



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Cálculo das propriedades físicas dos anéis envolvidas no processo de fabrico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Autor

Vasco Joel Simões Cruz

Orientadores

Professora Doutora Marta C. Oliveira

Engenheiro Richard G. Alves

Júri

Presidente Professor Doutor Bruno S. Trindade
Professor Associado da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Albano A. Cavaleiro
Professor Catedrático da Universidade de Coimbra

Orientador Engenheiro Richard G. Alves
Engenheiro da MAHLE Componentes de Motores SA.

Colaboração Institucional

MAHLE
Driven by performance

MAHLE Componentes de
Motores, S.A.

Coimbra, Julho, 2015

“Dê-me um ponto de apoio e moverei o mundo.”

Arquimedes de Siracusa [287 a.C. – 212 a.C]

Aos meus pais e irmão.

Agradecimentos

Este trabalho encerra um longo e brioso percurso académico acompanhado pela amizade, pela dedicação e pelo trabalho de um conjunto de pessoas extraordinárias que, em momento algum, deixaram de me ajudar a ultrapassar as vicissitudes da vida.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer às pessoas me acompanham desde sempre pelo incansável carinho, compreensão e apoio. Aos meus pais, Emília e José, ao meu irmão Rafael e à namorada Sara, à minha avó Arminda, aos meus tios, Olga e Vitor, e ao meu primo Hugo, o meu sincero agradecimento por fazerem de mim aquilo que sou hoje.

Aos meus amigos e amigas, à enorme Residência Piaçaba, pelos gloriosos momentos partilhados ao longo destes últimos anos, e pela amizade e saudade que levo para a vida. Ao Hugo, que me acompanha desde os 10 anos. À Mariana, que tanto aturou nesta vida.

À Professora Doutora Marta Cristina Oliveira pela sempre excelente orientação, disponibilidade e boa disposição. Por me ter ajudado ao longo dos últimos meses e por ter extraído o melhor de mim.

Ao Engenheiro Richard Gouveia Alves, da MAHLE Componentes de Motores S.A., pela dedicação e apoio ao longo deste estágio. Por não se cansar de partilhar a sua experiência e os seus conhecimentos. Ao Engenheiro Luís Nascimento por não se coibir de me ajudar. Ao Engenheiro Ricardo Reis, ao restante pessoal da MAHLE Componentes de Motores S.A., aos meus colegas estagiários, pela ajuda e companheirismo.

A todos os meus amigos e colegas de curso. Aos professores e ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

A todos o meu sincero e profundo agradecimento.

Vasco Joel Simões Cruz

Resumo

As propriedades dos anéis de pistão influenciam os parâmetros utilizados no estudo do comportamento em serviço e funcionamento no motor. Estas propriedades físicas dependem das características geométricas da secção transversal do anel bem como das propriedades mecânicas dos materiais utilizados no seu fabrico.

Este trabalho tem como objectivo desenvolver e implementar uma metodologia de cálculo do momento de inércia e da linha neutra da secção transversal dos anéis de pistão, que facilite e melhore a precisão do processo de cálculo das suas propriedades. A metodologia desenvolvida baseia-se na discretização da geometria da secção transversal num conjunto de pontos, cujas coordenadas são calculadas com o auxílio de cotas definidas pelas normas internacionais de anéis de pistão. O programa desenvolvido no *Microsoft Office Excel 2010* abrange todos os anéis de 1ª e 2ª ranhura e permite uma análise pormenorizada da secção, que garante valores de propriedades físicas e parâmetros de projecto dos anéis mais fiáveis.

A metodologia proposta contempla a análise do impacto do revestimento no módulo de elasticidade equivalente do anel, em particular nas propriedades físicas dos anéis. De facto, apesar dos revestimentos apresentarem uma espessura reduzida, o módulo de elasticidade equivalente do anel revestido altera-se, em função da percentagem de área do revestimento em relação à área total da secção e do módulo de elasticidade do material de base e do revestimento. No entanto, a influência da variação do módulo de elasticidade do anel no valor do coeficiente de conformabilidade não é significativa, na maior parte dos casos reais. O trabalho realizado focou-se nos anéis de pistão de compressão e foi realizado nas instalações da MAHLE Componentes de Motores S.A., em Portugal.

Palavras-chave: Anéis de Pistão, Secção Transversal, Momento de Inércia, Linha Neutra, Revestimentos, Módulo de Elasticidade.

Abstract

The properties of piston rings influence the parameters used in the study of the in service behaviour and operating conditions of the engine. These physical properties depend on the geometric characteristics of the ring cross section as well as on the mechanical properties of the materials used in its manufacture.

This work aims to develop and implement a methodology for calculating the moment of inertia and neutral line of the cross section of the piston rings, which facilitates and improves the accuracy of these properties calculation process. The methodology is based on the discretization of the geometry of the cross section using a set of points, whose coordinates are calculated with the aid of the dimensions defined by the international standards piston rings. The program developed in Microsoft Office Excel 2010 covers all the rings of 1st and 2nd groove and allows a detailed analysis of the section, which ensures more reliable values for the physical properties and project parameters.

The proposed method includes the assessment of the impact of the coating on the ring's equivalent elastic modulus, in particular on the physical properties of the rings. In fact, despite the reduced thickness of the coatings, the equivalent elastic modulus of the coated ring is altered, depending on the percentage ratio between the coating area and the total cross section area and the elastic modulus of the bulk material and the coating. However, the influence of variation of the ring's elastic modulus in the value of the conformability coefficient is not significant, for most real cases. The work focused on the compression piston rings and was performed in MAHLE Componentes de Motores SA plant, in Portugal.

