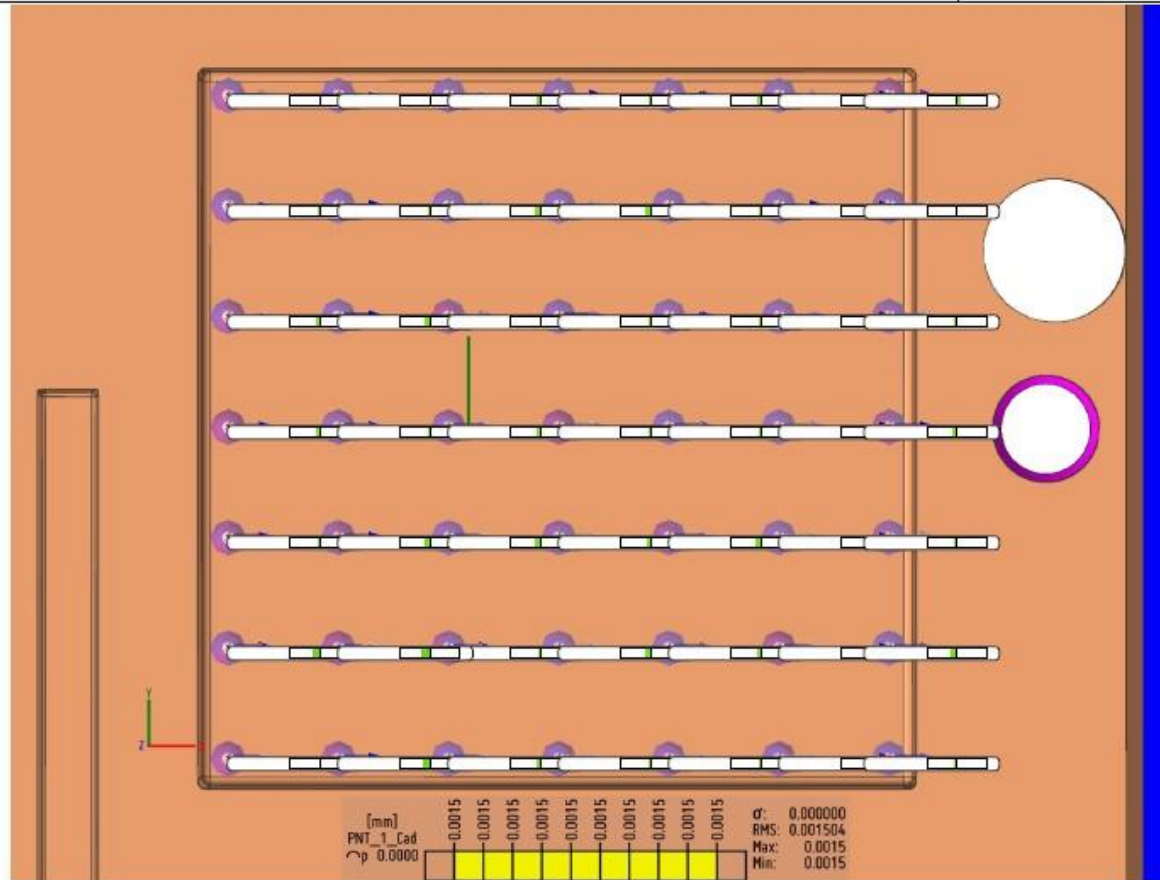
CORREÇÕES À COTA Z DO PLANO o_{XY}
 PLANOS o_{XZ} E o_{YZ} GARANTIDOS
 PELA BASE EROWA
 PLN_01 ANTES
 PLN_02 DEPOIS

Plane FA(PLM_1)						EROWA_A02	mm, dec
	Actual	Nominal	High	Low Deviation	Error		Graph
Z	51.0886	51.0000	0.0300	-0.0200	0.0886	0.0886	
	Actual	Zone	Bonus	Error			Graph
Z	0.0099	0.0400					



Plane FA(PLM_2)						PCS2	mm, dec
	Actual	Nominal	High	Low Deviation	Error		Graph
Z	50.9997	51.0000	0.0200	-0.0200	-0.0003		
	Actual	Zone	Bonus	Error			Graph
Z	0.0063	0.0400					

