



**Ricardo Miguel dos
Santos Neta**

**Análise e simulação dum pistão automóvel sob
diferentes condições de funcionamento**



**Ricardo Miguel dos
Santos Neta**

**Análise e simulação dum pistão automóvel sob
diferentes condições de funcionamento**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia Mecânica, realizada sob orientação científica de Francisco José Malheiro Queirós de Melo, Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

O júri / The jury

Presidente / President

Prof. Doutor Alfredo Manuel Balacó de Moraes

Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador)

Prof. Doutor José Luís Soares Esteves

Professor Auxiliar da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Agradecimentos /
Acknowledgements**

Em primeiro lugar aos meus pais que sempre me incentivaram sempre a fazer o meu melhor e apoiaram todas as minhas ideias, invenções e manias. Aos professores da Universidade de Aveiro que sempre se demonstraram disponíveis e muito incentivaram à criatividade, em particular o meu orientador Francisco Queirós de Melo, os professores Robert Valente, Balacó Morais e Teixeira Dias. À Sónia por nunca me deixar ser preguiçoso e a todos os meus amigos por me deixarem. Muito obrigado!

Palavras-chave

Pistão; Métodos Numéricos; Simulação; Estrutural; Térmico

Resumo

Atualmente o automóvel é um bem de conforto e trabalho imprescindível. Os padrões de segurança e fiabilidade envolvidos no fabrico dos seus componentes são de elevada exigência. No caso particular de peças integrando o motor (geralmente de combustão interna), o sucesso do bom desempenho em serviço depende de apurada investigação. Neste trabalho foi selecionado o estudo das solicitações de origem térmica e mecânica no pistão de um motor de 4 tempos. Para este projeto, foi efetuada simulação numérica a partir de software dotado da componente teórica necessária à caracterização do campo de temperaturas e deformações. As situações consideradas referem-se ao caso de combustão dita normal e com detonação, em que aqui o regime de pressões e temperaturas é muito severo, afetando a curto ou médio prazo a duração e integridade do componente. Para avaliar o grau de eficiência mecânica, foi efetuado o estudo das forças, determinando a compressão do pistão contra a face lateral cilíndrica e sua implicação no atrito. Foi também analisado o efeito de inversão do escoamento dos gases de admissão/escape e seu reflexo na assimetria térmica no pistão. Por fim, sugere-se um traçado melhorado para o pistão, a fim de minimizar os efeitos adversos referidos no estudo.

Keywords

Piston; Numeric Methods; Simulation; Structural; Thermal

Abstract

Nowadays, the automobile is tool for human comfort in modern life. Its continuous availability to run and reliability depends on a successful research prior the fabrication. In the particular case of engine parts, the piston plays a very important role once it transforms the internal combustion energy in mechanical displacement for work at the expense of severe thermal loads. Given the importance of this area of research it was select in this thesis, the characterization of the piston temperature and thermal stress field, also coupled with the mechanical work effect (burned gas pressure load and inertial forces). A finite element simulation of this problem was carried out for the objetives mentioned. The situations considered ranged from the normal combustion up to the knock down effects that are extremely severe for the piston integrity and performance. In extension with the study described, it was developed the study of the effects of friction forces along the piston wall contacting with adjacent parts. The problem of flow inversion (this meaning the thermal effect of intake/exhaust reversal on the piston head) was also investigated. Finally, an improved piston design, based on the investigation described, was suggested for further performance and reliability increase.

Conteúdo

I	Enquadramento e Estado da arte	1
1	Introdução	3
1.1	Enquadramento histórico do Pistão	3
2	Objetivos	5
3	Guia de Leitura	7
4	Estado da Arte	9
4.1	Generalidades	9
4.2	Definição das várias partes do pistão	10
4.3	Tipos de Pistões	11
4.3.1	Pistões de dois tempos	11
4.3.2	Pistões moldados	11
4.3.3	Pistões forjados	12
4.3.4	Pistões hidrotérmicos	12
4.3.5	Pistões hidrotermáticos	12
4.3.6	Pistões com segmentos e <i>pin boss bushes</i>	13
4.3.7	Pistões com segmentos e canal de arrefecimento	13
4.3.8	Pistões com segmentos, canal de arrefecimento e coroa reforçada	14
4.3.9	Pistões com segmentos arrefecidos	14
4.4	Métodos de Produção	14
4.4.1	Moldagem	15
	Moldagem de molde permanente	16
	Moldagem por injeção	16
	Tratamentos Térmicos pós Moldação	17
4.4.2	Forja	17
4.4.3	Maquinagem	18
	Maquinagem pós Moldação	18
	Maquinagem pós Forja	18
4.5	Características dos materiais	19
4.5.1	Ligas comerciais: Propriedades	19
4.5.2	Diagrama de Fases	21
4.5.3	Tratamentos térmicos	22
4.5.4	Investigação laboratorial	24
	Limite elástico verdadeiro	24
	Limite de proporcionalidade	24

Limite de elasticidade (<i>yielding strength</i>)	24
Ponto <i>yielding</i>	25
Deslocamento ponto de rendimento	25
Ponto de rendimento superior e ponto de menor rendimento	25
II Métodos e Modelos	27
5 Cinemática do caso em estudo	29
5.1 Equações de Movimento e Cinemática do Pistão	29
5.1.1 Determinação das acelerações e velocidades máximas	30
6 Comportamento Termodinâmico	33
6.1 Transferência de calor no pistão	33
6.1.1 Condução	33
Condução transiente	34
6.1.2 Convecção	34
6.1.3 Radiação	35
6.2 Influência da variação de temperatura	35
Coeficiente de expansão térmica	36
Difusividade térmica	38
Calor específico	39
Condutividade térmica	39
6.3 Variação do fluxo de calor durante o ciclo de combustão	40
7 Comportamento Estrutural	41
7.1 Influência dos esforços em frequência	41
7.2 Variação da pressão durante o ciclo de combustão	42
7.3 Cálculo de forças internas causadas pelas acelerações	42
7.4 Configurações Críticas	43
7.4.1 Resumo das propriedades	44
8 Fluxo de ar dentro do cilindro	47
8.1 Definição do caso em estudo	47
8.1.1 Simulação CFD por Brandstatter	48
9 Programas de Modelação	51
9.1 Elementos finitos	51
9.1.1 Tipos de Elementos	51
9.2 Fases de processamento	53
9.2.1 Definição e aplicação das condições fronteira e das características do material	53
9.2.2 Pré-processamento	54
9.2.3 Pós-processamento	54
9.2.4 Apresentação gráfica	54

10	Parametrização dos problemas em estudo	57
10.1	Caso base	57
10.1.1	Definição dos parâmetros utilizados	57
	Caso térmico	57
	Caso estrutural	58
10.2	Influência do fluxo de ar frio da Admissão	58
10.3	Atrito e fricção	59
10.4	O efeito da detonação no pistão	60
11	Modelação Numérica	65
11.1	Simulação numérica dos casos base	65
11.1.1	Simulação numérica do caso base térmico em termos de fluxos e variações de temperaturas	65
11.1.2	Simulação numérica do caso estrutural base	68
11.2	Simulação numérica de casos alternativos	69
11.2.1	A influência do ar da admissão na assimetria térmica	69
11.2.2	A influência do atrito dos segmentos e da parede do cilindro	71
11.2.3	A influência de um evento singular de detonação ligeira	71
11.2.4	Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com elevada relevância	71
11.3	O efeito dos melhoramentos no pistão	72
III	Resultados e Discussão	75
12	Resultados Numéricos	77
12.1	Análise térmica base	77
12.1.1	Simulação numérica do caso térmico base	77
	Temperatura Nodal	77
12.2	Análise estrutural base	79
12.2.1	Simulação numérica do caso estrutural base	79
	Tensões de Von Mises	79
	Deslocamentos	82
	Erro do método	85
12.3	Influência do fluxo do ar da admissão	86
12.3.1	Simulação térmica da influência do ar da admissão	86
	Temperatura Nodal	86
12.4	Influência do Atrito e da fricção	89
12.4.1	Simulação estrutural da influência do atrito	89
	Tensões de Von Mises	89
	Deslocamentos	90
	Erro do método	93
12.5	O efeito do detonação	93
12.5.1	Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com baixa relevância	93
	Tensões de Von Mises	93
	Deslocamentos	95

Erro do método	97
12.5.2 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com elevada relevância	97
Tensões de Von Mises	97
Deslocamentos	99
Erro do método	101
12.6 Simulações do pistão melhorado	102
12.6.1 Análise térmica	102
Temperatura Nodal	102
12.6.2 Simulação estrutural	103
Tensões de Von Mises	103
Deslocamentos	105
13 Conclusões	109
13.1 Análise térmica base	109
13.2 Análise estrutural base	110
13.3 Influência do fluxo do ar da admissão	111
13.4 Influência do Atrito e da fricção	111
13.5 O efeito do detonação	111
13.5.1 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com baixa relevância	111
13.5.2 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com elevada relevância	112
13.6 Análise térmica ao pistão melhorado	113
13.7 Análise estrutural ao pistão melhorado	113
13.8 Cedência plástica e falhas catastrófica	114
13.9 Discussão e Trabalhos Futuros	114
IV Anexos	115