Keywords Piston Ring, Cross Section, Moment of Inertia, Neutral Line, Coatings, Elastic Modulus.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xv
Simbologia e Siglas	xvii
Simbologia.....	xvii
Siglas.....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos.....	2
1.2. MAHLE Group.....	3
1.3. Características dos anéis de pistão.....	4
1.3.1. Definição e tipos de anel.....	4
1.3.2. Nomenclatura geral dos anéis de pistão.....	5
1.3.3. Material base.....	7
1.3.4. Revestimentos.....	8
2. ENQUADRAMENTO.....	9
2.1. Parâmetros envolvidos na definição do processo de fabrico.....	9
2.1.1. Coeficiente de conformabilidade.....	9
2.1.2. Coeficiente de ovalização.....	10
2.1.3. Abertura livre.....	11
2.1.4. Tensão de montagem.....	12
2.1.5. Tensão de trabalho.....	13
2.2. Cálculo de propriedades geométricas da secção: momento de inércia e posição da linha neutra.....	13
2.2.1. Base inicial para o desenvolvimento da metodologia de cálculo.....	14
2.3. Impacto da camada de revestimento.....	16
3. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ANÉIS.....	17
3.1. Geometria da secção transversal.....	17
3.1.1. Código interno do anel.....	19
3.2. Definição da geometria.....	20
3.3. Definição do número de pontos do sistema XY.....	22
3.3.1. Zona 1.....	23
3.3.2. Zona 2.....	24
3.3.3. Zona 3.....	25
3.3.4. Zona 4.....	26
3.3.5. Zona 5.....	26
3.3.6. Zona 6.....	27
3.3.7. Zona 7.....	28
3.3.8. Número total de pontos do sistema.....	28
3.4. Definição das coordenadas dos pontos.....	29
3.4.1. Relações geométricas.....	31

3.5.	Cálculo das propriedades da secção transversal	33
3.5.1.	Cálculo da área da secção.....	33
3.5.2.	Cálculo da posição da linha neutra.....	34
3.5.1.	Momento de inércia.....	37
3.6.	Validação dos resultados obtidos através do programa.....	39
3.6.1.	Impacto das propriedades físicas no coeficiente de conformabilidade	42
4.	IMPACTO DO REVESTIMENTO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE	45
4.1.	Modelo de análise.....	45
4.1.1.	Tensões residuais no modelo.....	46
4.1.2.	Método dos elementos finitos	47
4.1.3.	Validação do modelo.....	47
4.1.4.	Estimativa do módulo de elasticidade equivalente de um anel revestido: procedimento numérico	49
4.2.	Desenho de Experiências (DOE).....	50
4.2.1.	Abordagem fatorial fraccionada - Taguchi	51
4.2.2.	Fatores, níveis e matriz ortogonal	52
4.3.	Estimativa do módulo de elasticidade equivalente de um anel revestido: regressão linear	53
4.3.1.	Influência de cada fatores no módulo de elasticidade equivalente do anel... ..	55
4.3.2.	Estimativa do módulo de elasticidade equivalente	56
4.4.	Variação do módulo de elasticidade equivalente do anel.....	58
4.5.	Variação do coeficiente de conformabilidade	60
4.6.	Variação da força tangencial	61
4.7.	Validação do modelo de regressão	62
5.	CONCLUSÕES.....	65
5.1.	Cálculo da posição da linha neutra e do momento de inércia	65
5.2.	Impacto do revestimento no módulo de elasticidade equivalente do anel	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXO A: Desenho de projecto do anel AN75503.....	71
	ANEXO B: Excerto da norma NP03.....	73
	ANEXO C: Nomenclatura	75
	ANEXO D: DOE com matriz ortogonal L18.....	77
	ANEXO E: Regressão linear múltipla	79
	ANEXO F: Variação do módulo de elasticidade equivalente (DOE).....	81
	APÊNDICE A: Interface da metodologia de cálculo.....	83
	APÊNDICE B: Detalhes (<i>Solidworks</i>).....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Posição de cada anel no pistão, adaptado de MS Motor Service International GmbH (2010)	4
Figura 1.2. Nomenclatura geral de um anel de pistão	7
Figura 1.3. Representação de conceitos.....	7
Figura 1.4. Formas dos revestimentos, adaptado de MS Motor Service International GmbH (2010)	8
Figura 2.1. Estado do anel depois de interagir com o cilindro (Liu, 2005).....	9
Figura 2.2. Distribuição de pressão para diferentes valores do coeficiente de ovalização, z (Araújo, 2010)	11
Figura 2.3. Medição dos diâmetros para a ovalização - d_3 é o diâmetro medido na direção da folga e d_4 é o diâmetro medido na direção de 90° da folga para 270° (Garcia, 2003).....	11
Figura 2.4. Abertura livre, m (Araújo, 2010).....	12
Figura 2.5. Esquerda: excerto do desenho técnico do projeto de um anel, com a representação das dimensões das cotas normalizadas da secção transversal, espessura radial e altura paralela (para mais detalhes ver Anexo A). Direita: representação das cotas que devem ser calculadas <i>a priori</i> , para este caso específico, na metodologia inicial	14
Figura 2.6. Anel raspador com <i>napier</i>	15
Figura 3.1. Procedimento para o cálculo das propriedades da secção transversal dos anéis	17
Figura 3.2. Tipos de características que ajudam a definir a secção transversal de um anel (Bussolari, et al., 2014)	18
Figura 3.3. Cotas normalizadas correspondentes a cada geometria da face de contacto	20
Figura 3.4. Código interno do anel AN75503 segundo a norma da MAHLE (Bussolari, et al., 2014).....	20
Figura 3.5. Caixas de Combinação necessárias para a definição da geometria da secção transversal.....	21
Figura 3.6. Cotas normalizadas necessárias para definir a secção transversal do anel AN75503 (ver Anexo A) segundo as normas ISO 6621-1 (2006).....	21
Figura 3.7. Divisão em zonas da secção transversal.....	23
Figura 3.8. Representação dos pontos necessários para definir a zona 1, por tipo de geometria.....	24
Figura 3.9. Representação dos 3 pontos necessários para definir um raio	24