Component Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
Mould No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CAIXA	
Description: CAIXA 2ª EROSÃO			Measured by : BRUNO MOREIRA

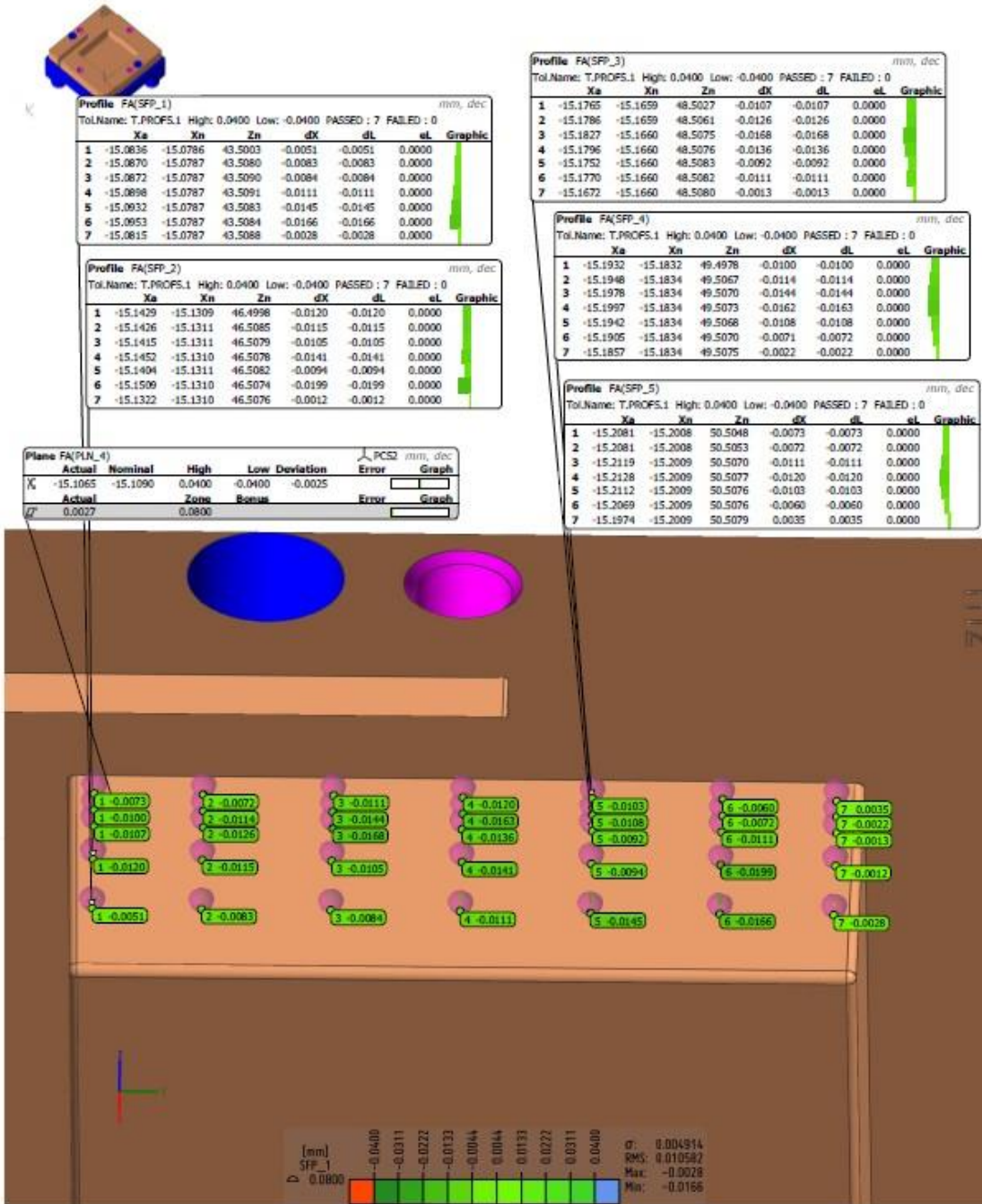


License: MOLDETIPO

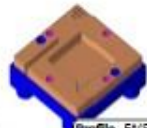
TouchDMIS

09/02/2024 12:04:31 Page 3/11

Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CADA	
Description: CADA 2ª EROSAO		Date of measurement : 05/02/2024 12:04:51	Page 4