Lista de Tabelas

4.1	Especificação dos tratamentos para alumínios da série H [21])	21
6.1	Variação do coeficiente de expansão térmica com a temperatura	38
6.2	Variação da difusividade térmica com a temperatura	38
6.3	Variação do calor específico com a temperatura	39
6.4	Variação da condutividade térmica com a temperatura	40
7.1	Propriedades estruturais da liga de alumínio T6061 [40]	44
8.1	Velocidades médias em cada área m/s	49
9.1	Tabela de elementos para análise estrutural e a sua descrição	52
9.2	Tabela de elementos para análise térmica e a sua descrição	52
10.1	Tabela de fluxos criados pelo ar de admissão em W/m^2	58
11.1	Tabela de fluxos criados pelo ar de admissão em W/m^2	69

Lista de Figuras

4.1	1. Terra 2. Rasgos para segmentos 3. Furos de óleo 4. Saia 5. <i>Pin boss</i> 6. Coroa	10
4.2	Pistão a dois tempos seccionado	11
4.3	Pistão moldado	11
4.4	Pistão forjado	12
4.5	Pistão hidrotérmicos	12
4.6	Pistão hidrotermático	13
4.7	Pistão com segmentos e anilhas no <i>pin boss</i>	13
4.8	Pistão com segmentos e canal de arrefecimento	14
4.9	Pistão com segmentos, canal de arrefecimento e coroa reforçada	14
4.10	Pistão com segmentos arrefecidos	15
4.11	Gráfico de fase do alumínio liga 6060	22
5.1	Cinemática do Pistão	29
5.2	Gráfico posição, velocidade e aceleração do pistão em relação à rotação da cambota.	31
6.1	Variação das temperaturas dentro de um pistão de um motor a gasolina [36]	35
7.1	Pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição	42
7.2	Aparecimento de fraturas num pistão de um motor a gasolina [6]	43
7.3	Aparecimento de fraturas [6]	43
7.4	Aparecimento de fraturas por fadiga [6]	44
7.5	Curvas Tensão-Deformação para várias ligas de Alumínio	45
8.1	<i>Flat plate</i> num fluxo paralelo [9]	47
8.2	Fluxo de ar durante a admissão. Vector de referência 250 m/s. Zonas Baixa pressão ABCDEF [35]	48
8.3	Definição das diferentes áreas 1,2,3 e 4 respetivamente	49
9.1	Elemento finito com 1 e 4 pontos de integração. Pontos encontram-se definidos por um quadrado e nós por um círculo. [19]	53
9.2	Interface do software	54
9.3	Monitorização do programa em funcionamento	55
9.4	Exemplo de apresentação gráfica numa análise térmica	55

9.5	Exemplo de apresentação gráfica numa análise estrutural	55
10.1	Atrito em kPa ao longo dos 4 estágios do ciclo. Verde- Compressão, Vermelho-Igنيção, Amarelo-Escape, Azul-Admissão	60
10.2	Influência da ignição na pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição	63
10.3	Influência da detonação na pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição	63
10.4	Influência da detonação de elevada magnitude, na pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição	63
11.1	Malha utilizada no modelo simplificado, elementos com faces de 10mm	66
11.2	Malha utilizada no modelo final para todos os ensaios, elementos com faces de 1mm	66
11.3	Pontos essenciais para a boa criação de malha	66
11.4	Histórico de simulação	67
11.5	Soluções requisitadas	67
11.6	Pontos de controlo na coroa para análises térmicas assinalados a vermelho	67
11.7	Pontos de controlo na base para análises térmicas assinalados a vermelho	67
11.8	Pontos de controlo para deslocamentos	68
11.9	Pontos de controlo para tensões de Von Mises	68
11.10	Pressão aplicada na coroa do pistão e fixação	69
11.11	Fluxos térmicos causados pelo ar de admissão	70
11.12	Aplicação das forças de atrito	71
11.13	Criação da função de amplitude do knock	72
11.14	Pistão com melhoramentos	73
12.1	Dispersão térmica vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin	78
12.2	Dispersão térmica vista em corte para comparação temperatura em graus Célsius	78
12.3	Gráfico das variações de temperatura ao longo de 40 segundos	79
12.4	Tensões de Von Mises máximas	80
12.5	Tensões de Von Mises máximas retirado de <i>Thermo-Mechanical Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Piston</i> [38] e de <i>Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss</i> [38] [39]	81
12.6	Gráfico das variações das tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos	82
12.7	Deslocamentos máximos	83
12.8	Deslocamentos máximos retirado de <i>Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss</i> [38]	83
12.9	Gráfico das variações deslocamentos na direção U1 ao longo de 40 segundos	84
12.10	Gráfico das variações de deslocamentos na direção U2 ao longo de 40 segundos	84
12.11	Gráfico das variações de deslocamentos na direção U3 ao longo de 40 segundos	85

12.12	Erro do método	86
12.13	Dispersão térmica vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin	86
12.14	Dispersão térmica vista em corte do caso base ao fim de 40 segundos para comparação	87
12.15	Dispersão de temperaturas ao final de 40 segundos de funcionamento vista de topo	87
12.16	Gráfico das variações de temperatura ao longo de 40 segundos	88
12.17	Tensões de Von Mises máximas com o efeito do atrito	89
12.18	Gráfico das variações das tensões de von mises ao longo de 40 segundos	90
12.19	Deslocamentos máximos	91
12.20	Deslocamentos máximos	91
12.21	Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos	92
12.22	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos	92
12.23	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos	93
12.24	Tensões de Von Mises máximas criadas por um evento de detonação de baixa relevância	94
12.25	Gráfico das variações de tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos, criadas por um evento de detonação de baixa relevância	94
12.26	Deslocamentos máximos criados por um evento de detonação de baixa relevância	95
12.27	Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por um evento de detonação de baixa relevância	96
12.28	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por um evento de detonação de baixa relevância	96
12.29	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por um evento de detonação de baixa relevância	97
12.30	Tensões de Von Mises máximas criadas por evento singular de detonação com elevada relevância	98
12.31	Gráfico das variações de tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos para o efeito da detonação de elevada relevância	98
12.32	Deslocamentos máximos	99
12.33	Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por evento singular de detonação com elevada relevância	100
12.34	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por evento singular de detonação com elevada relevância	100
12.35	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por evento singular de detonação com elevada relevância	101
12.36	Dispersão térmica no caso melhorado, vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin	102
12.37	Dispersão térmica no caso base vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin	103
12.38	Gráfico das variações de temperatura ao longo de 40 segundos, para o caso melhorado	104
12.39	Tensões de Von Mises máximas no caso melhorado	104
12.40	Gráfico das variações de tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos, no caso melhorado	105

12.41	Deslocamentos máximos no caso melhorado	106
12.42	Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos, no caso melhorado	106
12.43	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, no caso melhorado	107
12.44	Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, no caso melhorado	107
13.1	Variação da temperatura no componente ao longo de 40 segundos	117
13.2	Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio estrutural base	118
13.3	Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio estrutural base	119
13.4	Variação da temperatura no componente com influência do fluxo de ar, ao longo de 40 segundos	120
13.5	Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio estrutural sobre a influencia do atrito	121
13.6	Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio de atrito	122
13.7	Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio de detonação ligeira	123
13.8	Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio de detonação ligeira	124
13.9	Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio sobre a detonação elevada	125
13.10	Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio sobre a detonação elevada	126
13.11	Variação da tensão de Von Mises durante um ciclo de compressão e explosão de acordo para o pistão melhorado	127
13.12	Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio pistão melhorado	128

Parte I

Enquadramento e Estado da arte

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento histórico do Pistão

O Pistão já existia bem antes da invenção do motor de combustão interna, mas podemos assegurar que sem este, o seu desenvolvimento em termos de performance nunca poderia atingir os patamares de hoje em dia. Existem registos do século V que comprovam a utilização de pistões em máquinas que transformavam o movimento da água do rio na rotação de um eixo utilizado nas serras das maiores carpintarias romanas. O crédito para a primeira utilização de um pistão num motor a vapor vai para o físico francês Denis Papin que patenteou o seu design em 1690. Mas apenas em 1807 foi criado o primeiro motor de combustão interna por parte do engenheiro suíço François Isaac de Rivaz. Este criou um motor que era movido com uma mistura de hidrogénio e oxigénio deflagrado com uma faísca elétrica.

Os desenvolvimentos obtidos ao longo dos tempos possibilitaram a utilização de motores com compressão feita pelo cilindro, devido a uma maior precisão na manufatura do pistão que possibilitava uma melhor vedação e conseqüentemente uma compressão maior. Este facto é de fundamental relevância pois como sabemos quanto maior for a pressão dentro da câmara de combustão aquando da ignição, maior vai ser a energia libertada durante a combustão.

Desde então várias alterações foram feitas mas o objetivo final manteve-se o mesmo. Leveza, resistência estrutural elevada, baixo atrito, alta condutividade térmica e a capacidade de resistir durante elevados períodos de funcionamento sem a necessidade de manutenção. Para tal, os processos de fabricação foram-se alterando, os materiais utilizados foram sendo aprimorados e a própria forma do pistão foi sendo alterada de forma a aumentar a eficiência deste componente.