Figura 3.10. Representação dos pontos necessários para definir a zona 2, por geometria .	25
Figura 3.11. Representação dos pontos necessários para definir a zona 2, no caso dos canais <i>inlaid</i> ou <i>semi-inlaid</i>	25
Figura 3.12. Representação dos pontos necessários para definir a zona 3, por geometria .	26
Figura 3.13. Representação dos pontos necessários para desenhar a face do topo, zona 4. Esquerda: face totalmente paralela. Direita: face parcialmente paralela	26
Figura 3.14. Representação dos pontos necessários para desenhar as geometrias da zona 5	27
Figura 3.15. Representação dos pontos necessários para desenhar a geometria mais complexa da zona 6.....	27
Figura 3.16. Representação dos pontos necessários para desenhar a geometria real mais complexa da conjugação das zonas 5 e 6	28
Figura 3.17. Representação dos pontos necessários para desenhar as geometrias da zona 7	28
Figura 3.18. Representação da secção transversal potencialmente mais complexa, utilizando os 21 pontos. Esta secção, na prática, não existe	29
Figura 3.19. Cotas normalizadas necessárias para definir a secção do anel exemplo do Anexo A	30
Figura 3.20. Ilustração da influência da superfície abaulada no ponto 1	32
Figura 3.21. Fluxograma ilustrativo das relações usadas para definir as coordenadas do ponto 1.....	32
Figura 3.22. Ilustração das retas que definem zonas de área, $A(+)$, e zonas de área, $A(-)$	33
Figura 3.23. Ilustração do raciocínio para o cálculo da área definida por uma reta com $m > 0$ (esquerda) e $m < 0$ (direita)	34
Figura 3.24. Posição da linha neutra, T_x , na secção transversal de um anel, num sistema XY.....	35
Figura 3.25. Centro de gravidade de uma geometria composta (Beer et al., 2010).....	35
Figura 3.26. Centro de gravidade de uma geometria simples	36
Figura 3.27. Distância, d , entre os eixos paralelos	38
Figura 3.28. Secção transversal dos anéis estudados: (1) AN75752; (2) AN75503; (3) AN75229; (4) AN75158; (5) AN74878; (6) AN74596; (7) AN74294.....	39
Figura 3.29. Erro relativo do valor da área calculado	40
Figura 3.30. Erro relativo do valor da posição da linha neutra calculado	40
Figura 3.31. Erro relativo do valor do momento de inércia calculado	41
Figura 3.32. Erro absoluto do coeficiente de conformabilidade entre as metodologias antiga e proposta	43
Figura 4.1. Modelo de análise	46

Figura 4.2. Elemento 3D do tipo tetraédrico de 10 nós.....	47
Figura 4.3. Secção transversal do anel em estudo: (a) sem revestimento; (b) com revestimento de espessura de 0,01 mm; (c) com revestimento de espessura de 0,03 mm; (d) com revestimento de espessura de 1mm.	48
Figura 4.4. Procedimento para estimar o módulo de elasticidade do anel com revestimento, no módulo do <i>Solidworks</i>	50
Figura 4.5. Esquema das relações entre fatores, níveis, testes e respostas	51
Figura 4.6. Influência de cada um dos fatores na resposta ΔE [%] (retirado do <i>Minitab</i>) ..	55
Figura 4.7. Comparação do erro relativo do modelo de regressão (4.1) com e sem a constante independente.....	57
Figura 4.8. Erro relativo da estimativa do módulo de elasticidade do anel com revestimento através do modelo de regressão (4.2)	58
Figura 4.9. Interação entre o rácio E_b/E_r e a percentagem de A_r refletida na variação do módulo de elasticidade (retirado do <i>Minitab</i>)	59
Figura 4.10. Valor do coeficiente de conformabilidade em função do aumento percentual do E	60
Figura 4.11. Comparação da variação de E e da variação de Ft para garantir o mesmo valor da abertura livre.....	62

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Coeficiente de conformabilidade, k , por aplicação e material base (Araújo, 2010).....	10
Tabela 2.2. Recomendações para o valor do coeficiente de ovalização, z (Araújo, 2010).	11
Tabela 3.1. Lista de geometrias admissíveis para cada secção e respetiva nomenclatura, organizada por tipo de característica (Bussolari, et al., 2014)	18
Tabela 3.2. Coordenadas dos pontos do anel exemplo do Anexo A (extraídas da folha de cálculo auxiliar do programa desenvolvido)	30
Tabela 3.3. Propriedades da secção transversal dos anéis estudados calculadas por 3 alternativas diferentes.....	40
Tabela 3.4. Coeficiente de conformabilidade calculada com base nas diferentes metodologias	42
Tabela 4.1. Deslocamento em ZZ da ponta do anel e tempo de simulação, em função do caso de estudo e do tamanho do elemento	48
Tabela 4.2. Valores de P -Value da regressão linear múltipla criada com as 18 simulações, retirados do <i>Minitab</i>	53
Tabela 4.3. Fatores considerados e níveis correspondentes	54
Tabela 4.4. Combinações dos níveis dos fatores de cada uma das simulações, segundo a matriz ortogonal $L9$, e respetivas respostas.....	54
Tabela 4.5. Valores de P -Value das variáveis da regressão, retirados do <i>Minitab</i>	56
Tabela 4.6. Comparação de resultados da estimativa do módulo de elasticidade de anéis reais	63

