

CALIBRAÇÃO DE ROSCADOS

Ticiana Vilarinho Vieira



Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Departamento de Física

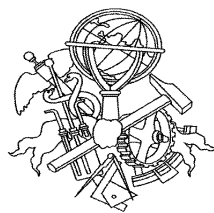
Instituto Superior de Engenharia do Porto

2015

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Disciplina de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Candidata: Ticiania Vilarinho Vieira, N° 1030304, 1030304@isep.ipp.pt

Orientação científica: Carlos Sousa, ccs@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia de Instrumentação e Metrologia

Departamento de Física

Instituto Superior de Engenharia do Porto

10 de Fevereiro de 2015

Resumo

Na presente dissertação é proposto o desenvolvimento de um novo sistema de calibração de roscados de exteriores através de visão computacional.

A calibração de roscados de exterior consiste na obtenção do diâmetro efectivo, do diâmetro exterior e do passo, e no cálculo da incerteza expandida correspondente.

Actualmente, a calibração é efectuada com o auxílio de máquinas universais (SIP), na qual o diâmetro efectivo é obtido através de um modelo matemático, pois não se consegue obtê-lo directamente.

O sistema de calibração por visão computacional tem como objectivo obter-se o diâmetro efectivo directamente, assim como as restantes características.

A vantagem deste novo sistema será para roscados com dimensões inferiores a 2 mm, que não se conseguem medir utilizando a SIP.

A desvantagem é referente a diâmetros superiores a 2 mm, devido à resolução obtida com a câmara utilizada.

Este sistema foi validado por comparação com a calibração utilizando como equipamento calibrador a SIP.

Ao longo da dissertação irão ser explicados todos os passos dados para a calibração de roscados de exterior.

Abstract

This paper proposes the development of a new calibration system of external thread through computer vision.

The calibration of external screw is to obtain the effective diameter, the outer diameter and pitch, and the corresponding calculation of expanded uncertainty.

Currently, calibration is performed with the aid of universal machines (SIP), in which the effective diameter is obtained through a mathematical model, because we can not get it directly.

The calibration system for computer vision aims to achieve the effective diameter directly, as well as other features.

The advantage of this new system is for thread sizes smaller than 2 mm, which can not be measured using the SIP.

The disadvantage is related with diameters greater than 2mm, due to the resolution obtained with the camera used.

This system was validated by comparison with a calibration using standard SIP as the calibrator.

Throughout the dissertation will explain the steps taken to calibrate external thread.

Résumé

Dans ce papier nous proposons l'élaboration d'un nouveau système d'étalonnage enfilé à travers la vision par ordinateur à l'extérieur.

L'étalonnage consiste à l'extérieur obtanção taraudé le diamètre effectif du diamètre extérieur et le tangage, et le calcul correspondant de l'incertitude élargie.

Actuellement, l'étalonnage est effectué à l'aide de machines universelles (SIP), dans lequel le diamètre effectif est obtenue par un modèle mathématique, parce que vous ne pouvez pas l'obtenir directement.

Le système de calibration pour la vision par ordinateur vise à obtenir le diamètre effectif directement, ainsi que d'autres fonctionnalités.

L'avantage de ce nouveau système doit être fileté avec des dimensions inférieures à 2 mm, ce qui ne peut pas être mesurée en utilisant le protocole SIP.

L'inconvénient est lié à un diamètre supérieur à 2mm, en raison de la résolution obtenue avec la caméra utilisée.

Ce système a été validé par comparaison avec le calibrage utilisant le protocole SIP à voie normale.

Tout au long de la thèse sera expliqué les mesures prises pour calibrer l'extérieur fileté.

Índice

RESUMO	III
ABSTRACT	V
RESUME	VII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XIII
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2. OBJECTIVOS	17
1.3. CALENDARIZAÇÃO.....	17
1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO.....	18
2. SISTEMAS ROSCADOS	19
2.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO	19
2.2. CLASSIFICAÇÃO DE ROSCAS.....	24
2.3. ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DAS ROSCAS	25
2.4. TIPOS DE ROSCAS.....	26
2.5. ROSCA DIREITA E ESQUERDA.....	30
2.6. PASSO DAS ROSCAS.....	31
2.7. TIPOS DE ROSCADOS	32
2.8. MEDIÇÃO DE ROSCADOS	37
2.9. MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE ROSCADOS	40
3. VISÃO COMPUTACIONAL	42
3.1. ESTADO DA ARTE	42
3.2. TERMINOLOGIA ASSOCIADA À VISÃO	44
3.3. COMPONENTES DE UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL.....	47
3.4. SISTEMA ÓPTICO	50
3.5. APLICAÇÕES	52
4. PROCEDIMENTOS PARA CALIBRAÇÃO DE ROSCADOS DE EXTERIOR	55
4.1. PROCEDIMENTO UTILIZANDO A MÁQUINA UNIVERSAL SIP.....	57
4.1.1. PREPARAÇÃO DO EQUIPAMENTO	57
4.1.2. MEDIÇÃO DO DIÂMETRO EXTERIOR E DO DIÂMETRO EFECTIVO	57
4.2.3. MEDIÇÃO DO PASSO	62
4.2.4. MODELO MATEMÁTICO	64

4.2.5.	ESTUDO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	76
4.2.	SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL	87
4.2.1	MONTAGEM EXPERIMENTAL	87
4.2.2.	PROCEDIMENTO AUTOMÁTICO	90
4.2.3.	ESTUDO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	108
5.	CONCLUSÕES.....	112
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	116
	ANEXO A. APROXIMAÇÕES À EQUAÇÃO DE BERNDT	118
	ANEXO B. INCERTEZA EXPANDIDA PARA A CALIBRAÇÃO UTILIZANDO A SIP.....	120
	ANEXO C. IMAGENS DE CALIBRAÇÃO PARA O SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL.	124
	ANEXO D. INCERTEZA EXPANDIDA PARA A CALIBRAÇÃO UTILIZANDO O SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL.....	126

Índice de Figuras

Figura 1	Tampão roscado (rosca exterior)	16
Figura 2	Primeiro parafuso	20
Figura 3	Parafuso com rosca.....	23
Figura 4	a) Rosca com superfície roscada exterior (parafuso); b) Rosca com superfície roscada interior (porca).....	24
Figura 5	Elementos da Rosca.....	25
Figura 6	Definição do perfil do filete por intersecção de um plano.....	26
Figura 7	Perfil de uma rosca quadrada.....	27
Figura 8	Perfil de uma Rosca Trapezoidal.....	27
Figura 9	Perfil de uma rosca dente de serra	28
Figura 10	Perfil de uma rosca redonda	28
Figura 11	Perfil de uma rosca triangular.....	28
Figura 12	Sentido de movimento de uma rosca (lado esquerdo da imagem temos uma rosca direita, do lado direito da imagem uma rosca esquerda)	30
Figura 13	A regra do dedo polegar	30
Figura 14	Passo nas roscas triangulares, dentes de serra e redondas	31
Figura 15	Passo nas roscas de fita.....	31
Figura 16	Passo nas roscas de duas entradas ($P=2P'$)	32
Figura 17	Passo nas roscas de três entradas ($P=3P'$).....	32
Figura 18	Rosca triangular e suas características.....	33
Figura 19	Rosca métrica	33
Figura 20	Designação de rosca métrica	35
Figura 21	Rosca métrica	36
Figura 22	Elementos principais de um roscado (letras minúsculas para o parafuso, e letras maiúsculas para a porca).....	37
Figura 23	Medição dos diâmetros exterior e interior	38
Figura 24	Medição do diâmetro efectivo de roscas exteriores e roscas interiores.....	38
Figura 25	Vários métodos para a medição do diâmetro efectivo.....	39
Figura 26	Medição do passo	40
Figura 27	Interdependência entre os termos da área de sistemas de visão.....	46
Figura 28	Componentes gerais de um sistema de visão	48
Figura 29	Parâmetros fundamentais para definição de um sistema óptico	50
Figura 30	Parâmetros fundamentais para definição de um sistema óptico	51

Figura 31	Diversas áreas de aplicação das tecnologias de visão computacional e processamento de imagens	54
Figura 32	Características de um roscado de exteriores	56
Figura 33	Caixa de cavilhas	58
Figura 34	Método das três cavilhas (d →diâmetro da cavilha, M →valor medido com a SIP).....	59
Figura 35	Tampão liso padrão.....	60
Figura 36	Tampão Roscado	60
Figura 37	Tampão padrão com as cavilhas	61
Figura 38	Tampão roscado a calibrar.....	61
Figura 39	Tampão roscado a calibrar com as cavilhas.....	62
Figura 40	Comparador Electrónico.....	63
Figura 41	Medição do passo	63
Figura 42	Equações para o diâmetro exterior e diâmetro efectivo, passa e não passa	66
Figura 43	Montagem Experimental – 1ª Abordagem.....	88
Figura 44	Montagem experimental – 2ª Abordagem	89
Figura 45	Menu utilizado de interface	96
Figura 46	Gráfico obtivo através do ficheiro “txt”.....	97
Figura 47	Caixa automática que indica que é necessário a selecção do inicio da pesquisa	97
Figura 48	Diferença entre contornos do tampão roscado (contorno lado direito menos contorno lado esquerdo).....	98
Figura 49	Rectas criadas para formar os triângulos perfeitos	99
Figura 50	Tabelas com valores dos extremos das rectas (em pixeis).....	100
Figura 51	Apresentação dos valores (em pixeis).....	101
Figura 52	Imagem adquirida da régua (calibração do sistema).....	102
Figura 53	Imagem para calibração cortada	103
Figura 54	Valores obtido em pixeis (tabela superior) e valores obtidos em mm (tabela inferior)	104
Figura 55	Valores obtidos da calibração por sistema de visão computacional	105
Figura 56	Imagem adquirida com a 2ª abordagem da montagem experimental	105
Figura 57	Imagem convertida em tons de cinza.....	106
Figura 58	Imagem convertida para binária	106
Figura 59	Imagem processada (erosão seguida de dilatação)	107
Figura 60	Ficheiro obtido com os valores dos pixeis que definem os contornos da imagem processada.....	107
Figura 61	Explicação da diferença obida no diâmetro exterior.....	114
Figura 62	Esquema de uma cavilha colocada no tampão roscado para se efectuar a medição do diâmetro efectivo	118
Figura 63	Imagem cortada nos extremos exteriores das marcas da régua (1602×1936).....	124
Figura 64	Imagem cortada no centro das marcas da régua (1582×1936).....	125

Índice de Tabelas

Tabela 1	Calendarização do projecto.....	17
Tabela 2	Tabela normalizada para a rosca métrica.....	35
Tabela 3	Equações para os cálculos dos diâmetros das cavilhas.....	57
Tabela 4	Passo das roscas em função dos diâmetros padronizados das cavilhas	57
Tabela 5	Equações para tampões roscados de exterior.....	65
Tabela 6	Tolerâncias e valores para cálculos, valores em μm	66
Tabela 7	Dimensão das roscas em milímetros.....	67
Tabela 8	Tolerâncias e valores para os cálculos em micrometros.....	68
Tabela 9	Tolerância admitida do diâmetro efectivo de tampões roscados e de anéis roscados (passa e não passa).....	70
Tabela 10	Designação para roscas internas em micrometros (μm).....	71
Tabela 11	Fontes de incerteza padrão que contribuem para o diâmetro exterior	77
Tabela 12	Fontes de incerteza padrão que contribuem para o passo.....	80
Tabela 13	Fontes de incerteza padrão que contribuem para o diâmetro efectivo.....	83
Tabela 14	Fontes de incerteza padrão que contribuem para as medições utilizando o sistema de visão computacional	108
Tabela 15	Comparação dos valores obtidos por ambas as calibrações	113
Tabela 16	Comparação dos valores da incerteza expandida de ambas as calibrações	115

1. INTRODUÇÃO

Este documento pretende explicar todo o sistema de calibração de roscados de exterior, através da máquina universal SIP, e também através do novo sistema implementado através de visão computacional.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este projecto surgiu do desejo de realizar um trabalho no âmbito de metrologia, concretamente no âmbito de calibração de equipamentos.

Ao longo dos tempos as tecnologias foram-se inovando, daí ser necessário inovar também os processos de calibração, de forma a minimizar os erros de influência do operador. Assim surgiu a proposta para criar um sistema de calibração automático para roscados de exterior, não só para minimizar a influência do operador, mas também para se tentar minimizar o tempo de calibração, e poder calibrar roscados de exterior inferiores a 2 mm, que não se conseguem calibrar com o auxílio da SIP.



Figura 1 Tampão roscado (rosca exterior)

1.2. OBJECTIVOS

O objectivo principal deste projecto é a elaboração de um sistema de calibração de roscados de exterior através de visão computacional, e a sua validação por comparação com a calibração da SIP (máquina de medição por contactos).

1.3. CALENDARIZAÇÃO

A calendarização utilizada encontra-se expressa na tabela 1.

Tabela 1 Calendarização do projecto

PLANIFICAÇÃO								
MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO
1ª FASE		2ª FASE		3ª FASE	4ª FASE	5ª FASE	6ª FASE	

Como se pode observar na tabela 1:

1ª FASE: Leitura das normas existentes para a calibração de roscados de exterior, pois o sistema de visão computacional tem que cumprir os requisitos das normas.

2ª FASE: Elaboração do procedimento para a calibração de roscados de exterior através do sistema de visão computacional e respectiva montagem experimental.

3ª FASE: Elaboração do procedimento para a calibração de roscados de exterior com o auxílio da SIP.

4ª FASE: Efectuar calibrações de roscados de exterior com o auxílio da SIP.

5ª FASE: Elaboração do cálculo de incertezas, para o sistema por visão computacional e para a calibração com o auxílio da SIP.

6ª FASE: Elaboração do relatório da dissertação e testes finais.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Este relatório é composto por 5 capítulos:

Capítulo 1 – Apresenta o relatório e todo o trabalho que foi elaborado para conseguir cumprir os objectivos propostos.

Capítulo 2 – Descreve todos os pontos necessários para perceber o que é um roscado, os tipos de roscas, as características de cada uma delas e como se efectuam medições em roscas a nível da indústria.

Capítulo 3 – Descreve os pontos importantes para que se perceba em que consiste um sistema de visão computacional, e os seus factores mais importantes.

Capítulo 4 – Descreve toda a prática elaborada para este trabalho: procedimento para a calibração de roscados de exterior com o auxílio da máquina universal SIP e o cálculo da incerteza expandida associada, e o procedimento e algoritmo elaborado para a calibração de roscados de exterior através de um sistema de visão computacional e sua incerteza expandida.

Capítulo 5 – Apresenta as conclusões obtidas do trabalho, e comparação de ambos os métodos, para que o método de sistema de visão computacional seja validado.

2. SISTEMAS ROSCADOS

2.1. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO^{[1][2][3][4][5]}

Apesar de o parafuso roscado datar do século XV, o parafuso não-roscado é bem mais antigo.

Na antiguidade, o matemático grego Archytas of Tarentum (428 - 350 AC.) foi responsável pela invenção do parafuso. No 1º século AC., os parafusos de madeira foram usados em todo o mundo Mediterrâneo em dispositivos como prensas de óleo e de vinho. Arquímedes (287 AC. – 212 AC.) desenvolveu o princípio da rosca e utilizou-o para a construção de dispositivos para a elevação de água na irrigação. Os romanos aplicaram o princípio de Arquímedes para conduzir material em minas. Também existem evidências de que componentes parafusados foram aplicados em instrumentos cirúrgicos em 79 AC. Os parafusos de metal só apareceram na Europa a partir do ano de 1400.

A rosca era afilada à mão ou consistia de um fio enrolado em volta de uma haste e soldado.

Aparentemente esta invenção desapareceu com o Império Romano, já que o primeiro documento impresso sobre parafusos consta num livro do início do século XV. Mais tarde, no mesmo século, Johann Gutenberg incluiu parafusos entre os fixadores na sua impressora. Mais tarde os relojoeiros e as armadeiras também dependiam de parafusos. Os cadernos de Leonardo da Vinci, do século XV e início do XVI, incluem vários desenhos de máquinas cortadoras de parafusos, mas a primeira máquina real para este propósito foi inventada em

1568 por Jacques Besson, um matemático Francês. No final do século XVII, os parafusos já eram componentes comuns nas armas de fogo.

Com estes progressos, o parafuso sem rosca e o conceito de rosca estavam à mão, mas a porca viria mais tarde, assim como a ideia de colocar a rosca e a porca no parafuso.



Figura 2 Primeiro parafuso

A primeira referência existente de porca roscada apareceu no final do século XVI, início do século XVII. Os primeiros parafusos eram feitos à mão, sendo extremamente grosseiros e para a rosca da porca combinar com a do parafuso era uma questão de sorte. Quando dava certo, a porca e o parafuso eram deixados juntos até serem instalados numa máquina ou numa construção.

Pode-se supor que foi só com a Revolução Industrial que as porcas e os parafusos se tornaram comuns entre os fixadores. Se numa época tão abrangente pode ter havido "um início", este foi com a invenção da máquina a vapor em 1765 por James Watt.

Ficou claro aos fabricantes de máquinas na época que fixadores roscados eram cruciais para um eficiente desempenho mecânico, para fácil montagem e para assegurar operações de responsabilidade. Várias invenções bem conhecidas da época dependiam extensivamente de fixadores roscados. Entre eles estava a máquina de tecer de James Hargreaves e o descaroçador de algodão de Eli Whitney.

Foi Whitney que mostrou em 1801 o caminho para o próximo conceito fundamental: a intercambialidade das partes. Naquele ano, ele apresentou-se a um grupo de oficiais em Washington que incluía o presidente e o vice-presidente. Ele empilhou várias partes idênticas que constituíam um mosquete e pegando numa peça de cada pilha, montou rapidamente (em questão de minutos) um mosquete completo.

A ideia foi tão bem aceite que logo foi um factor importante do sucesso de várias outras invenções, entre elas a pistola de mão de Samuel Colt, o martelo hidráulico de James Nasmyth e a máquina de costura de Elias House.

Um problema que persistia até o século XIX era a falta de uniformidade do rosqueamento de porcas e parafusos. Até ao fim do século XVIII a técnica padrão para formas de roscas largas era a colocação de uma matriz ou de um instrumento de corte contra um parafuso quente sem rosca.

Roscas menores eram cortadas por um torno mais primitivo. Geralmente, o instrumento cortante tinha que ser mantido contra o "blank" (parafuso sem rosca) pelo operador, o que significava ser virtualmente impossível obter roscas uniformes.

Por volta de 1800 o torno mecânico foi aperfeiçoado com deslizadores e com um conjunto de engrenagens de tal forma que a rosca do parafuso de chumbo podia ser reproduzida com boa exactidão, mas ainda não havia um sistema para adequar o número de fios da rosca com o diâmetro do parafuso. Nesta época Nasmyth declarava: "Todos os parafusos e suas porcas correspondentes precisam ser marcadas como pertencentes um ao outro. Qualquer mistura traz grandes complicações e despesas, como também ineficiência e confusão - especialmente quando partes de uma máquina complexa precisam ser desmontadas para conserto".

O homem que alterou esta situação foi o inventor inglês Henry Maudesley. Em 1800, ele construiu o primeiro equipamento que possibilitava ao operador fazer parafusos com qualquer passo e diâmetro. O maior diâmetro é medido da crista de um fio de rosca até a correspondente crista do lado oposto do parafuso. O menor diâmetro é medido desde o vale entre duas roscas até o correspondente vale do lado oposto.

O equipamento de corte de parafusos serviu por vários anos como método principal na produção de fixadores roscados. Hoje a técnica padrão é a de "rolar" roscas, mantendo as matrizes roscadas contra o parafuso ainda sem rosca ("blank") e girá-lo. A principal diferença é que o torno corta a rosca, removendo o material do "blank", enquanto as matrizes rolantes formatam a superfície do "blank" sem perda de material.

Willian Ward, de Fort Chester (NY), desenvolveu as máquinas para o forjamento a quente de porcas e parafusos. Neste processo a matéria prima é aquecida até uns 870°C, dependendo do material, e alimentada as matrizes de forma. Mais tarde Ward desenvolveu as máquinas para realizar o mesmo serviço a frio.

O processo é bastante semelhante, com a exceção de que o aço não é aquecido. As matrizes precisam ser fortes e a máquina que os sustenta deve ser capaz de exercer forças poderosas. Um produto formado a frio pode ser feito com tolerâncias dimensionais menores do que a quente e é mais forte. O forjamento a frio é actualmente o método básico para a produção em massa de porcas e parafusos.

No fim do século XIX a produção em massa de fixadores foi gradualmente convertida da maquinagem da matéria prima para o forjamento contínuo a frio de rolos de aço. Um tarugo é transferido através de uma série de matrizes e emerge como parafuso "blank" no qual a rosca é rolada para terminar a operação.

A capacidade de fazer roscas uniformes não foi suficiente para garantir a uniformidade, visto que cada fabricante preferia ter o seu próprio padrão. Era necessário definir padrões nacionais e internacionais. Na Inglaterra o primeiro passo significativo neste sentido ocorreu em 1841, quando Joseph Whitworth apresentou ao Instituto dos engenheiros civis o seu trabalho "Um sistema uniforme de roscas de parafusos".

Whitworth propôs que para parafusos de certas dimensões as roscas deveriam ser iguais em passo, profundidade e forma. Ele recomendou um ângulo de 55 graus entre um lado do fio de rosca e outro. O número de fios por polegada deveria ser especificado para cada diâmetro de parafuso. A rosca devia ser arredondada na crista e no vale em 1/6 de profundidade. Em 1881, 40 anos após, o sistema de Whitworth já tinha sido adoptado.

Nos EUA o movimento para a normalização começou em 1864. William Sellers, um montador de ferramentas de máquinas na Filadélfia, persuadiu o Instituto Franklin daquela cidade a reunir um comité que procuraria estabelecer padrões nacionais. Sellers tinha várias objecções ao sistema de Whitworth. Dizendo que o ângulo de corte de 55 graus era difícil de medir, argumentava que 60 graus era o ideal e que resultaria em roscas mais resistentes. Ele também achava que o padrão de arredondamento da rosca de Whitworth resultava num encaixe incerto entre o parafuso e a porca resultando roscas mais frágeis, ele propôs roscas com cristas e vales planos.

O Instituto Franklin acabou por adoptar o sistema Sellers recomendando-o como padrão nacional onde roscas de parafusos devem ser feitos de lados planos com ângulo entre eles de 60 graus, tendo uma superfície plana no topo e no fundo igual a 1/8 do passo. Pelo fim do século, o sistema de Sellers já era padrão para os EUA e boa parte da Europa.



Figura 3 Parafuso com rosca

A incompatibilidade dos sistemas Whitworth e Sellers trouxe dificuldades nas 1ª e 2ª Guerras mundiais, quando as forças armadas americanas e britânicas precisavam de peças intercambiáveis. Desde 1918 e continuando até 1948, os dois países estudaram as formas para reconciliar os sistemas. Numa conferência em Washington em 1948, os EUA, o Canadá e a Grã-Bretanha adoptaram o sistema unificado que incorpora aspectos do sistema Whitworth e Sellers. O papel principal na padronização das roscas de parafusos em polegada foi do Instituto Industrial de Fixadores, constituído pelos maiores produtores de fixadores da América do Norte.

No mesmo ano a Organização Internacional para a Padronização (ISO) iniciou um trabalho para estabelecer um sistema padrão de rosca de parafuso que pudesse ser aplicado mundialmente. Quando o trabalho terminou em 1964 e foi adoptado numa conferência internacional em Nova Deli, consistia em dois sistemas: O sistema ISO polegada (ISO Inch Screw Thread System) o mesmo que sistema unificado e o sistema ISO métrico (ISO Metric Screw Thread System), que era uma nova fórmula para substituir os diversos sistemas métricos nacionais.

Com base no argumento de que os fixadores feitos de acordo com o sistema métrico eram inferiores aos feitos de acordo com a norma ISO polegada, o Instituto de Fixadores Industriais recomendou, em 1970, que um sistema métrico mais aperfeiçoado fosse desenvolvido. Em 1971 o grupo propôs o Sistema Métrico Óptimo (Optimum Metric Fastener System). Entre outras coisas, o plano previa um perfil baseado no formato que se tornou padrão para fixadores aeroespaciais e fixadores com melhor resistência à fadiga. A proposta levou a um sistema similar que agora é o padrão métrico internacional: o sistema ANSI/ISO (ANSI: American National Standards Institute).

Várias outras organizações se preocupam com padrões de fixadores, frequentemente especificando quais são os fixadores padronizados mais apropriados para uma determinada indústria. Nos EUA essas organizações incluem a American Society for Testing and Materials (ASTM), a American National Standards Institute (ANSI), a Society of Automotive Engineers e outros. Tomados em conjunto, as suas actividades incluem por volta de 8000 padrões para fixadores, que cobrem assuntos como: material, configuração, dimensões, tolerâncias e características mecânicas. Se forem incluídos os fixadores especiais, os diversos acabamentos e revestimentos superficiais junto de todas as combinações de diâmetros e comprimentos, o total de itens na área de fixadores supera os dois milhões.

2.2. CLASSIFICAÇÃO DE ROSCAS^{[5][6][7]}

As roscas consistem num filete helicoidal de várias espiras, sobre uma superfície cilíndrica, cujas formas e dimensões permitem a outro filete da rosca que se encaixe na ranhura que forma o filete.

As roscas classificam-se em:

- Rosca exterior (parafuso);
- Rosca interior (porca).

Uma haste provida de rosca exterior tem o nome de parafuso (Figura 4a), enquanto a peça que tem rosca interior (Figura 4b), denomina-se porca.

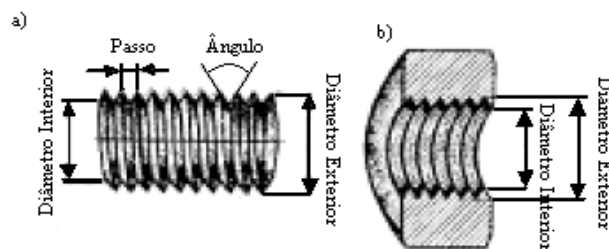


Figura 4 a) Rosca com superfície roscada exterior (parafuso); b) Rosca com superfície roscada interior (porca)

2.3. ELEMENTOS FUNDAMENTAIS DAS ROSCAS^{[6][8]}

Em todas as roscas se distinguem os seguintes elementos fundamentais:

- Perfil da rosca;
- Ângulo do perfil;
- Altura do perfil;
- Passo da rosca;
- Diâmetro exterior;
- Diâmetro médio;
- Diâmetro interior da rosca.