Os pistões existentes num motor de combustão interna são um dos componentes mais complexos entre todos os campos da indústria automóvel. O motor pode ser chamado o coração de um carro e o pistão pode ser considerado como a parte mais importante de um motor.[6]

Há muitos trabalhos de pesquisa que propõem novas geometrias, materiais e técnicas de fabrico. Esta evolução tem sofrido uma melhoria contínua nas últimas décadas, sendo sujeita a um exame minucioso de todos os detalhes. Não obstante todos estes estudos, há um grande número de pistões danificados. Os mecanismos de danos têm origens diferentes e são, principalmente, desgaste, temperatura e fadiga relacionada com esforços cíclicos.

Entre os danos de fadiga térmica e fadiga mecânica, tanto o ambiente como a temperatura elevada, desempenham um papel proeminente.

Apesar da forma ter evoluído ao longo dos anos e os materiais terem vindo a ser melhorados, o pistão continua a ser um dos componentes mais importantes num motor de combustão interna. A principal razão pela qual o pistão é considerado o coração do motor está no facto de ele ser um dos componentes que mais é solicitado estrutural e termicamente em todo o veículo. Operando entre temperaturas desde os 150^oC até máximos de 700^oC, tendo que comportar pressões de 180 bar[10], tudo isto atingindo velocidades que podem chegar a 25 m/s e acelerações de 200 m/s^2 o pistão tem de conseguir manter a sua forma e integridade estrutural com vista a controlar a estanquicidade do cilindro. Apesar de existirem os segmentos que fazem a maior parte da vedação, a selagem do cilindro continua muito dependente da prestação do pistão. Como se não bastasse, o pistão também transmite calor libertado na explosão através das suas paredes para as paredes do cilindro.

Hoje em dia a eficiência de um motor de combustão interna utilizado na indústria automóvel ronda os 25%. Este número tem vindo a ser melhorado e o pistão é um dos componentes em que mudanças podem criar alterações significativas nas prestações do automóvel.

Este trabalho vai incidir sobre as alterações causadas pelas mudanças de temperatura e pressão a nível das propriedades do pistão, bem como nos possíveis melhoramentos encontrados.

Capítulo 2

Objetivos

- Comprovar a aproximação à realidade dos estudos base testados comparando com estudos já publicados, assegurando assim a validade do processo analítico.
- Tendo por base as duas simulações iniciais, que foram validadas, realizar testes à integridade estrutural e térmica do componente em causa para diversas situações a que este pode estar exposto. Os diversos testes iram abranger o efeito da detonação, a influência do atrito e por fim a existência de assimetria na dispersão térmica.
- Tendo em conta as análises anteriores irão-se detetar as fragilidades no design do pistão e sugerir melhoramentos no design do mesmo. Estes serão testados segundo os mesmos parâmetros dos ensaios base.
- Estabelecer comparações entre as várias simulações e detetar pontos importantes de convergência de esforços ou pontos críticos.

Capítulo 3

Guia de Leitura

Este trabalho pode ser dividido em 4 partes principais. Iniciando no estado da arte, procura-se dar uma breve introdução ao leitor dos avanços tecnológicos bem como de processos essenciais ao seguimento do trabalho.

O capítulo de métodos e modelos abrange todas as características do material, modelos cinemáticos e programas de modelação e como estes serviram de base para a simulação. Por fim e na análise de resultados comparam-se os os dados obtidos nas simulações com outros estudos de forma a comprovar a sua validade. Uma vez que o método de simulação está definido e comprovado que fornece resultados em consonância com outros estudos, avançar-se-á para simulações ainda não testadas em estudos anteriores.

Os ensaios realizados seguem a seguinte ordem: Ensaio térmico base, ensaio térmico com influência do ar da admissão, ensaio estrutural base, ensaio estrutural com influência do atrito, ensaio estrutural com detonação, ensaio estrutural com influência de detonação forte e finalmente ensaio estrutural e térmico ao pistão com melhoramentos. A ordem dos ensaios é importante pois os primeiros ensaios base irão determinar se os valores obtidos são aproximados e se esta metodologia de simulação pode ser explorada.

No fim deste trabalho espera-se encontrar justificações para casos de cedência, falha plástica ou desgastes existentes que existem no componente em questão. Verificar-se-á também como se é possível melhorar o design já existente.

Capítulo 4

Estado da Arte

4.1 Generalidades

Poucos são os materiais que têm a mesma flexibilidade de aplicação do alumínio. Sendo o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, o alumínio preza pela leveza, condutividade elétrica e térmica, elevada resistência à corrosão e baixo ponto de fusão.

As características deste material fizeram com que o desenvolvimento de várias variantes do mesmo fossem criadas. Desde ligas, compósitos ou mesmo no seu estado puro, o alumínio tem múltiplas aplicações. A capacidade de ligação do Alumínio com outras substâncias permite a alteração das suas propriedades de forma dramática. Por exemplo o alumínio puro possui uma tensão de cedência de 190MPa e cerca de 400MPa para o caso de algumas ligas de alumínio.

O alumínio possui uma estrutura cúbica de faces centradas. A estrutura cúbica de faces centradas apresenta um átomo em cada vértice do cubo, mais um átomo no centro de cada uma das suas faces. Como exemplo de materiais que cristalizam segundo esta estrutura destacam-se os seguintes: Ouro, Prata, Cobre, Platina, Alumínio e Ferro (γ).

Existem muitas aplicações e materiais para os pistões, sendo que a sua primeira utilização foi para bombeamento de água, motores a vapor, motores de combustão interna, canhões pneumáticos, compressores, etc. Para cada um destes usos os materiais utilizados variam drasticamente. Sem sombra de dúvida que o alumínio foi o material que mais influenciou o aumento de performance nos pistões.

No início do século, e até aos anos 50, a maioria dos motores de combustão interna utilizavam pistões de algum tipo de ferro fundido ou aço - essencialmente o mesmo material que o bloco do motor. Os motores mais velhos deixaram de utilizar este material durável e barato, mas pesado, uma vez que geralmente opera sob, pelos padrões modernos, rpm e taxa de compressão baixas. A baixa velocidade significa menos tensão sobre os tirantes de ligação, permitindo que os engenheiros utilizem pistões muito mais pesados, sem receio de quebrar as saias. Baixas taxas de compressão diminuem a pressão do cilindro, o que permite o uso de ligas fracas. Os motores mais antigos tendem a utilizar ranhuras do anel mais espaçadas parcialmente por causa das menores pressões dentro do cilindro e devido aos materiais utilizados no momento, mas, principalmente, por causa do peso do pistão não ser uma prioridade até então.

O método de tratamento do alumínio e a liga utilizada tem vindo a ser melhorada, de forma a obter uma liga leve, resistente a temperaturas altas, leve e resistente estruturalmente. Afinal de contas, um componente que tem de trabalhar quer numa manhã fria

de temperaturas negativas e apenas segundos mais tarde pode atingir temperaturas de 500 graus na coroa tem de ser capaz de aguentar amplitudes térmicas elevadas mantendo a sua integridade estrutural e dimensional.

O pistão acelera de zero a 30 m/s(100km/h) ou mais, no comprimento de meio cilindro e depois tem de parar completamente quando chega ao topo. Isto em média 5 000 vezes num minuto ou seja 300 000 vezes numa hora, e se pensarmos que um motor pode fazer 300 mil quilómetros a uma média de 60km/h o pistão tem de aguentar estes esforços 1 500 000 000 vezes durante a sua vida.

Enquanto tudo isto ocorre o pistão tem de manter o gás em expansão dentro do cilindro a pressões de 180 bar. Também tem de dissipar o calor intenso e tem de evitar perdas de óleo para o cilindro. Não se pode gastar rápido demais e o mais importante, tem de transmitir a energia da queima e expansão da mistura de gases através da biela.

Desta forma, o estudo das condições no pistão durante o funcionamento do motor, torna-se cada vez mais um ponto importante de forma a melhorar a sua performance e eliminar casos de falha pontuais.

4.2 Definição das várias partes do pistão

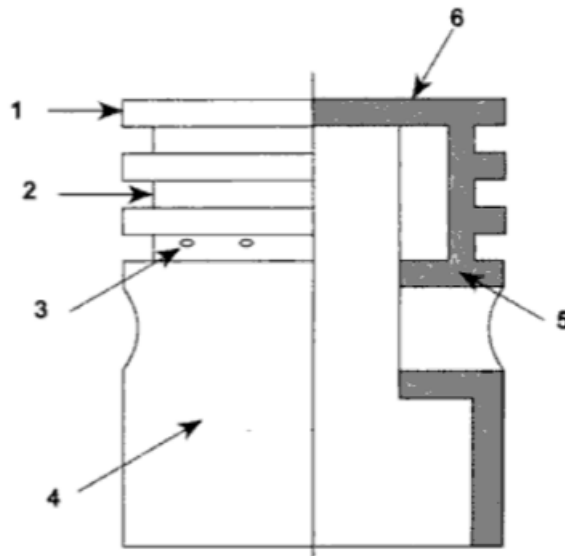


Figura 4.1: 1. Terra 2. Rasgos para segmentos 3. Furos de óleo 4. Saia 5. Pin bore 6. Coroa

O pistão tem muitas variantes e diferentes designs mas podemos dizer que todos os pistões têm pelo menos 6 partes comuns. O pistão é constituído por 6 partes principais tal como é retratado na figura 4.1.