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ΔL – Espessura do revestimento

a_1 – Espessura radial

A – Área da secção

A_r – Área do revestimento

d_1 – Diâmetro nominal

E – Módulo de Elasticidade

E_{anel} – Módulo de Elasticidade equivalente do conjunto (anel + revestimento)

E_b – Módulo de Elasticidade do material base de um anel com revestimento

E_r – Módulo de Elasticidade do revestimento

F_t – Força tangencial do anel

F_{ab} – Fator de abertura livre

FO_v – Fator de ovalização

h_1 – Altura paralela

I – Momento de inércia

k – Coeficiente de conformabilidade

k_{anel} – Coeficiente de conformabilidade do anel com revestimento

k_b – Coeficiente de conformabilidade do anel sem revestimento

m – Abertura livre

n – Número de pontos da secção transversal

O_v – Ovalização

s_1 – Folga entre pontas

S_a – Tensão de montagem

S_r – Tensão de flexão

S_w – Tensão de trabalho

T_x – Posição da linha neutra da secção transversal do anel em relação ao eixo vertical dos YY

z – Coeficiente de ovalização

Siglas

AC – *Air Compressor*

CAD – *Computer-aided design*

DOE – *Design of Experiments*

HDD – *Heavy Duty Diesel*

HSD – *High Speed Diesel*

ISO – *Internacional Organization for Standardization*

MDD – *Medium Duty Diesel*

PVD – *Physical Vapor Deposition*

SD – *Small Diameter*

SI – *Spark Ignition*

1. INTRODUÇÃO

Na maioria dos problemas de engenharia é possível recorrer a uma panóplia de soluções que visam a resolução de um mesmo problema, seja ele prático ou teórico. Nesse sentido, e na procura incessante de respostas que conduzam à perfeição, assenta a ambição do ser humano que, desde os seus primórdios, se dedica ao desenvolvimento e estudo de novos métodos que, década após década, século após século, ofereçam soluções para ultrapassar os obstáculos que a vida e a natureza lhe colocam.

Em meio industrial, o aumento da competitividade tem levado à necessidade das empresas apostarem na formação dos seus colaboradores e a investirem nos departamentos de investigação e desenvolvimento, com o objetivo de melhorarem os seus produtos e de diminuir os custos de produção.

Hoje em dia, a indústria automóvel, com especial foco para as empresas que se dedicam ao desenvolvimento de peças para os motores, é uma das indústrias mais exigentes ao nível da fiabilidade, eficiência e custo dos seus produtos. Tal deve-se ao mercado com cada vez mais oferta, mas também é consequência do aumento do custo do petróleo que, sendo um recurso natural, estima-se não durar muito mais décadas. Para além disso, existem as questões ambientais, que impõem soluções sustentáveis cada vez mais rigorosas. A MAHLE Componentes de Motores S.A., enquanto empresa fabricante de anéis de pistão, procura todos os dias diminuir o desgaste destes componentes e prever, com maior precisão, o seu comportamento ao longo do processo de fabrico e ao longo da vida em serviço, no motor.

Os anéis de pistão são peças colocadas em ranhuras específicas de cada pistão do motor. A necessidade de envolver um pistão com anéis resulta do facto de existir uma folga, entre a cabeça do pistão e a camisa do cilindro. Apesar da folga poder levar à diminuição do rendimento do motor, é necessária para compensar o fenómeno de dilatação do pistão, devido às altas temperaturas de funcionamento do motor. Tipicamente, cada pistão apresenta 3 ranhuras, sendo que a cada uma corresponde um anel. Cada um dos anéis tem uma função específica: (i) o anel de compressão procura evitar que os gases de combustão passem da câmara de combustão para o cárter do motor, evitando a perda de

pressão de combustão e a contaminação do lubrificante; (ii) o anel raspador e de compressão é responsável pela remoção do excesso de óleo na camisa do cilindro, contribuindo para uma maior eficiência do processo de lubrificação, bem como ajudar o anel de compressão; e (iii) o anel de óleo procura controlar o fluxo de óleo que sai do cárter para lubrificar o processo.

A eficiência de um anel, a longo prazo, depende do desgaste que sofre ao longo da vida. Este é função da forma como o anel se adapta e interage com o pistão, o que depende de diversas propriedades do anel. O desgaste pode ser reduzido com a aplicação de um revestimento na superfície de contacto entre o anel e a camisa do cilindro, que altera algumas das propriedades do anel.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo facilitar e complementar o processo de cálculo das propriedades de anéis de pistão, incluindo o aumento da precisão deste cálculo. Para além desse objetivo principal, também se pretende estudar a influência dos revestimentos nas propriedades dos anéis. A melhoria no cálculo das propriedades físicas dos anéis visa aumentar a confiança e o controlo no seu fabrico, ajustando-as às necessidades da empresa e dos clientes, até porque as propriedades geométricas da secção transversal definem como deverá ser maquinado o anel na produção.

As propriedades geométricas em análise são o momento de inércia e a posição da linha neutra da secção transversal, uma vez que influenciam as propriedades dos anéis utilizadas no estudo do comportamento em serviço e funcionamento no motor. Estas propriedades dependem também das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nos anéis. Neste contexto, pretende-se estudar a influência da aplicação da camada de revestimento no módulo de elasticidade equivalente do anel, uma vez que esta propriedade mecânica é diferente para o material base e para o revestimento. O trabalho realizado focou-se nos anéis de pistão de compressão e foi realizado nas instalações da MAHLE Componentes de Motores S.A., em Portugal.