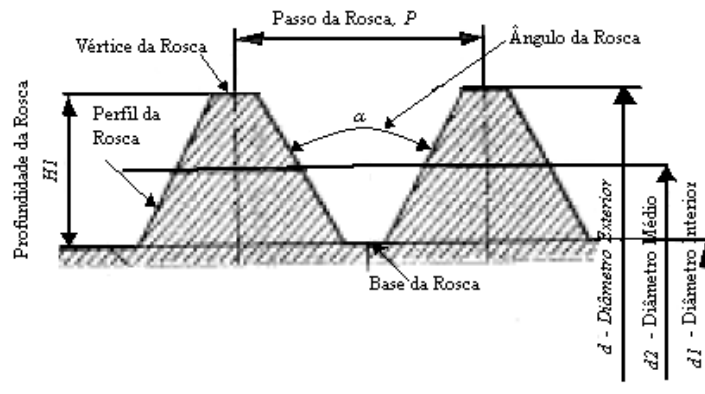


Figura 5 Elementos da Rosca

O perfil da rosca (Figura 5) examina-se na seção transversal que passa através do eixo do parafuso ou da porca.

Filete (ou fio) chama-se à parte da rosca que se obtém no decorrer da volta completa do perfil.

O ângulo do perfil (α), é o ângulo que se forma entre os flancos do filete (fio) da rosca, a ser medido no plano que atravessa o eixo do parafuso. Na rosca métrica este ângulo é de 60° , enquanto na rosca Whitworth (de passo inglês) o ângulo é de 55° .

O passo da rosca P , é a distância entre dois filetes vizinhos que se encontram sobre a mesma geratriz do cilindro roscado e medida ao longo do eixo da rosca, isto é, é a distância entre a crista de um filete e a crista do filete seguinte. Na rosca métrica o passo mede-se em

milímetros, enquanto que na rosca Whitworth calcula-se o número de filetes que cabem no comprimento de uma polegada.

A altura do perfil (a profundidade da rosca) H_1 , é a distância medida entre o vértice da rosca e a base do perfil, medida perpendicularmente ao eixo do parafuso.

O diâmetro exterior da rosca d , é o diâmetro do cilindro que se descreve em torno da superfície roscada. O diâmetro exterior mede-se nos parafusos entre os vértices dos perfis da rosca, enquanto que nas porcas entre as bases dos perfis da mesma.

O diâmetro interior da rosca d_1 , é o diâmetro de um cilindro imaginário que passa através das bases dos perfis da rosca. O diâmetro interior da rosca nos parafusos mede-se entre as bases da rosca, enquanto que nas porcas entre os vértices da rosca.

O diâmetro médio d_2 , é o diâmetro do cilindro imaginário, coaxial com a rosca, cujas geratrizes ficam divididas em porções de comprimento igual pelos flancos do perfil da rosca.

2.4. TIPOS DE ROSCAS^{[6][8][9][10]}

As roscas podem ter uma variedade ilimitada de formas e tamanhos (diâmetro da rosca).

As roscas utilizadas em mecânica diferenciam-se umas das outras, principalmente, pela forma do perfil do filete. Esta forma é definida pela intersecção da superfície roscada com um plano que contenha o eixo da rosca (Figura 6). O perfil do filete, sempre uniforme, dá nome às roscas e condiciona a sua aplicação.

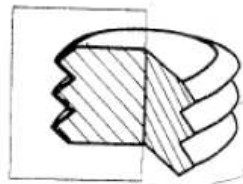


Figura 6 Definição do perfil do filete por intersecção de um plano

Os tipos de roscas mais correntemente utilizados, segundo o seu perfil, são os seguintes:

- Rosca quadrada;
- Rosca trapezoidal;
- Rosca de dente de serra;
- Rosca redonda;
- Rosca triangular.

➤ Rosca Quadrada

As roscas quadradas são usadas em elementos de transmissão e potência (parafusos que sofrem grandes esforços e choques). Este tipo de rosca não está normalizada.

Exemplo de aplicação: Prensas e morsas

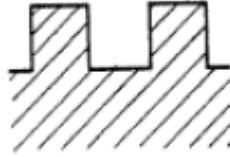


Figura 7 Perfil de uma rosca quadrada

➤ Rosca Trapezoidal

As roscas trapezoidais possuem a secção transversal sob forma de trapézio, com o ângulo do perfil igual a 30°. Este tipo de rosca é normalizada.

As roscas trapezoidais são usadas em elementos de transmissão e transformação de esforços (parafusos que transmitem movimento suave e uniforme).

Exemplo de aplicação: Fusos de máquinas.

Exemplo de designação abreviada: Tr 30 × 6 quer dizer, rosca trapezoidal de diâmetro nominal igual a 30 mm e 6 mm de passo; Tr 40 × 12 (2 filetes) quer dizer rosca trapezoidal de 40 mm de diâmetro nominal, 12 mm de passo e 2 entradas.

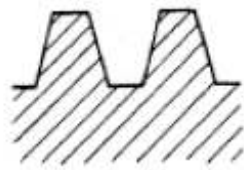


Figura 8 Perfil de uma Rosca Trapezoidal

➤ Rosca de Dente de Serra

As roscas de dente de serra são menos empregues e correspondem a necessidades especiais que se apresentam em determinados acoplamentos (parafusos que exercem grande esforço num só sentido). O flanco activo tem uma inclinação de 3° e o flanco desactivo (dorso) uma inclinação de 30°.

Exemplo de aplicação: Fusos de pressão nas prensas.

Exemplo de designação abreviada: S 50 × 8 quer dizer rosca de serra de diâmetro exterior igual a 50 mm e 8 mm de passo.



Figura 9 Perfil de uma rosca dente de serra

➤ Rosca Redonda

As roscas redondas são menos empregues e correspondem a necessidades especiais que se apresentam em determinados acoplamentos (parafusos de grandes diâmetros sujeitos a grandes esforços).

Exemplo de aplicação: Equipamentos ferroviários, fusos de válvula, roscas de mangueiras, etc.

Exemplo de designação abreviada: Rd 45 × 5 quer dizer rosca redondada de diâmetro exterior igual a 45 mm e passo igual a 5 mm.



Figura 10 Perfil de uma rosca redonda

➤ Rosca Triangular

As roscas triangulares utilizam-se, de preferência, em elementos de união (parafusos e porcas de fixação na união de peças).

Exemplo de aplicação: Fixação da roda de um carro.

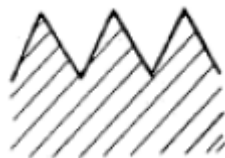


Figura 11 Perfil de uma rosca triangular

Além da forma do seu perfil, as roscas são identificadas pelas suas dimensões, pelo seu passo e pelo seu diâmetro. O grande emprego das roscas conduziu à normalização destas características, com o fim de facilitar o seu uso e a sua produção. Conseguiu-se, além disto, a intercambialidade das peças normalizadas de diversas precedências, a fácil reprodução de um tipo de rosca em caso de necessidade e a produção em grande série de porcas e parafusos normalizados.

As normas de roscas fixam a forma do perfil e as dimensões do mesmo, assim como o passo e as dimensões para um diâmetro exterior determinado nos parafusos de fixação e suas porcas. Entre as roscas triangulares normalizadas cabe distinguir os seguintes tipos:

- Roscas normais;
- Roscas finas;
- Roscas-gás.

Das roscas normais e roscas finas existem duas classes:

- ✓ Roscas métricas, em que o passo é expresso em milímetros;
- ✓ Roscas Whitworth, ou de passo inglês, em que o passo é expresso em medidas inglesas pelo número de fios que há em uma polegada de comprimento.

As roscas-gás têm as suas medidas derivadas do sistema inglês, ou Whitworth.

Nas roscas normais, as dimensões são determinadas pelo diâmetro exterior do parafuso, chamado por isso, diâmetro nominal. Ao dizer-se, um parafuso de 10 mm de diâmetro, por exemplo, ficam completamente definidas todas as medidas da rosca, pois existem tabelas normalizadas que consoante as dimensões da rosca obtemos todos os outros parâmetros.

As roscas finas empregam-se quando a profundidade da rosca que corresponde ao diâmetro da peça roscada, resulte excessiva. Os perfis das roscas finas são os mesmos que os de igual passo nas roscas de fixação, porém, empregam-se com diâmetros da parte roscada maiores do que os que lhe correspondem.

As roscas-gás empregam-se no roscado de tubos para condutas. Derivam da rosca Whitworth, sendo o passo e a profundidade da rosca menores do que os que corresponderiam ao diâmetro roscado, se se utilizasse uma rosca Whitworth fina. As roscas-gás definem-se pelo diâmetro interior do tubo em polegadas.

2.5. ROSCA DIREITA E ESQUERDA^{[6][9][10]}

Independentemente das características do perfil e dimensões de uma rosca, o filete, ou parte saliente da rosca, pode estar enrolado em dois sentidos diferentes, como se vê na Figura 12.

Dependendo da inclinação dos filetes em relação ao eixo do parafuso, as roscas podem ser direitas ou esquerdas.

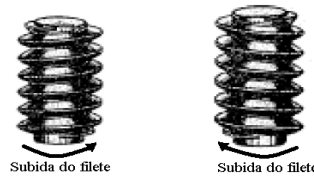


Figura 12 Sentido de movimento de uma rosca (lado esquerdo da imagem temos uma rosca direita, do lado direito da imagem uma rosca esquerda)

Na rosca direita, o filete desloca-se no sentido directo, isto é, no sentido contrário ao movimento dos ponteiros do relógio. Na rosca esquerda, o filete desloca-se no sentido indirecto, isto é, no sentido dos ponteiros do relógio.

A rosca chama-se direita, porque para aparafusar uma porca (ou um parafuso) que possui esta rosca há que lhe dar voltas no sentido directo, ou seja, no sentido dos ponteiros do relógio. No caso de a porca (ou o parafuso) ter a rosca esquerda, para aparafusá-los há que lhe dar voltas no sentido indirecto, isto é, no sentido contrário ao do movimento dos ponteiros do relógio.

Na prática, por vezes, emprega-se a regra do dedo do polegar. Para isto convém colocar a palma da mão direita sobre a superfície roscada de uma peça a fim de observar o sentido em que sobe a linha helicoidal (Figura 13). Se a linha subir no sentido para o dedo polegar, trata-se da rosca esquerda, no caso de se deslocar no sentido oposto ao dedo polegar (no sentido dos ponteiros do relógio), trata-se da rosca direita.

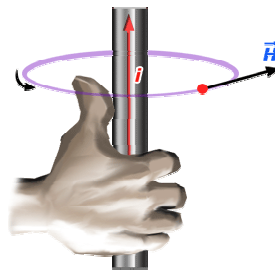


Figura 13 A regra do dedo polegar

As roscas normais são direitas, portanto ao longo do trabalho sempre que se fale de roscas, sem se especificar que são esquerdas, entende-se que as roscas são direitas.

2.6. PASSO DAS ROSCAS^{[6][8][10]}

Existem roscas formadas por um só filete ou por vários (dois, três ou mais), paralelos, enrolados simultaneamente. As roscas com vários filetes denominam-se roscas múltiplas ou roscas de n entradas. As mais correntes são as de dois ou três filetes, chamadas de duas entradas e de três entradas, respectivamente.

As roscas de um filete (de uma entrada) têm um ângulo de inclinação reduzido da linha helicoidal e elevado atrito (reduzido rendimento). São empregues nos casos em que se requer um acoplamento, por exemplo, em elementos de união.

Nas roscas de entradas múltiplas, em comparação com as de uma entrada, o ângulo de inclinação da linha helicoidal é notavelmente mais pronunciado. As roscas deste tipo são utilizadas nos casos em que se torna necessário um deslocamento rápido pela rosca, com o mínimo de atrito possível.

Nas roscas de um só fio ou filete, o passo é igual ao comprimento do perfil gerador da superfície roscada, medido no sentido do eixo da rosca. Na Figura 14 pode ver-se como, nas roscas triangulares, redondas e em dente de serra, o passo P é igual à distância que mede entre os dois pontos mais salientes imediatamente situados sobre a mesma geratriz e na Figura 15 mostra-se como, no caso de roscas de fita, este passo é igual ao comprimento medido sobre uma geratriz que compreenda um filete e um intervalo.

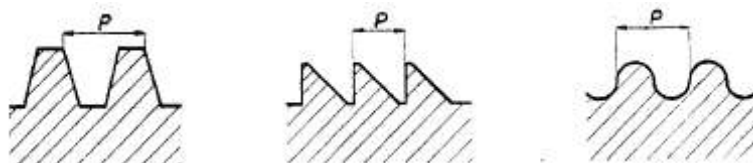


Figura 14 Passo nas roscas triangulares, dentes de serra e redondas

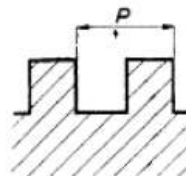


Figura 15 Passo nas roscas de fita

Nas roscas de várias entradas, o passo é maior do que o comprimento do perfil gerador do filete, sendo o múltiplo deste comprimento correspondente ao número de entradas. Assim, numa rosca de duas entradas, o passo P será o dobro do passo P' , que corresponderia a uma rosca do mesmo perfil com uma só entrada (Figura 16), e numa rosca de três entradas, o comprimento do passo P seria três vezes o comprimento P' , que corresponderia ao mesmo perfil de filete, se a rosca fosse de uma só entrada (Figura 17).

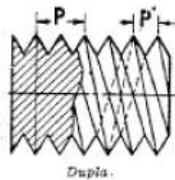


Figura 16 Passo nas roscas de duas entradas
($P=2P'$)

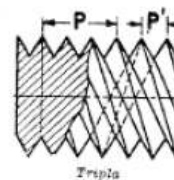


Figura 17 Passo nas roscas de três entradas
($P=3P'$)

Para a execução das roscas de várias entradas é de grande interesse a forma como os diversos filetes que as constituem ficam dispostos em volta do eixo da rosca.

Os filetes destas roscas são distribuídos uniformemente em volta do eixo. Isto significa que, se a rosca é de duas entradas, os filetes se encontram igualmente dispostos longitudinalmente em relação ao eixo quando estão afastados 180° , em posição circular. Nas roscas de três entradas, a posição longitudinal dos três filetes é a mesma quando, em disposição circular, estão deslocadas 120° .

2.7. TIPOS DE ROSCADOS

Depois de ao longo do relatório se dar um breve conhecimento sobre roscas, será dado agora um breve conhecimento sobre roscados triangulares métricos, que são roscados que possuem roscas triangulares e que já foram explicadas anteriormente. Unicamente para comparação e abrangência do conhecimento também se dará um breve esclarecimento sobre as roscas Whitworth.

De salientar que tendo conhecimento sobre um tipo de roscado é fácil perceber qualquer tipo de roscados, tendo o conhecimento sobre os tipos de roscas explicados anteriormente.

Roscas Triangulares Métricas^{[6][7][8][10][11][12][13]}

As roscas de parafusos de fixação têm que gerar um grande esforço e não relaxam por si só. A rosca triangular responde a estas exigências e é adequada, por isso, para os parafusos de fixação.

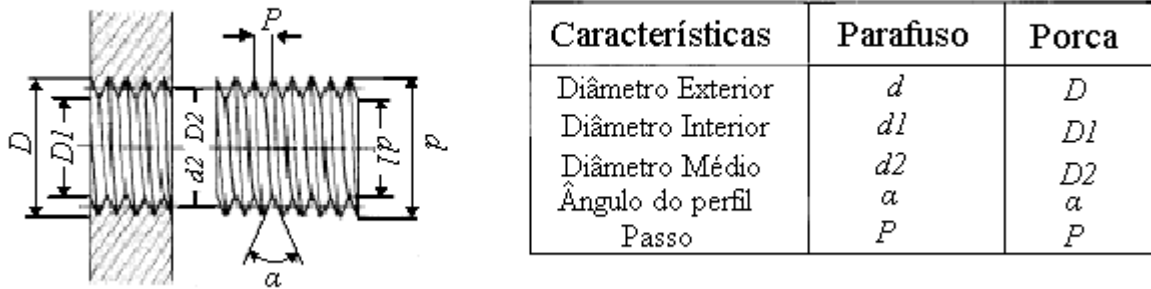


Figura 18 Rosca triangular e suas características

Entre as roscas normalizadas utilizadas na construção de máquinas, a de uma entrada, secção transversal triangular com ângulo de 60° (rosca métrica) ou 55° (rosca Whitworth) entre flancos, é empregue nos parafusos de fixação (maior atrito), enquanto que as restantes servem para os parafusos de movimento.

O perfil da rosca métrica é um triângulo equilátero de altura H , com os vértices exteriores rectos, e os vértices interiores arredondados com raio r (Figura 19), com um ângulo de perfil de 60° . Os diâmetros e o passo da rosca exprimem-se em unidades do sistema métrico, em milímetros.

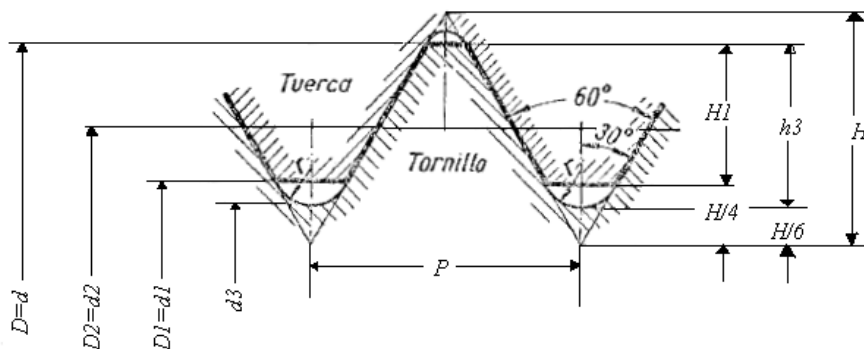


Figura 19 Rosca métrica

As roscas métricas distinguem-se entre rosca normal e rosca fina. Na rosca normal a cada diâmetro exterior corresponde um passo determinado.

Exemplo de designação: M12, por exemplo, rosca métrica (rosca normal) de 12 mm de diâmetro exterior.

As roscas métricas empregam-se normalmente, em elementos de união e fixação. As roscas de grande passo em elementos de união com grandes esforços e em elementos de fixação (parafusos, porcas, etc.), enquanto que as roscas de passo reduzido se utilizam em elementos de união com reduzidos esforços e nos casos em que é necessário um ajuste fino.

As roscas finas têm passos menores e profundidades de rosca menores que as roscas correntes métricas. Em virtude do reduzido passo obtém-se uma menor auto-retenção, o que é interessante para roscas que vão estar expostas a sacudidelas ou vibrações. A pequena profundidade da rosca é necessária em peças com paredes finas.

Exemplo de designação abreviada: M 50 x 2 quer dizer, rosca métrica de 50 mm de diâmetro exterior e 2 mm de passo.

Actualmente este tipo de rosca é a mais utilizada.

Para a rosca métrica o valor do ângulo de flanco é 60° (sendo os semiângulos $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$).

Além disso, a norma ABNT NB97^[14], entre outras, descreve quais os diâmetros nominais que devem ser usados preferencialmente, quais os diâmetros que são complementares, de forma que a combinação do diâmetro nominal com certo valor numérico do passo deva ser considerado como normal, e quais as combinações que podem ser usadas opcionalmente.

Outros tipos de roscas têm as suas dimensões e outros elementos definidos também pelas respectivas normas. Para calibradores de rosca métrica, a norma NBR-8225^[15] especifica os valores nominais, tolerâncias de fabricação e tolerância de desgaste.

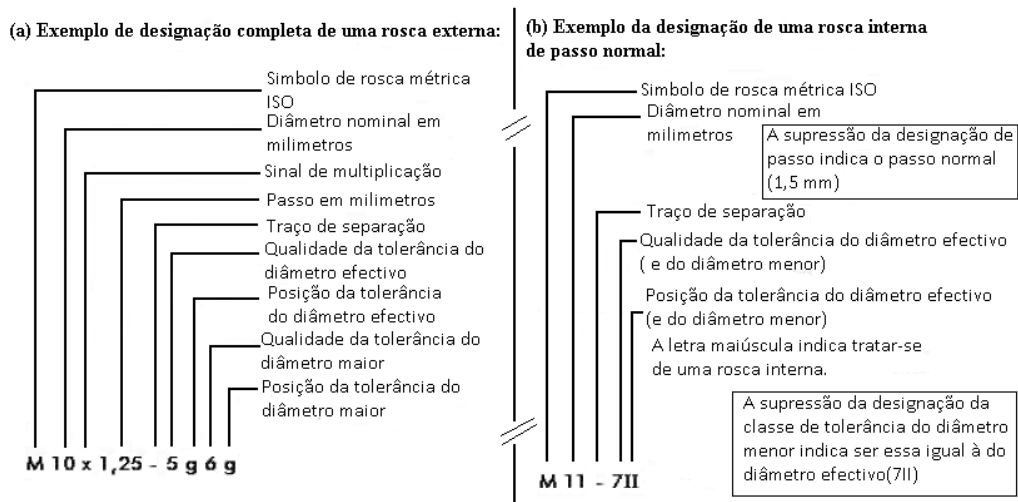


Figura 20 Designação de rosca métrica

A medição de roscas é abordada tradicionalmente em medição de roscas externas (isto é, roscas tipo parafuso), e medição de roscas internas (tipo porca).

Apesar dos métodos de calibração terem procedimentos em comum, há bastante diferenças entre eles. Além disso, a medição de roscas internas é mais complexa e o número de métodos aplicáveis bastante reduzido.

De salientar que o estudo feito neste relatório é aplicado unicamente em roscas externas.

Tabela 2 Tabela normalizada para a rosca métrica

Rosca métrica

$h = 0,866 p$
 $h_1 = 0,4495 p$
 $d'_1 = d - h_1$
 $d'_2 = d - 2 h$
 $r_1 = 0,1082 p = \frac{h}{8}$

Diâmetro nominal	Passo p	Diâmetro interior d'	Diâmetro médio d'	Profundidade da rosca h	Raio do fundo r1	Secção do núcleo - Milímetros quadrados
1	0,25	0,676	0,838	0,162	0,03	0,36
1,2	0,25	0,876	1,038	0,162	0,03	0,60
1,4	0,3	1,010	1,205	0,195	0,03	0,80
2	0,4	1,480	1,740	0,260	0,04	1,72
3	0,5	2,350	2,675	0,325	0,05	4,34
3,5	0,6	2,720	3,110	0,390	0,06	5,81
4	0,7	3,090	3,545	0,455	0,08	7,50
5	0,8	3,960	4,480	0,520	0,09	12,3
6	1	4,700	5,350	0,650	0,11	17,3
7	1	5,700	6,350	0,650	0,11	25,5
8	1,25	6,376	7,188	0,812	0,14	31,9
10	1,5	8,052	9,026	0,974	0,16	50,9
12	1,75	9,726	10,863	1,137	0,19	74,3
14	2	11,402	12,701	1,299	0,22	102
16	2	13,402	14,701	1,299	0,22	141
18	2,5	14,752	16,376	1,624	0,27	171
20	2,5	16,752	18,376	1,624	0,27	220
22	2,5	18,752	20,376	1,624	0,27	276
24	3	20,102	22,051	1,949	0,32	317
27	3	23,102	25,051	1,949	0,32	419
30	3,5	24,454	27,727	2,273	0,38	509
33	3,5	28,454	30,727	2,273	0,38	636
36	4	30,804	33,402	2,598	0,43	745
39	4	33,804	36,402	2,598	0,43	897
42	4,5	36,154	39,077	2,923	0,49	1 027
45	4,5	39,154	42,077	2,923	0,49	1 204
48	5	41,504	44,752	3,248	0,54	1 353
52	5	45,504	48,752	3,248	0,54	1 626
56	5,5	48,856	52,428	3,572	0,60	1 875
60	5,5	52,856	56,428	3,572	0,60	2 194
64	6	56,206	60,103	3,897	0,65	2 481
68	6	60,206	64,103	3,897	0,65	2 847

Características essenciais das roscas métricas:

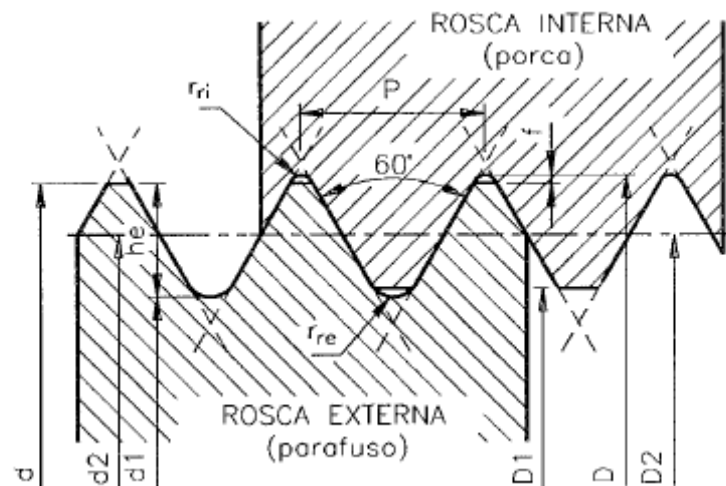


Figura 21 Rosca métrica

⇒ Ângulo do perfil da rosca:

$$\alpha = 60^\circ$$

⇒ Diâmetro interior da rosca (θ do núcleo):

$$d_1 = d - 1,2268 \times P$$

⇒ Diâmetro efectivo da rosca (θ médio):

$$d_2 = D_2 = d - 0,6495 \times P$$

⇒ Altura do filete da rosca:

$$h_e = 0,61343 \times P$$

Rosca Whitworth¹⁷¹

O ângulo dos flancos é de 55° . O diâmetro exterior é expresso em polegadas, por exemplo $5/8''$. O passo designa-se consoante o número de fios (ou filetes) por polegadas, por exemplo 11 fios por 1 polegada. Nos países que utilizam o sistema métrico decimal não se aplica a rosca Whitworth, que é o caso de Portugal.

Rosca Whitworth para tubos:

Têm um ângulo dos flancos de 55° e um passo proporcionalmente menor. O diâmetro nominal não se refere ao diâmetro exterior da rosca, mas sim ao diâmetro interior do tubo.

As roscas de tubos blindados têm um ângulo dos flancos de 80° .

Exemplo de designação abreviada: R1 quer dizer, rosca para tubos de 1"; o diâmetro da rosca é neste caso 33,25 mm.

2.8. MEDIÇÃO DE ROSCADOS^[11]

São cinco os elementos que definem um roscado cilíndrico (ver Figura 22):

Diâmetro externo d, D ;

Diâmetro interno d_1, D_1 ;

Diâmetro efectivo (ou de flancos) d_2, D_2 ;

Passo P (na figura 22 está representado pela letra h);

Ângulo de flancos α , sendo os semi-ângulos de flancos α_1 e α_2 .