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-02-F02 CADA	
Description: CADIA 2ª EROSÃO		Date of measurement : 05/02/2024 12:04:51 Page 6	



Profile FA(SFP_6) mm, dec
TolName: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	eL	Graphic
1	20.1041	20.0786	43.5008	0.0255	-0.0255	0.0000	
2	20.1090	20.0787	43.5083	0.0303	-0.0303	0.0000	
3	20.1063	20.0787	43.5090	0.0276	-0.0276	0.0000	
4	20.1105	20.0787	43.5092	0.0318	-0.0318	0.0000	
5	20.1128	20.0787	43.5091	0.0341	-0.0341	0.0000	
6	20.1087	20.0787	43.5087	0.0300	-0.0300	0.0000	
7	20.0911	20.0787	43.5090	0.0124	-0.0124	0.0000	

Profile FA(SFP_8) mm, dec
TolName: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 6 FAILED : 1

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	eL	Graphic
1	20.1947	20.1659	48.5048	0.0288	-0.0288	0.0000	
2	20.2058	20.1659	48.5066	0.0398	-0.0398	0.0000	
3	20.2114	20.1660	48.5075	0.0454	-0.0454	0.0054	
4	20.2043	20.1660	48.5078	0.0383	-0.0383	0.0000	
5	20.2044	20.1660	48.5080	0.0384	-0.0384	0.0000	
6	20.1977	20.1660	48.5083	0.0317	-0.0317	0.0000	
7	20.1792	20.1660	48.5081	0.0132	-0.0132	0.0000	

Profile FA(SFP_7) mm, dec
TolName: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	eL	Graphic
1	20.1604	20.1310	46.5042	0.0294	-0.0294	0.0000	
2	20.1666	20.1310	46.5068	0.0356	-0.0356	0.0000	
3	20.1676	20.1311	46.5096	0.0365	-0.0365	0.0000	
4	20.1677	20.1311	46.5092	0.0366	-0.0366	0.0000	
5	20.1648	20.1311	46.5084	0.0338	-0.0338	0.0000	
6	20.1636	20.1311	46.5087	0.0325	-0.0325	0.0000	
7	20.1454	20.1311	46.5080	0.0143	-0.0143	0.0000	

Profile FA(SFP_9) mm, dec
TolName: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

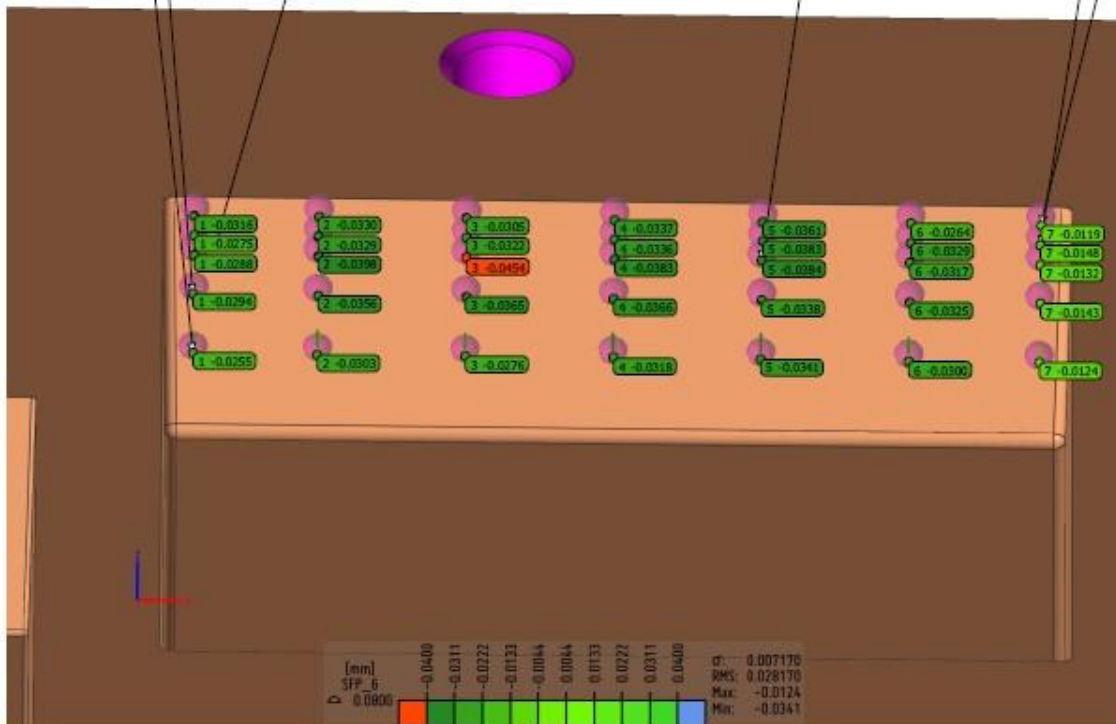
	Ya	Yn	Zn	dY	dL	eL	Graphic
1	20.2109	20.1834	49.5050	0.0275	-0.0275	0.0000	
2	20.2163	20.1834	49.5065	0.0329	-0.0329	0.0000	
3	20.2156	20.1834	49.5078	0.0322	-0.0322	0.0000	
4	20.2170	20.1834	49.5079	0.0336	-0.0336	0.0000	
5	20.2217	20.1834	49.5082	0.0383	-0.0383	0.0000	
6	20.2163	20.1834	49.5078	0.0329	-0.0329	0.0000	
7	20.1982	20.1834	49.5076	0.0148	-0.0148	0.0000	