O topo do pistão é chamado de coroa ou cabeça do pistão e é o local onde a pressão da explosão é aplicada. Os rasgos para os segmentos servem para impedir os movimentos dos segmentos na superfície do pistão.

Os espaços entre os rasgos para os segmentos são chamados de ilhas e fazem uma barreira contra o aumento da pressão. A parte dos pistões abaixo dos rasgos chama-se a

saia e serve para absorver o impulso lateral desenvolvido durante o aumento de pressão.

A cavilha que une a biela ao pistão assenta no furo para o pino. As forças de combustão são aplicadas diretamente na coroa do pistão sendo a força transmitida diretamente para o *Pin bones*. Por fim os furos de óleo servem para a extração do óleo que existe entre a parede do cilindro e o pistão.

4.3 Tipos de Pistões

4.3.1 Pistões de dois tempos

Os pistões a dois tempos são produzidos por moldagem e são utilizados maioritariamente em motores a gasolina ou motores a diesel que estejam sujeitos a cargas elevadas. Normalmente estes pistões têm tiras de aço dentro do pistão e não têm rasgos. Como resultado apresentam um corpo uniforme resistente a esforços elevados.

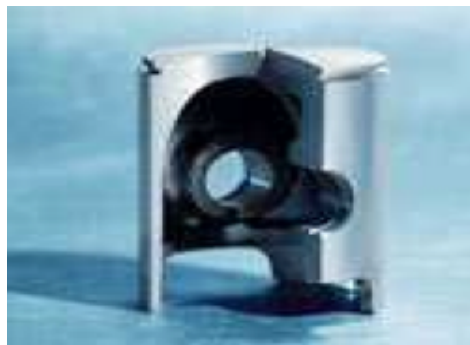


Figura 4.2: Pistão a dois tempos seccionado

4.3.2 Pistões moldados

Os pistões moldados têm uma vida útil longa. O que faz com que este tipo de pistões sejam utilizados na maioria dos motores tanto a gasolina, como a gasóleo. A sua adaptabilidade é tão grande que a sua utilização está presente tanto em motores de modelismo (aviões e carros telecomandados) como em geradores com 1000 kW de potência.



Figura 4.3: Pistão moldado

4.3.3 Pistões forjados

Os pistões forjados são produzidos através de um processo de forja, descrito mais à frente no trabalho, que dá uma maior resistência ao pistão sem aumentar o seu peso. Este tipo de pistão é encontrado fundamentalmente em séries de alta performance, tal como carros de competição e motos. Para além deste processo aumentar a resistência, também faz com que o peso do pistão reduza através da diminuição da espessura das suas paredes. Claro que de todos estes prós advém um contra que é o custo acrescido do processo de forja.



Figura 4.4: Pistão forjado

4.3.4 Pistões hidrotérmicos

Um pistão hidrotérmico é primariamente utilizado em carros de passageiros pois tem um trabalhar muito pouco ruidoso. Tal deve-se à inserção de tiras de aço na estrutura interior do pistão aquando da moldação. A inserção das tiras de aço aumenta a resistência do pistão mantendo o mesmo peso através da diminuição do material na coroa do pistão.

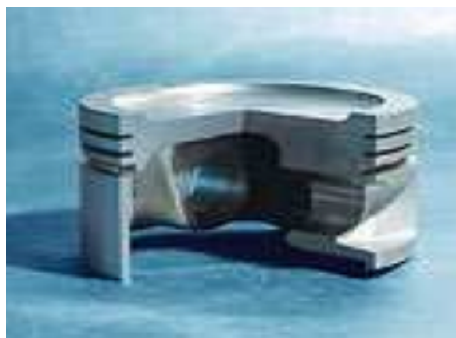


Figura 4.5: Pistão hidrotérmicos

4.3.5 Pistões hidrotermáticos

Em continuação dos pistões hidrotérmicos, os pistões hidrotermáticos também apresentam tiras de aço como forma de reforçar a sua integridade estrutural. Como principal diferença estes não apresentam cavidades na coroa o que faz com que a sua resistência

estrutural aumente ainda mais e tornando-os perfeitos para aplicações que necessitem de esforços estruturais extremamente elevados.



Figura 4.6: Pistão hidrotermático

4.3.6 Pistões com segmentos e *pin boss bushes*

Este tipo de pistões é utilizado principalmente em motores diesel. Estes têm nos rasgos onde os segmentos encaixam, uma proteção em aço que é conectada metálica e rigidamente com o material do pistão de forma a tornar o encaixe do primeiro segmento mais resistente ao desgaste. Este processo é utilizado maioritariamente no primeiro segmento.

Para além do rasgo do segmento revestido o *pin boss* também é revestido por um material especialmente desenvolvido de forma a aumentar a capacidade de carga do mesmo.



Figura 4.7: Pistão com segmentos e anilhas no *pin boss*

4.3.7 Pistões com segmentos e canal de arrefecimento

Estes pistões são utilizados em condições com temperaturas de funcionamento especialmente elevadas e para tal a refrigeração proporcionada pelo canal de refrigeração proporciona um decréscimo na temperatura. O canal de refrigeração encontra-se com óleo em constante circulação. Este canal transfere o calor da coroa e dos segmentos para o óleo e conseqüentemente diminuí a temperatura do pistão nas zonas mais críticas.

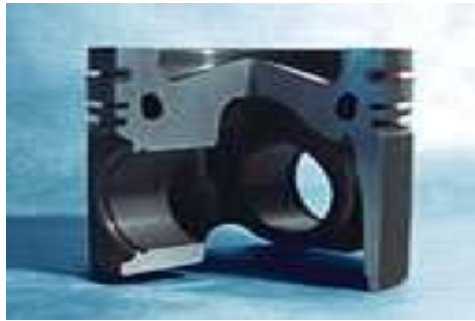


Figura 4.8: Pistão com segmentos e canal de arrefecimento

4.3.8 Pistões com segmentos, canal de arrefecimento e coroa reforçada

Este tipo de pistões é utilizado em motores a diesel em que existem elevadas temperaturas e pressões. Desta forma o canal de arrefecimento proporciona uma diminuição de temperatura e a coroa é tratada criando uma camada dura anodizada. Esta camada é necessária pois existe uma grande ocorrência de fissuras ou quebra de arestas neste tipo de pistões devido aos requisitos térmicos e estruturais elevados a que estes estão sujeitos.



Figura 4.9: Pistão com segmentos, canal de arrefecimento e coroa reforçada

4.3.9 Pistões com segmentos arrefecidos

Finalmente existem os pistões com segmentos arrefecidos. Estes consistem num canal de refrigeração que está diretamente ligado ao rasgo do primeiro segmento de forma a proporcionar um arrefecimento mais forte no mesmo. Estes pistões são os mais eficazes na remoção do calor dos segmentos e em combinação com uma camada na coroa endurecida por anodização tornam-se um dos melhores pistões em termos de transferência de calor.

4.4 Métodos de Produção

A indústria funciona em torno de 3 métodos essenciais. A moldação, a forja e a maquinaria. Consoante as características desejadas cada um destes processos varia dentro de si mesmo em termos de tratamentos térmicos, superficiais, inserção de camadas resistentes ao desgaste, fibras diferentes dentro do material base entre outros.



Figura 4.10: Pistão com segmentos arrefecidos

Claro que ainda existem vários métodos de produção experimentais todos com a intenção de possibilitar o aumento da pressão e temperaturas dentro do cilindro, mantendo o peso baixo e o atrito mínimo. As coberturas de grafite e carbetos de silício ?? foram desenvolvidas como forma de diminuir o atrito e aumentar as pressões suportadas pelo pistão. Combinações de materiais diferentes como corpos em alumínio com coroas em aço de forma a aumentar a resistência a temperaturas e pressões elevadas também são métodos utilizados para a obtenção de um pistão mais eficiente.

Essencialmente existem dois métodos de produção, moldagem ou forja.

4.4.1 Moldagem

A moldagem é um processo muito variado e aperfeiçoado de acordo com as características do material a obter. Hoje em dia, muitos fabricantes que trabalham na indústria metalúrgica escolhem a fundição por injeção como o seu principal meio de produção. Este processo muito versátil é utilizado para a construção de peças de metal através da injeção de metal fundido, sob alta pressão, em moldes de aço re-utilizáveis. Desta forma cada molde pode ser mais detalhado pois apesar de a sua produção ser mais dispendiosa cada molde pode produzir vários milhões de peças durante a sua vida útil.