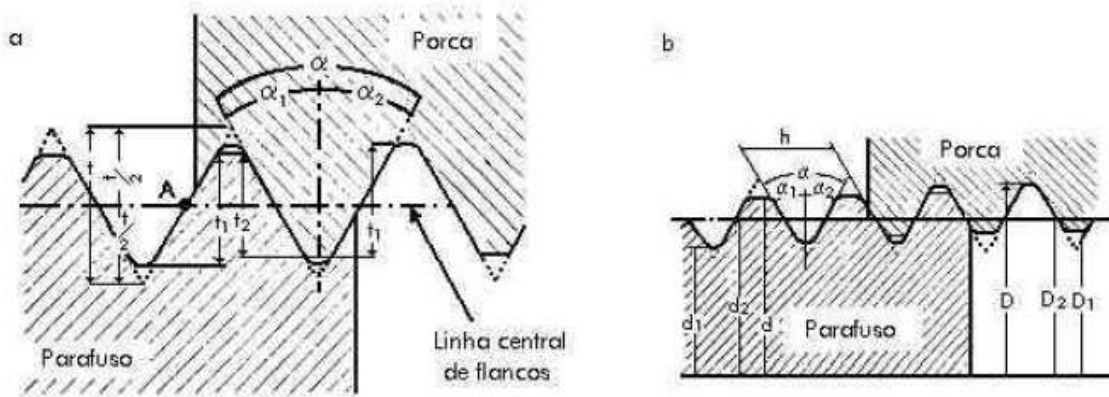


Figura 22 Elementos principais de um roscado (letras minúsculas para o parafuso, e letras maiúsculas para a porca)

Para a medição de roscas o diâmetro efectivo é de máxima importância. É definido como a distância (medida perpendicularmente ao eixo da rosca) dos dois flancos opostos, medida nos pontos A (Figura 22a) que se encontram na linha central (na metade) dos flancos de um perfil teórico completo (pontiagudo, com profundidade t na Figura 22a).

Por medição podem obter-se as 5 amplitudes determinantes da rosca que foram citadas. Mas estas medições são “grosseiras” e por vezes difíceis de realizar. É mais simples efectuar a calibração com calibres ou conta-fios. Geralmente procede-se à medição das roscas unicamente quando não se dispõe dos conta-fios.

Os diâmetros: exterior e interior podem medir-se e verificar-se com paquímetros ou micrómetros (ver Figura 23).

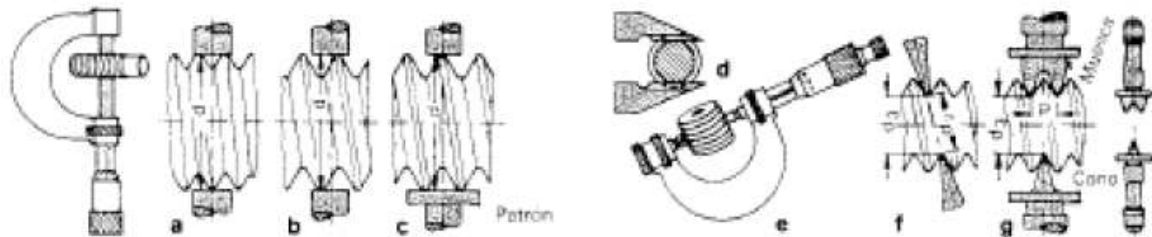


Figura 23 Medição dos diâmetros exterior e interior

O diâmetro efectivo pode medir-se com um micrómetro para roscas exteriores e interiores. Para a medição na indústria, o instrumento mais usado são os calibres para roscas (micrómetros) (ver Figura 24). Estes calibres (pontas; ponteiras) do micrómetro podem ser trocadas e têm para cada passo de rosca uma amplitude diferente.

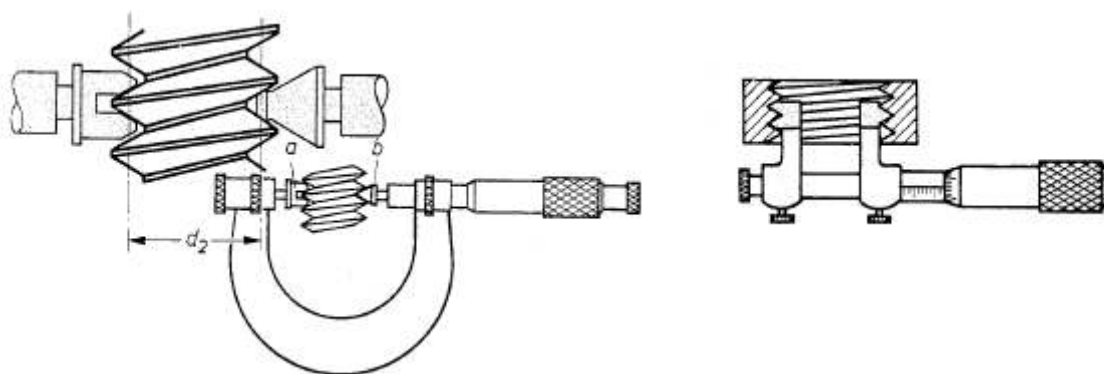


Figura 24 Medição do diâmetro efectivo de roscas exteriores e roscas interiores

Para uma medição do diâmetro efectivo aplicam-se frequentemente os conta-fios, colocados em suportes adequados.

O diâmetro efectivo corresponde à medida de verificação obtida, tomada a partir de tabelas. Para a medição são necessários 3 cavilhas que devem ter um diâmetro adequado ao passo da rosca que se mede.

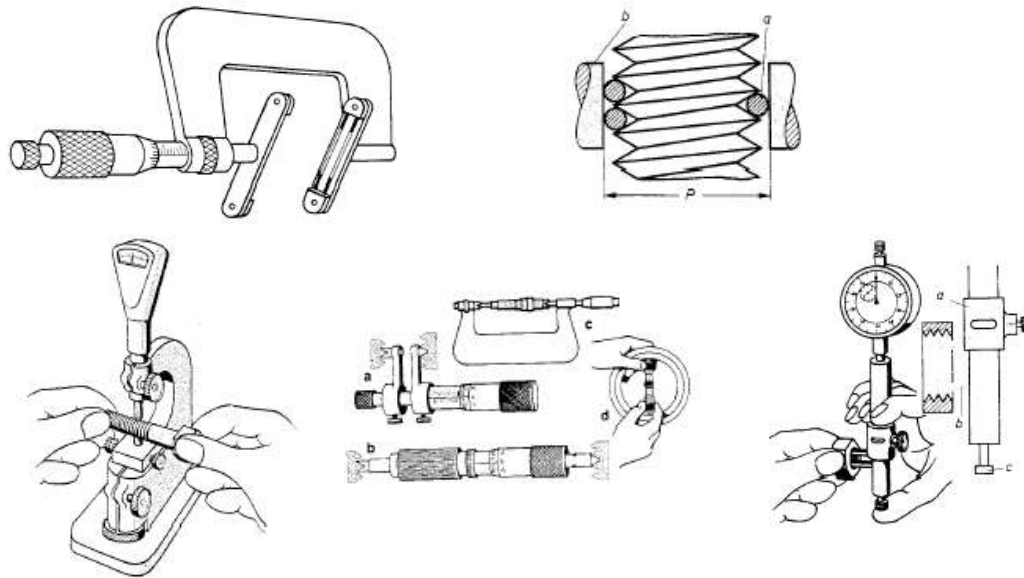


Figura 25 Vários métodos para a medição do diâmetro efectivo

Exemplo: Para medir o diâmetro efectivo de uma rosca M24, usam-se cavilhas com diâmetro igual a 2,05 mm. O diâmetro efectivo tem a medida correcta (22,051 mm) e a medida de verificação é igual a 25.606 mm.

Por meio de instrumentos de comparação, como por exemplo, comparadores, podem determinar-se as descrições do diâmetro efectivo com a medida nominal. Antes da medição é necessário ajustar os instrumentos de acordo com a peça padrão, por exemplo, com um anel padrão para roscas ou um tampão roscado (calibre) para roscas.

2.9. MÉTODO DE CALIBRAÇÃO DE ROSCADOS

As listas (*bullets*) de itens fazem uso do estilo “List Bullet”.

a) Medição do Diâmetro Exterior

A medição do diâmetro exterior de roscas por meios mecânicos não difere das medições externas de cilindros lisos. Devem ser levadas em consideração em cada lado da rosca pelo menos duas cristas dos filetes. No caso de passos grandes pode-se utilizar corpos auxiliares como por exemplo, dois blocos padrão em cada lado da rosca.

b) Medição do Passo

Na medição do passo de roscas é possível usar dois procedimentos diferentes:

- medição sobre um flanco;
- medição sobre dois flancos vizinhos, ou seja, medição entre "cristas da rosca".

Na Figura 26a, observa-se o perfil de rosca com a marcação nítida do flanco esquerdo do perfil e do flanco direito. Segundo a definição, o passo (n na Figura 26a) é a distância entre dois flancos consecutivos (esquerdos ou direitos).

Se o perfil for ideal, com o passo perfeitamente constante ao longo da rosca, o passo aparece também entre quaisquer pontos do perfil, como por exemplo, entre "cristas da rosca" (n^* na Figura 26a). Se por outro lado, houver erros locais de passo, os dois procedimentos oferecem resultados um tanto diferentes. Neste caso, como resultado mais correcto, deve ser considerado aquele obtido de acordo com a definição do passo, ou seja, obtido pela medição sobre um flanco só.

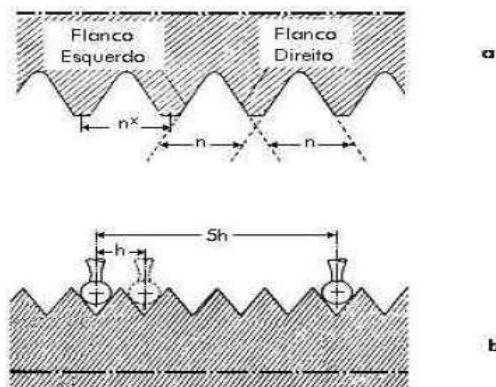


Figura 26 Medição do passo

Nos dois métodos apalpa-se o flanco (ou os flancos) com algum apalpador de medição conveniente. O mais frequente nos métodos mecânicos é o apalpador com ponta esférica. No primeiro método encosta-se o apalpador sempre sobre o mesmo tipo de flanco (por exemplo, sempre o esquerdo) e mede-se o referido deslocamento do apalpador. Este método é menos seguro, visto que o posicionamento pode não ocorrer sempre na mesma altura dos flancos consecutivos.

No segundo método, o apalpador é introduzido entre os filetes da rosca até encostar nos dois flancos vizinhos, Figura 26b. Nesta posição o centro do apalpador coincide com a linha de simetria do filete da rosca ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha/2$, na Figura 26a). Medindo-se em seguida o deslocamento do apalpador para o filete seguinte (medida h na Figura 26b), tem-se o valor de um passo. Neste método, porém, é bastante comum deslocar o apalpador em mais do que um filete, como por exemplo, em 5 filetes, obtendo-se depois o passo médio da rosca (Figura 26b).

Algumas máquinas de medir mecânicas, destinadas a realizar a verificação do passo médio usando o segundo método acima descrito, dispõem de apalpadores cónicos que são ajustados para a medida correcta por intermédio de blocos-padrão que fazem parte dos acessórios das máquinas de medir.

c) Medição do Diâmetro Efectivo

A medição do diâmetro efectivo é uma das medições mais importantes, pois caracteriza a rosca em projectos de dimensionamento. Surgem dificuldades porque o diâmetro efectivo não é directamente disponível para a medição. De acordo com a definição, o diâmetro em questão é a distância medida perpendicularmente ao eixo da rosca na metade da altura do filete. Entretanto, os flancos da rosca encontram-se na realidade deslocados axialmente em valor da metade do passo. Além disso, o ponto central do flanco (onde se deveria medir de acordo com a definição) também não é directa e nitidamente marcada. Logo, não é possível medir o diâmetro de flancos directamente de acordo com a definição do mesmo. Servir-se dos diâmetros exteriores e do núcleo como meios auxiliares para a medição do diâmetro efectivo não é viável, já que estes dois diâmetros são apenas parâmetros secundários para a definição e funcionamento da rosca.

3. VISÃO COMPUTACIONAL

3.1. ESTADO DA ARTE^{[17][19]}

O campo de visão artificial/computacional pode ser caracterizado como imaturo e diverso. Apesar de existirem trabalhos já reconhecidos, somente após o final da década de 1970 é que começaram a haver estudos aprofundados, quando os computadores já podiam processar grandes conjuntos de dados como imagens. Entretanto, tais estudos foram geralmente originados de outros campos de pesquisa, e, conseqüentemente, não existe uma formulação padrão para o problema de visão computacional, assim como não existe uma formulação padrão de como os problemas de visão computacional devem ser resolvidos. O que existe actualmente são diversos métodos para resolver várias tarefas bem definidas, nos quais os métodos são bastante especializados e raramente podem ser generalizados para várias aplicações. Na maioria das aplicações de visão computacional, os computadores são pré-programados para resolver uma tarefa particular, mas métodos baseados em aprendizagem estão a tornar-se cada vez mais comuns.

Uma parte significativa da inteligência artificial necessita de um sistema de visão computacional, que age como um sensor de visão, fornecendo informações de alto nível sobre o ambiente ao robô. Outras áreas da inteligência artificial relacionadas com a visão computacional são o reconhecimento de padrões e a aprendizagem da máquina. Como

consequência, a visão computacional é por vezes vista como parte da inteligência artificial ou da ciência da computação de modo geral.

As técnicas de processamento e análise de imagem para ambientes industriais e científicos são relativamente recentes. Tiveram início há cerca de 30 anos e evoluíram muito rapidamente, acompanhando, por sua vez, o rápido avanço tecnológico dos computadores e da sua capacidade de cálculo.

Num passado mais recente, não era possível realizar os processamentos em tempo real, uma vez que os computadores não eram suficientemente rápidos para realizar cálculos com imagens. Na verdade, até há cerca de cinco anos, não era possível realizar a visualização de imagens, devido à largura de banda do bus ISA. Os processamentos em tempo real, nesta altura, faziam-se em processadores DSP on-board, com o objectivo de poder alcançar as velocidades requeridas para a maioria das aplicações.

Com a chegada do bus PCI e PCI Express, assim como, com a rápida evolução dos processadores dos PC, conseguiu-se visualizar as imagens em tempo real e realizar a maioria dos processamentos num período de tempo suficientemente curto. Desta forma, passou-se a poder resolver aplicações de visão em ambientes científicos e industriais, com os resultados esperados em tempo aceitável.

Esta evolução de hardware conduziu ao desenvolvimento de bibliotecas de visão artificial capazes de funcionar em ambientes Standard, tanto de sistemas operativos, como de processadores.

O sistema operativo mais utilizado, actualmente, nas aplicações de visão artificial é o Windows, em qualquer das suas variedades. De qualquer forma, existem muitas aplicações desenvolvidas em UNIX, QNX e em LINUX, ultimamente utilizada com grande assiduidade, tanto na sua versão Standard, como na RT (RealTime).

Até há poucos anos, a implementação de sistemas de visão artificial requeria um extenso conhecimento do software de baixo nível e do hardware de visão artificial. Actualmente, o panorama alterou-se radicalmente, uma vez que se encontram disponíveis numerosos ambientes de programação escaláveis e fáceis de utilizar que, combinados com os novos processadores, tornam muito fácil a implementação de um sistema de visão artificial.

A base do software de um sistema de visão artificial é a interpretação e análise dos píxeis. O resultado final pode ir desde a medida de uma partícula, até à determinação ou leitura de uma série de caracteres (OCR), passando por qualquer outro processamento que possamos imaginar sobre as imagens.

Dependendo do facto de a aplicação se realizar em ambiente industrial ou científico, os passos a seguir num sistema de visão artificial, de certa forma são distintos. Enquanto que nas aplicações industriais a velocidade a que se realizam as medições é fundamental, já que se devem avaliar todas as peças produzidas em tempo real, nas aplicações científicas procura-se a determinação dos resultados em imagens mais complexas.

Exemplos de aplicações industriais:

- Captura da imagem;
- Definição da região de interesse onde se realizarão as medições;
- Inicialização das tolerâncias para se verificar se a peça a avaliar está de acordo com o requerido ou não;
- Executar as medições;
- Gerar uma saída apropriada.

3.2. TERMINOLOGIA ASSOCIADA À VISÃO^{[16][20]}

Quando se refere ao termo visão, mais especificamente visão de máquina (do inglês *machine vision*) ou também sistemas de visão, surge uma série de novos termos interligados, relacionados com a área de processamento de imagens, cada qual com a sua própria definição, mas que causam confusão pela afinidade de conceitos.

Apesar de actualmente ainda não haver um consenso geral na literatura desta área para a definição precisa desta terminologia, no trabalho, serão adoptados os conceitos apresentados por Gonzalez and Woods, Jain et al. e Erhardt-Ferron^[20], por apresentarem certa semelhança:

Processamento de Imagens: refere-se ao processamento digital de imagens através de um computador ou dispositivo eletrónico, onde as entradas e saídas do processamento são imagens. Em geral são operações de realce, restauração, transformação ou compressão de imagens. Enquadra-se este tipo de operação de processamento como de “nível baixo” ou até “médio”. Um exemplo seria a aplicação de um filtro na imagem para realçar os contornos do seu objecto.

Visão Computacional: refere-se ao processamento digital de imagens para a extração de características importantes, que auxiliem na compreensão da imagem e na tomada de decisões inteligentes. Enquadra-se este tipo de operação de processamento como de “nível alto”, sendo comum a utilização de técnicas de inteligência artificial para o processamento dos dados. Um exemplo seria o reconhecimento e a classificação de um objecto da imagem.

Análise de Imagens: refere-se ao processamento digital de imagens onde somente as entradas do processamento são imagens. As saídas costumam apresentar uma descrição ou representação diferente da imagem ou alguma característica sua. Diz-se que a análise de imagens se encontra-se em nível intermédio ao processamento de imagens e à visão computacional, enquadrando-se como operação de “nível médio”, podendo até atingir operação de “nível alto”. Um exemplo seria a visualização dos dados de uma imagem a partir do seu histograma, que descreve as características de luminosidade do objecto.

Computação Gráfica: refere-se ao processo de formação de imagens a partir do modelo de imagens geométricas primitivas, como linhas e círculos, aplicado nas áreas de publicidade, jogos eletrónicos, realidade virtual, entre outras. A computação gráfica encontra-se no caminho inverso da visão computacional, pretende analisar e compreender imagens do mundo real, e não criá-las. Porém, existe uma certa ligação entre estas áreas, principalmente no que diz respeito às pesquisas de realidade virtual ou de geração de modelos 3D a partir de imagens de tomografia médica, onde ferramentas de ambas as áreas são utilizadas para a geração e apresentação de resultados.

Reconhecimento de Padrões: refere-se a operações inteligentes na interpretação de sinais. Está intimamente ligado à visão computacional, mas processa apenas informações visuais para realizar o reconhecimento de características de um ambiente, por existirem outros tipos de sensores dos quais poderia fazer uso, como por exemplo um sensor acústico para reconhecimento de voz. Em visão computacional, trata-se da interpretação e reconhecimento de objetos e características específicas em uma imagem.

Inteligência Artificial: refere-se à modelagem de sistemas inteligentes e análise de aspectos ligados à inteligência. É normalmente usada junto da visão computacional para a obtenção, reconhecimento, classificação de objectos e características nas imagens. Em geral é aplicada em três etapas: percepção, cognição e acção. A etapa de percepção traduz os sinais provenientes do ambiente em símbolos, a de cognição manipula estes símbolos e a de acção traduz o resultado destes símbolos em acções que devem ser aplicadas de volta ao ambiente.

Sistemas de Visão: refere-se a um sistema completo, que envolve a solução de um problema de natureza visual, tentando criar um modelo do mundo real a partir de imagens deste. É composto tanto por dispositivos de *hardware* como por módulos de *software*, fazendo uso de uma ou até todas as demais operações de processamento previamente citadas. Em geral, etapas como aquisição, pré-processamento e processamento das imagens, extracção de características, tomada de decisão inteligente e atuação/realimentação estão contempladas num sistema deste tipo.

Visão de Máquina: refere-se ao termo inglês *machine vision*. É usado normalmente como um sinónimo para o termo “sistema de visão”, porém, pode ser encontrado na literatura como sendo a simulação e/ou incorporação do comportamento visual inteligente de humanos em máquinas, como robôs, usando extensivamente técnicas de visão computacional e inteligência artificial.

A figura seguinte ilustra a íntima ligação entre os termos e áreas acima mencionados.

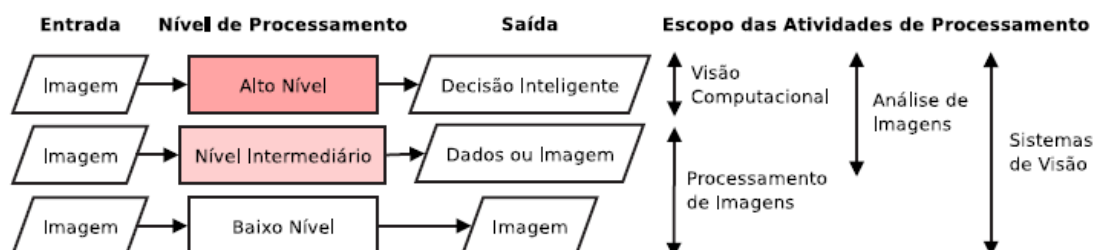


Figura 27 Interdependência entre os termos da área de sistemas de visão.

3.3.COMONENTES DE UM SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL^{[17][18][19][20]}

Todas as áreas de aplicação utilizam um conjunto de tarefas de visão computacional.

O primeiro passo é o reconhecimento, que consiste num problema clássico da visão computacional e do processamento de imagens. O objectivo é determinar se uma imagem contém ou não um dado objecto, uma dada característica ou uma dada actividade. Tal tarefa pode ser resolvida de forma robusta e sem esforço humano, mas ainda não foi resolvida satisfatoriamente para o caso geral, objetos arbitrários em situações arbitrárias. Os métodos acuais conseguem, no máximo, resolver para objetos específicos, como poliedros, faces humanas, letras escritas à mão ou veículos; também em situações específicas, com iluminação bem definida, fundo fixo e pose dos objectos bem definida.

A organização de um sistema de visão artificial é dependente da aplicação. A implementação específica de tal sistema depende também se a sua funcionalidade é pré-especificada ou da existência de aprendizagem durante a operação. Existem, entretanto, etapas típicas encontradas em vários sistemas de visão computacional:

- **Aquisição de imagem:** uma imagem digital é produzida por um ou vários sensores. Dependendo do tipo de sensor, o resultado pode variar entre uma imagem bidimensional, uma cena tridimensional ou ainda uma sequência de imagens. Os valores dos pixels geralmente indicam a intensidade da luz em uma ou várias faixas de cor (o que forma imagens em tom de cinza ou coloridas), mas também podem indicar valores físicos como profundidade e absorção ou reflexão das ondas eletromagnéticas.

Nesta etapa a qualidade da imagem obtida é de extrema importância para as seguintes etapas, sendo necessário o conhecimento de técnicas de iluminação. A aplicação de cada tipo de câmara depende do tipo de aplicação e dos custos envolvidos.

- **Pré-processamento:** antes de um método de visão computacional ser aplicado em uma imagem para extrair informação, é geralmente necessário processar a imagem para assegurar-se que ela satisfaz as condições do método.

Esta etapa faz o tratamento da imagem de forma a minimizar o custo computacional e maximizar a extracção de características relevantes ao processo. Isto significa a redução ou eliminação de ruídos, redução dos efeitos indesejáveis de uma iluminação inadequada, remoção de objectos de cena, e a redução da dimensionalidade dos dados.

- **Extração de características:** são extraídas características matemáticas da imagem em vários níveis de complexidade. Exemplos básicos incluem detecção de contornos, cantos ou pontos. Exemplos sofisticados incluem a morfologia matemática, detecção de texturas, formatos e movimentos.

-

- **Detecção e segmentação:** em algum ponto do processo uma decisão é feita sobre a relevância de regiões da imagem para processamento posterior. Exemplos incluem a selecção de regiões de interesse específicos e segmentação de uma ou mais regiões que contêm um objecto de interesse.

- **Processamento de alto nível:** neste ponto a entrada é geralmente um conjunto pequeno de dados. O processo posterior inclui a verificação da satisfação dos dados, a estimativa de parâmetros sobre a imagem e a classificação dos objectos detectados em diferentes categorias.

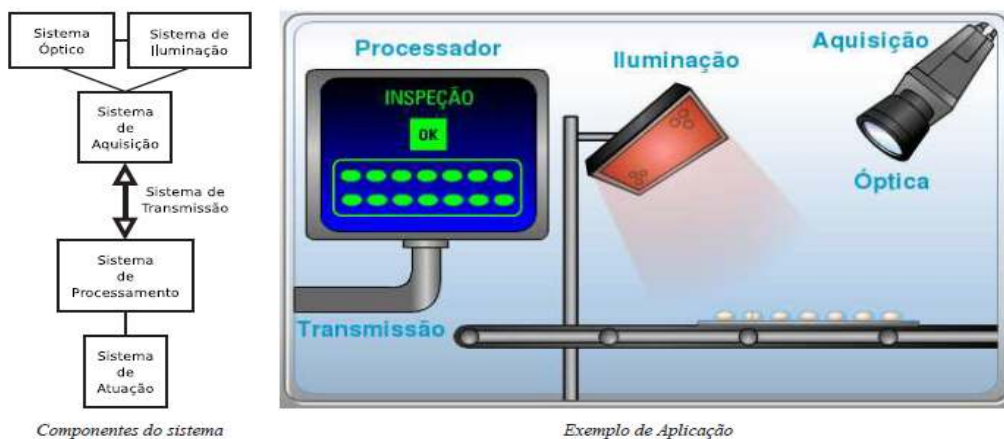


Figura 28 Componentes gerais de um sistema de visão

Como se pode visualizar na figura 28, o sistema de aquisição de imagem engloba o sistema óptico e o sistema de iluminação. O sistema de processamento da figura corresponde à etapa de pré-processamento referido anteriormente, o qual engloba a extracção de características, detecção e segmentação. Por último o sistema de actuação que corresponde à etapa de processamento de alto nível, descrita anteriormente.

De salientar que o sistema de processamento de dados é o coração do sistema de visão computacional, responsável pelo pré-processamento e pelo processamento das informações recebidas de todas as outras partes do sistema, e principalmente pela tomada de decisões de acordo com o estado actual da aplicação. Comunica com todos os demais componentes, monitorizando e coordenando as actividades gerais e proporcionando ao usuário uma interface de comando, para que este possa interferir no sistema quando desejado. Para realizar estas tarefas é necessário um hardware adequado, que cumpra os requisitos da aplicação e principalmente software para inserir a parte inteligente, que garante a autonomia do sistema.