1.2. MAHLE Group

A MAHLE é um grupo alemão com sede em Stuttgart, fundado em 1920 pelos irmãos Ernst e Hermann Mahle, com a introdução de ligas leves como material alternativo ao ferro fundido, para o fabrico de pistões. Apesar das dificuldades iniciais em implementar as ligas leves no fabrico de pistões, os irmãos Mahle começaram a ganhar mercado no setor automóvel com este tipo de pistões quando começaram a desenvolver filtros de óleo, ar e combustível, (MAHLE Group, 2015). O grupo não se limitou ao fabrico destes componentes e é, atualmente, um dos maiores fornecedores da indústria automóvel, produzindo também anéis de pistão, camisas, bronzinas, arruelas de encosto, bielas, sistemas de admissão, entre outros componentes, periféricos e sistemas de motores de combustão.

Impulsionado pela exigência do setor automóvel, o grupo sente uma constante necessidade em apostar no desenvolvimento tecnológico, de modo a encontrar sempre novas e melhores soluções, assentes nos princípios de qualidade do produto e satisfação do cliente.

Na área em que opera, o grupo apresenta-se como um dos três líderes de mercado, com cerca de 150 centros operativos, entre fábricas e centros tecnológicos, espalhados por todo o mundo, com cerca de 66000 colaboradores, dos quais mais de 4500 são engenheiros e técnicos que trabalham no desenvolvimento de produtos voltados para o presente e para o futuro (MAHLE Group, 2015).

Em Portugal, a MAHLE Componentes de Motores S.A. conta com uma fábrica de anéis de pistão, no concelho de Cantanhede, adquirida em 1997 ao grupo Cofapeuropa S.A., que tinha começado a operar nessa localização em 1993. Este grupo era originário do Brasil, onde a MAHLE Group se tinha instalado em 1950, por intermédio de Ernst Mahle (MAHLE América do Sul, 2015). Tal como os outros centros operativos, a fábrica em Portugal atua globalmente, em contacto permanente com o grupo no Brasil e em Espanha.

Na fábrica em Murte, Cantanhede, o grupo conta com mais de 600 colaboradores que operam na área dos anéis de pistão, fabricados a partir de placas de ferro fundido cinzento ou nodular ou da conformação de fitas de aço, com a possibilidade de incluírem revestimentos que aumentam a sua durabilidade. Estes componentes são fabricados com tecnologia de ponta, sendo que, em 2010, foi instalada nesta fábrica uma linha de produção de anéis para motores de competição, designada por *Racing*, responsável

por abastecer grandes marcas, como a Ferrari na *Fórmula 1*, a Ducati na *MotoGP*, a Audi nas *24 Horas de Le Mans* ou alguns motores na *NASCAR*. Estas parcerias, tal como todas as outras, envolvem uma constante aposta na investigação e na inovação, assim como a constante preocupação com questões ambientais e com o bem-estar dos trabalhadores, e tornam a MAHLE Componentes de Motores S.A. um grupo de confiança e de referência a nível mundial.

1.3. Características dos anéis de pistão

1.3.1. Definição e tipos de anel

A designação anel de pistão deriva do inglês *piston ring*. Pode também ser utilizada a denominação de segmento, que deriva do francês *segment*. A norma ISO 6621-1 (Internacional Organization for Standardization, 2006) define um anel de pistão como sendo uma mola circular metálica que, depois de montado numa ranhura do pistão, tem a capacidade de se auto-expandir, de modo a promover a vedação da folga entre a camisa do cilindro e a cabeça do pistão. Esta definição de anel pode ser considerada muito vaga, uma vez que, num motor a combustão comum, tipicamente, cada pistão é constituído por 3 anéis, cada um com a sua função. Deste modo, torna-se obrigatório dividir os anéis de pistão em 3 categorias distintas: anel de compressão, anel de compressão e raspador, e anel de óleo. A posição de cada anel no pistão encontra-se esquematizada na Figura 1.1.

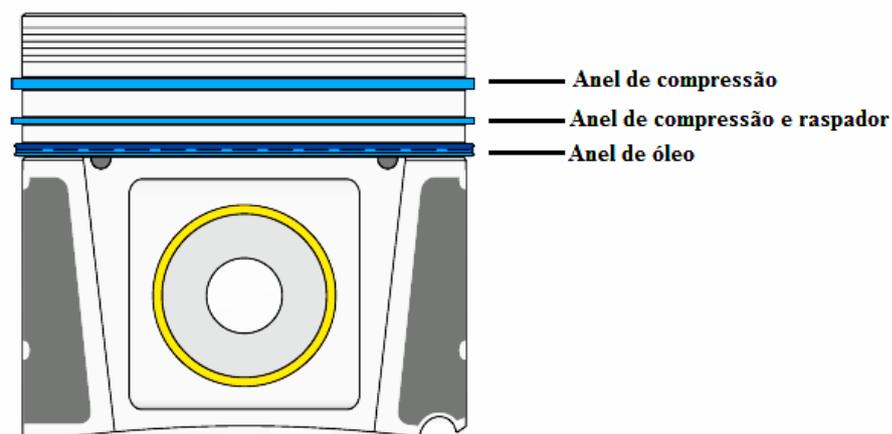


Figura 1.1. Posição de cada anel no pistão, adaptado de MS Motor Service International GmbH (2010)

1.3.1.1. Anel de compressão

O anel de compressão é o que está mais próximo da câmara de combustão, na 1ª ranhura do pistão. Segundo a norma ISO 6621-1 (2006), este anel tem como principal função prevenir que os gases de combustão escapem pela folga do pistão. O escape destes gases pode diminuir o rendimento do motor, uma vez que a pressão de combustão diminui, e pode também contaminar o óleo lubrificante. É também responsável por absorver o calor transmitido pelo pistão durante o processo de combustão e transmiti-lo para a parede do cilindro.