Os processos que são de maior interesse para a produção de pistões são processos de moldagem com molde em metal, pois estes permitem a utilização de um mesmo molde várias vezes. Peças produzidas através de moldagem por injeção foram criadas em meados do século 19, com a introdução da injeção pressurizada como uma alternativa ao por gravidade como um meio para a fundição de metais. Em 1849 a patente para a primeira máquina de injeção operada manualmente foi criada e projetado por Sturges. Após a criação desta patente outras formas e técnicas nasceram e desenvolveram-se baseando-se sempre no princípio de injeção forçada criado por Sturges. Oito anos antes do século 20 começar, diferentes aplicações comerciais começaram a surgir. Entre as quais a fundição de peças para de precisão elevada, máquinas fotográficas, máquinas registadoras e o mais importante pistões.

De fato, as peças de fundição por injeção estão incluídas entre os objetos mais produzidos em massa pela indústria metalúrgica hoje em dia. Isto é primeiramente porque este processo pode ser concebido de modo a produzir uma variedade de formas simples ou complexas enquanto mantém um nível elevado de precisão e repetibilidade desta forma aumentando o valor acrescentado das peças produzidas. Os fabricantes poupam

e os consumidores podem beneficiar de itens resistentes e muito confiáveis para suas necessidades comerciais e industriais.

Moldagem de molde permanente

Quando o metal no estado fluido é vertido para moldes de metal e sujeito apenas a pressão hidrostática, o processo chama-se moldagem de molde permanente. O molde separa-se em duas ou mais partes de forma a libertar a peça moldada e é fechado outra vez de forma a ser utilizado para a peça seguinte. Os metais mais comumente utilizados neste tipo de moldagem têm de ter um baixo ponto de fusão tipicamente chumbo, zinco, alumínio, ligas de magnésio, bronze e ferro.

A maioria dos moldes são feitos a partir de Aço com "close grain" como Meehanite, que é resistente ao calor e a mudanças de temperatura repetitivas. Os núcleos dos moldes são normalmente constituídos por uma liga de Aço mas areia ou gesso também podem ser utilizados para o caso de utilização prolongada. Os moldes e os núcleos são lavados com um adesivo refratário, basicamente grafite, barro ou *whiting*. Isto ajuda a manter os moldes limpos e a evitar que a peça se una ao molde promovendo uma melhor injeção e um maior tempo útil de vida do molde.

No caso da utilização de núcleos de areia, o processo chama-se moldagem de molde semi-permanente. Os núcleos de areia são baratos e fáceis de remover de cavidade complexas, mas a estrutura, precisão e a superfície acabadas são apenas tão bons como os de molde de areia.

A moldagem por molde permanente é muitas vezes feita manualmente mas é facilmente adaptável à mecanização. Ambos os processos de moldagem permanente ou semipermanente, são utilizadas na produção de pistões. Sendo que a moldagem semi-permanente é utilizada em pistões com secções interiores mais complexas e a moldagem permanente é utilizada nos restantes (maioria) dos casos.

A automatização do processo pode ser feita através de uma máquina que transfere o molde através de várias etapas. Ejeção das peças, limpeza e cobertura do molde, colocação de núcleos, trancamento, verter, arrefecimento e abertura do molde. Em alguns casos apenas algumas funções são automatizadas mas todas elas podem ser automatizadas. Existem algumas variações do processo, por exemplo, *squeeze casting* ou *piercing* em que um punção é pressionado para dentro do molde de forma a moldar e forjar o metal enquanto este solidifica.

Moldagem por injeção

Na moldagem por injeção o metal fundido é forçado, sob pressão considerável, para um molde de aço. O metal fundido é disparado de forma a encher o molde. A violência da injeção obriga à criação de ventilações e giros de sobre-enchimento que permitam a saída do ar. O metal é pressionado de encontro todas as superfícies do molde e a pressão é mantida até este solidificar, de forma a garantir a densidade uniforme do material.

Um dos maiores problemas deste processo é a formação de vazios na peça. Devido à injeção muito rápida do metal, criam-se turbulências e o ar fica aprisionado dentro do metal. Como forma de evitar estas ocorrências começa-se a encher moldes com oxigénio que em contacto com o metal forma óxidos ao invés de vazios. Desta forma criando peças mais uniformes.

Tratamentos Térmicos pós Moldação

O tratamento térmico é um processo no qual os metais são alternadamente aquecida e arrefecida de acordo com um calendário pré-estabelecido de tempo e temperatura para a melhoria das características do metal.

Tratamento Térmico T6 é um processo de tratamento de calor específico, que pode ser aplicado ao alumínio de cobre/ silício, tais como a ligas hiper-eutética, para aumentar a resistência da liga até 30%. No caso de tratamento térmico T6, o processo ocorre em duas fases.

A primeira fase do tratamento térmico T6 é chamada Fase Quench. Nesta fase, a liga é aquecida a 493 graus Celcius durante 9 horas, fazendo com que o cobre presente na liga se dissolva no alumínio, formando o que se chama um "liga de Fase Única". Se for permitido o arrefecimento ao ar, o cobre tende a reconstituir, ou voltar a formar-se dentro da liga. No entanto, quando a liga é arrefecida rapidamente por água de têmpera, a formação do cobre é retardada e o alumínio, super saturado com cobre, fica bloqueado no estado de liga de fase única.

Na segunda fase do processo de tratamento T6 calor, chama-se a fase de envelhecimento, a liga é aquecida a 350 graus celcius durante 10 horas e depois deixou-se arrefecer o ar. Durante esta fase, o cobre combina com o alumínio, num processo chamado "endurecimento por precipitação" para formar um cristal de cobre/ alumínio CuAl_2 . É a formação da liga de cristais de cobre / alumínio que dá a sua resistência.

A chave para a maximização da resistência da liga é o controlo do tamanho dos cristais cobre / alumínio. Resistência máxima é alcançada quando o tamanho dos cristais ou partículas precipitadas, é mantido muito pequeno forçando-os a estar em conformidade com a estrutura do alumínio.

O resultado final é uma liga de alumínio hipereutética que quando é aplicada num pistão o pode tornar até 30% mais resistente. [16]

4.4.2 Forja

A forja é a formação de metal, na maior parte dos casos quente, por aplicação individual e intermitente de pressão, ao invés de uma pressão contínua. Este processo pode também trabalhar o metal, comprimindo-o de forma a alonga-lo ou comprimindo lateralmente de forma a aumentar a sua secção transversal, ou ,como é o caso da produção de pistões, fazendo com que o metal se conforme a uma cavidade ou molde através da aplicação da força.

A forja pode ser feita em molde aberto ou fechado. Os moldes abertos são utilizados para formar placas planas ou com curvas pequenas (formas em v, pequenas concavidades, metade oval, metade redondo). Moldes fechados são utilizados na forja em que são necessárias formas mais complexas. Todos os tipos de forjas necessitam de precisão mas a forja de molde fechado é a que apresenta um maior nível de dificuldade. Tolerâncias mais pequenas e mais peças por minuto são conseguidas apenas com a forja em molde fechado.

Hoje em dia as prensas são operadas por computador e todo o processo, após ser parametrizado, é automatizado.

A qualidade do produto obtido varia consoante um número de parâmetros. Desde comportamentos diferentes do material, temperaturas, fecho do molde, descentramento do molde, aumento das cavidades do molde devido a desgaste, tudo vai influenciar o

material obtido. Uma tolerância de $\pm 0.8mm$ é considerada boa para prensas de aço carbono e pode chegar a $\pm 7mm$ em casos de peças grandes. No caso dos pistões são utilizadas prensas de precisão e obtêm-se tolerâncias de $\pm 0.25mm$ ou menos consoante o custo e a frequência da máquina.

No caso dos pistões, estes são forjados e posteriormente maquinados. Desta forma a tolerância é sempre positiva pois o material tem de estar sempre em excesso de forma a obter a forma desejada.

Os pistões forjados conseguem obter os mesmos resultados estruturais com menos peso. Isto deve-se à criação de tensões dentro da estrutura do pistão durante a solidificação.

4.4.3 Maquinagem

A maquinagem é um passo essencial na produção do pistão qualquer que seja o seu método produtivo. De forma a criar estanquidade do cilindro é necessário obter um pistão com tolerâncias muito baixas. Sem isto seria impossível ter atritos baixos, elevadas tempos de funcionamento e prestações.

É de ter em conta que estes *blanks* foram sujeitos a um tratamento térmico de forma a melhorar as qualidades do material o que torna a maquinagem mais difícil. Máquinas com grande precisão, elevada potencia de corte e com baixos avanços são utilizadas de forma a contrabalançar os efeitos dos tratamentos térmicos nas propriedades do material.

Maquinagem pós Moldação

A maquinagem pós moldação tem duas vertentes. Caso o pistão seja fabricado em série ou caso o pistão seja um elemento único. Em qualquer dos casos após a moldação o pistão tem tolerâncias dimensionais e superficiais muito elevadas e seria impraticável utilizá-lo nestas condições.

A diferença principal entre os dois casos é a quantidade de material a remover. Ou seja, no caso da maquinagem em série o *blank* tem dimensões muito mais aproximadas do tamanho final. Um pistão único tem dimensões menos normalizadas não existindo *blanks* específicos para cada tipo diferente de pistão. Esta contingencia obriga assim a uma maquinagem mais demorada e como resultado um custo acrescido.