Plane FA(PLN_5) mm, dec
PCSD Error

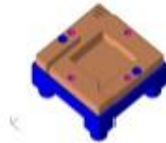
	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	Error	Graph
Y	20.1298	20.1090	0.0400	-0.0400	0.0208		
Z	0.0086	0.0800	Zone Bonus				

Profile FA(SFP_10) mm, dec
TolName: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	eL	Graphic
1	20.2323	20.2007	50.4988	0.0316	-0.0316	0.0000	
2	20.2339	20.2009	50.5069	0.0330	-0.0330	0.0000	
3	20.2313	20.2009	50.5071	0.0305	-0.0305	0.0000	
4	20.2345	20.2009	50.5076	0.0336	-0.0337	0.0000	
5	20.2369	20.2009	50.5071	0.0361	-0.0361	0.0000	
6	20.2272	20.2009	50.5067	0.0264	-0.0264	0.0000	
7	20.2127	20.2009	50.5070	0.0119	-0.0119	0.0000	



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA		
MOULD No: TMSM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CADXA		
Description: CADXA 2ª EROSÃO			Date of measurement : 05/02/2024 12:04:51	Page 7



Profile FA(SFP_23) mm, dec

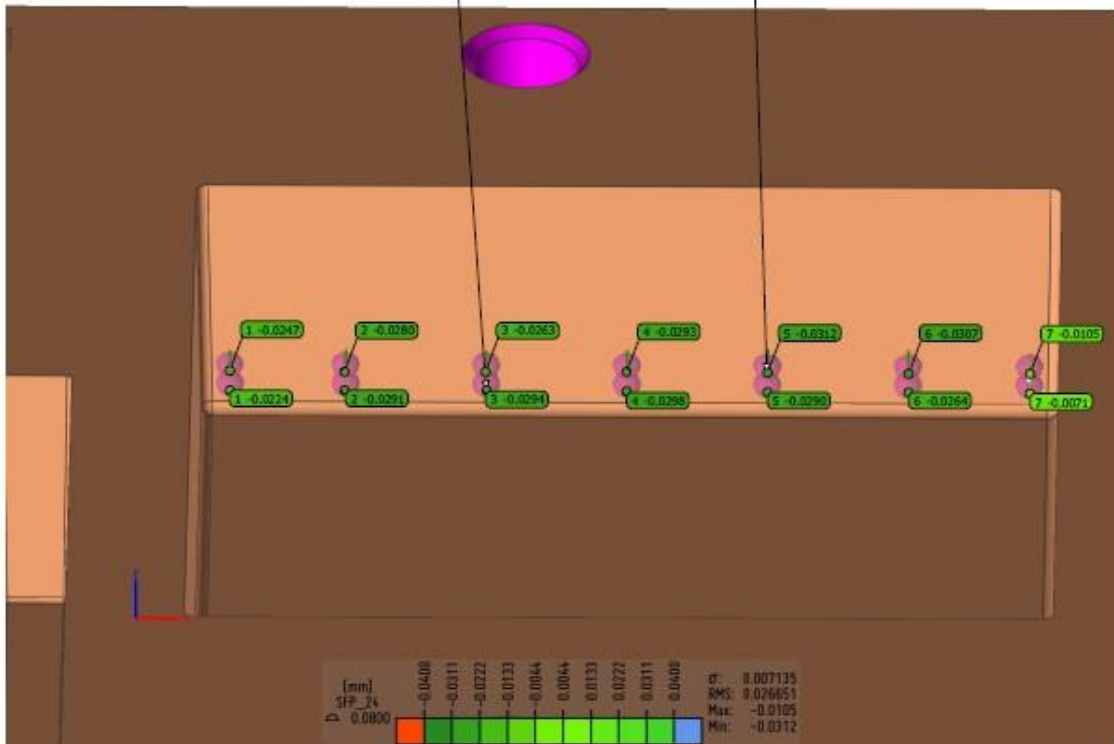
TolName: T_PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	Graphic
1	20.0487	20.0263	40.5058	0.0224	-0.0224	0.0000		
2	20.0554	20.0263	40.5077	0.0291	-0.0291	0.0000		
3	20.0558	20.0263	40.5089	0.0294	-0.0294	0.0000		
4	20.0561	20.0263	40.5085	0.0298	-0.0298	0.0000		
5	20.0554	20.0263	40.5081	0.0290	-0.0290	0.0000		
6	20.0528	20.0263	40.5089	0.0264	-0.0264	0.0000		
7	20.0335	20.0264	40.5113	0.0071	-0.0071	0.0000		

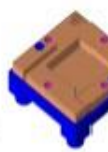
Profile FA(SFP_24) mm, dec