O hardware do sistema processador trata-se de um computador (um elemento processador e memória) e em muitos casos ainda uma placa de aquisição de imagens, responsável pela digitalização dos dados vindos do sensor óptico. A placa de aquisição pode ser dispensada quando o sinal que provém das câmaras já se encontra digitalizado. O elemento processador não é o único responsável pelo processamento dos dados provindos das câmaras, sendo comum, desejável e as vezes até mesmo indispensável que a própria placa de aquisição se responsabilize por parte do processamento, principalmente em aplicações com curtos requisitos temporais, permitindo assim que o elemento processador concentre esforços em tarefas mais custosas e na tomada de decisões.

Depois de descrito todo o sistema de visão computacional é essencial referir como se deve escolher o **sistema óptico** adequado para a aquisição da imagem desejada.

3.4. SISTEMA ÓPTICO ^[16]

Para se obter sucesso na implementação de uma aplicação de visão, deve-se ter muito cuidado na escolha do *hardware* de cada componente do sistema. Uma regra básica para que se possam escolher bons algoritmos de processamento de imagens e alcançar bons resultados na interpretação das informações são ter como entrada do sistema uma imagem de boa qualidade. Ou seja, a etapa de aquisição de imagem deve ser bem configurada, o que implica a escolha correcta e precisa do *hardware* do sistema de visão. Erros na configuração destes equipamentos, como por exemplo, obtenção de imagens escuras ou com sombras perturbadoras, foco inapropriado, ampliação insuficiente, tempo de aquisição impróprio e demasiados ruídos podem inviabilizar a implementação da aplicação.

Alguns parâmetros de um sistema de visão computacional são essenciais para que se possa especificar o *hardware* de qualquer parte do sistema, exercendo normalmente maior influência sobre a configuração do sistema óptico. Estes parâmetros são ditos **parâmetros fundamentais**, sendo necessária a familiarização com os mesmos antes de se iniciar um projecto.

A figura 29 ilustra estes parâmetros.



Figura 29 Parâmetros fundamentais para definição de um sistema óptico

Campo de Visão (*Field of Vision – FOV*): representa a área visível do objecto em estudo que incide sobre o sensor, ou seja, a porção do objecto que preenche e sensibiliza a área do sensor.

Distância de Trabalho (*Working Distance – WD*): representa a distância da parte frontal das lentes até a superfície do objecto. Trata-se normalmente de uma faixa de valores (máximo e mínimo).

Resolução (*Resolution – R*): representa a menor porção do objecto em estudo que pode ser distinguida pelo sistema. É normalmente visualizada em pares de linha, ou em número de pixels, e também é bem conhecida pela expressão “resolução espacial”.

Profundidade de Campo (*Depth of Field – DOF*): representa a maior distância (em termos de profundidade no campo de visão) que pode ser mantida em foco no objecto em estudo para uma determinada distância de trabalho. Também pode ser vista como a quantidade de movimento permitida ao objecto que ainda conserve foco na área ou superfície inspecionada.

Tamanho do Sensor (*Sensor Size – SS*): representa o tamanho da área activa do sensor, especificada na sua dimensão horizontal.

Desta forma o primeiro passo para o projecto de um sistema de visão é a identificação destes parâmetros fundamentais na aplicação, que permitem inferir a respeito dos demais dispositivos necessários ao sistema. A figura 30 apresenta uma metodologia sistemática para o projecto de um sistema de visão do ponto de vista do *hardware* do sistema.

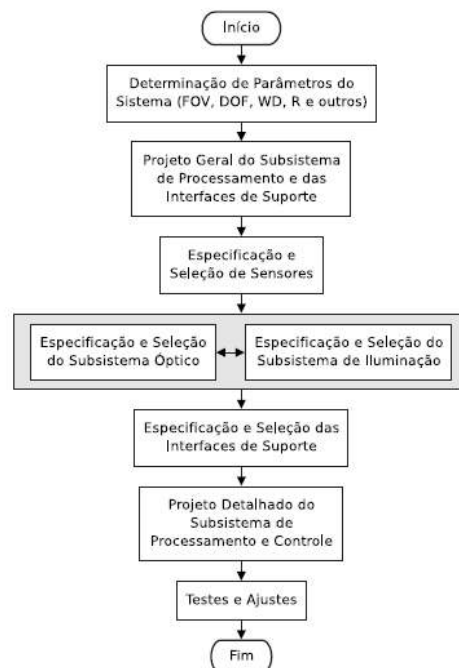


Figura 30 Parâmetros fundamentais para definição de um sistema óptico

Nota-se no diagrama que o projecto inicia sempre com a identificação dos parâmetros fundamentais para a boa formação das imagens (*FOV*, *DOF*, *WD*, *R*, *SS* e derivados). Na sequência, um pré-projecto do sistema de processamento pode ser inferido, de acordo com as restrições temporais da aplicação. Em geral nesta fase já foram adquiridas algumas imagens do objecto de estudo, e pode-se tentar inferir soluções preliminares para o processamento destas.

Deve ser escolhido um sensor para aquisição das imagens, levando em conta o tipo de varrimento, taxa de aquisição e resolução necessárias para atacar o problema. O conjunto óptico e de iluminação devem ser ajustados a seguir, para permitir uma boa focagem, foco e destaque para o objecto em estudo na imagem. Em geral a escolha de ambos os sistemas é feita de maneira paralela pela forte ligação de algumas características das lentes e a quantidade de luminosidade que afecta o sistema.

No final, fixa-se a definição do conjunto de interfaces de suporte, transmissão e processamento de dados, sendo possível a realização de testes e a elaboração de uma estratégia mais profunda em relação ao processamento das imagens para a extracção das características desejáveis.

3.5. APLICAÇÕES^[20]

As áreas de sistemas de visão e processamento de imagens são muito extensas e baseiam-se em diversas áreas do conhecimento, o que lhes garante grande flexibilidade de soluções e aplicações em diferentes meios. Inúmeras áreas de aplicação podem ser mencionadas:

Controlo de Qualidade: rígida monitorização de características particulares de produtos industriais, procurando evitar o contacto de produtos defeituosos com o mercado consumidor.

Exemplos: verificação de números de lote, rótulos, referências e datas de validade em embalagens, inspecção de placas de circuito impresso, inspecção de ampolas e comprimidos.

Controlo de Processos Industriais: manipulação de peças em linhas industriais e monitorização de parâmetros fundamentais para o bom desempenho de processos industriais, visando realimentar o sistema corrigindo estes parâmetros quando necessário.

Exemplos: alinhamento de peças em linhas de montagem de automóveis, orientação de robôs de solda, pintura ou manipuladores, monitorização de parâmetros de corte em processos de maquinagem.

Rastreabilidade: localização e reconhecimento de informações codificadas sobre a trajetória de produtos.

Exemplos: leitura de códigos de barras, localização e leitura de códigos bidimensionais em linhas de montagem, identificação de toros na indústria madeireira.

Segurança: certificação de permissões e monitorização de ambientes.

Exemplos: inspeção de bagagens por raios-X, reconhecimento de íris e impressões digitais, leitura de placas de automóveis, monitorização inteligente de ambientes por detecção de movimento.

Geografia e Meteorologia: análise de imagens de satélite.

Exemplos: previsões meteorológicas e fenómenos naturais, inspeção de áreas de preservação ambiental, medições de áreas territoriais.

Astronomia: análise de imagens espaciais.

Exemplos: análise da composição física de estrelas, cometas e planetas, criação do modelo de constelações e galáxias.

Militar: inspeção de ambientes em condições desfavoráveis ao olho humano.

Exemplos: módulos ópticos de visualização noturna baseados em imagens de calor.

Controlo de Tráfego: análise e controlo de tráfego rodoviário para manter um fluxo normal de automóveis.

Exemplos: controlo de redes de semáforos, criação de desvios inteligentes e informações de alerta em auto-estradas através da análise do fluxo automóvel.

Análise de Imagens Médicas: auxílio na identificação de diagnósticos de doenças.

Exemplos: tomografia cerebral, inspeção da estrutura óssea por raios-X, controle do crescimento e saúde de bebês, sondas para análise interna de órgãos do corpo humano.

Escritório e Lazer: dispositivos e sistemas para ampliar a comunicação e armazenamento de informações.

Exemplos: videoconferências, controle de sistemas computacionais para deficientes físicos.

A figura 31 ilustra exemplos de aplicação em cada uma das áreas previamente citadas.

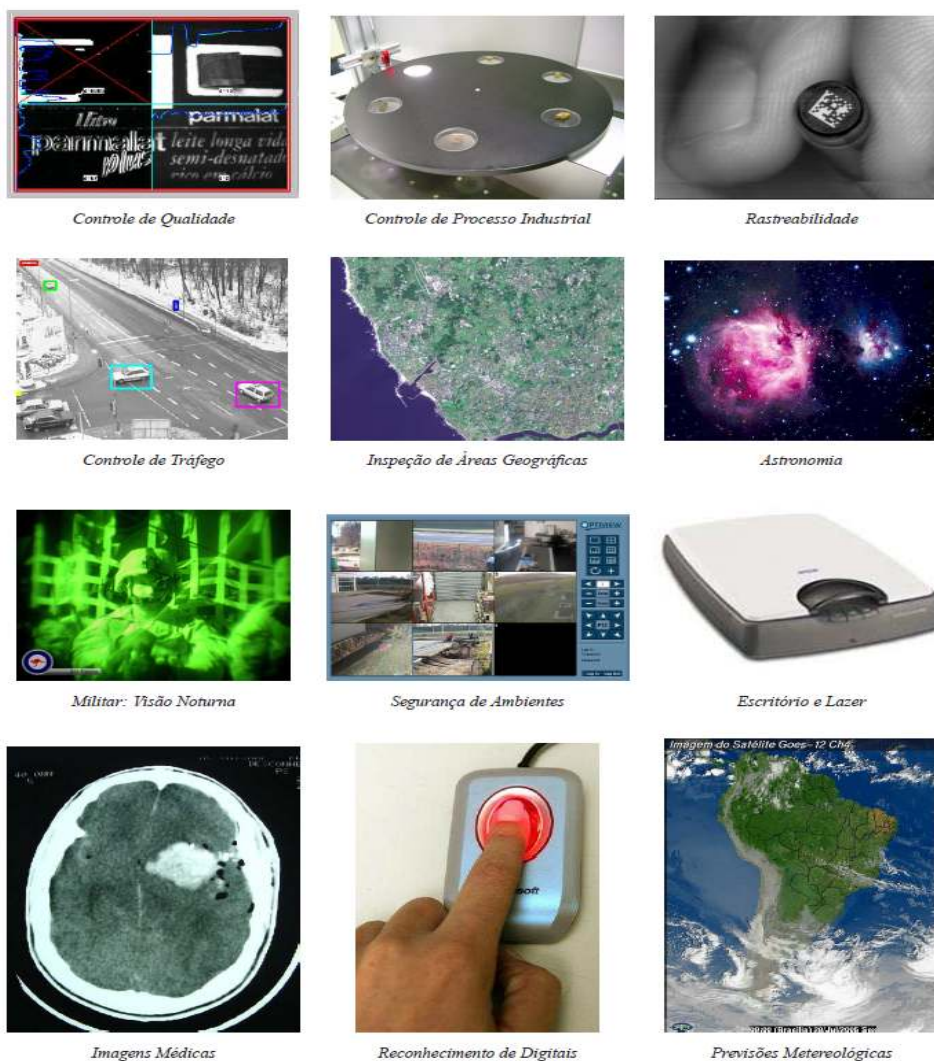


Figura 31 Diversas áreas de aplicação das tecnologias de visão computacional e processamento de imagens

4. PROCEDIMENTOS PARA CALIBRAÇÃO DE ROSCADOS DE EXTERIOR

Foram elaborados dois procedimentos independentes para calibração de roscados de exterior. Para que se possa proceder à comparação entre ambos.

No primeiro procedimento descrito na sub-secção 4.1., a calibração é efectuada utilizando como sistema de calibração a máquina universal SIP. Actualmente a calibração é efectuada segundo este procedimento.

No segundo procedimento descrito na sub-secção 4.2., a calibração é efectuada utilizando um sistema de visão computacional, em que a imagem é adquirida em tempo real, e de seguida processada, de forma a que se obtenham os valores desejados automaticamente.

Ambos os procedimentos se encontram de acordo com as normas existentes para os roscados.

O objectivo de se efectuar a calibração de roscados de exteriores é obter as características que o caracterizam (ver figura 32), que são:

⇒ **Diâmetro exterior, d** : é o diâmetro do cilindro que se descreve em torno da superfície roscada, isto é, é a distância (medida perpendicularmente ao eixo da rosca) entre a crista do filete e a crista do filete oposto.

⇒ **Diâmetro efectivo, d_2** : é o diâmetro do cilindro imaginário, coaxial com a rosca, cujas geratrizes ficam divididas em porções de comprimento igual pelos filetes do perfil da rosca, isto é, é a distância (medida perpendicularmente ao eixo da rosca) entre a meia altura perfeita de dois filetes opostos.

Exemplo: Considerando um roscado que possua rosca triangular para que o filete fosse perfeito, a sua crista teria que terminar num pico. Como na realidade isso não acontece, esse pico tem que ser imaginado para que se possa retirar a meia altura necessária para se obter o diâmetro efectivo.

⇒ **Passo, P** : é a distância entre dois filetes vizinhos que se encontram sobre a mesma geratriz do cilindro roscado e medidos ao longo do eixo da rosca, isto é, é a distância entre a crista de um filete e a crista do filete seguinte.

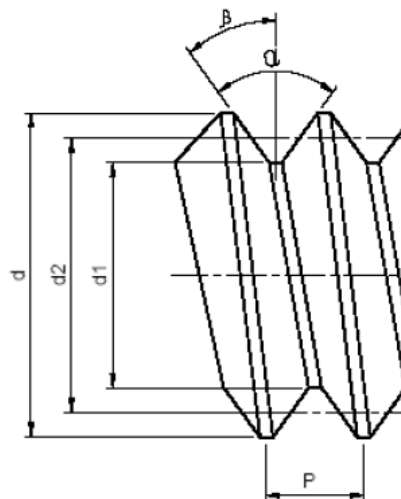


Figura 32 Características de um roscado de exteriores

Ao longo do relatório irão sendo dados exemplos, todos eles são referentes a um tampão roscado gás 3/8, incluindo os exemplos do procedimento de visão computacional.

4.1. PROCEDIMENTO UTILIZANDO A MÁQUINA UNIVERSAL SIP

4.1.1. PREPARAÇÃO DO EQUIPAMENTO

- ✎ Efectuar a limpeza de todo o equipamento a utilizar na calibração;
- ✎ Deixar o roscado junto ao equipamento padrão para a estabilização da temperatura;
- ✎ Inicializar a máquina SIP e o comparador electrónico;
- ✎ Utilizar luvas em todo o manuseamento do equipamento.

4.1.2. MEDIÇÃO DO DIÂMETRO EXTERIOR E DO DIÂMETRO EFECTIVO

O primeiro passo é saber como escolher as cavilhas utilizadas na calibração.

A escolha do diâmetro da cavilha (d_D) para a medição do diâmetro efectivo faz-se em função do passo e do ângulo do filete da rosca. Os valores para algumas roscas encontram-se nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 Equações para os cálculos dos diâmetros das cavilhas

Tipo de Rosca	$\varnothing_{nominal}$	$\varnothing_{máx}$	$\varnothing_{mín}$
60° Métrica ou Unificada	0,57735 . P	0,61343 . P	0,54126 . P
55° Whitworth	0,56369 . P	0,59892 . P	0,52846 . P
47° 30' B.A.	0,54626 . P	0,58040 . P	0,51212 . P
30° Trapezoidal	0,51764 . P	0,54999 . P	0,48528 . P
29° ACME	0,51645 . P	0,54873 . P	0,48417 . P

Tabela 4 Passo das roscas em função dos diâmetros padronizados das cavilhas

Diâmetro do Arame \varnothing em mm	Rosca Métrica Passo em mm	Rosca Unificada Passo em fios por polegada	Rosca Whitworth passo fios por polegada	Rosca B.A. Passo em mm	Rosca trapezoidal Passo em mm	Rosca ACME Passo fios por polegada
0,17	0,3		80	0,31		
0,195	0,35	80 – 72	72	0,35		
0,22	0,4	64	64	0,39 – 0,43		
0,25	0,45	56	56	0,48		
0,29	0,5	48	48	0,53		
0,335	0,6	44	44 – 40	0,59 – 0,66		
0,39	0,7	40 – 36	36	0,73		
0,455	0,75 – 0,8	32	32	0,81 – 0,90		
0,53	1,0	28 – 27	28 – 26	1,00		
0,62	1,0	24	24 – 22			
0,725	1,25	20	20 – 19 – 18			
0,895	1,5	18 – 16	16			16 – 14
1,10	1,75 – 2,0	14 – 13 – 12	14 – 13 – 12			12
1,35	2,5	11,5 – 11 – 10	11 – 10			10
1,65	3,0	9 – 8	9 – 8		3	8
2,05	3,5	7	7		4	6
2,55	4,0 – 4,5	6	6		5	5
3,20	5,0 – 5,5	5 – 4,5	5 – 4,5		6	4

Obtém-se o diâmetro das cavilhas normalizadas que seriam as indicadas para os vários passos das diferentes roscas.

Porém caso seja necessário efectuar o seu cálculo deve-se considerar:

$$d_D = \frac{P}{2 \times \cos(\alpha/2)} \text{ (mm)} , \quad (1)$$

$$d_{Dm\acute{a}x} = \frac{17 \times P}{32 \times \cos(\alpha/2)} \text{ (mm)} , \quad (2)$$

$$d_{Dmin} = \frac{15 \times P}{32 \times \cos(\alpha/2)} \text{ (mm)} , \quad (3)$$

Sendo:

d_D → Diâmetro nominal das cavilhas

$d_{Dm\acute{a}x}$ → Valor máximo admissível para o diâmetro das cavilhas

d_{Dmin} → Valor mínimo admissível para o diâmetro das cavilhas

O valor do diâmetro nominal da cavilha deve-se encontrar entre os valores admissíveis. Verificar se existe nos conjuntos das cavilhas o diâmetro desejado, se não existir, utilizar o diâmetro mais próximo do intervalo determinado anteriormente.



Figura 33 Caixa de cavilhas

Após separar o conjunto de 3 cavilhas, que serão usadas na medição do diâmetro efectivo, deve-se fazer uma medição de cada cavilha para verificar se não existiu alguma troca, anotar os valores obtidos e calcular a sua média. A diferença entre o maior diâmetro obtido e o menor, das 3 cavilhas, não deve ser superior a 0,002 mm.

O método utilizado na calibração é o conhecido método das três cavilhas.

Este método consiste em colocar 3 cavilhas cilíndricas, com a mesma dimensão nominal, entre o fundo dos flancos da rosca, colocando duas de um lado (em fundos consecutivos) e uma do lado oposto em posição intermédia, de modo que o centro dessa cavilha se situe entre os centros das cavilhas opostas, conforme a Figura 34.

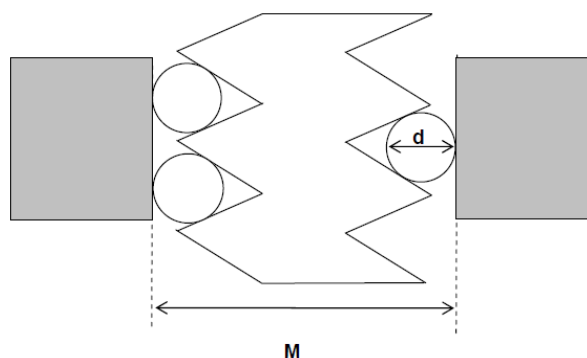


Figura 34 Método das três cavilhas (d →diâmetro da cavilha, M →valor medido com a SIP)

Depois de se conhecer o método das três cavilhas e de se saber quais as cavilhas a utilizar, procede-se à continuação da calibração.

☞ Efectuar a montagem da mesa universal na SIP;

☞ Regular a força com que a SIP vai efectuar as medições

Nota: Na calibração efectuada foi utilizada uma força de 1,5 N.

☞ Colocar o tampão liso padrão para alinhar correctamente a mesa e para “zerar” a SIP;

“Zerar”, isto é, ao se colocar o tampão liso padrão regista-se o seu valor de certificado, para que a SIP considere essa medição como o valor do certificado do tampão padrão.

Exemplo: Na calibração efectuada o valor do certificado do tampão liso padrão utilizado é de 49,9895 mm, e foi este valor que foi registado na SIP.



Figura 35 Tampão liso padrão

O tampão roscado utilizado possui dois lados diferentes, o passa e o não passa. Normalmente o lado não passa está assinalado de alguma forma para se distinguir. Neste caso só se irá descrever o procedimento relativamente ao lado passa, pois o procedimento utilizado para o lado não passa, é exactamente igual.



Figura 36 Tampão Roscado

☞ Depois de se ter colocado o tampão liso padrão e de se ter efectuado o “zero” à SIP, coloca-se o tampão liso padrão juntamente com as cavilhas e efectua-se a medição;



Figura 37 Tampão padrão com as cavilhas

As cavilhas utilizadas variam consoante o tipo de roscado e a dimensão do seu passo, tal como referido anteriormente.

✍ Colocar o tampão roscado a calibrar, encostar os apalpadores da SIP e registar a leitura;



Figura 38 Tampão roscado a calibrar

✍ Colocar as cavilhas no fundo de um filete. Ter atenção à posição das cavilhas descrito anteriormente no método das 3 cavilhas;



Figura 39 Tampão roscado a calibrar com as cavilhas

- ✍ Rodar o tampão roscado a calibrar num ângulo de 60° e voltar a repetir as medições;
- ✍ Efectuar as medições três vezes, com e sem cavilhas;
- ✍ Voltar a colocar o tampão liso padrão, para se confirmar o valor de referência;
- ✍ Voltar a colocar as cavilhas no tampão liso padrão e registar as leituras.

Nota: O diâmetro efectivo é obtido com o tratamento da medição efectuada com as cavilhas, o diâmetro exterior é o diâmetro medido sem as cavilhas.

4.2.3. MEDIÇÃO DO PASSO

- ✍ Desmontar a mesa universal;
- ✍ Trocar os apalpadores da SIP;

Tal como nas cavilhas os apalpadores para a medição do passo variam consoante o valor nominal do passo para o respectivo tampão roscado.



Figura 40 Comparador Electrónico

- ✍ Colocar o apalpador na primeira crista do filete existente no tampão roscado a calibrar, nesse ponto colocar a SIP a zero;

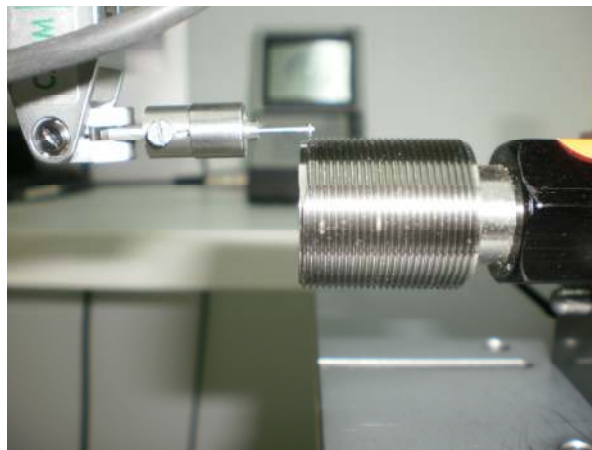


Figura 41 Medição do passo

- ✍ Efectuar três medições nos três fundos dos filetes seguintes, e registar essas medições;

As medições no comparador electrónico são efectuadas através dos pontos de viragem, isto é, da inversão do sentido.

4.2.4. MODELO MATEMÁTICO

Na calibração de tampões roscados são necessários quatro modelos matemáticos, três referentes aos valores nominais e um referente à medição do diâmetro efectivo.

As normas existentes não tabelam directamente as suas características nominais, por esta razão têm que se aplicar expressões matemáticas. Consoante o tipo de roscado escolhe-se a norma de calibração, e cada norma identifica como se calculam os valores nominais necessários. Neste relatório, serão dados dois exemplos: para tampões roscados métricos segundo a norma ISO 1502^[25] e para tampões de gás segundo a norma ISO 228^{[26][27]}.

1) Modelo matemático para o diâmetro exterior nominal

Para tampões roscados métricos:

De acordo com a tabela 5 as equações para o cálculo do diâmetro exterior nominal são:

$$\text{Para o passa: } d_{ext} = d + EI + Z_{PL} \text{ (mm)}, \quad (4)$$

$$\text{Para o não passa: } d_{ext} = d_2 + EI + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} + 2 \times F_1 \text{ (mm)}, \quad (5)$$

Sendo:

d_{ext} → Diâmetro exterior nominal;

d → Diâmetro exterior inscrito no tampão roscado;

EI → Desvio fundamental de uma rosca interna de uma peça;

Z_{PL} → Distância entre o centro da tolerância T_{PL} do lado passa do tampão roscado e do limite menor da rosca da peça;

T_{PL} → Tolerância para o diâmetro efectivo de um tampão roscado (passa e não passa);

T_{D2} → Tolerância para d_2 ;

F_1 → Parâmetro definido através da seguinte equação:

$$F_1 = 0,1 \times P \text{ (mm)}, \quad (6)$$

Tabela 5 Equações para tampões roscados de exterior^[25]

Type of gauge	Thread profile according to figure	Limits of gauge thread				Minor diameter or clearing diameter
		Major diameter		Pitch diameter		
		Theoretical size	Tolerance	Theoretical size	Tolerance	
GO screw plug gauge	5	$D + EI + Z_{PL}$	$\pm T_{PL}$	$D_2 + EI + Z_{PL}$	$\pm T_{PL}/2$	max. size = $D_1 + EI - \frac{H}{6}$ with clearance groove b_2 or radius
NOT GO screw plug gauge	7	$D_2 + EI + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} + 2F_1$	$\pm T_{PL}$	$D_2 + EI + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2}$	$\pm T_{PL}/2$	max. size = $D_1 + EI - \frac{H}{6}$ with clearance groove b_3 or radius
<p>NOTES</p> <p>1 Wear limit for the pitch diameter of a GO screw plug gauge: $D_2 + EI + Z_{PL} - W_{GO}$</p> <p>2 Wear limit for the pitch diameter of a NOT GO screw, plug gauge: $D_2 + EI + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} - W_{NG}$</p>						

De salientar que um tampão roscado possui rosca externa, mas como a sua função é ser um calibre para uma peça com rosca interna, as normas vêm referenciadas pelas roscas das peças. Daí o EI ser um desvio da rosca interna, pois o tampão como é utilizado como um calibre funciona como rosca interna.