1.3.1.2. Anel raspador

O anel raspador é montado na ranhura do meio. Além de auxiliar o primeiro anel na função de troca de calor e na retenção dos gases de compressão (apenas cerca de 80% destes são retidos pelo anel do topo), tem como principal função extrair para o cárter o excesso de óleo acumulado na camisa do cilindro, para evitar que este passe para a câmara de combustão e se misture com os gases. Deste modo, fica apenas um filme de lubrificante na camisa, que não é completamente lisa, para garantir que as duas peças metálicas não raspem diretamente uma na outra.

1.3.1.3. Anel de óleo

O anel de óleo é montado na parte inferior da cabeça do pistão, na 3ª ranhura. É responsável por controlar o fluxo de óleo lubrificante, que entra na folga pistão/cilindro, e a espessura de filme de lubrificante que fica na camisa do cilindro. O restante óleo passa para o cárter do motor. A lubrificação do contacto entre o pistão e o cilindro é parte integrante do processo de transformação de energia química de combustão em energia mecânica, uma vez que torna o mecanismo mais eficiente, ao reduzir a força de atrito entre as duas peças metálicas. Normalmente, o anel de óleo é constituído por mais do que uma peça.

1.3.2. Nomenclatura geral dos anéis de pistão

Neste subcapítulo são introduzidos os conceitos gerais e nomenclatura dos anéis de pistão. A nomenclatura é apresentada de acordo com as normas internacionais para os anéis de pistão. Ao longo do trabalho, sempre que necessário, serão introduzidos

outros conceitos mais específicos. A Figura 1.2 resume a nomenclatura mais geral, de modo a facilitar a sua compreensão. Alguns conceitos estão representados na Figura 1.3.

Abertura livre, m (mm) – é a distância entre pontas do anel, no estado de descompressão, medida desde a linha imaginária que passa no centro da espessura radial;

Altura paralela, h_1 (mm) – distância entre as faces paralelas inferior e superior do anel, medida na perpendicular ao plano de referência;

Diâmetro nominal, d_1 (mm) – diâmetro medido externamente com o anel na condição de trabalho (condição de folga entre pontas);

Espessura radial, a_1 (mm) – distância máxima, medida na horizontal, entre dois pontos da face exterior e da face interior do anel;

Face de trabalho – também chamada de face de contacto, refere-se à superfície exterior no anel que está em contacto com a camisa do cilindro;

Folga entre pontas, s_1 (mm) – é a distância entre pontas do anel, quando este está montado no motor, sob pressão, compensando a dilatação no anel quando exposto a temperaturas elevadas, de modo a evitar que quebre em funcionamento;

Força tangencial, F_t (N) – força de expansão do anel quando este está montado no motor, na condição de folga entre pontas;

Cotas nomalizadas – todas as cotas que se encontram na norma internacional de anéis de pistão que gozam de nomenclatura própria (por exemplo, toda a nomenclatura da Figura 1.1).

Propriedades físicas dos anéis – também designadas por parâmetros dos anéis, estudam a viabilidade destes, bem como o seu comportamento ao longo da montagem e funcionamento no motor. Definem também o processo de fabrico destes componentes.

Módulo de elasticidade do anel, E_{anel} – também designado por módulo de elasticidade equivalente, representa o módulo de elasticidade do conjunto material base com revestimento. No entanto, deve ficar claro que o módulo de elasticidade é uma propriedade específica de cada material.

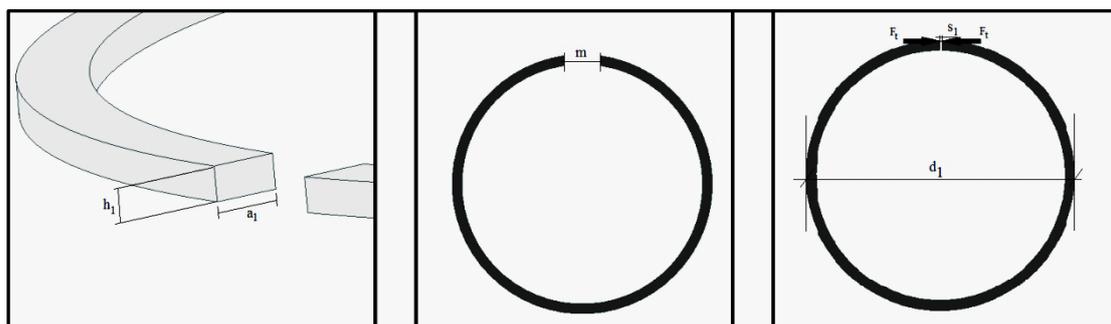


Figura 1.2. Nomenclatura geral de um anel de pistão

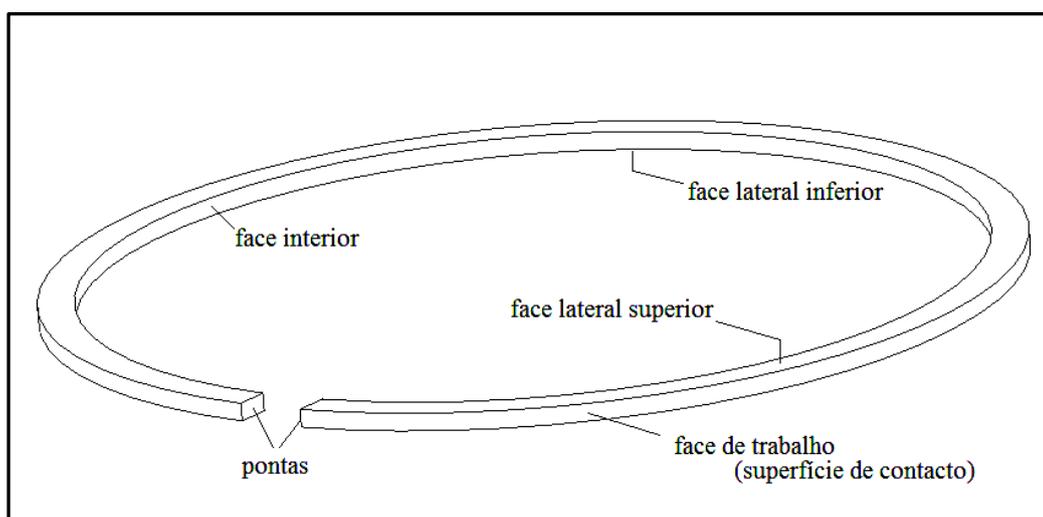


Figura 1.3. Representação de conceitos

1.3.3. Material base

O material que compõe a maior parte ou a totalidade do corpo do anel é denominado por material base ou substrato. Os materiais base estão subdivididos em duas grandes classes: ferro fundido e aço (MAHLE Metal Leve, 2015).