TolName: T_PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	Graphic
1	20.0684	20.0437	41.5036	0.0247	-0.0247	0.0000		
2	20.0718	20.0438	41.5082	0.0280	-0.0280	0.0000		
3	20.0701	20.0438	41.5081	0.0263	-0.0263	0.0000		
4	20.0730	20.0438	41.5084	0.0293	-0.0293	0.0000		
5	20.0750	20.0438	41.5087	0.0312	-0.0312	0.0000		
6	20.0745	20.0438	41.5089	0.0307	-0.0307	0.0000		
7	20.0543	20.0438	41.5110	0.0105	-0.0105	0.0000		



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1T5H12	Electrode: EL-02-F02 CADXA	
Description: CAIXA 2ª ERODÃO			Date of measurement :05/02/2024 12:04:51 Page 8



Profile FA(SFP_11)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.0779	25.0787	43.5078	-0.0008	0.0008	0.0000	
2	25.0780	25.0787	43.5064	-0.0007	0.0007	0.0000	
3	25.0793	25.0787	43.5089	0.0006	-0.0006	0.0000	
4	25.0793	25.0787	43.5079	0.0006	-0.0006	0.0000	
5	25.0794	25.0787	43.5087	0.0007	-0.0007	0.0000	
6	25.0804	25.0787	43.5084	0.0017	-0.0017	0.0000	
7	25.0672	25.0787	43.5082	-0.0115	0.0115	0.0000	

Profile FA(SFP_13)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.1635	25.1658	48.4975	-0.0023	0.0023	0.0000	
2	25.1642	25.1660	48.5078	-0.0018	0.0018	0.0000	
3	25.1696	25.1660	48.5074	0.0037	-0.0037	0.0000	
4	25.1684	25.1660	48.5082	0.0025	-0.0025	0.0000	
5	25.1699	25.1660	48.5079	0.0039	-0.0039	0.0000	
6	25.1691	25.1660	48.5077	0.0031	-0.0031	0.0000	
7	25.1471	25.1660	48.5078	-0.0189	0.0189	0.0000	