O Z_{PL} e o T_{PL} obtêm-se através da tabela 6, mas para isso é necessário recorrer à norma NP ISO 965-1^[28] para se obter T_{D2} :

$$T_{D2} = 90 \times P^{0,4} \times d^{0,1} (\mu\text{m}), \quad (7)$$

Sendo:

$P \rightarrow$ Passo nominal expresso em milímetros (mm);

$d \rightarrow$ Diâmetro exterior inscrito no tampão roscado expresso em milímetros (mm).

Tabela 6 Tolerâncias e valores para cálculos, valores em μm ^[25]

T_{D2} or T_{D2}		T_R	T_{PL}	T_{CP}	m	Z_R ¹⁾	Z_{PL}
over	up to and incl.						
—	50	8	6	6	10	-4	0
50	80	10	7	7	12	-2	2
80	125	14	9	8	15	2	6
125	200	18	11	9	18	8	12
200	315	23	14	12	22	12	16
315	500	30	18	15	27	20	24
500	670	38	22	18	33	28	32

1) The values for Z_R are to be inserted into table 10 taking into consideration the sign; i.e. the use of the minus values in the formula given in table 10 results in plus values. Minus values for Z_R mean that Z_R is situated outside of the tolerance T_{D2} (see figure 1).

Para tampões roscados de gás:

De acordo com a figura 42 as equações para o cálculo do diâmetro exterior nominal são:

$$\text{Para o passa: } d_{ext} = d + \frac{T_{PL}}{2} \text{ (mm)}, \tag{8}$$

$$\text{Para o não passa: } d_{ext} = d_2 + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} + 0,2 \times P \text{ (mm)}, \tag{9}$$

Todas as variáveis já foram descritas anteriormente.

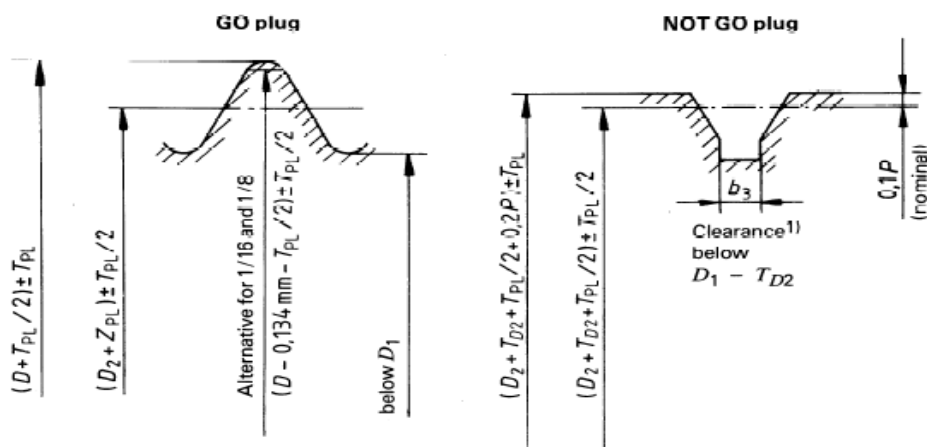


Figura 42 Equações para o diâmetro exterior e diâmetro efectivo, passa e não passa ^[27]

A equação utilizada para o cálculo de d_2 de acordo com a norma NP EN ISO 228-1^[26] é:

$$d_2 = d - 0,640327 \times P \text{ (mm)} , \quad (10)$$

Sabendo a dimensão do tampão roscado (gravada no mesmo) através da tabela 7 obtem-se directamente o passo (P) e o T_{D_2} , e através da tabela 8 obtem-se o T_{PL} .

Tabela 7 Dimensão das roscas em milímetros^[26]

Dimensão da rosca	Número de filetes em 25,4mm	Passo P	Altura da Rosca h	Diâmetros			Tolerâncias no diâmetro médio ^{a)}					Tolerância no diâmetro menor		Tolerância no diâmetro maior	
				Maior $d=D$	Médio $d_2=D_2$	Menor $d_1=D_1$	Rosca interior		Rosca exterior			Rosca interior		Rosca exterior	
							T_{D_2}		T_{d_2}			T_{D_1}		T_d	
				Desvio inferior	Desvio superior	Desvio inferior	Desvio inferior	Desvio superior	Desvio inferior	Desvio superior	Desvio inferior	Desvio superior	Desvio inferior	Desvio superior	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1/16	28	0,907	0,581	7,723	7,142	6,561	0	+ 0,107	- 0,107	- 0,214	0	0	+ 0,282	- 0,214	0
1/8	28	0,907	0,581	9,728	9,147	8,566	0	+ 0,107	- 0,107	- 0,214	0	0	+ 0,282	- 0,214	0
1/4	19	1,337	0,856	13,157	12,301	11,445	0	+ 0,125	- 0,125	- 0,250	0	0	+ 0,445	- 0,250	0
3/8	19	1,337	0,856	16,662	15,806	14,950	0	+ 0,125	- 0,125	- 0,250	0	0	+ 0,445	- 0,250	0
1/2	14	1,814	1,162	20,955	19,793	18,631	0	+ 0,142	- 0,142	- 0,284	0	0	+ 0,541	- 0,284	0
5/8	14	1,814	1,162	22,911	21,749	20,587	0	+ 0,142	- 0,142	- 0,284	0	0	+ 0,541	- 0,284	0
3/4	14	1,814	1,162	26,441	25,279	24,117	0	+ 0,142	- 0,142	- 0,284	0	0	+ 0,541	- 0,284	0
7/8	14	1,814	1,162	30,201	29,039	27,877	0	+ 0,142	- 0,142	- 0,284	0	0	+ 0,541	- 0,284	0
1	11	2,309	1,479	33,249	31,770	30,291	0	+ 0,180	- 0,180	- 0,360	0	0	+ 0,640	- 0,360	0
1 1/8	11	2,309	1,479	37,897	36,418	34,939	0	+ 0,180	- 0,180	- 0,360	0	0	+ 0,640	- 0,360	0
1 1/4	11	2,309	1,479	41,910	40,431	38,952	0	+ 0,180	- 0,180	- 0,360	0	0	+ 0,640	- 0,360	0
1 1/2	11	2,309	1,479	47,803	46,324	44,845	0	+ 0,180	- 0,180	- 0,360	0	0	+ 0,640	- 0,360	0
1 3/4	11	2,309	1,479	53,746	52,267	50,788	0	+ 0,180	- 0,180	- 0,360	0	0	+ 0,640	- 0,360	0
2	11	2,309	1,479	59,614	58,135	56,656	0	+ 0,180	- 0,180	- 0,360	0	0	+ 0,640	- 0,360	0
2 1/4	11	2,309	1,479	65,710	64,231	62,752	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
2 1/2	11	2,309	1,479	75,184	73,705	72,226	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
2 3/4	11	2,309	1,479	81,534	80,055	78,576	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
3	11	2,309	1,479	87,884	86,405	84,926	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
3 1/2	11	2,309	1,479	100,330	98,851	97,372	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
4	11	2,309	1,479	113,030	111,551	110,072	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
4 1/2	11	2,309	1,479	125,730	124,251	122,772	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
5	11	2,309	1,479	138,430	136,951	135,472	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
5 1/2	11	2,309	1,479	151,130	149,651	148,172	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0
6	11	2,309	1,479	163,830	162,351	160,872	0	+ 0,217	- 0,217	- 0,434	0	0	+ 0,640	- 0,434	0

^{a)} Nas partes com parede fina, as tolerâncias são aplicáveis à média do diâmetro médio, definida como a média aritmética de dois diâmetros médios medidos com ângulos rectos entre eles (ortogonalmente).

Tabela 8 Tolerâncias e valores para os cálculos em micrometros ^[27]

Designation	T_{d2}	T_R	T_{PL}	T_{CP}	m	Z_R	W_{NG}	W_{GO}
1/16 and 1/8	107	16	10	10	17	2	13	18
1/4 and 3/8	125	16	10	10	17	2	13	18
1/2 to 7/8	142	20	12	10	20	9	17	23
1 to 2	180	20	12	10	20	9	17	23
2 1/4 to 4	217	26	16	14	24	13	21	28
4 1/2 to 6	217	26	16	14	24	13	21	28

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Para o lado passa:

Utilizando a equação (8), temos:

$$d_{ext} = d + \frac{T_{PL}}{2} \text{ (mm)} , \quad (8)$$

Sendo:

$d = 16,662$ mm (tabela 7);

$T_{PL} = 10$ μ m (tabela 8).

Assim temos:

$$d_{ext} = 16,662 + \frac{0,010}{2} = 16,667 \text{ mm} \quad (11)$$

Para o lado não passa:

Utilizando a equação (9), temos:

$$d_{ext} = d_2 + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} + 0,2 \times P \text{ (mm)} , \quad (9)$$

Sendo:

$T_{D2} = +0,125$ mm (tabela 7);

$T_{PL} = 10$ μ m (tabela 8);

$d = 16,662$ mm (tabela 7);

$P = 1,337$ mm (tabela 7);

d_2 é calculado de acordo com a equação (10):

$$d_2 = 16,662 - 0,640327 \times 1,337 = 15,8059 \text{ mm} , \quad (12)$$

Assim temos:

$$d_{ext} = 15,8059 + 0,125 + \frac{0,010}{2} + 0,2 \times 1,337 = 16,203 \text{ mm} \quad (13)$$

2) Modelo matemático para o passo nominal

Para tampões roscados métricos:

O passo nominal está inscrito no próprio tampão roscado.

Exemplo: M24×1 6H, quer dizer que o passo é de 1 mm.

Para tampões roscados de gás:

Sabendo a dimensão do roscado que se encontra inscrita no próprio, obtém-se o passo nominal usando a tabela 7.

Exemplo: Tampão roscado 3/8, corresponde a um passo nominal de 1,337 mm.

3) Modelo matemático para o diâmetro efectivo nominal

Para tampões roscados métricos:

De acordo com a tabela 5 referida anteriormente as equações para o cálculo do diâmetro efectivo nominal são:

$$\text{Para o passa: } d_{ef} = d_2 + EI + Z_{PL} \text{ (mm)} , \quad (14)$$

$$\text{Para o não passa: } d_{ef} = d_2 + EI + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} \text{ (mm)} , \quad (15)$$

Sendo:

d_{ef} → Diâmetro efectivo nominal;

d_2 → Diâmetro efectivo da rosca da peça, isto é, diâmetro efectivo da peça à qual o tampão roscado irá fazer de calibre;

EI → Desvio fundamental de uma rosca interna de uma peça;

Z_{PL} → Distância entre o centro da tolerância T_{PL} do lado passa do tampão roscado e do limite menor da rosca da peça;

T_{PL} → Tolerância para o diâmetro efectivo de um tampão roscado (passa e não passa);

T_{D2} → Tolerância para d_2 ;

De acordo com a norma ISO 724^[30] d_2 é calculado através da seguinte equação:

$$d_2 = d - 0,6495 \times P \text{ (mm) } , \quad (16)$$

Sendo, tal como referido anteriormente:

d → Diâmetro exterior inscrito no tampão roscado expresso em milímetros (mm);

P → Passo inscrito no tampão roscado expresso em milímetros (mm).

As restantes variáveis (EI , Z_{PL} , T_{PL} e T_{D2}) já foram descritas anteriormente, na explicação do cálculo do diâmetro exterior nominal.

É necessário saber também o valor de W_{GO} e W_{NG} , para que se possam calcular as tolerâncias correspondentes, como se pode verificar nas notas da tabela 5.

Sabendo T_{D2} , através da tabela 9 obtém-se W_{GO} e W_{NG} directamente.

Tabela 9 Tolerância admitida do diâmetro efectivo de tampões roscados e de anéis roscados (passa e não passa)

T_{d2} or T_{D2}		W_{GO}		W_{NG}	
over	up to and incl.	GO screw ring gauge	GO screw plug gauge	NOT GO screw ring gauge	NOT GO screw plug gauge
—	50	10	8	7	6
50	80	12	9,5	9	7,5
80	125	16	12,5	12	9,5
125	200	21	17,5	15	11,5
200	315	25,5	21	19,5	15
315	500	33	27	25	19
500	670	41	33	31	23

Para tampões roscados de gás:

De acordo com a figura 42 as equações para o cálculo do diâmetro efectivo nominal são:

$$\text{Para o passa: } d_{ef} = d_2 + Z_{PL} \text{ (mm) ,} \quad (16)$$

$$\text{Para o não passa: } d_{ef} = d_2 + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} \text{ (mm) ,} \quad (17)$$

Sendo,

Z_{PL} → Distância entre o centro da tolerância T_{PL} do lado passa do tampão roscado e do limite menor da rosca da peça.

Sabendo a designação do roscado através da tabela 10 obtem-se Z_{PL} directamente.

Tabela 10 Designação para roscas internas em micrometros (μm)^[27]

Designation	T_{D2}	Z_{PL}	T_{PL}	W_{NG}	W_{GO}
1/16 and 1/8*	107	8	10	10	14
1/4 and 3/8	125	8	10	10	14
1/2 to 7/8	142	13	12	13	19
1 to 2	180	13	12	13	19
2 1/4 to 4	217	18	16	17	23
4 1/2 to 6	217	18	16	17	23

* For 1/16 and 1/8 GO plugs, a profile is permitted without a radius with an external diameter, in millimetres, truncated to

$$(D - 0,134 - T_{PL}/2) \pm T_{PL}/2 = D - 0,139 \pm 0,005$$

As restantes variáveis (d_2 , T_{PL} e T_{D2}) já foram descritas anteriormente, na explicação do cálculo do diâmetro exterior nominal.

É necessário saber também o valor de W_{GO} e W_{NG} , para que se possam calcular as tolerâncias correspondentes. Sabendo T_{D2} , através da tabela 7 obtem-se W_{GO} e W_{NG} directamente através da tabela 8.

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Para o lado passa:

Utilizando a equação (16), temos:

$$d_{ef} = d_2 + Z_{PL} \text{ (mm)} , \quad (16)$$

Sendo:

$$T_{PL} = 10 \text{ } \mu\text{m (tabela 8);}$$

$$d = 16,662 \text{ mm (tabela 7);}$$

$$P = 1,337 \text{ mm (tabela 7);}$$

$$d_2 = 15,8059 \text{ mm (de acordo com a equação (10));}$$

$$Z_{PL} = 8 \text{ } \mu\text{m (tabela 8).}$$

Assim temos:

$$d_{ef} = 15,8059 + 0,008 = 15,8139 \text{ mm} \quad (18)$$

Para o lado não passa:

Utilizando a equação (17), temos:

$$d_{ef} = d_2 + T_{D2} + \frac{T_{PL}}{2} \text{ (mm)} , \quad (17)$$

Sendo:

$$d_2 = 15,8059 \text{ mm (de acordo com a equação (10));}$$

$$T_{D2} = +0,125 \text{ mm (tabela 7),}$$

$$T_{PL} = 10 \text{ } \mu\text{m (tabela 8).}$$

Assim temos:

$$d_{ef} = 15,8059 + 0,125 + \frac{0,010}{2} = 15,9359 \text{ (mm)} \quad (19)$$

4) Modelo matemático para o diâmetro efectivo medido

Para se obter o diâmetro efectivo de um roscado de exteriores, com o auxílio da SIP, é necessário o uso de cavilhas. Assim, a SIP irá efectuar a medição do roscado e das três cavilhas em simultâneo. Como se quer obter unicamente o diâmetro efectivo é necessário aplicar a seguinte fórmula matemática de acordo com o documento da EURAMET^[31] e do NPL^[32]:

$$d_2 = \Delta L - d_D - d_D \times \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{P}{2} \times \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A_1 + A_2 \text{ (mm)}, \quad (20)$$

Sendo:

d_2 → Diâmetro efectivo;

ΔL → Medição obtida pela SIP, com as cavilhas;

d_D → Diâmetro médio das cavilhas utilizadas na calibração;

α → Ângulo do flanco;

P → Passo do tampão roscado;

A_1 → Correção devido à inclinação da hélice da rosca;

A_2 → Correção devido à força utilizada na calibração, força que os apalpadores exercem sobre o tampão roscado.

A equação anterior (20), aplica-se para medições de diâmetros efectivos utilizando cavilhas (contacto esférico ou cilíndrico) e 2 ou 3 pontos de medição, sendo conhecido o passo, o ângulo entre filetes e o diâmetro das cavilhas.

Para roscados com $n=1$, isto é com apenas uma entrada, é válida a seguinte aproximação para A_1 :

$$A_1 = \frac{d_D}{2} \times \text{tg}^2 \psi \times \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \times \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) \text{ (mm)}, \text{ com } \text{tg} \psi = \frac{P}{\pi \times d_2}, \quad (21)$$

Sendo:

ψ → Ângulo de inclinação da rosca.

Para se efectuar a correcção A_2 , aplica-se a seguinte equação:

$$A_2 = \sqrt[3]{\frac{9 \times F^2}{8 \times d_D} \times \left(\frac{(1 - \nu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \nu_2^2)}{E_2} \right)}, \quad (22)$$

Sendo:

$F \rightarrow$ Força de medição;

$\nu_i \rightarrow$ Coeficiente de Poisson (aço: 0,28);

$E_i \rightarrow$ Modulo de elasticidade (aço: 2×10^{11} N/m²).

Tal como se pode verificar no appendix 2 do documento da EURAMET^[31] para roscados de exterior com uma entrada ($n=1$), as equações (20), (21) e (22) podem-se aplicar, em situações em que $n \neq 1$ tem que se aplicar a equação de Berndt sem aproximações.

Para detalhes acerca das equações (20), (21) e (22), ver anexo A deste relatório.

Equação de Berndt:

$$d_2 = m \times \cos \theta - d_D \times \frac{\cos\left(\frac{\beta - \gamma}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\beta + \gamma}{2}\right)} \times \sqrt{1 - \frac{m^2 \times \text{sen}^2 \theta}{d_D^2 \times \cos^2\left(\frac{\beta - \gamma}{2}\right)}} + \left(\frac{1}{n} - \frac{2 \times l \times \theta}{\pi}\right) \times \frac{\cos \beta \times \cos \gamma}{\text{sen}(\beta + \gamma)} \text{ (mm)} \quad (23)$$

Sendo:

$m \rightarrow$ Distância entre os centros das cavilhas opostas que tocam no tampão roscado:

$$m = \Delta L - d_D \text{ (mm)} \quad (24)$$

$\theta \rightarrow$ Ângulo auxiliar;

$d_D \rightarrow$ Média do diâmetro das três cavilhas;

β e $\gamma \rightarrow$ Semi-ângulos dos filetes;

$n \rightarrow$ Número de entradas.

$$l = n \times P \text{ (mm)}, \quad (25)$$

Sendo:

$P \rightarrow$ Passo da rosca.

O ângulo auxiliar (θ) é calculado por interação através da seguinte equação:

$$\theta_K = \arcsen \left(\frac{\frac{d_D \times l}{\pi \times m^2} \times \frac{\cos \beta \times \cos \gamma \times \cos\left(\beta - \gamma/2\right)}{\cos\left(\beta + \gamma/2\right)} \times \sqrt{1 - \frac{m^2 \times \text{sen}^2 \theta_{K-1}}{d_D^2 \times \cos^2\left(\beta - \gamma/2\right)}}}{\cos \theta_{K-1} - \text{sen}\left(\beta + \gamma/2\right) \times \cos\left(\beta - \gamma/2\right) \times \frac{d_D}{m} \times \sqrt{1 - \frac{m^2 \times \text{sen}^2 \theta_{K-1}}{d_D^2 \times \cos^2\left(\beta - \gamma/2\right)}}} \right) \quad (26)$$

O cálculo deve ser inicializado com o ângulo θ_l :

$$\theta_1 = \frac{d_D \times l}{\pi \times m^2} \times \frac{\cos \beta \times \cos \gamma \times \cos\left(\beta - \gamma/2\right)}{\cos\left(\beta + \gamma/2\right) \times \left(1 - \text{sen}\left(\beta + \gamma/2\right) \times \cos\left(\beta - \gamma/2\right) \times \frac{d_D}{m}\right)} \quad (27)$$

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Como o cálculo para o diâmetro efectivo medido é exactamente igual para o lado passa e para o lado não passa, só se vai dar como exemplo o lado passa.

Para o lado passa:

$$d_D = 0,8185 \text{ mm};$$

$$\alpha = 55^\circ, \text{ logo } \beta = \gamma = 27,5^\circ = ((27,5 \times \pi)/180) \text{ rad};$$

$$n = 1;$$

$$P = 1,337 \text{ mm};$$

$$l = n \times P = 1 \times 1,337 = 1,337 \text{ mm};$$

$$m = \Delta L - d_D = 17,12551 - 0,8185 = 16,30701 \text{ mm};$$

θ é calculado de acordo com a equação (27):

$$\theta_1 = \frac{0,8185 \times 1,337}{\pi \times 16,30701^2} \times \frac{\cos\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right) \times \cos\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right) \times \cos(0)}{\cos\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right) \times \left(1 - \text{sen}\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right) \times \cos(0) \times \frac{1,337}{16,30701}\right)} =$$

$$= 0,0012076511 \quad (28)$$

Tendo todas as variáveis necessárias pode-se prosseguir para o cálculo de d_2 , de acordo com a equação (23):

$$d_2 = 16,30701 \times \cos(0,0012076511) - 0,8185 \times \frac{\cos(0)}{\text{sen}\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right)} \times \sqrt{1 - \frac{16,30701^2 \times \text{sen}^2 0,0012076511}{0,8185^2 \times \cos^2(0)}} +$$

$$+ \left(\frac{1,337}{1} - \frac{2 \times 1,337 \times 0,0012076511}{\pi}\right) \times \frac{\cos\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right) \times \cos\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right)}{\text{sen}\left(\left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right) + \left(27,5 \times \frac{\pi}{180}\right)\right)} =$$

$$= 15,81809097 \approx 15,818 \text{ mm} \quad (29)$$

4.2.5. ESTUDO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Como são efectuadas três medições distintas ao longo da calibração, também será necessário efectuar três cálculos distintos da incerteza expandida: diâmetro exterior, passo e diâmetro efectivo.

O cálculo da incerteza expandida encontra-se de acordo com o documento EA-04/02^[33] e com o GUM^[34].

1) Diâmetro Exterior

A incerteza expandida da calibração é obtida através da contribuição dos seguintes componentes (tabela 11):

Tabela 11 Fontes de incerteza padrão que contribuem para o diâmetro exterior

Incertezas Padrão	Tipo de distribuição	Graus de liberdade	Designação
Incerteza padrão devida à dispersão de leituras (equipamento a calibrar)	Tipo A	n-1	u_1
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Tampão liso padrão – Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_2
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Tampão liso padrão – Deriva)	Tipo B-R	50	u_3
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (SIP – Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_4
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (SIP – Deriva)	Tipo B-R	50	u_5
Incerteza padrão devida à dilatação térmica (equipamento calibrador)	Tipo B-R	50	u_6
Incerteza padrão devida à temperatura (Incerteza de certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_7
Incerteza padrão devida à temperatura (Deriva)	Tipo B-R	50	u_8
Incerteza padrão devida à temperatura (Variação ao longo da calibração)	Tipo B-R	50	u_9

Consoante o tipo de distribuição as incertezas padrão são calculadas de diferentes formas, neste caso existem três tipos diferentes:

$$\text{Tipo A: } \mu_1 = \sqrt{\frac{s^2}{n}} \text{ (mm)} \quad (30)$$

Sendo:

s → Desvio padrão experimental;

n → Número de leituras efectuadas.

$$\text{Tipo B-N: } \mu_2, \mu_4, \mu_7 = \frac{U}{k} \text{ (mm)}, \quad (31)$$

Sendo:

U → Incerteza do certificado de calibração;

k → Factor de expansão do certificado de calibração correspondente.

$$\text{Tipo B-R: } \mu_3, \mu_5, \mu_6, \mu_8, \mu_9 = \sqrt{\frac{1}{12} \times (a_+ - a_-)^2} \text{ (mm)}, \quad (32)$$

Sendo:

a_- = Limite inferior;

a_+ = Limite superior.

Neste caso os coeficientes de sensibilidade, isto é, as derivadas parciais, são todas igual a 1, à excepção da temperatura.

Como é considerada a influência da dilatação térmica, esta é obtida através da seguinte equação:

$$\text{Dilatação} = d \times \alpha \times (T - 20) \text{ (mm)}, \quad (33)$$

Sendo:

d → Média das leituras efectuadas do diâmetro exterior (mm);

α_{ter} → Coeficiente de expansão térmica referente ao equipamento calibrador;

(Aço: $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)

T → Temperatura durante a qual a calibração foi efectuada.

Conhecida a equação (33), o coeficiente de sensibilidade referente à temperatura é:

$$\left(\frac{\partial d}{\partial T}\right) = d \times \alpha \text{ (mm.K}^{-1}\text{)}, \quad (34)$$

Conhecidas todas as fontes de incerteza padrão, e sabendo como são efectuados os seus cálculos, ir-se-á se proceder à obtenção da incerteza expandida.

A expressão geral para a incerteza combinada é dada através da seguinte equação:

$$\mu(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^9 (u_i \times C_i)^2}, \quad (35)$$

Sendo:

$\mu(y)$ → Incerteza combinada da medição;

C_i → Coeficiente de sensibilidade, isto é, derivada parcial da função respectivo a cada variável;

u_i → Incerteza padrão da medição.

O cálculo do número de graus de liberdade efectivos é efectuado através da seguinte equação:

$$v_{ef} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^9 \frac{(u_i \times C_i)^4}{v_i}} \quad (36)$$

De seguida calcula-se o factor de expansão k que é obtido através da distribuição inversa de t de Student, para uma probabilidade expandida de 95,45%.

Depois de todos estes cálculos obtem-se a incerteza expandida através da seguinte equação:

$$U = \pm(k \times u(y)) \quad (37)$$

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Como o cálculo da incerteza expandida para o diâmetro exterior medido é exactamente igual para o lado passa e para o lado não passa, só se vai dar como exemplo o lado passa.

Para o lado passa:

Todos os cálculos efectuados encontram-se no Anexo B deste documento.

Obteve-se uma incerteza expandida de $U=1,6 \mu\text{m}$, com $k=3,31$ e $\nu_{\text{ef}}=3$.

2) Passo

A incerteza expandida da calibração é obtida através da contribuição dos seguintes componentes (tabela 12):

Tabela 12 Fontes de incerteza padrão que contribuem para o passo

Incertezas Padrão	Tipo de distribuição	Graus de liberdade	Designação
Incerteza padrão devida à dispersão de leituras (equipamento a calibrar)	Tipo A	n-1	u_1
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Comparador electrónico – Resolução)	Tipo B-R (semi)	50	u_2
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Comparador electrónico – Deriva)	Tipo B-R	50	u_3
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (SIP – Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_4
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (SIP – Deriva)	Tipo B-R	50	u_5
Incerteza padrão devida à dilatação térmica (equipamento calibrador)	Tipo B-R	50	u_6
Incerteza padrão devida à temperatura (Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_7
Incerteza padrão devida à temperatura (Deriva)	Tipo B-R	50	u_8
Incerteza padrão devida à temperatura (Variação ao longo da calibração)	Tipo B-R	50	u_9

O tipo de distribuições já foi explicado anteriormente.