Todo o processo se inicia com um *blank* que é colocado num torno onde é dado o primeiro desbaste, com o intuito de apenas tornar a superfície mais uniforme e de criar os apertos para o passo seguinte. Em seguida o pistão é levado para uma CNC de 5 eixos em que se dá a maquinação pela seguinte ordem: topo do pistão, orifícios das válvulas, saia, rasgos para segmentos e finalmente um acabamento superficial de forma a eliminar imperfeições.

Hoje em dia a maioria dos pistões comercializados na indústria automóvel são produzidos desta forma. Carros, motas, camiões, diesel ou gasolina quase todos utilizam pistões produzidos através deste processo. Salvo algumas exceções que utilizam o método seguinte.

Maquinagem pós Forja

A maquinagem pós forja é em tudo semelhante ao método descrito anteriormente, a única diferença consiste na dureza do material ser maior o que vai dificultar a sua maquina-

gem. Como soluções para este problema temos a alteração de ferramentas de corte e a diminuição de cada avanço.

Estas condicionantes vão causar um acréscimo de custo, que no entanto é tolerado pois as aplicações deste tipo de processo podem suportar o custo acrescido. Os principais utilizadores de pistões produzidos desta forma são carros de competição e motacilos de elevado rendimento.

4.5 Características dos materiais

4.5.1 Ligas comerciais: Propriedades

O alumínio é o metal mais abundante na crosta terrestre. Contudo, este só existe quando combinado com outros elementos, nomeadamente os óxidos e os silicatos. Este metal apresenta baixa densidade e quando combinado com outros elementos de liga (ferro, magnésio, silício, zinco, cobre, níquel, crómio, tungsténio, zircónio, boro, titânio, lítio, e estanho) pode apresentar propriedades mecânicas muito atrativas sob o ponto de vista da engenharia. Em contrapartida, o processamento do minério do alumínio (bauxite) é difícil e dispendioso.

O processo de fabrico Bayer é o mais comumente utilizado na indústria. Porém este apresenta um baixo rendimento. Na produção de uma tonelada de alumínio é necessário submeter seis toneladas de bauxite a todo o processo termo-químico que engloba várias etapas.

As ligas de alumínio revelam grande versatilidade no seu uso e apresentam a vantagem de grande facilidade na reciclagem. Atualmente cerca de um terço do consumo mundial de alumínio é de alumínio reciclado, constituindo assim uma parte económica e financeira muito importante da indústria em análise. As vantagens económicas e financeiras devem-se ao facto de a energia necessária para reciclar uma porção de alumínio ser muito menor que para o produzir a partir do minério [19].

As ligas de alumínio dividem-se em dois grandes grupos: as ligas tratáveis termicamente e as não tratáveis. As ligas não tratáveis termicamente não sofrem endurecimento por precipitação, porém podem ser endurecidas através de deformação a frio. As ligas de alumínio que pertencem a este grupo são as 1xxx, 3xxx, 4xxx, e 5xxx. As ligas tratáveis termicamente podem sofrer endurecimento por precipitação, aumentando a resistência mecânica. As ligas 2xxx, 6 xxx e 7 xxx são exemplos de ligas que podem ser tratadas termicamente. [18]

As ligas 1xxx são normalmente selecionadas para condutores elétricos e aplicações que requerem uma boa resistência à corrosão e excelente formabilidade. Esta não é tratável termicamente, visto que apresenta mais de 99% de alumínio, contendo em percentagem muito reduzida o silício, o ferro, e o cobre.

As ligas 2xxx são usadas maioritariamente pela indústria aeroespacial, e o seu principal elemento de liga é o cobre. O magnésio também é adicionado a grande parte das ligas, visto que aumenta a resistência mecânica, a ductilidade, a resistência à corrosão, e a soldabilidade. A classe em análise é tratável termicamente e durante o tratamento é comum formar-se um composto intermetálico (Al_2CuMg) que contribui para o aumento da resistência mecânica. Por vezes, nestas ligas ainda são adicionados outros elementos que tornam a análise da sua micro-estrutura um processo complexo.

As 3xxx têm uma aplicabilidade muito generalista, tendo como aplicação o fabrico de

tubagens, alhetas entre outros componentes. Estas ligas são muito resistentes à corrosão e contêm uma boa deformabilidade, contudo não são tratáveis termicamente. Estas contêm como elemento principal de liga o manganês, que finamente se dispersa na matriz metálica do alumínio aumentando a resistência mecânica. Porém diminui a ductilidade e a resistência à corrosão intergranular.

As linhas 4xxx tais como as anteriores não são termicamente tratáveis, e têm como aplicabilidade a produção de fios de soldadura. O principal elemento de liga nesta classe é o silício. Caso erradamente, esta liga seja submetida a um tratamento térmico, haverá o efeito indesejado da coalescência do silício.

As linhas 5xxx também não são termicamente tratáveis. Algumas delas têm como aplicabilidade a indústria de transportes e naval quando se apresentam sob a forma de chapas finas. Nesta classe o principal elemento de liga é o magnésio, que favorece a resistência à corrosão, e à deformabilidade. O magnésio é adicionado em cerca de 5%, visto que deste modo consegue-se promover o endurecimento por solução sólida.

Atualmente, as ligas 6xxx representam cerca de 80% da produção mundial de extrudidos. Este grupo apresenta características apropriadas para extrusão, soldadura e resistência à corrosão. Os principais elementos de liga são magnésio e silício, que reagem e formam um composto (Mg_2Si) que ao sofrer precipitação origina o endurecimento do material, ou seja, este grupo é tratável termicamente. Esta classe também possui outros elementos ligantes em pequenas quantidades tais como: cobre, crómio, e manganês.

As ligas 7xxx são materiais de alto desempenho, usados normalmente pela indústria aeroespacial em componentes sujeitos a esforços severos. Este grupo tem como principais elementos ligantes o zinco, o magnésio, e o cobre. O zinco e o magnésio reagem formando um novo composto ($MgZn_2$) que promove o endurecimento quando tratada termicamente. A elevada solubilidade do zinco e do magnésio no alumínio promovem uma grande densidade de precipitados que resulta num grande aumento da resistência mecânica [19].

As ligas 8xxx não são tratáveis termicamente e têm como aplicabilidade fios de construção e cabos de serviço [20]. Os principais elementos de liga são o lítio, estanho, ferro, cobre, e manganês [21]. As ligas Al-Sn são indicadas para aplicações que envolvam atrito enquanto as ligas Al-Fe são indicadas para condutores elétricos, contudo no caso desta liga a sua utilização é muito recente [19].

Os desenvolvimentos das ligas de alumínio devem-se à necessidade de materiais leves e de baixo custo, com um nível de resistência mecânica aceitável. Por outro lado a resistência à corrosão dos alumínios é extremamente atrativa para algumas indústrias, bem como a sua boa condutibilidade elétrica que os torna atrativos para a indústria elétrica.

A caracterização das ligas também depende do tipo de tratamento que sofrem. A designação está presente na letra extra seguinte à série. Por exemplo, a denominação 6021-H18 seria para uma liga que sofre trabalho mecânico a frio e que é normalmente seguida de dois dígitos, o primeiro representa o tratamento que sofre e o segundo está relacionado com a diminuição de espessura. Na tabela 4.1 podemos constatar os diferentes valores que o primeiro dígito pode ter e quais são os seus significados. O número também pode ser seguido da letra F para o caso da liga que não sofre qualquer tratamento. A letra O para ligas que foram sujeitas ao recozimento de forma a homogeneizar a sua estrutura e a aliviar tensões. A letra T representa ligas que tenham sido sujeitas a um tratamento térmico com vista a melhorar as suas propriedades e é caracterizada mais

pormenorizadamente por um dígito adicional que se refere especificamente ao tipo de tratamento térmico.

Tipo	Especificação do 1º dígito
H1x	Deformação a frio
H2x	Deformação a frio e recozimento parcial
H3x	Deformação a frio e estabilização

Tabela 4.1: Especificação dos tratamentos para alumínios da série H [21])

4.5.2 Diagrama de Fases

No caso em estudo a série de Alumínio utilizada é da série 6xxx, ou seja os principais elementos liga são Magnésio e Silício. Alumínio-silício é um sistema eutético binário simples com uma solubilidade limitada de silício em Alumínio. Existe apenas uma reação invariante neste diagrama, nomeadamente

$$L = \alpha + \beta \quad (4.1)$$

Na equação acima, L é a fase líquida, α é predominantemente de alumínio, e β é predominantemente de silício. É agora amplamente aceite que a reação tem lugar no ponto eutético a 577 ° C e com um nível de silício de 12,6. As ligas de fundição Alumínio-silício (Al-Si) são as mais úteis de todas as ligas fundidas, produção de pistões para motores de automóveis. Dependendo da concentração de Si em percentagem de peso, os sistemas de ligas de Al-Si são divididos em três categorias principais:

- Hipoeutética (<12 em peso de Si)
- Eutética (12-13 em peso de Si)
- Hipereutética (14-25 em peso de Si)

Como já foi explicado anteriormente os vários elementos de liga influenciam as curvas dos diagramas TTT, e por consequência a dureza do material. Influenciam também as propriedades mecânicas dos mesmos. Quando os elementos de liga são adicionados aos aços, estes têm uma finalidade, e um propósito. Vejamos agora quais as suas principais funções [16]:

- Aumentar a resistência à tração: carbono (C), manganês (Mn), cromo (Cr), e níquel (Ni).
- Melhorar a maquinabilidade: Enxofre (S), selênio (Se), e chumbo (Pb).
- Melhorar a resistência ao desgaste: cromo (Cr), manganês (Mn), molibdênio (Mo), e tungstênio (W).
- Aumentar a penetração de têmpera: carbono (C), manganês (Mn), níquel (Ni), molibdênio (Mo), e cromo (Cr).
- Diminuir a fragilidade no revenido: molibdênio (Mo), e vanádio (V).
- Aumentar a resistência ao revenido: tungstênio (W), molibdênio (Mo), vanádio (V), e cobalto (Co).