Os anéis em ferro fundido, cinzento ou nodular, têm como principais características a elevada resistência ao desgaste e à fadiga, devido à adição de elementos de liga na sua composição, assim como boas condições de trabalho quando expostos a grandes temperaturas e a pouca lubrificação. Os anéis de aço, inoxidáveis ou ao carbono, são caracterizados por terem um módulo de elasticidade mais elevado do que o do ferro fundido. Esta característica permite produzir anéis com alturas paralelas mais baixas, sem risco de quebra do anel, quer na montagem quer no funcionamento.

1.3.4. Revestimentos

Quando o motor está em funcionamento, os anéis podem ser expostos a condições de trabalho mais severas do que o normal, que podem conduzir a um desgaste mais elevado e mais prematuro. Um exemplo de condições mais severas são a falta de lubrificação e a deficiência do sistema de arrefecimento do motor (MAHLE Metal Leve, 2015).

Para diminuir o desgaste e aumentar o tempo de vida dos anéis, é aplicado um revestimento na face de trabalho do anel, com uma espessura bastante reduzida, mas com melhores propriedades mecânicas, i.e. mais duros e mais resistentes. Para este efeito, recorre-se a tecnologias de PVD (*Physical Vapor Deposition*), que permitem produzir revestimentos em crómio, crómio cerâmico ou em ligas de última geração. Tipicamente, os revestimentos apresentam uma das três formas representadas na Figura 1.4.

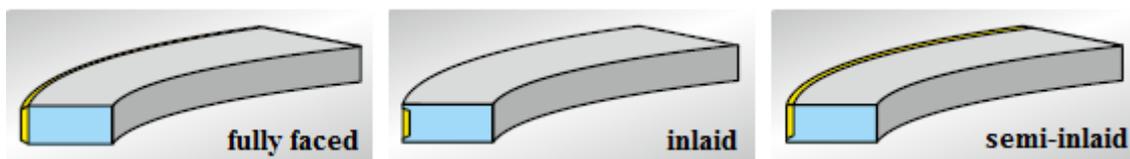


Figura 1.4. Formas dos revestimentos, adaptado de MS Motor Service International GmbH (2010)

2. ENQUADRAMENTO

2.1. Parâmetros envolvidos na definição do processo de fabrico

A análise de viabilidade de fabrico e a eficácia de uma determinada geometria de anel são estudadas com base no cálculo e análise de parâmetros que dependem de algumas das suas propriedades, como o momento de inércia, I_y , e a posição da linha neutra em relação ao eixo vertical dos YY da sua secção transversal, T_x , do módulo de elasticidade do material, E , e da força tangencial, F_t . Estes parâmetros, também designados ao longo deste trabalho por propriedades físicas dos anéis, devem atender a determinados critérios previamente estabelecidos (Araújo, 2010), antes de o anel seguir para a fase de produção, e são apresentados neste subcapítulo.

2.1.1. Coeficiente de conformabilidade

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.1.2. Coeficiente de ovalização

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.1.3. Abertura livre

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.1.4. Tensão de montagem

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.1.5. Tensão de trabalho

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.2. Cálculo de propriedades geométricas da secção: momento de inércia e posição da linha neutra

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.2.1. Base inicial para o desenvolvimento da metodologia de cálculo

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

2.3. Impacto da camada de revestimento

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3. METODOLOGIA PARA O CÁLCULO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ANÉIS

----- este capítulo contém material confidencial -----

3.1. Geometria da secção transversal

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.1.1. Código interno do anel

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.2. Definição da geometria

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3. Definição do número de pontos do sistema XY

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.1. Zona 1

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.2. Zona 2

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.3. Zona 3

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.4. Zona 4

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.5. Zona 5

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.6. Zona 6

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.7. Zona 7

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.3.8. Número total de pontos do sistema

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.4. Definição das coordenadas dos pontos

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.4.1. Relações geométricas

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.5. Cálculo das propriedades da secção transversal

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.5.1. Cálculo da área da secção

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.5.2. Cálculo da posição da linha neutra

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.5.1. Momento de inércia

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.6. Validação dos resultados obtidos através do programa

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

3.6.1. Impacto das propriedades físicas no coeficiente de conformabilidade

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4. IMPACTO DO REVESTIMENTO NO MÓDULO DE ELASTICIDADE

----- este capítulo contém material confidencial -----

4.1. Modelo de análise

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.1.1. Tensões residuais no modelo

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.1.2. Método dos elementos finitos

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.1.3. Validação do modelo

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.1.4. Estimativa do módulo de elasticidade equivalente de um anel revestido: procedimento numérico

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.2. Desenho de Experiências (DOE)

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.2.1. Abordagem fatorial fraccionada - Taguchi

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.2.2. Fatores, níveis e matriz ortogonal

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.2.2.1. Seleção dos fatores fundamentais

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.3. Estimativa do módulo de elasticidade equivalente de um anel revestido: regressão linear

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

**4.3.1. Influência de cada fatores no módulo de elasticidade
equivalente do anel**

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.3.2. Estimativa do módulo de elasticidade equivalente

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.4. Variação do módulo de elasticidade equivalente do anel

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.5. Variação do coeficiente de conformabilidade

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.6. Variação da força tangencial

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

4.7. Validação do modelo de regressão

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

5. CONCLUSÕES

O trabalho realizado tinha como objetivo principal o cálculo das propriedades geométricas dos anéis de 1ª e 2ª ranhura, necessárias para a fase de projeto de fabrico. Este cálculo deve ser realizado com precisão de modo a garantir maior confiança e maior flexibilidade no processo de produção dos anéis. Neste contexto, foi definido também o objetivo de determinar o impacto do revestimento nas propriedades físicas dos anéis.