Mas neste caso tem-se também um tipo de distribuição B-SemiRectangular, cuja única diferença em relação à tipo B-R é não possuir limite inferior.

Então, sabendo a equação (32) referente ao tipo B-R, obtem-se a equação (38) para o tipo B-SemiRectangular.

$$\text{Tipo B-R: } \mu = \sqrt{\frac{1}{12} \times (a_+ - a_-)^2} \text{ (mm),} \quad (32)$$

$$\text{Tipo B-SemiR: } \mu_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \times (a_+)^2} \text{ (mm),} \quad (38)$$

Neste caso os coeficientes de sensibilidade, isto é, as derivadas parciais, são todas iguais a 1, à excepção da temperatura.

Como é considerada a influência da dilatação térmica, esta é obtida através da seguinte equação:

$$\text{Dilatação} = P \times \alpha \times (T - 20) \text{ (mm),} \quad (38)$$

Sendo:

P → Média das leituras efectuadas do passo (mm);

α_{ter} → Coeficiente de expansão térmica referente ao equipamento calibrador

(Aço: $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$);

T → Temperatura durante a qual a calibração foi executada.

Conhecida a equação (38), o coeficiente de sensibilidade referente à temperatura é:

$$\left(\frac{\partial d}{\partial T} \right) = P \times \alpha \text{ (mm.K}^{-1}\text{),} \quad (39)$$

Conhecidas todas as fontes de incerteza padrão, e sabendo como são efectuados os seus cálculos, ir-se-á se proceder à obtenção da incerteza expandida.

As expressões necessárias já foram descritas anteriormente nas equações:

(35) – para a incerteza combinada

(36) – para o número de graus de liberdade efectivos

De seguida calcula-se o factor de expansão k que é obtido através da distribuição inversa de t de Student, para uma probabilidade expandida de 95,45%.

Depois de todos estes cálculos obtém-se a incerteza expandida através da seguinte equação:

$$U = \pm(k \times u(y)) \quad (37)$$

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Como o cálculo da incerteza expandida para o passo medido é exactamente igual para o lado passa e para o lado não passa, só se vai dar como exemplo o lado passa.

Para o lado passa:

Todos os cálculos encontram-se no Anexo B deste documento.

Obteve-se uma incerteza expandida de $U=0,66 \mu\text{m}$, com $k=2,10$ e $\nu_{ef}=27$.

3) Diâmetro efectivo

A incerteza expandida da calibração é obtida através da contribuição dos seguintes componentes (tabela 13):

Tabela 13 Fontes de incerteza padrão que contribuem para o diâmetro efectivo

Incertezas Padrão	Tipo de distribuição	Graus de liberdade	Designação
Incerteza padrão devida à dispersão de leituras (equipamento a calibrar)	Tipo A	n-1	u_1
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Tampão liso padrão – Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_2
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Tampão liso padrão – Deriva)	Tipo B-R	50	u_3
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (SIP – Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_4
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (SIP – Deriva)	Tipo B-R	50	u_5
Incerteza padrão devida às cavilhas (Dispersão de leituras) ¹	Tipo A	n-1	u_6
Incerteza padrão devida ao passo (Incerteza do certificado de calibração) ²	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_7
Incerteza padrão devida ao alinhamento ³	Tipo B-R	50	u_8
Incerteza padrão devida aos semi-ângulos dos filetes ⁴	Tipo B-R	50	u_9
Incerteza padrão devida à dilatação térmica (equipamento calibrador)	Tipo B-R	50	u_{10}
Incerteza padrão devida à temperatura (Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_{11}

Incerteza padrão devida à temperatura (Deriva)	Tipo B-R	50	u_{12}
Incerteza padrão devida à temperatura (Variação ao longo da calibração)	Tipo B-R	50	u_{13}

¹ – Esta incerteza padrão é uma dispersão de leituras porque as cavilhas não são calibradas, logo efectuou-se a medição das três para as poder contabilizar.

² – Esta incerteza padrão é tipo B-N, porque o cálculo referente à incerteza expandida do passo já foi calculada anteriormente (para o tampão roscado que está a ser calibrado).

³ – Esta fonte de incerteza padrão existe devido ao contacto do tampão roscado com a cavilha e por sua vez da cavilha com o apalpador da SIP.

⁴ – Esta incerteza padrão tem que ser contabilizada do tipo B-R porque o ângulo não é medido.

O tipo de distribuições já foi explicado anteriormente (tipo A equação (30), tipo B-N equação (31) e tipo B-R equação (32)).

Neste caso os coeficientes de sensibilidade, isto é, as derivadas parciais, encontram-se de acordo com o documento da EURAMET^[31].

Apesar do cálculo do diâmetro efectivo medido ser efectuado usando a equação (23), os coeficientes de sensibilidade são efectuados para a equação (20), de acordo com o documento da EURAMET^[31].

$$d_2 = m \times \cos \theta - d_D \times \frac{\cos\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\beta+\gamma}{2}\right)} \times \sqrt{1 - \frac{m^2 \times \text{sen}^2 \theta}{d_D^2 \times \cos^2\left(\frac{\beta-\gamma}{2}\right)}} + \left(\frac{1}{n} - \frac{2 \times l \times \theta}{\pi}\right) \times \frac{\cos \beta \times \cos \gamma}{\text{sen}(\beta + \gamma)} \text{ (mm)} \quad (23)$$

$$d_2 = \Delta L - d_D - d_D \times \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{P}{2} \times \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right) - A_1 + A_2 \text{ (mm)} \quad (20)$$

De acordo com a equação (20) os coeficientes de sensibilidade são:

$$C_{\Delta L}=1$$

$$C_{d_D} = -1 - \frac{1}{\text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (38)$$

$$C_{\frac{\alpha}{2}} = -\frac{d_D \times \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - \frac{P}{2 \times \text{sen}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \text{ (mm)} \quad (39)$$

$$C_P = \frac{\cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2} \quad (40)$$

Os coeficientes de sensibilidade referentes ao equipamento calibrador são igual a 1.

Como é considerada a influência da dilatação térmica, esta é obtida através da seguinte equação:

$$\text{Dilatação} = d_2 \times \alpha \times (T - 20) \text{ (mm)}, \quad (41)$$

Sendo:

$d_2 \rightarrow$ Média das leituras efectuadas do diâmetro efectivo (mm);

$\alpha_{ter} \rightarrow$ Coeficiente de expansão térmica referente ao equipamento calibrador

(Aço: $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$);

$T \rightarrow$ Temperatura durante a qual a calibração foi efectuada.

Conhecida a equação (41), o coeficiente de sensibilidade referente à temperatura é:

$$\left(\frac{\partial d}{\partial T}\right) = d_2 \times \alpha \text{ (mm.K}^{-1}\text{)}, \quad (42)$$

Conhecidas todas as fontes de incerteza padrão, e sabendo como são efectuados os seus cálculos, ir-se-á se proceder à obtenção da incerteza expandida.

A expressão geral para a incerteza combinada é dada através da seguinte equação:

$$\mu(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{13} (u_i \times C_i)^2}, \quad (43)$$

Sendo:

$\mu(y)$ → Incerteza combinada da medição,

C_i → Coeficiente de sensibilidade

u_i → Incerteza padrão da medição

O cálculo do número de graus de liberdade efectivos é efectuado através da seguinte equação:

$$v_{ef} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^{13} \frac{(u_i \times C_i)^4}{v_i}} \quad (44)$$

De seguida calcula-se o factor de expansão k que é obtido através da distribuição inversa de t de Student, para uma probabilidade expandida de 95,45%.

Depois de todos estes cálculos obtém-se a incerteza expandida através da seguinte equação:

$$U = \pm(k \times u(y)) \quad (37)$$

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Como o cálculo da incerteza expandida para o diâmetro efectivo medido é exactamente igual para o lado passa e para o lado não passa, só se vai dar como exemplo o lado passa.

Para o lado passa:

Todos os cálculos encontram-se no Anexo B deste documento.

Obteve-se uma incerteza expandida de $U=1,2 \mu\text{m}$, com $k=2,02$ e $v_{ef}=107$.

4.2. SISTEMA DE VISÃO COMPUTACIONAL

Actualmente este método não é utilizado para se proceder à calibração de roscados de exteriores.

Em geral, relativamente a medições de parafusos por visão computacional já se efectuam, fundamentalmente em reconhecimento e classificação de imagens, em que um dos aspectos utilizados para a classificação do parafuso é as suas dimensões, o que se torna semelhante com o desejado para a calibração de roscados.

Ao longo deste procedimento pretende-se explicar e implementar um programa que classifique dimensionalmente o roscado (passo, diâmetro exterior e diâmetro efectivo).

O primeiro passo para a projecção do sistema de visão computacional é proceder à elaboração da montagem experimental para que se possam obter as imagens com a melhor qualidade possível. Obtendo as imagens, estas irão ser tratadas, de forma a minimizar os erros.

De seguida, irão ser medidas as características desejadas, em pixeis, o que obriga a que se efectue uma calibração ao sistema, para que seja possível converter pixeis no sistema métrico. Só assim as dimensões obtidas passam a ter significado, para se proceder à comparação com o método actual (SIP), descrito na sub-secção anterior.

Os programas utilizados para se efectuar o trabalho descrito foram o Opencv^[21], cmake-gui^[22], imageJ^[23] e matlab^[24].

4.2.1 MONTAGEM EXPERIMENTAL

O primeiro passo para este procedimento é exactamente igual ao descrito na sub-secção 4.1.1 (Preparação do equipamento).

O segundo passo é a montagem experimental. Foram efectuadas duas abordagens diferentes.

1ª Abordagem

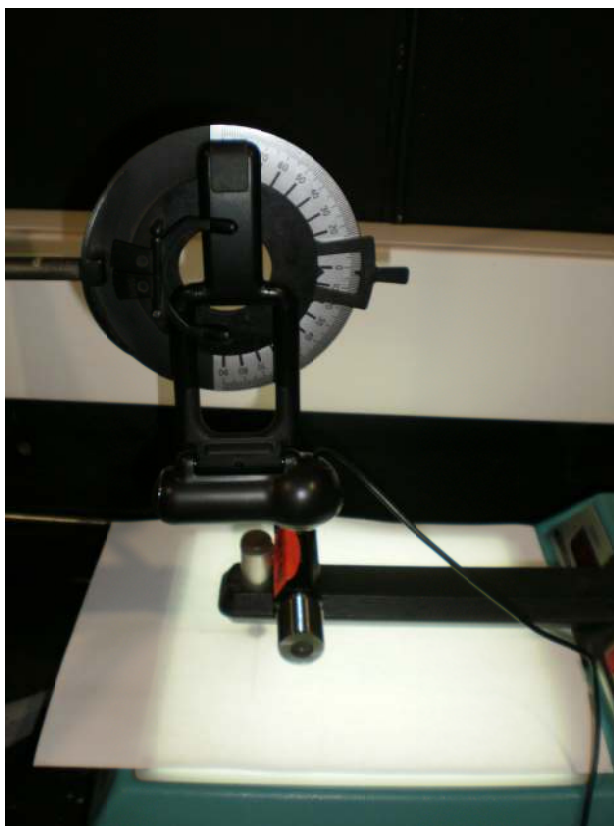


Figura 43 Montagem Experimental – 1ª Abordagem

Tal como se pode verificar na figura 43, esta montagem experimental possui uma webcam, um tampão roscado e uma luz uniforme.

Foram vários os problemas encontrados nesta montagem, tais como:

- Luz uniforme: Apesar da luz utilizada ser uniforme, a imagem adquirida continuava a possuir sombras. A imagem adquirida detectava mudanças da intensidade da luz, por esse motivo foi colocada uma folha branca sobre a luz tal como se pode verificar na figura 4â.

- Distância entre webcam e tampão roscado: A distância entre a webcam e o objecto, isto é, a distância da imagem adquirida é muito importante para se poder calcular qual o valor real (unidades métricas) de cada pixel. Esta distância não era possível de ser controlada com exactidão.

- Posição da webcam: A movimentação da câmara era efectuada manualmente, o que tornava muito complicado fixá-la no ponto exacto em que o objecto estava a ser focado.

- Ampliação óptica da webcam: Mesmo conseguindo uma boa focagem, a ampliação óptica da câmara não era suficiente para se obter a parte de interesse do objecto, os seus contornos.

Por todos estes motivos procedeu-se à seguinte abordagem:

2ª Abordagem



Figura 44 Montagem experimental – 2ª Abordagem

A 1ª abordagem foi uma abordagem bastante simples e totalmente manual. A 2ª abordagem é mais complexa e é um sistema automatizado, o que facilitou na aquisição das imagens.

Tal como se pode verificar na figura 44, a montagem experimental é composta por uma câmara da Carl Zeiss, um tampão roscado e uma luz uniforme.

A grande diferença entre esta montagem experimental e a anterior encontra-se no sistema da câmara. Este sistema possui duas lentes, ocular e objectiva, o que faz com que se

consiga obter um bom contorno do tampão roscado. Com este sistema consegue-se variar a ampliação óptica e a distância entre a câmara e o objecto automaticamente.

O sistema de luz uniforme também é bastante melhor, não se encontram variações de intensidade nem provoca sombras, pelo menos que sejam detectadas a observar a imagem adquirida.

Uma das desvantagens desta abordagem é que para roscados com dimensões superiores a 18 mm a câmara não consegue captar todo o objecto necessário para a calibração.

Resumindo, o essencial nesta montagem é possuir uma câmara com uma grande ampliação óptica, e colocá-la num sistema automático. É conveniente que a luz uniforme utilizada não possua mudanças de intensidade, nem possua uma intensidade excessiva devido às sombras que pode provocar.

4.2.2. PROCEDIMENTO AUTOMÁTICO

A aplicação encontra-se dividida em dois tipos de programação distinta.

A primeira parte, aquisição de imagem e processamento de imagem encontra-se desenvolvida em OpenCv. A segunda parte, tratamento de dados encontra-se desenvolvida em Matlab.

O algoritmo encontra-se dividido em 4 partes:

- ✍ Adquirir uma imagem através da câmara de video (OpenCV);
- ✍ Carregar uma imagem do disco (OpenCv);
- ✍ Processar a imagem e guardar os resultados (OpenCv);
- ✍ Efectuar os cálculos para as medições (Matlab).

✍ Adquirir uma imagem através da câmara de video:

O primeiro passo é ligar o sistema de video ao computador, para que o programa o reconheça. Seguidamente alinha-se o roscado com o sistema de video tendo em atenção a luminosidade, tentando assim adquirir a melhor imagem possível.

Assim que se coloque o algoritmo a correr, caso se clique na tecla “G”, a imagem é gravada automaticamente com o nome out_index, sendo o index um número inteiro sucessivo (começa em 1). Caso se clique em “ESC”, a imagem não é gravada e a imagem obtida pela câmara deixa de ser mostrada no ecrã.

De salientar que o index (nome da imagem) é um valor incrementado sucessivamente, enquanto o programa está aberto, assim que o programa seja encerrado e se volte a iniciá-lo, o index passa a ser novamente 1, gravando as novas imagens sobre as já existentes.

O algoritmo essencial que foi utilizado para que esta parte funcione foi o seguinte:

```
capture = cvCaptureFromCAM( 0 ); // inicializa
a câmara
if( !capture )
    return EXIT_FAILURE;

frame = cvQueryFrame( capture ); // vai buscar
frame do video
if ( !frame )
    return EXIT_FAILURE;

cvNamedWindow( "Video", CV_WINDOW_AUTOSIZE );
//cria uma janela

for(;;)
{
    int c;

    frame = cvQueryFrame( capture ); // vai
buscar a frame
    if( !frame )
        break;

    cvShowImage( "Video", frame ); //mostra a
imagem
}
```

🔗 Carregar uma imagem do disco:

Caso se deseje correr o algoritmo utilizando uma imagem já gravada no disco.

A única condição é que a imagem tem que ser gravada como: “out_index” (referido anteriormente). Em que o “index” é o valor que se desejar gravar, desde que seja um número inteiro, ou o número que já foi gravado automaticamente quando se adquiriu a imagem através da câmara de video.

O algoritmo essencial que foi utilizado para que esta parte funcione foi o seguinte:

```
//Leitura da imagem
Image = cvLoadImage( filename, 1 );
```

✎ Processar a imagem e guardar os resultados:

O primeiro passo no processamento da imagem escolhida anteriormente é converter a imagem em tons de cinza da seguinte forma:

```
// cria imagem tons de cinza
image_cinza = cvCreateImage( cvSize( Image-
>width, Image->height ), IPL_DEPTH_8U, 1);
cvCvtColor (Image, image_cinza, CV_RGB2GRAY);
```

De seguida transforma-se esta imagem em binária:

```
//Imagem binaria
double thresh = 125;

CvMemStorage* storage = cvCreateMemStorage(0);
CvSeq* contour = 0;

IplImage* bw = cvCreateImage
(cvGetSize(image_cinza), 8, 1);
cvThreshold(image_cinza, bw, thresh, 255,
CV_THRESH_OTSU);
```

O valor do threshold pode ser alterado, consoante seja necessário. Neste caso o tipo de threshold utilizado foi o CV_THRESH_OTSU.

De seguida aplicaram-se filtros à imagem binária, para tentar aniquilar todo o tipo de ruído que possa existir. Os filtros utilizados foram erosão, seguido de dilatação, para que a imagem volte a possuir as dimensões iniciais. Primeiro foi aplicada a erosão e só depois a dilatação, porque os filtros actuam sobre os pixels brancos, e neste caso as imagens possuem o objecto preto e o fundo branco. Assim, na realidade, a erosão actua como uma dilatação do objecto, e vice-versa.

O algoritmo essencial que foi utilizado para que esta parte funcione foi o seguinte:

```
// aplicar filtros na imagem - tratamento da
imagem
cvErode(bw,bw,NULL,2); //filtro erosão na imagem
binaria
cvDilate(bw,bw,NULL,2); //filtro dilatacao na
imagem binaria
```

Assim obtém-se a imagem processada. Seguidamente efectua-se um varrimento à imagem binária (erodida e dilatada), o qual vai obter a posição do pixel da linha i na coluna j sempre que houver uma mudança de cor. Isto é, a imagem vai ser varrida linha a linha, e sempre que detectar uma mudança de cor (preto ou branco) regista a posição desse pixel na coluna, num ficheiro com extensão txt.

Como o objecto da imagem, a parte de interesse, é preta e o fundo é branco, o algoritmo começa por procurar quando é que o pixel passa de branco para preto. Detectando esse pixel, grava-o (linha e coluna) no ficheiro e continua a fazer o varrimento na mesma linha, até que detecte a passagem de preto para branco, guardando também esta posição do pixel (coluna).

Estando o varrimento efectuado a toda a imagem e os valores das colunas registados, obtem-se na realidade os contornos da imagem (as posições).

Para esta parte do algoritmo foram feitas duas abordagens diferentes:

1ª Abordagem

```
// Abordagem 1:
//-----

    fprintf( outputfile, "%d ", i); //gravar
valor de i (linha) no ficheiro
    int j = 0; //1º pixel da linha

    xx=cvGet2D(bw,i,j); //para ir buscar os
valores i e j
    printf("indices i = %d, j = %d, valor =
%d\n", i, j, xx.val[0]);//mostra os valores no
menu

    //ciclo para efectuar o varrimento da
imagem
    while( xx.val[0] > 0 && j < bw->width-a )
//enquanto maior que 0 e tamanho da imagem
inferior ao seu comprimento menos a variavel a
(numero de pixeis, para encortar a imagem)
    {
        j++;
        xx=cvGet2D(bw,i,j);
    }

    printf("indices i = %d, j = %d, valor =
%f\n", i, j, xx.val[0]);//grava valores de i, j,
e valor do pixel (preto(0) ou branco (255) no
menu

    fprintf( outputfile, "%d ", j); //gravar
valor de j (coluna) no ficheiro
```

```

        if (j<bw->width-a)
        {
            xx=cvGet2D(bw,i,j);
            j++;
        }

        while( xx.val[0] < 1 && j < bw->width-a )
        //enquanto menor que 1 e tamanho da imagem
        inferior ao seu comprimento menos a variavel a
        (numero de pixeis, para encortar a imagem)
        {
            j++;
            xx=cvGet2D(bw,i,j);
        }

        printf("indices i = %d, j = %d, valor =
        %f\n", i, j, xx.val[0]); //grava valores de i, j,
        e valor do pixel (preto(0) ou branco (255)) no
        menu

        fprintf( outputfile, "%d\n", j); //gravar
        2º valor de j (coluna) no ficheiro, e muda de
        linha

```

A 1ª abordagem funcionou na perfeição sempre que o objecto era 100% preto. Quando se obtiveram imagens em que as morfologias utilizadas não eram suficientes para aniquilar o ruído existente no centro do objecto, o algoritmo funcionava mas detectando a passagem de preto para branco, passava para a linha seguinte. Logo não varria totalmente a linha, nem estava a detectar os pixeis de interesse. Por este motivo criou-se a abordagem 2:

Abordagem 2:

```

// Abordagem 2:
//-----
// varrer toda a linha, até ao fim
// registar o numero n de transições (1-
>0, ou 0->1)
// guardar os indices j do 1º e ultimo

std::list<int> L;
int flag = 0;
int j = 0;
xx = cvGet2D(bw,i,j); //para ir buscar o
valor do pixel, linha, coluna 0
j++;
//for(int j = 1; j < bw->width-a; j++)
//para cada coluna j da imagem
while (j < bw->width-a )
{
    CvScalar temp = cvGet2D(bw,i,j);

```

```

        if ( temp.val[0] != xx.val[0] )
        {
            //acrescentar esse nova
            transição à lista, veto
            printf("transicao em: i = %d,
j = %d, valor = %f\n", i, j, temp.val[0]);
            L.push_back(j);
            xx = cvGet2D(bw,i,j);
            flag = 1;
        }
        j++;
    }

    if (flag == 1)
    {
        int j1 = L.front();
        int j2 = L.back();
        if (j1 != j2)
            fprintf( outfile, "%d %d
%d\n", i, j1, j2);
    }

}

```

Com esta 2ª abordagem garante-se que o varrimento é efectuado ao longo de toda a linha, retirando posteriormente o primeiro e o ultimo pixel obtido, assim obtém-se o contorno do objecto.

Termina assim o algoritmo criado em OpenCV.

Até este ponto as fases do algoritmo, funcionam através de um “MENU” criado (ver figura 45), que interage com o utilizador tendo este apenas que seleccionar as teclas de 1 a 4. O próprio MENU automaticamente vai pedindo o que necessita para que o algoritmo continue a correr e assim executar todas as aplicações.

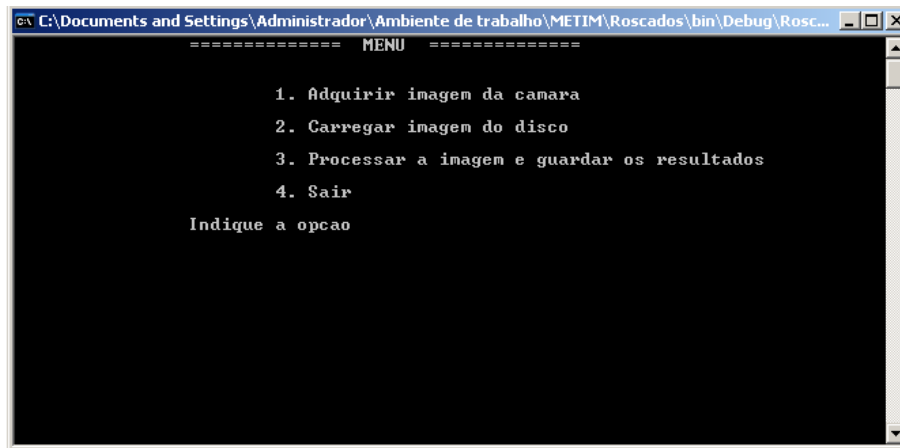


Figura 45 Menu utilizado de interface

Efectuar os cálculos para as medições:

O tratamento de dados, onde são efectuados os cálculos para as medições foi efectuado em Matlab.

As medições necessárias para a calibração de roscados, tal como já referido são: medição do diâmetro exterior, do diâmetro efectivo e do passo. Para obter os valores correspondentes a estas características têm que se avaliar as posições dos pixels registadas no programa “txt”, gravado anteriormente na fase do processamento de imagem.

O primeiro passo do programa é carregar o ficheiro “txt” criado anteriormente e efectuar um gráfico com esse valores, para se verificar se na realidade o ficheiro possui os pixels dos contornos da imagem adquirida (ver figura 46). Para isso utilizou-se o seguinte algoritmo:

```
data = dlmread('out.txt');  
  
n = data(1:end,1)+1;  
i = data(1:end,2);  
j = data(1:end,3);  
  
figure(1), hold on;  
plot(n,i,'b');  
plot(n,j,'r');
```

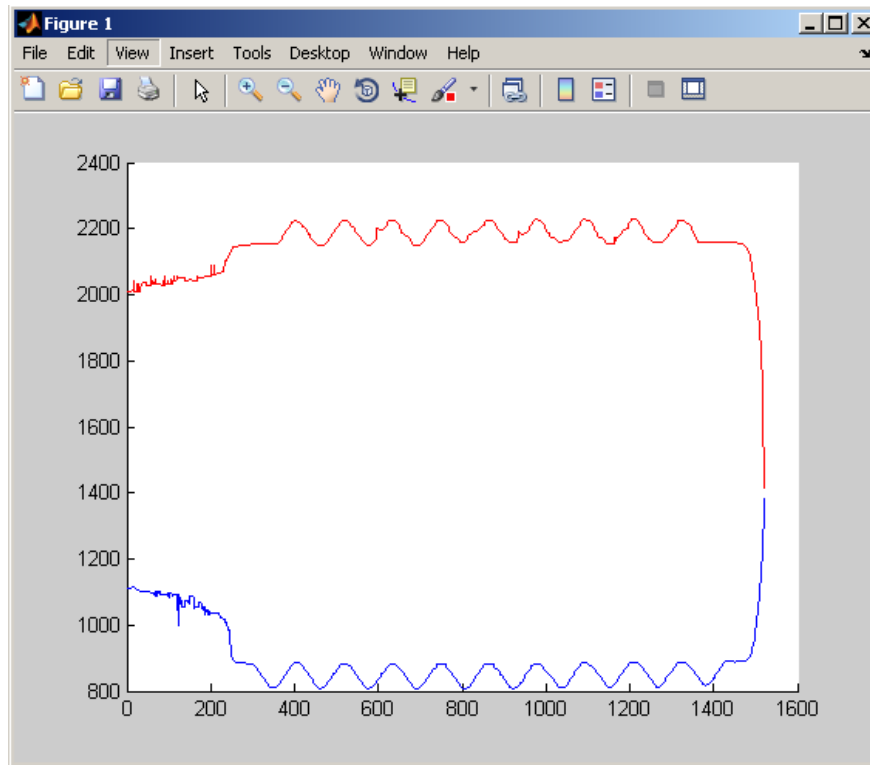


Figura 46 Gráfico obtivo através do ficheiro “txt”

Criado o gráfico, surge uma caixa de diálogo, tal como se pode observar na figura 47, para que se seleccione o ponto onde se deseja que comece a pesquisa. Este ponto deve ser seleccionado antes de um ponto máximo, porque de seguida o programa vai procurar o primeiro máximo.