Profile FA(SFP_12)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.1291	25.1310	46.5070	-0.0019	0.0019	0.0000	
2	25.1307	25.1310	46.5054	-0.0003	0.0003	0.0000	
3	25.1297	25.1311	46.5092	-0.0014	0.0014	0.0000	
4	25.1344	25.1311	46.5083	0.0033	-0.0033	0.0000	
5	25.1309	25.1311	46.5080	-0.0001	0.0001	0.0000	
6	25.1357	25.1311	46.5088	0.0046	-0.0046	0.0000	
7	25.1213	25.1311	46.5085	-0.0098	0.0098	0.0000	

Profile FA(SFP_14)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

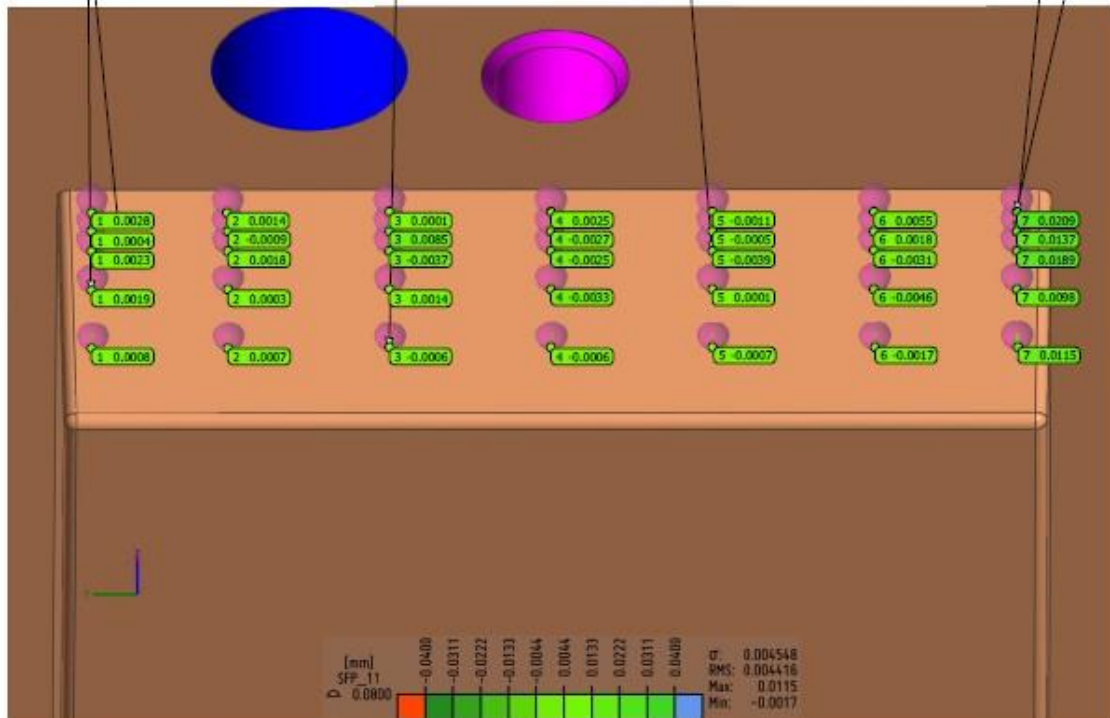
	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.1829	25.1833	49.5034	-0.0004	0.0004	0.0000	
2	25.1843	25.1834	49.5068	0.0009	-0.0009	0.0000	
3	25.1749	25.1834	49.5077	-0.0085	0.0085	0.0000	
4	25.1861	25.1834	49.5080	0.0027	-0.0027	0.0000	
5	25.1839	25.1834	49.5077	0.0005	-0.0005	0.0000	
6	25.1816	25.1834	49.5073	-0.0018	0.0018	0.0000	
7	25.1697	25.1834	49.5071	-0.0137	0.0137	0.0000	

Plane FA(PLN_6)
PC52

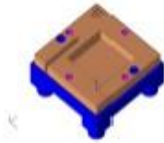
	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	Error	Graph
X	25.1194	25.1090	0.0400	-0.0400	0.0104		
Z	0.0051	0.0800					

Profile FA(SFP_15)
Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.1981	25.2009	50.5069	-0.0028	0.0028	0.0000	
2	25.1994	25.2008	50.5059	-0.0014	0.0014	0.0000	
3	25.2007	25.2009	50.5073	-0.0001	0.0001	0.0000	
4	25.1984	25.2009	50.5069	-0.0025	0.0025	0.0000	
5	25.2020	25.2009	50.5074	0.0011	-0.0011	0.0000	
6	25.1954	25.2009	50.5080	-0.0055	0.0055	0.0000	
7	25.1799	25.2009	50.5074	-0.0209	0.0209	0.0000	