5.1. Cálculo da posição da linha neutra e do momento de inércia

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

5.2. Impacto do revestimento no módulo de elasticidade equivalente do anel

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

----- este subcapítulo contém material confidencial -----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo Fábio S-R-PS-0006-en, Piston Rings: Scraper and Compression Rings used in 2nd groove, Design Guideline [Relatório]. - Brasil : MAHLE GmbH: Marcio Yamawaki, 2013.
- Araújo Fábio S-R-PS-0017-en, Descriptions of calculations for Piston Rings designs [Relatório]. - Brasil : MAHLE GmbH: Márcio Yamawaki - EDMEM, 2010.
- Beer Ferdinand P. [et al.] Chapter 9 - Distributed Forces: Moments of Inertia [Secção do Livro] // VECTOR MECHANICS FOR ENGINEERS - Statics and Dynamics, 9th Edition. - [s.l.] : McGrawHill , 2010.
- Bussolari Arthur e Araújo Fábio S-R-PS-0003-en, NP03 - Piston Rings codes description [Relatório]. - Brasil : MAHLE GmbH: Márcio Yamawaki - EDMEM, 2014.
- Chapra Steven e Canale Raymond Numerical Methods for Engineers, Sixth Edition [Livro]. - New York, US : McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- Dlugos Jozef Computacional Modelling of Ring Dynamics // Tese de Mestrado. - Brno : Brno University of Technology, Maio de 2014.
- Fernandez Márcia S-R-PS-0005-en, Upper Compression Rings, Design Guidelines [Relatório]. - Brasil : MAHLE GmbH: Marcio Dias (EDMEM), Marcio Yamawaki (EDME), 2014.
- Garcia Marcos Batista Características do desgaste de anéis de pistão com diferentes tecnologias de tratamentos superficiais // Dissertação de Mestrado. - São Paulo : Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares, 2003.
- Internacional Organization for Standardization Piston Rings and Pins ISO 6621-1, 1ª Edição [Livro]. - Suíça : Internacional Organization for Standardization, 2006.
- Lagatta Cristiano F. Medição de tensões residuais em filmes finos durante o processo de deposição [Relatório]. - São Paulo : Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.
- Liu Liang Modeling the Performance of the Piston Ring-Pack with Consideration of Non-Axisymmetric Characteristics of the Power Cylinder System in Internal Combustion Engines [Livro]. - Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- Lotti Raquel [et al.] Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos [Relatório]. - Maringá, Brasil : R Dental Press Ortodon Ortop Facial, 2006.
- MAHLE América do Sul MAHLE AMÉRICA DO SUL [Online] // Web site de MAHLE América do Sul / PT. - 2015. - Abril de 2015. - <http://www.mahle.com.br>.
- MAHLE Group ABOUT MAHLE [Online] // Web Site de MAHLE Group. - 2015. - Abril de 2015. - <http://www.mahle.com>.
- MAHLE Metal Leve "MANUAL TÉCNICO - Aftermarket" (Capítulo 7 - Anéis de pistão) [Online] // Web site de MAHLE América do Sul. - 2015. - Abril de 2015. - www.mahle.com.br.
- Minitab Inc. Minitab 17 Support [Online] // Web site do Minitab. - 2015. - Junho de 2015. - <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/introductory-concepts/p-value-and-significance-level/what-is-pvalue/>.

- MS Motor Service International GmbH Piston Rings for Combustion Engines - Service, Tips & Infos [Livro]. - Heilbronn, Alemanha : Motor Service Technical Market Support, 2010.
- Sakharova N.A. [et al.] On the Determination of Mechanical Properties of a Material with Residual Stresses by Indentation: Numerical Simulation Study [Conferência] // IV European Conference on Computational Mechanics. - Paris, France : [s.n.], 2010.
- SOLIDWORKS Web Help [Online] // Simulation > Meshing > Background on Meshing (Solidworks 2010). - 2015. - May de 2015. - <http://help.solidworks.com/HelpProducts.aspx>.
- Tomanik Eduardo Ring Free Shape Calculation and Pressure Distribution - Technical Report [Relatório]. - Brasil : MAHLE Metal Leve S.A., Centro Tecnológico, 2007.

ANEXO A: DESENHO DE PROJECTO DO ANEL AN75503

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

ANEXO B: EXCERTO DA NORMA NP03

----- este anexo contém material confidencial -----

ANEXO C: NOMENCLATURA

**Nomenclatura das cotas normalizadas para a norma NP03 e
respetivas aplicações**

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

ANEXO D: DOE COM MATRIZ ORTOGONAL L18

----- este anexo contém material confidencial -----

ANEXO E: REGRESSÃO LINEAR MÚTIPLA

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

ANEXO F: VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE EQUIVALENTE (DOE)

----- este anexo contém material confidencial -----

APÊNDICE A: INTERFACE DA METODOLOGIA DE CÁLCULO

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

APÊNDICE B: DETALHES (*SOLIDWORKS*)

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----

----- este anexo contém material confidencial -----