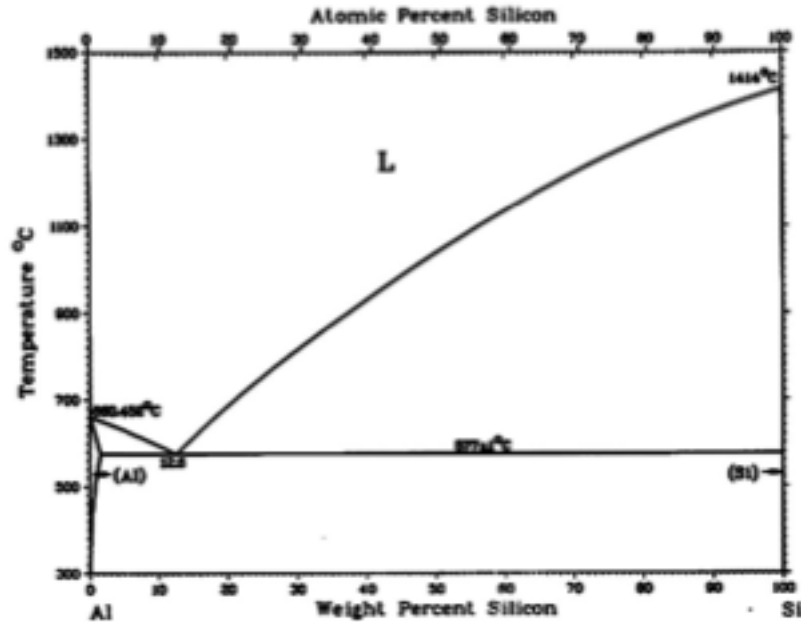


Figura 4.11: Gráfico de fase do alumínio liga 6060

- Resistir a temperaturas elevadas: tungstênio (W), molibdênio (Mo), vanádio (V), cobalto (Co), e crômio (Cr).
- Resistir ao trabalho a quente: tungstênio (W), molibdênio (Mo), vanádio (V), e crômio (Cr).
- Aumentar resistência à corrosão: crômio (Cr), níquel (Ni), molibdênio (Mo), cobre (Cu), e silício (Si).

Existem muitos mais elementos de ligas, mas os mais importantes são os referenciados acima. Para uma pesquisa mais detalhada sobre cada elemento, as suas propriedades e influências na liga aconselha-se a consulta da referência [23].

4.5.3 Tratamentos térmicos

O alumínio pode ser sujeito a tratamentos térmicos a fim de aumentar a sua resistência mecânica bem como o seu módulo de elasticidade [22]. O material em análise sofre um conjunto de tratamentos térmicos que se denominam por endurecimento por precipitação.

O endurecimento por precipitação é um processo que permite o aumento da resistência mecânica de algumas ligas metálicas, em particular as ligas de alumínio 2xxx, 6xxx e 7xxx. Deste processo resulta uma liga termicamente tratada, visto que os precipitados dispersam-se pela matriz metálica. Estes compostos vão atuar como obstáculos ao movimento das deslocações, mecanismo principal de deformação. Por conseguinte existe um aumento da resistência mecânica. Este processo é normalmente dividido em três partes distintas: tratamento térmico de solubilização, tratamento térmico de têmpera, e tratamento de envelhecimento (revenido) [18].

O tratamento térmico de têmpera consiste num arrefecimento rápido do material, geralmente até à temperatura ambiente. O fluido usado nas têmperas é normalmente água, visto que os problemas associados à oxidação e corrosão são reduzidos. Caso as peças apresentem uma geometria complexa há possibilidade de formação de tensões internas que podem levar a distorções. Nesta situação deverá ser usada água em ebulição, ou óleos, ou sais.

O tratamento térmico de solubilização é o aquecimento do material e posterior estágio a uma temperatura entre o ponto de solidificação e fusão do material. Devido a este processo, é possível a homogeneização dos precipitados grosseiros nas fronteiras de grão, numa estrutura sólida uniforme.

O tratamento de envelhecimento é necessário para que seja possível a formação de precipitados finos e dispersos, sendo o objetivo principal de todo o processo de endurecimento por precipitação. Caso o tratamento térmico de envelhecimento seja processado à temperatura ambiente trata-se de um envelhecimento natural, caso seja processado a temperaturas mais altas trata-se de envelhecimento artificial.

Em algumas ligas pode-se conseguir um considerável aumento de resistência mecânica e dureza através de deformação controlada a frio após têmpera. O aumento de resistência do material é atribuído ao encruamento.

O material pode ser adquirido em diferentes estados:

- Tal como fabricado (F)
- Recozido e recristalizado (O) favorecendo a ductilidade e diminuindo a resistência mecânica.
- Tratado termicamente: solubilização (W), aplicado apenas a materiais que envelhecem à temperatura ambiente.
- Endurecido por encruamento (H), ou seja, deformado a frio controladamente.
- Tratado termicamente (T) para obtenção de estruturas estáveis.

Relativamente aos materiais tratados termicamente (T), estes são denominados pela letra T seguida de um ou dois números. As diferentes sequências de tratamentos térmicos possíveis são numeradas pela forma anteriormente descrita. As sequências de tratamentos térmicos são dados por:

- T1- Arrefecimento e envelhecimento natural até um estado estável. Utiliza-se em materiais que foram arrefecidos desde uma temperatura elevada na qual foram enformados, e envelhecidos naturalmente.
- T2- Arrefecimento, deformação a frio e envelhecimento natural até ao estado estável. Utiliza-se em materiais que foram arrefecidos desde uma temperatura elevada à qual foram enformados, para posterior deformação a frio, a fim de aumentar a sua resistência mecânica por encruamento. No final são naturalmente envelhecidos.
- T3- Deformação a frio e envelhecimento até ao estado estável. Utiliza-se em materiais que foram deformados a frio após tratamento de solubilização, e envelhecidos naturalmente.
- T4- Tratamento térmico de solubilização e envelhecimento natural estável.

- T5- Arrefecimento e envelhecimento artificial. Utiliza-se em materiais que foram arrefecidos desde uma temperatura elevada à qual foram enformados, e envelhecidos artificialmente.
- T6- Solubilização seguida de envelhecimento artificial.
- T7- Solubilização seguida de estabilização.
- T8- Solubilização, deformação a frio, e envelhecimento artificial.
- T9- Solubilização, envelhecimento artificial e deformação a frio.
- T10- Arrefecimento, deformação a frio, e envelhecimento artificial.

As dez sequências apresentadas anteriormente são uma pequena parte das muitas outras sequências de tratamentos possíveis de efetuar.

O envelhecimento natural aumenta a resistência mecânica do material e prossegue indefinidamente ou eventualmente estabiliza.

O envelhecimento artificial, ou seja, a temperaturas mais elevadas promove um aumento da dureza numa fase inicial. Porém se o tempo de envelhecimento for demasiado elevado ocorre o amaciamento do material. A este fenómeno denomina-se sobre-envelhecimento.

4.5.4 Investigação laboratorial

É muitas vezes difícil de definir com precisão *yielding* devido à grande variedade de curvas tensão exibidas pelos materiais reais. Desta forma, as várias maneiras de testar laboratorialmente e de deferir as curvas de tensão do material são essenciais para obter uma visão realista das características do mesmo. Existem várias formas possíveis de definir *yielding*:

Limite elástico verdadeiro

A menor tensão em que deslocamentos se movem. Esta definição é raramente usada, visto a deteção de deslocamentos em tensões muito baixas ser muito difícil.

Limite de proporcionalidade

Até esta quantidade de tensão, esta é proporcional à deformação (Lei de Hooke). Desta forma o gráfico de tensão-deformação é uma linha recta, e o gradiente será igual ao módulo de elasticidade do material.

Limite de elasticidade (*yielding strength*)

Para além do limite elástico, a deformação permanente ocorrerá. A menor tensão que provoca uma deformação permanente pode ser medida. Isso requer um procedimento de carga-descarga manual. A precisão deste processo é extremamente dependente de equipamentos e habilidade do operador. Para elastómeros, tal como borracha, o limite de elasticidade é muito maior do que o limite de proporcionalidade. Além disso, as ensaios de tensão mostram que a deformação plástica começa a tensões baixas.