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : C1TSH12	Electrode: EL-02-F02 CADXA	
Description: CADXA 2ª EROSAO			Date of measurement : 05/02/2024 12:04:51 Page 9

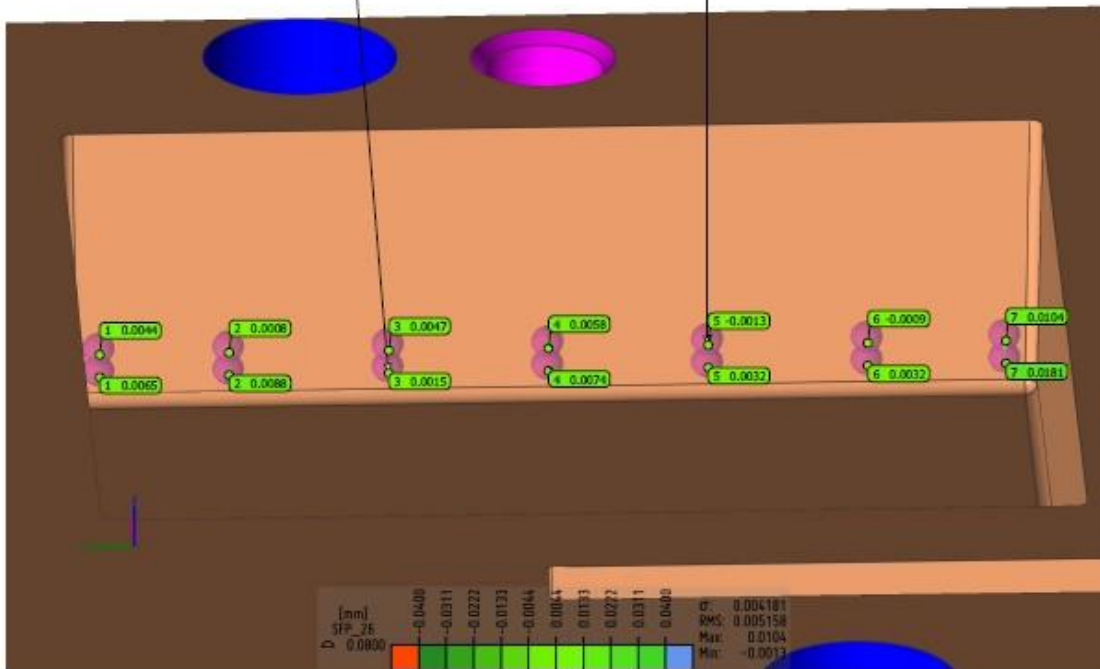


Profile FA(SFP_25) mm, dec
 Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

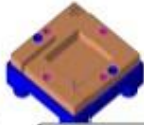
	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.0199	25.0263	40.5091	-0.0065	0.0065	0.0000	
2	25.0175	25.0263	40.5077	-0.0088	0.0088	0.0000	
3	25.0248	25.0263	40.5087	-0.0015	0.0015	0.0000	
4	25.0189	25.0263	40.5085	-0.0074	0.0074	0.0000	
5	25.0231	25.0263	40.5085	-0.0032	0.0032	0.0000	
6	25.0231	25.0263	40.5084	-0.0032	0.0032	0.0000	
7	25.0082	25.0264	40.5105	-0.0181	0.0181	0.0000	

Profile FA(SFP_26) mm, dec
 Tol.Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Xa	Xn	Zn	dX	dL	eL	Graphic
1	25.0393	25.0437	41.5041	-0.0044	0.0044	0.0000	
2	25.0430	25.0438	41.5079	-0.0008	0.0008	0.0000	
3	25.0390	25.0438	41.5073	-0.0047	0.0047	0.0000	
4	25.0380	25.0438	41.5078	-0.0058	0.0058	0.0000	
5	25.0451	25.0438	41.5079	0.0013	-0.0013	0.0000	
6	25.0447	25.0438	41.5084	0.0009	-0.0009	0.0000	
7	25.0334	25.0438	41.5107	-0.0104	0.0104	0.0000	