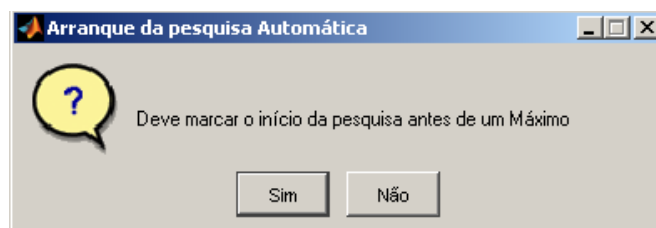


Figura 47 Caixa automática que indica que é necessário a selecção do início da pesquisa

A caixa de inicio de pesquisa foi criada com o auxílio do seguinte algoritmo:

```
button = questdlg('Deve marcar o início da
pesquisa antes de um Máximo','Arranque da
pesquisa Automática',...
'Sim','Não','Sim');
```

Tal como se pode observar na figura 48, é criada uma linha a preto, esta linha representa a diferença entre a linha vermelha e a linha azul, lembrando que se continua a trabalhar em pixels.

A linha vermelha do gráfico corresponde ao contorno do roscado de um dos lados, a linha azul corresponde ao contorno do lado oposto. Neste caso a linha vermelha corresponde ao lado direito e a linha azul ao lado esquerdo do tampão roscado.

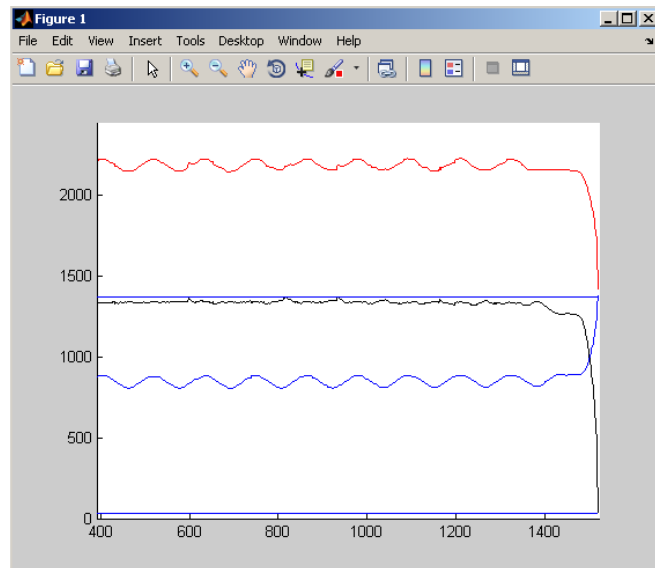


Figura 48 Diferença entre contornos do tampão roscado (contorno lado direito menos contorno lado esquerdo)

Como se pode verificar os filetes não são formados por triângulos perfeitos, o que já era de esperar, por este motivo é necessário criá-los. Relembra-se que a definição para o diâmetro efectivo é a meia altura do filete perfeito (triângulo perfeito), somado ao diâmetro interior.

Como se sabe a posição dos pixels, o programa procura as rectas que melhor se adequam aos pontos, e de seguida procura os pontos em que se intersectam. No ponto em que duas rectas se intersectam esse valor passa a ser o ponto máximo ou mínimo, dependendo da sua posição. O algoritmo utilizado foi:

```

sinal_i=sinal(inicio(1):fim(1));
xxf=mean(find(sinal_i==max(sinal_i)));
xxf=round(xxf+inicio(1)+xs);
a2=kk{flag,1}(1,1);
b2=kk{flag,1}(1,2);
yyf=b2+a2*xxf;
interc{flag}=[xxf yyf -sign(a2)];
for ii=2:size(kk,2)

```

```

a1=a2;b1=b2;xxi=xxf;yyi=yyf;
a2=kk{flag,ii}(1,1);
b2=kk{flag,ii}(1,2);
xxf=-(b1-b2)/(a1-a2);
yyf=(a2*b1-a1*b2)/(a2-a1);
line([xxi xxf],[yyi
yyf], 'Color','k','LineWidth',2);
interc{flag}=[interc{flag}; xxf yyf -
sign(a2)];
end

```

Através deste algoritmo cria-se a figura seguinte:

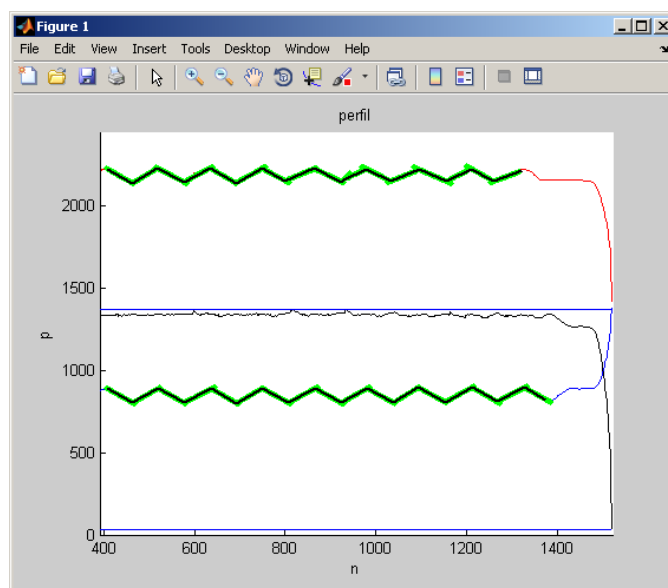


Figura 49 Rectas criadas para formar os triângulos perfeitos

De seguida retiram-se os valores dos extremos das rectas, incluindo a indicação se são máximos ou mínimos. Os valores são apresentados numa tabela tal como se pode observar na figura 50. Para isto foi utilizado o seguinte algoritmo:

```

for flag=1:2
data =interc{flag};
colnames = {'X-Data', 'Y-Data', 'Extremo'};
t = uitable(f, 'Data', data, 'ColumnName',
colnames, ...
'Position', [20+270*(flag-1)
140 260 240]);
end

```

Tabela de resultados da pesquisa automática

	X-Data	Y-Data	Extremo
1	407	891.6754	1
2	463.3980	803.0151	-1
3	519.7833	890.9576	1
4	576.8075	804.1316	-1
5	637.7270	889.0158	1
6	693.1545	801.5636	-1
7	748.9954	892.1621	1
8	807.5412	803.8444	-1
9	865.5250	891.4565	1
10	923.6761	803.0806	-1
11	980.5952	891.3568	1
12	1.0389e+03	803.9479	-1

	X-Data	Y-Data	Extremo
1	407	2.2273e+03	1
2	463.6313	2.1403e+03	-1
3	518.4740	2.2315e+03	1
4	576.5111	2.1478e+03	-1
5	633.9754	2.2323e+03	1
6	690.8394	2.1414e+03	-1
7	748.8282	2.2292e+03	1
8	800.0021	2.1557e+03	-1
9	864.4810	2.2279e+03	1
10	925.1778	2.1488e+03	-1
11	928.7795	2.1609e+03	-1
12	978.3885	2.2277e+03	1

Figura 50 Tabelas com valores dos extremos das rectas (em pixels)

Possuindo os valores dos máximos e dos mínimos de ambas as rectas, pode-se prosseguir para o cálculo do diâmetro exterior, passo e diâmetro efectivo.

De salientar que o máximo da linha azul, para este programa na realidade é um mínimo, e o seu mínimo na realidade é um máximo. Necessário ter isto em atenção.

O algoritmo utilizado foi:

Para o diâmetro exterior:

```
% determinação do diâmetro exterior
A=interc{1};
B=interc{2};
pmax=find(B(:,3)==1);
pqutil=pmax(2:end-1);
d_ext=B(pqutil,2)-A(pqutil+1,2);
```

Para o passo:

```
% determinação do passo
pmin=find(A(:,3)==-1);
passoS=B(pqutil+2,1)-B(pqutil,1);
passoI=A(pqutil+2,1)-A(pqutil,1);
```

PassoS refere-se aos valores obtidos do passo na linha vermelha (B), o PassoI refere-se ao passo na linha azul (A).

Para o diâmetro efectivo:

```
% determinação do diâmetro efectivo
meiaS=(B(pqutil,2)-B(pqutil+1,2))/2;
meiaI=(A(pqutil,2)-A(pqutil+1,2))/2;
dia_effectivo=d_ext-abs(meiaS)-abs(meiaI);
```

Todos estes valores são apresentados numa tabela:

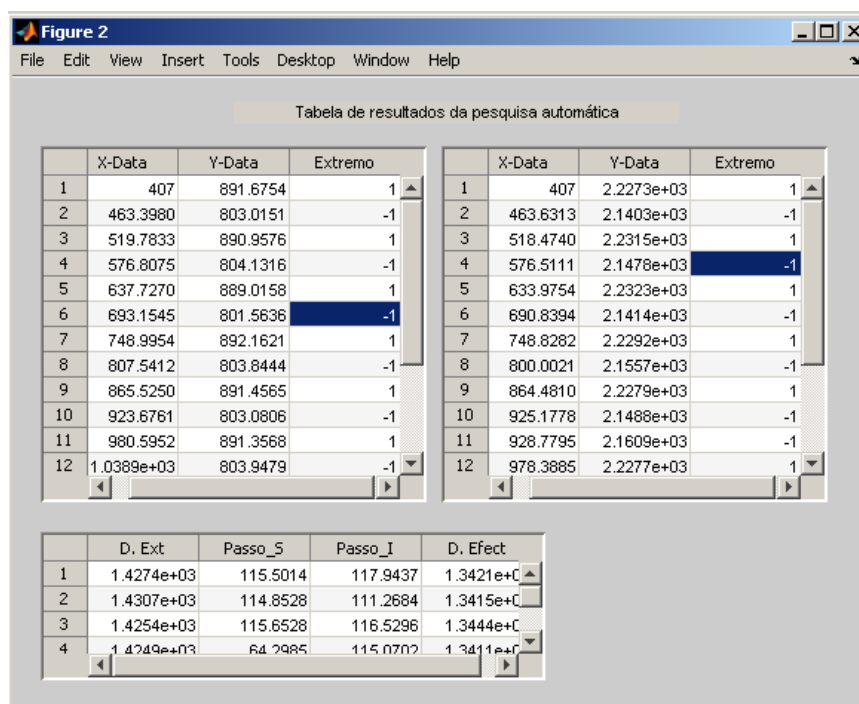


Figura 51 Apresentação dos valores (em pixels)

Por fim é necessário efectuar a calibração da montagem experimental, para se saber qual o factor de conversão de pixels para o sistema métrico.

A calibração de um Sistema de Visão consiste em encontrar uma correlação entre as medidas dos objectos do mundo real e as suas medidas actuais nas imagens adquiridas, realizando a tradução das dimensões da menor parte integrante de uma imagem adquirida (um pixel da imagem) para uma unidade de medição padrão conhecida (sistema métrico).

A calibração é importante para todo o sistema que se comprometa em devolver valores de medição de objectos como resposta do sistema, pois em geral o usuário deseja receber um valor em uma unidade conhecida, e não apenas uma contagem de pixels da imagem.

Especialmente as aplicações voltadas para a área de metrologia necessitam do valor de calibração do sistema para operarem correctamente.

Usando exactamente o mesmo sistema (2ª abordagem da montagem experimental), retirou-se o tampão roscado e colocou-se uma régua, com a mesma diferença de alturas entre o objecto e a câmara (matendo a mesma ampliação).

A imagem obtida da régua foi:

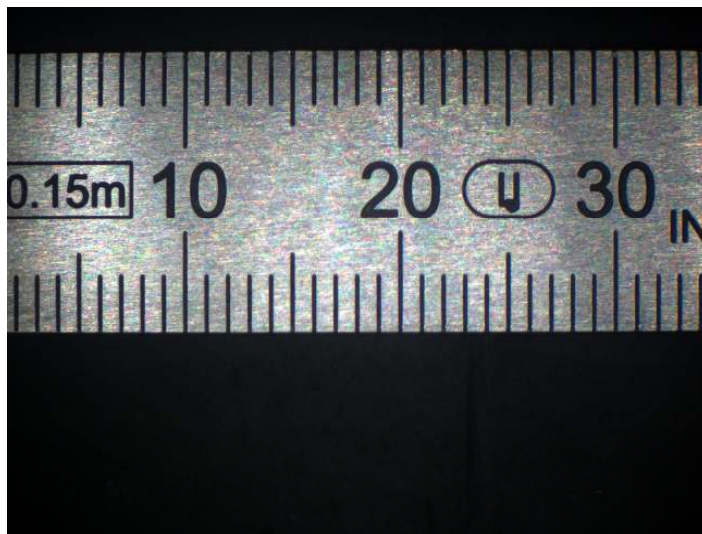


Figura 52 Imagem adquirida da régua (calibração do sistema)

A dimensão desta imagem adquirida é de 2584×1936. Mas como se pode observar na figura os extremos da imagem não se encontram coincidentes com as marcações da régua, o que era de prever. Por isso foi necessário recorrer ao corte de imagem, utilizando o programa de edição de imagem da Microsoft Office 2010 (figura 53).



Figura 53 Imagem para calibração cortada

A dimensão desta imagem adquirida é de 1564×1936.

Devido às dimensões das marcas da régua foram cortadas imagens em diferentes pontos, tal como se pode verificar no anexo C deste documento.

Sabendo a quantidade de pixeis existentes na imagem (1564) e sabendo que entre os extremos interiores das marcações da régua (entre a marcação de 10 mm e a marcação de 30 mm) o valor real é de 19,972 mm, calcula-se a resolução de cada pixel:

$$Resolução = \frac{\text{valor real da régua (mm)}}{n^\circ \text{ de pixeis}} = \frac{19,972}{1564} = 12,7698 \mu\text{m} \quad (45)$$

Sabendo a resolução de cada pixel pode-se proceder à conversão do programa de pixels para o sistema métrico. Para isso utilizou-se o seguinte código:

```
%conversão do diâmetro exterior
%valor real da régua
regua=19,972;
%numero de pixels da imagem de calibração
n_pixel=1564;
a=regua/n_pixel;
d=d_ext*a;

%conversão do Passo
P_S=passoS*a;
P_I=passoI*a;

%conversão do diâmetro efectivo
d2=dia_efectivo*a;
```

De seguida estes valores são apresentados numa tabela, tal como se pode observar na figura seguinte:

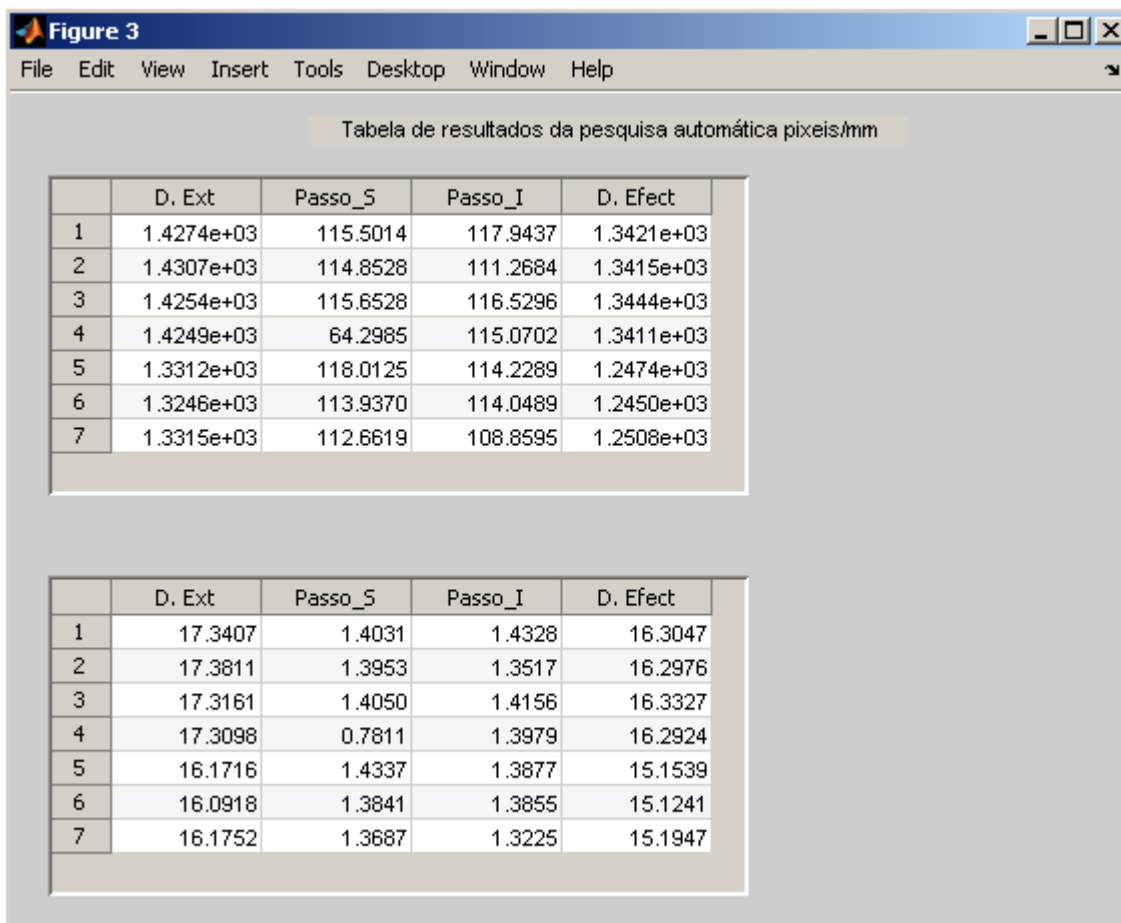


Figura 54 Valores obtido em pixels (tabela superior) e valores obtidos em mm (tabela inferior)

De seguida calcula-se a média dos valores obtidos, para se poder retirar as conclusões por comparação com a calibração com o auxílio da SIP.

O algoritmo utilizado para o cálculo da média dos valores obtidos foi:

```
d_final=mean(d);  
P_S_final=mean(P_S);  
P_I_final=mean(P_I);  
P=(P_S_final+P_I_final)/2;  
d2_final=mean(d2);
```

A media dos valores é apresentada numa tabela, tal como se pode observar na figura 55.

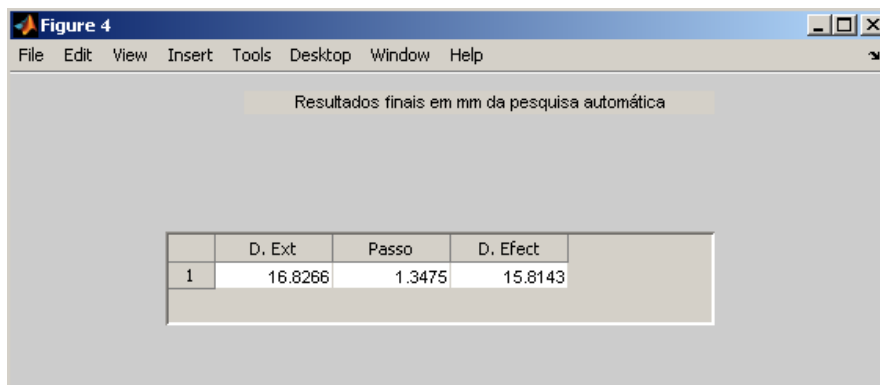


Figura 55 Valores obtidos da calibração por sistema de visão computacional

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Considerando o mesmo tampão utilizado para a calibração com o auxílio da SIP, procedeu-se à calibração com o sistema de visão computacional.

A imagem adquirida foi a seguinte:



Figura 56 Imagem adquirida com a 2ª abordagem da montagem experimental

De seguida procedeu-se ao tratamento da imagem:

Primeiro converte-se para tons de cinza, de seguida para binária, e por final sofre uma erosão seguida de uma dilatação, para eliminar algum ruído que possa existir.

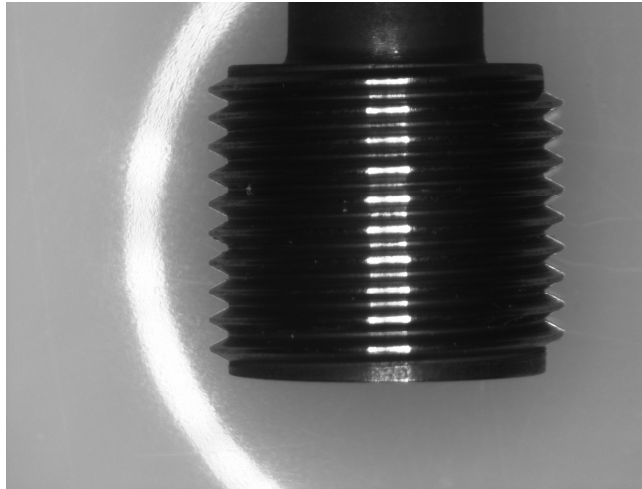


Figura 57 Imagem convertida em tons de cinza

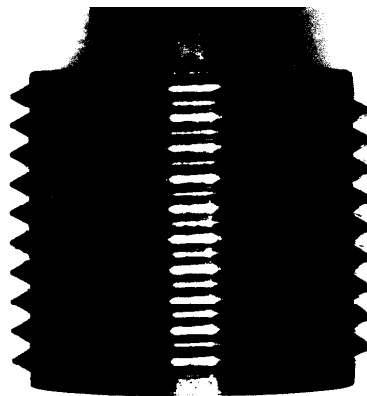


Figura 58 Imagem convertida para binária

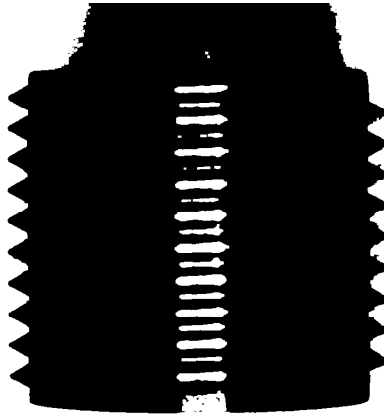


Figura 59 Imagem processada (erosão seguida de dilatação)

Obtida a imagem processada, cria-se um ficheiro com os valores dos pixels que representam o contorno da imagem, como se pode observar na figura 60.

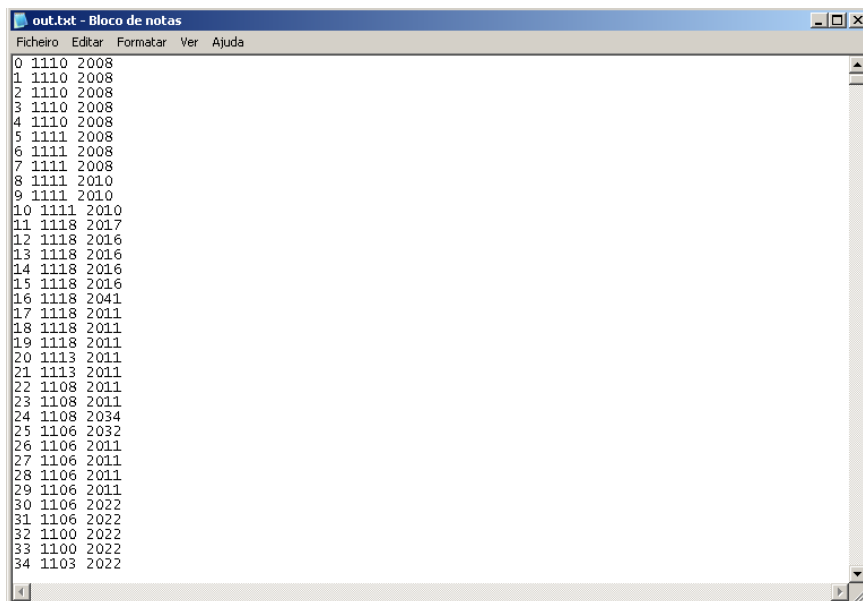


Figura 60 Ficheiro obtido com os valores dos pixels que definem os contornos da imagem processada

Estes valores são depois processados em matlab, tal como já se demonstrou anteriormente. As figuras 46 a 55 já se encontram de acordo com este exemplo.

Então conclui-se que através do sistema de visão computacional, obtiveram-se os seguintes valores:

Diâmetro exterior = 16,8266 mm;

Passo = 1,3475;

Diâmetro efectivo = 15,8143 mm.

De seguida tem que ser efectuado o cálculo de incertezas referente a este sistema de calibração.

4.2.3. ESTUDO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Neste caso as medições estão todas interligadas, e o sistema utilizado é exactamente o mesmo para todas as medições, logo só se irá possuir um cálculo da incerteza expandida.

O cálculo da incerteza expandida encontra-se de acordo com o documento EA-04/02^[33] e com o GUM^[34].

A incerteza expandida da calibração é obtida através da contribuição dos seguintes componentes (tabela 14):

Tabela 14 Fontes de incerteza padrão que contribuem para as medições utilizando o sistema de visão computacional

Incerteza Padrão	Tipo de distribuição	Graus de liberdade	Designação
Incerteza padrão devida à dispersão de leituras (equipamento a calibrar)	Tipo A	n-1	u_1
Incerteza padrão devida à resolução do sistema	Tipo B-R (semi)	50	u_2
Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Régua – Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_3

Incerteza padrão devida ao equipamento calibrador (Régua – Deriva)	Tipo B-R	50	u_4
Incerteza padrão devida à dilatação térmica (equipamento calibrador)	Tipo B-R	50	u_5
Incerteza padrão devida à temperatura (Incerteza do certificado de calibração)	Tipo B-N	Ver certificado de calibração	u_6
Incerteza padrão devida à temperatura (Deriva)	Tipo B-R	50	u_7
Incerteza padrão devida à temperatura (Variação ao longo da calibração)	Tipo B-R	50	u_8

O tipo de distribuições já foi explicado anteriormente (tipo A equação (30), tipo B-N equação (31), tipo B-R equação (32) e tipo B-SemiR equação (38)).

Neste caso só se possuem coeficientes de sensibilidade diferentes de 1, nas incertezas parciais referentes à temperatura, devido à dilatação térmica, explicada anteriormente.