Dimensional Graphic Report		Measured by : BRUNO MOREIRA	
MOULD No: TMBM	Part number : CIT5H12	Electrode: EL-02-F02 CAIXA	
Description: CAIXA 2ª EROSIÃO		Date of measurement :05/02/2024 12:04:51	Page.10



Profile FA(SFP_16) mm, dec
 Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	et	Graphic
1	-20.0606	-20.0786	43.5026	0.0180	0.0180	0.0000			
2	-20.0598	-20.0787	43.5081	0.0189	0.0189	0.0000			
3	-20.0667	-20.0787	43.5097	0.0120	0.0120	0.0000			
4	-20.0621	-20.0787	43.5083	0.0166	0.0166	0.0000			
5	-20.0661	-20.0787	43.5089	0.0126	0.0126	0.0000			
6	-20.0606	-20.0787	43.5096	0.0181	0.0181	0.0000			
7	-20.0480	-20.0787	43.5060	0.0307	0.0307	0.0000			

Profile FA(SFP_18) mm, dec
 Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	et	Graphic
1	-20.1472	-20.1659	48.5047	0.0187	0.0187	0.0000			
2	-20.1483	-20.1659	48.5057	0.0177	0.0177	0.0000			
3	-20.1541	-20.1660	48.5082	0.0119	0.0119	0.0000			
4	-20.1525	-20.1660	48.5079	0.0135	0.0135	0.0000			
5	-20.1508	-20.1660	48.5080	0.0151	0.0151	0.0000			
6	-20.1521	-20.1660	48.5075	0.0139	0.0139	0.0000			
7	-20.1341	-20.1660	48.5076	0.0318	0.0318	0.0000			

Profile FA(SFP_17) mm, dec
 Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	et	Graphic
1	-20.1116	-20.1309	46.4982	0.0193	0.0193	0.0000			
2	-20.1234	-20.1311	46.5088	0.0077	0.0077	0.0000			
3	-20.1155	-20.1311	46.5083	0.0155	0.0155	0.0000			
4	-20.1169	-20.1311	46.5082	0.0142	0.0142	0.0000			
5	-20.1166	-20.1311	46.5086	0.0145	0.0145	0.0000			
6	-20.1142	-20.1311	46.5082	0.0169	0.0169	0.0000			
7	-20.0957	-20.1311	46.5081	0.0353	0.0353	0.0000			

Profile FA(SFP_19) mm, dec
 Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	et	Graphic
1	-20.1603	-20.1832	49.4983	0.0229	0.0229	0.0000			
2	-20.1647	-20.1834	49.5072	0.0187	0.0187	0.0000			
3	-20.1689	-20.1834	49.5076	0.0146	0.0146	0.0000			
4	-20.1688	-20.1834	49.5077	0.0146	0.0146	0.0000			
5	-20.1713	-20.1834	49.5069	0.0121	0.0121	0.0000			
6	-20.1663	-20.1834	49.5068	0.0171	0.0171	0.0000			
7	-20.1506	-20.1834	49.5071	0.0328	0.0328	0.0000			

Profile FA(SFP_20) mm, dec
 Tol:Name: T.PROFS.1 High: 0.0400 Low: -0.0400 PASSED : 7 FAILED : 0

	Ya	Yn	Zn	dY	dL	dL	dL	et	Graphic
1	-20.1798	-20.2008	50.5060	0.0210	0.0210	0.0000			
2	-20.1801	-20.2008	50.5052	0.0208	0.0208	0.0000			
3	-20.1818	-20.2009	50.5070	0.0191	0.0191	0.0000			
4	-20.1830	-20.2009	50.5071	0.0178	0.0178	0.0000			
5	-20.1855	-20.2009	50.5076	0.0153	0.0153	0.0000			
6	-20.1818	-20.2009	50.5074	0.0190	0.0190	0.0000			
7	-20.1659	-20.2009	50.5069	0.0349	0.0349	0.0000			

Plane FA(PLN_7) PCS2 mm, dec

	Actual	Nominal	High	Low	Deviation	Error	Graph
Y	-20.1048	-20.1090	0.0400	-0.0400	-0.0042		
Z	0.0071	0.0600					