Recordando, temos:

$$Dilatação = d_2 \times \alpha \times (T - 20)(\text{mm}), \quad (41)$$

Sendo:

$d_2 \rightarrow$ Média das leituras efectuadas do diâmetro exterior;

$\alpha_{ter} \rightarrow$ Coeficiente de expansão térmica referente ao equipamento a calibrar

(Aço: $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$);

$T \rightarrow$ Temperatura durante a qual a calibração foi executada.

Conhecida a equação (41), o coeficiente de sensibilidade referente à temperatura é:

$$\left(\frac{\partial d}{\partial T} \right) = d_2 \times \alpha \text{ (mm.K}^{-1}\text{)}, \quad (42)$$

Conhecidas todas as fontes de incerteza padrão, e sabendo como são efectuados os seus cálculos, ir-se-á se proceder à obtenção da incerteza expandida.

A expressão geral para a incerteza combinada é dada através da seguinte equação:

$$\mu(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (u_i \times C_i)^2}, \quad (46)$$

Sendo:

$\mu(y)$ → Incerteza combinada da medição;

C_i → Coeficiente de sensibilidade;

u_i → Incerteza padrão da medição.

O cálculo do número de graus de liberdade efectivos é efectuado através da seguinte equação:

$$v_{ef} = \frac{u^4}{\sum_{i=1}^8 \frac{(u_i \times C_i)^4}{v_i}} \quad (47)$$

De seguida calcula-se o factor de expansão k que é obtido através da distribuição inversa de t de Student, para uma probabilidade expandida de 95,45%.

Depois de todos estes cálculos obtém-se a incerteza expandida através da seguinte equação:

$$U = \pm(k \times u(y)) \quad (37)$$

Exemplo: Tampão roscado gás 3/8

Como o cálculo da incerteza expandida é exactamente igual para o lado passa como para o lado não passa, só se vai dar como exemplo para o lado passa.

Para o lado passa:

Todos os cálculos encontram-se no Anexo D deste documento.

Obteve-se uma incerteza expandida de:

Diâmetro exterior: $U=0,047$ mm, com $k=4,53$ e $\nu_{ef}=2$;

Passo: $U=0,015$ mm, com $k=2,15$ e $\nu_{ef}=18$;

Diâmetro Efectivo: $U=0,013$ mm, com $k=2,32$ e $\nu_{ef}=9$.

5. CONCLUSÕES

Ao longo deste texto foram sendo apresentadas conclusões que permitiram sustentar as opções de desenvolvimento efectuadas ao longo do projecto e os procedimentos utilizados. Assim, nesta última secção é realizada uma síntese das principais conclusões, consequências e relevância do trabalho realizado e perspectivados futuros desenvolvimentos.

Sob pena de repetição, é inevitável voltar a recordar que os factores de maior importância para a calibração de roscados é a medição do diâmetro exterior, do passo e do diâmetro efectivo.

Os valores obtidos pela medição por contacto (máquina universal SIP) e pelo sistema de visão computacional encontram-se na tabela seguinte, para que melhor se possa efectuar a comparação.

Tabela 15 Comparação dos valores obtidos por ambas as calibrações

	Valores medidos pela SIP	Valores obtidos pelo sistema de visão computacional	Diferença entre ambos os sistemas
Diâmetro Exterior	16,658 mm	16,827 mm	0,169 mm
Passo	1,336 mm	1,347 mm	0,011 mm
Diâmetro Efectivo	15,818 mm	15,814 mm	0,004 mm

Aquando da criação do programa referente à calibração, a principal preocupação foi para com o diâmetro efectivo, e a diferença obtida entre os sistemas leva a que se conclua que o sistema contruido se encontra de acordo com o esperado.

O erro obtido na medição do passo também se encontra dentro dos parâmetros esperados. De salientar que através da medição por contacto (SIP) são medidos unicamente 3 passos, no sistema de visão computacional mede-se o tampão roscado a 100%.

O diâmetro exterior apresenta uma diferença de 0,169 mm, uma diferença que não se encontra de acordo com os valores esperados. O motivo desta diferença é fácil de explicar, e é um erro possível de se alterar à posterior. Este erro é explicado com o auxilio da imagem seguinte. Para se obter o diâmetro efectivo é necessário criar o topo do filete, para criar um roscado perfeito, afim de se poder saber o valor da meia altura ($H/2$), necessário para o cálculo do diâmetro efectivo, como foi explicado ao longo do relatório. O cálculo do diâmetro exterior (d) no programa foi efectuado através dos extremos desse triângulo perfeito criado, mas na realidade o diâmetro exterior é como demonstra na figura 61, d .

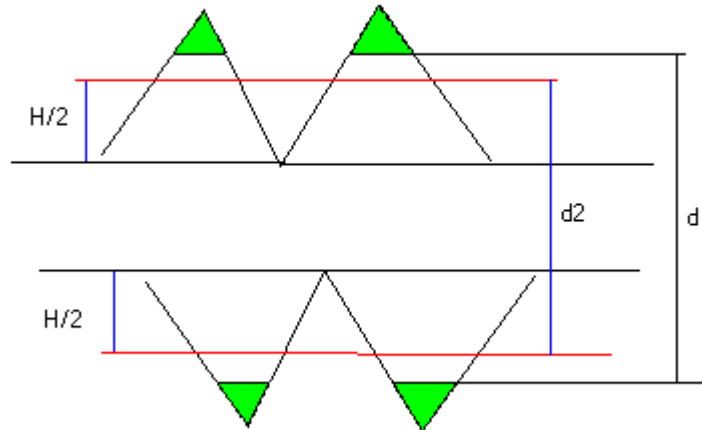


Figura 61 Explicação da diferença obida no diâmetro exterior

Matematicamente é possível demonstrar este erro. O que foi criado pelo programa encontra-se representado na figura 61, zona preenchida.

Para os valores de medição por contactos (SIP):

$$d - d2 = 16,658 - 15,818 = 0,840 \text{ mm} \quad (48)$$

Para os valores do sistema por visão computacional:

$$d - d2 = 16,827 - 15,814 = 1,013 \text{ mm} \quad (49)$$

Assim pode-se compreender que a diferença excessiva provém do filete perfeito criado (zona preenchida).

Relativamente ao cálculo da incerteza expandida, tal como era de esperar a incerteza expandida relacionada com o sistema de visão computacional é bastante superior, devido principalmente à sua resolução. A forma de se conseguir melhorar esta resolução é possuir uma câmara em que o valor do seu pixel seja inferior. Para a objectiva utilizada um pixel equivale a aproximadamente 13 μm , resolução bastante elevada em comparação com a obtida na medição por contacto (SIP) que é de 0,1. Para, além disso, no exemplo usado o factor de maior influência é a própria dispersão de leituras.

Por este motivo, serão mostrados os valores da incertezas expandidas considerando a dispersão nula para ambos os casos:

Tabela 16 Comparação dos valores da incerteza expandida de ambas as calibrações

	Valores medidos pela SIP	Valores obtidos pelo sistema de visão computacional
Diâmetro Exterior	$\pm 0,52 \mu\text{m}$	$\pm 7,9 \mu\text{m}$
Passo	$\pm 0,55 \mu\text{m}$	$\pm 7,9 \mu\text{m}$
Diâmetro Efectivo	$\pm 1,1 \mu\text{m}$	$\pm 7,9 \mu\text{m}$

Mesmo comparando através do balanço da melhor incerteza conclui-se que a a incerteza expandida obtida pela SIP equivale a aproximadamente 13% da incerteza expandida obtida pelo sistema de visão computacional, o que demonstra ser mais viável proceder a calibração com o auxílio da SIP (medição por contacto).

Esta incerteza expandida pode ser melhorada, basta possuir uma melhor resolução, ou até mesmo um equipamento calibrador com menor incerteza expandida. Porque baixando a resolução, passa a ser o padrão (régua) o equipamento que mais influência no cálculo da incerteza expandida.

Conclui-se portanto que o sistema de medição por visão computacional deve ser usado para roscados de exteriores com dimensões inferiores a 2 mm, pois são calibres que por medição por contacto (SIP) não consegue efectuar a calibração, acima desses valores deve-se continuar a efectuar a calibração por medição de contacto (SIP).

Referências Documentais

- [1] www.soparafusos.com.br/curiosidades.html
- [2] www.ciser.com.br/noticias/noticia.asp?idNoticia=645
- [3] http://pt.scribd.com/doc/49769254/Historia_do_Parafuso
- [4] <http://www.elemaq10.com.br/modules/smartsection/itm.php?itemid=19>
- [5] <https://www.reiparparafusos.com.br/historia-do-parafuso.php>
- [6] “Manual do Serralheiro”, N. Makienko; Editora MIR
- [7] “Formulário de Mecânica”, L. Pareto, Ediciones CEAC
- [8] “Alrededor de las Máquinas-Herramienta”, H. Gerling, Editorial Revertè, S.A.
- [9] <http://pt.wikipedia.org/wiki/Rosca>
- [10] “Abertura de Roscas no Torno”, Estévez Somolinos, Coleção Mecânica Geral, Edições CETOF
- [11] http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema092/Documentos/APOSTILA_PARTE_II_cap_11_Medicao_de_Roscas.pdf
- [12] www.scribd.com/doc/3969840/Aula-09-calculos-de-roscas
- [13] www.jobraja.com.br/tabelas/calculo_de_rozca.doc
- [14] Norma ABNT NB97
- [15] Norma NBR 8225
- [16] Stemmer, Marcelo – Sistemas Industriais Inteligentes - Apostila de Sistemas de Visão, Dissertação Florianópolis, Brasil 2005, <http://s2i.das.ufsc.br/harpia>
- [17] <http://www.infaimon.com/pt/catalogo-industria/software-visao-artificial-61.html>
- [18] Kitani, Edson – Sistema de Visão Artificial: Uma Aplicação em Mecatrônica. Dissertação do curso de pós-graduação Mecânica Fina, da Universidade São Judas Tadeu, São Paulo 2005, Brasil, <http://www2.dem.inpe.br/mcr/Orient>
- [19] http://pt.wikipedia.org/wiki/Vis%C3%A3o_computacional
- [20] Pavim, Alberto – Contribuições na Otimização de um Sistema de Visão para detecção, Medição e Classificação Automática do Desgaste de Ferramentas de Corte em Processos de Maquinagem, Dissertação Florianópolis, Brasil 2005, <http://www-users.rwth-aachen.de>
- [21] OpenCV Reference Manual v2.1, March 18, 2010
- [22] http://www.visitusers.org/index.php?title=Using_CMake2with_VisIt_on_Windows
- [23] <http://rsbweb.nih.gov/ij/>
- [24] Manual do Matlab R2010a

- [25] Norma ISO 1502:1996 – ISO general-purpose metric screw threads – Gauges and gauging
- [26] Norma NP EN ISO 228-1:2005 – Roscas de tubagem para ligação sem estanquidade no filete, Parte 1: Dimensões, tolerâncias e designação
- [27] Norma ISO 228-2:1987 – Pipe threads where pressure-tight joints are not made on the threads, Part 2: Verification by means of limit gauges
- [28] Norma NP ISO 965-1:2008 – Roscas métricas ISO para usos gerais, Tolerâncias, Parte 1: Princípios e dados de base
- [29] Norma NP ISO 965-3:2008 - Roscas métricas ISO para usos gerais, Tolerâncias, Parte 3: Desvios para roscas de construção
- [30] Norma ISO 724:1993 – ISO general-purpose metric screw threads – Basic dimensions
- [31] EURAMET – Calibration Guide: Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing, July 2007
- [32] NPL NOTES ON SCREW GAUGES, 2003
- [33] EA-04/02 – Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, December 1999
- [34] GUM – Guide for the Expression of Uncertainty in Measurements, 1995

Anexo A. Aproximações à equação de Berndt

Neste anexo são descritos os passos para se perceber as aproximações efectuadas à equação de Berndt, equações (20) e (21).

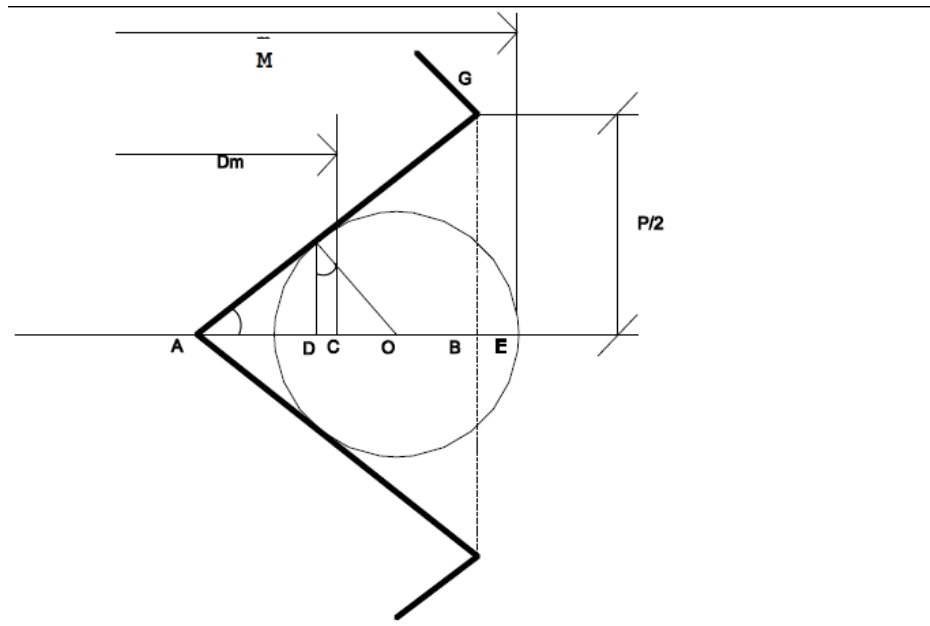


Figura 62 Esquema de uma cavilha colocada no tampão roscado para se efectuar a medição do diâmetro efectivo

Na figura Dm representa o diâmetro efectivo, que vamos considerar como d_2 , como se tem considerado ao longo do relatório.

Temos:

$$d_2 = M - 2 \times (\overline{OE} + \overline{OC}) \quad (50)$$

$$\overline{OE} = \frac{d_D}{2} \quad (51)$$

$d_D \rightarrow$ Diâmetro da cavilha

$$\overline{OC} = \overline{OA} - \overline{AC} \quad (52)$$

O triângulo AFO:

$$\overline{OA} = \frac{d_D/2}{\text{sen } \alpha} \quad (53)$$

Pela defenição do diâmetro efectivo:

$$\overline{AC} = \overline{CB} = \frac{\overline{AB}}{2} \quad (54)$$

O triângulo ABG:

$$\overline{AB} = \frac{P/2}{\text{tg } \alpha} \quad (55)$$

Substituindo as equações (54) e (55) obtem-se:

$$\overline{AC} = \frac{1}{2} \times \frac{P}{2 \times \text{tg } \alpha} = \frac{P}{4 \times \text{tg } \alpha} \quad (56)$$

Substituindo as equações (52), (53) e (56) obtem-se:

$$\overline{OC} = \frac{d}{2 \times \text{sen } \alpha} - \frac{P}{4 \times \text{tg } \alpha} \quad (57)$$

Substiuiendo as equações (50), (51) e (57) obtem-se:

$$d_2 = M - d_D \times \left(1 + \frac{1}{\text{sen } \alpha} \right) + \frac{P}{2 \times \text{tg } \alpha} \quad (58)$$

A equação (58), obtida através das relações geométricas, modifica-se com o acréscimo das correcções:

$$d_2 = M - d_D \times \left(1 + \frac{1}{\text{sen } \alpha} \right) + \frac{P}{2 \times \text{tg } \alpha} - A_1 + A_2, \quad (59)$$

Anexo B. Incerteza Expandida para a Calibração utilizando a SIP

Neste anexo é apresentado o cálculo da incerteza expandida para o diâmetro exterior, o passo e o diâmetro efectivo.

Para o lado PASSA:

RESULTADOS:

Diâmetro Exterior mm	k'	v_{ef}	Incerteza Expandida mm
16,658	3,31	3	$\pm 0,0016$

Equipamento a ser calibrado												
TIPO A												
Leituras (possibilidade de 10 leituras)			Média		STDEV (n-1)		u (dispersão)		C		gr. liber.	
16,65713	16,65835	16,65834	16,65794	mm	0,000701	mm	0,000405	mm	1	---	2	

TAMPÃO LISO PADRÃO- EQUIPAMENTO CALIBRADOR														
TIPO B - Normal						TIPO B - RECTANGULAR								
Incerteza	k	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.						
1,00E-04	mm	2,00	0,00005	mm	1	---	1000	0	mm	0	mm	1	---	50

SIP - EQUIPAMENTO CALIBRADOR														
TIPO B - Normal						TIPO B - RECTANGULAR								
Incerteza	k	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.						
0,0002	mm	2,01	7,46E-05	mm	1	---	217	0,0004	mm	0,000231	mm	1	---	50

Equipamento calibrador																
TIPO B - RECTANGULAR					TIPO B - NORMAL											
Dilatação Térmica	u	C	gr. liber.	Valor	Incerteza	k	u	C	gr. liber.							
1,92E-05	mm	1,11E-05	mm	1	---	50	20,1	K	0,19	K	2	0,095	K	1,92E-04	mm.K ⁻¹	1000

TEMPERATURA													
TIPO B - RECTANGULAR					TIPO B - RECTANGULAR								
Variação	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.						
0,5	K	0,288675	K	#####	mm.K ⁻¹	50	0,02	K	0,011547	K	1,92E-04	mm.K ⁻¹	50

Incerteza Padrão Combinada	Incerteza			Nº Casas Decimais	Percentagem da Incerteza					
	Vef	k	INCERTEZA EXPANDIDA		Repetibilidade	Padrão	Temperatura			
0,000478	mm	3	3,31	0,0016	mm	4	71,6	26,8	1,5	100,0

RESULTADOS:

Passo	k'	v'_{ef}	Incerteza Expandida
mm			mm
1,336	2,10	27	$\pm 0,00066$

Equipamento a ser calibrado											
TIPO A											
Leituras (possibilidade de 10 leituras)				Média	STDEV (n-1)	u (dispersão)	C	gr. liber.			
1,3359	1,3355	1,3354		1,3356 mm	0,000265 mm	0,000153 mm	1	---	2		

Comparador Electrónico - Equipamento Calibrador											
TIPO B - Semi-Rectangular						TIPO B - RECTANGULAR					
Resolução	u	C	lit	E.M.A.		u	C	gr. liber.			
1,00E-04 mm	0 mm	1	---	50	0,0002 mm	0,000115 mm	1	---	50		

SIP - Equipamento Calibrador											
TIPO B - Normal						TIPO B - RECTANGULAR					
Incerteza	k	u	C	lit	Deriva	u	C	gr. liber.			
1,50E-04 mm	2,01	7,46E-05 mm	1	---	# 0,0004 mm	0,000231 mm	1	---	50		

Equipamento calibrador											
TIPO B - RECTANGULAR						TIPO B - NORMAL					
Dilatação Térmica	u	C	gr. liber.	Valor	Incerteza	k	u	C	gr. liber.		
1,54E-06 mm	8,87E-07 mm	1	---	50	20,1 K	2	0,1 K	1,54E-05 mm.K ⁻¹	1000		

TEMPERATURA											
TIPO B - RECTANGULAR						TIPO B - RECTANGULAR					
Varição	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.				
0,5 K	0 K	#	50	0,02 K	0,011547 K	1,54E-05 mm.K ⁻¹	50				

Incerteza Padrão Combinada	Incerteza			Nº Casas Decimais	Porcentagem da Incerteza				100,0
	Vef	k	INCERTEZA EXPANDIDA		Comparador	SIP	Temperatura		
0,000311 mm	27	2,10	0,0007 mm	5	24,2	14,7	61,1	0,0	

RESULTADOS:

Diâmetro Efectivo	k'	v'_{ef}	Incerteza Expandida
mm			mm
15,818	2,02	107	$\pm 0,0012$

Equipamento a ser calibrado											
TIPO A											
Leituras (possibilidade de 10 leituras)				Média	STDEV (n-1)	u (dispersão)	C	gr. liber.			
17,12584	17,12527	17,12542		17,12551 mm	0,000295 mm	0,000171 mm	1	---	2		

TAMPÃO LISO PADRÃO- EQUIPAMENTO CALIBRADOR												
TIPO B - Normal						TIPO B - RECTANGULAR						
Incerteza	k	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.				
0,0001 mm	2,00	0,00005 mm	1	---	1000	0 mm	0 mm	1	---	50		

SIP - Equipamento Calibrador										
TIPO B - Normal					TIPO B - RECTANGULAR					
Incerteza	k	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.		
1,50E-04 mm	2,01	7,46E-05 mm	1	---	217	0,0004 mm	0,000231 mm	1	---	50

Cavilhas						Passo								
TIPO A						TIPO B - Normal								
Leituras (3 cavilhas)	Média	STDEV (n-1)	u (dispersão)	C	gr. liber.	Incerteza	k	u	C	gr. liber.				
0,818	0,81799	0,8179	0,818 mm	6E-05 mm	3,18E-05 mm	2,43	---	2	6,51E-04 mm	2,10	0,000311 mm	0,51119	---	27

Alinhamento				Ângulo dos Flancos							
TIPO B - RECTANGULAR				TIPO B - RECTANGULAR							
Alinhamento	u	C	gr. liber.	Valor: β ou γ	Incerteza associada	Incerteza	C	gr. liber.			
0,00052 mm	0,0003 mm	1	---	50	27,5 °	0,479966 rad	10 ' "	0,002909 rad	0,001679 rad	1,70E-01 mm	50

Equipamento calibrador					TIPO B - NORMAL					
TIPO B - RECTANGULAR					TIPO B - NORMAL					
Dilatação Térmica	u	C	gr. liber.	Valor	Incerteza	k	u	C	gr. liber.	
1,97E-05 mm	1,14E-05 mm	1	---	50	20,1 K	0,19 K	2	0,095 K	1,97E-04 mm.K ⁻¹	1000

TEMPERATURA										
TIPO B - RECTANGULAR					TIPO B - RECTANGULAR					
Varição	u	C	gr. liber.	Deriva	u	C	gr. liber.			
0,5 K	0,288675 K	1,97E-04 mm.K ⁻¹	50	0,02 K	0,011547 K	1,97E-04 mm.K ⁻¹	50			

Incerteza				Nº Casas Decimais	Porcentagem da Incerteza							100,0
Incerteza Padrão Combinada	Vef	k	INCERTEZA EXPANDIDA		Padrão	Cavilhas	Passo	Alinhamento	Flancos	Temperatura		
0,000545 mm	107	2,02	0,0011026 mm	4	9,8	20,7	2,0	8,5	30,4	27,4	1,3	

Anexo C. Imagens de Calibração para o Sistema de Visão Computacional

Neste anexo são mostradas diferentes imagens cortadas para a calibração do sistema computacional:



Figura 63 Imagem cortada nos extremos exteriores das marcas da régua (1602×1936)



Figura 64 Imagem cortada no centro das marcas da régua (1582×1936)

Anexo D. Incerteza Expandida para a Calibração utilizando o Sistema de Visão Computacional

Utilizando o Sistema de Visão Computacional Para o lado PASSA:			
RESULTADOS:			
Diâmetro Exterior	k'	v'_{ef}	Incerteza Expandida
mm			mm
16,8266	4,53	2	± 0,047
RESULTADOS:			
Passo	k'	v'_{ef}	Incerteza Expandida
mm			mm
1,3475	2,15	18	± 0,015
RESULTADOS:			
Diâmetro Efectivo	k'	v'_{ef}	Incerteza Expandida
mm			mm
15,8143	2,32	9	± 0,013

Equipamento a ser calibrado													
TIPO A													
Leituras (possibilidade de 10 leituras)					Média		STDEV (n-1)		u (dispersão)		C		gr. liber.
17,3407	17,3161	17,3098			17,3222	mm	0,016328	mm	0,009427	mm	1	---	2
Equipamento a ser calibrado													
TIPO A													
Leituras (possibilidade de 10 leituras)					Média		STDEV (n-1)		u (dispersão)		C		gr. liber.
1,4031	1,3953	1,4050			1,39766	mm	0,018195	mm	0,005754	mm	1	---	9
Equipamento a ser calibrado													
TIPO A													
Leituras (possibilidade de 10 leituras)					Média		STDEV (n-1)		u (dispersão)		C		gr. liber.
16,2924	16,2976	16,3047			16,29823	mm	0,006174	mm	0,003565	mm	1	---	2

Como só a dispersão de leituras é diferente neste cálculo de incertezas, de seguida só vou apresentar o cálculo uma única vez, no final coloco o resultado para os três novamente, pela mesma ordem.

Sistema Visão Computacional							Régua (cali)								
TIPO B - SemiRectangular							TIPO B - Normal								
Resolução		u		C		gr. liber.	Incerteza		k		u		C		gr. liber.
0,01277	mm	0,00368633	mm	1	---	50	1,40E-04	mm	2,07	6,76E-05	mm	1	---	37	

o)							Equipamento calibrador						
TIPO B - RECTANGULAR							TIPO B - RECTANGULAR						
Deriva		u		C		gr. liber.	Dilatação Térmica		u		C		gr. liber.
0,002	mm	0,001155	mm	1	---	50	1,87E-05	mm	1,08E-05	mm	1	---	50

TEMPERATURA																
TIPO B - NORMAL							TIPO B - RECTANGULAR									
Valor	Incerteza	k	u		C		gr. liber.	Varição	u		C		gr. liber.			
20,1	K	0,19	K	2	0,095	K	1,87E-04	mm.K ⁻¹	1000	0,5	K	0,288675	K	1,87E-04	mm.K ⁻¹	50

TIPO B - RECTANGULAR						
Deriva		u		C		gr. liber.
0,02	K	0,011547	K	1,87E-04	mm.K ⁻¹	50

Incerteza					Nº Casas Decimais	Porcentagem da Incerteza					
Incerteza Padrão Combinada	Vef	k	INCERTEZA EXPANDIDA			Repetitividade	Resolução	Padrão	Temperatura		
0,010188	mm	2	4,53	0,0461177	mm	3	85,6	13,1	1,3	0,0	100,0
Incerteza					Nº Casas Decimais	Porcentagem da Incerteza					
Incerteza Padrão Combinada	Vef	k	INCERTEZA EXPANDIDA			Repetitividade	Resolução	Padrão	Temperatura		
0,006931	mm	18	2,15	0,0148926	mm	3	68,9	28,3	2,8	0,0	100,0
Incerteza					Nº Casas Decimais	Porcentagem da Incerteza					
Incerteza Padrão Combinada	Vef	k	INCERTEZA EXPANDIDA			Repetitividade	Resolução	Padrão	Temperatura		
0,005257	mm	9	2,32	0,0121957	mm	3	46,0	49,2	4,8	0,0	100,0