Ponto *yielding*

O ponto na curva de tensão-deformação em que os níveis de curva ficam nivelados e a deformação plástica começa a ocorrer.

Deslocamento ponto de rendimento

Quando um ponto de rendimento não é facilmente definido com base na forma da curva de tensão-deformação, um ponto de cedência de deslocamento é arbitrariamente definido. O valor para este, normalmente é fixado em 0,1 ou 0,2% da tensão de cedência. O valor do deslocamento é dado como, por exemplo, $Rp0.2 = 310MPa$.

Ponto de rendimento superior e ponto de menor rendimento

Alguns metais, como o aço leve, chegam a um ponto de rendimento superior antes de decair rapidamente a um ponto de menor rendimento. A resposta material é linear até ao ponto de rendimento superior, mas o ponto de menor rendimento é usado em engenharia estrutural como um valor conservador. Se um metal só é tensionado até ao limite de elasticidade superior, ou ligeiramente mais, podem desenvolver-se bandas de Lüders .

O teste de *yielding strength* envolve uma amostra pequena, com uma secção transversal de área fixa, e aplicando uma tensão controlada, aumentando gradualmente até que haja alteração na forma da amostra ou haja quebras. A deformação longitudinal ou transversal é gravada utilizando extensómetros mecânicos ou óticos.

Os testes de dureza correlacionam linearmente esta com a resistência à tração para a maioria dos aços. Os testes de dureza podem, portanto, constituir um substituto economicamente viável para testes de tração. Estes podem também fornecer informação sobre variações locais de resistência à deformação. Por exemplo, soldagem ou operações de moldação podem ser analisados através dos testes de dureza.

A têmpera da liga T6 6061 tem uma resistência à tração de pelo menos 340 MPa e uma resistência à deformação de pelo menos 241 MPa. Os valores mais típicos são 320 MPa e 285 MPa, respetivamente. Em espessuras de 6,35 mm ou menos, tem alongamento de 8% ou superior. Em secções mais espessas, apresenta alongamento de 10% .

Parte II

Métodos e Modelos

Capítulo 5

Cinemática do caso em estudo

5.1 Equações de Movimento e Cinemática do Pistão

A cinemática do pistão é útil para este trabalho pois podemos deduzir as forças a que o pistão está sujeito tendo em conta as acelerações.

Diagrama de Corpo livre

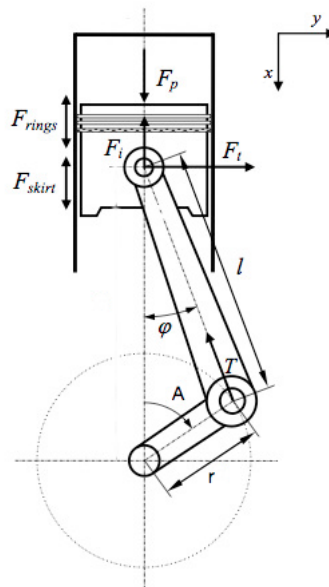


Figura 5.1: Cinemática do Pistão

Para expressar este sistema vamos recorrer à utilização da lei dos cosenos para simplificar as equações

A partir da lei dos Cosenos obtém-se:

$$l^2 = r^2 + x^2 - 2 * r * x * \cos(A) \quad (5.1)$$

Equação em ordem da posição

$$l^2 - r^2 = x^2 - 2 * r * x * \cos(A) \quad (5.2)$$

$$l^2 - r^2 = x^2 - 2 * r * x * \cos(A) + r^2 * ((\sin^2(A) + \cos^2(A)) - 1) \quad (5.3)$$

$$l^2 - r^2 + r^2 - r^2 * \sin^2(A) = x^2 - 2 * r * x * \cos(A) + r^2 * \cos^2(A) \quad (5.4)$$

$$l^2 - r^2 * \sin^2(A) = x^2 - 2 * r * x * \cos(A) + r^2 * \cos^2(A) \quad (5.5)$$

$$l^2 - r^2 * \sin^2(A) = (x - r * \cos(A))^2 \quad (5.6)$$

$$x - r * \cos(A) = \sqrt{l^2 - r^2 * \sin^2(A)} \quad (5.7)$$

$$x = r * \cos(A) + \sqrt{l^2 - r^2 * \sin^2(A)} \quad (5.8)$$

Equação em ordem da velocidade $x' = \frac{\delta x}{\delta A}$

$$x' = -r * \sin(A) + \frac{\frac{1}{2} * -2 * r^2 * \sin(A) * \cos(A)}{\sqrt{l^2 - r^2 * \sin^2(A)}} \quad (5.9)$$

$$x' = -r * \sin(A) - \frac{r^2 * \sin(A) * \cos(A)}{\sqrt{l^2 - r^2 * \sin^2(A)}} \quad (5.10)$$

Equação em ordem da aceleração $x'' = \frac{\delta^2 x}{\delta^2 A}$

$$x'' = -r * \sin(A) - \frac{r^2 * (-\sin(A) * \cos(A))}{\sqrt{l^2 - r^2 * \sin^2(A)}} - \frac{r^4 * \sin^2(A) * \cos^2(A)}{\sqrt{l^2 - r^2 * \sin^2(A)}} \quad (5.11)$$

5.1.1 Determinação das acelerações e velocidades máximas

Para a determinação das velocidades e acelerações ao longo da rotação do pistão, utilizou-se um código criado em Matlab. Tendo por base as equações 5.10, 5.11 e criou-se um código que gera 3 gráficos, acelerações médias e máximas, velocidades médias e máximas e quais os momentos em que estes picos acontecem.

Como se pode ver no gráfico da aceleração 5.2 o valor máximo de aceleração encontra-se quando o pistão vai a mais de meio do curso. A partir desse instante este vai começar a abrandar.

As equações deduzidas neste capítulo serão utilizadas posteriormente para a determinação do ângulo da cambota para o qual se obtém a aceleração máxima de forma a determinar a força da energia cinética do pistão.

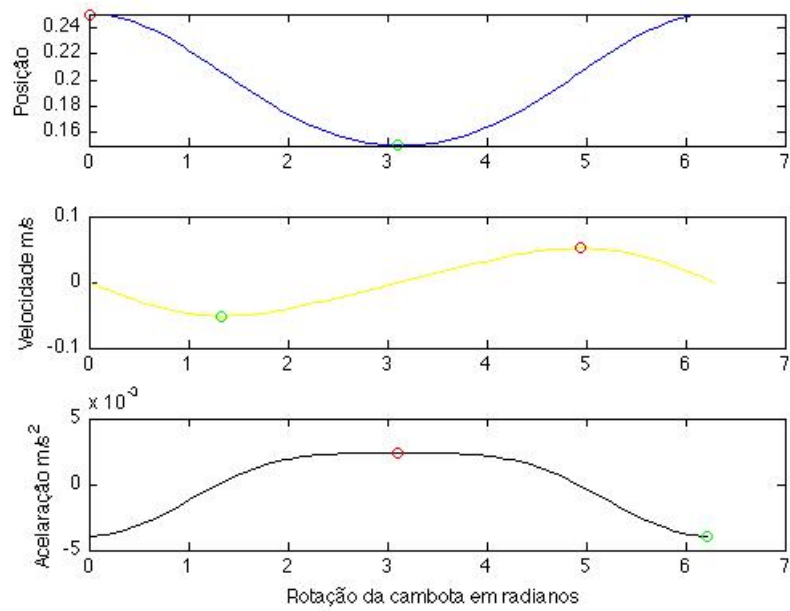


Figura 5.2: Gráfico posição, velocidade e aceleração do pistão em relação à rotação da cambota.

Capítulo 6

Comportamento Termodinâmico

6.1 Transferência de calor no pistão

No ambiente circundante ao pistão apresentam-se os 3 tipos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. A condução é a mais relevante e as outras duas têm menos impacto no sistema. Neste capítulo todos os tipos de transferência de energia que existem no pistão serão abordados.

6.1.1 Condução

Numa escala microscópica, a condução ocorre dentro de um corpo considerado como sendo estacionário, o que significa que a maior parte das energias cinéticas e potenciais do movimento do corpo é contabilizada separadamente. A energia interna difunde-se através do movimento ou vibração dos átomos e das moléculas que interagem com partículas vizinhas. O calor é transferido por condução quando átomos adjacentes ou moléculas colidem, ou quando vários elétrons se movem para trás e para a frente. De forma a evitar a formação de uma corrente elétrica macroscópica os fônons colidem e dispersam-se. A condução é o meio mais importante da transferência de calor dentro de um sólido ou entre objetos sólidos em contacto térmico. A condução é maior em sólidos, porque as relações espaciais entre átomos são uma rede relativamente próxima e fixa, isto ajuda a transferir energia entre eles por vibração [9].

Uma queda de temperatura é frequentemente observada na interface entre as duas superfícies em contacto. Este fenómeno é referido como sendo o resultado de uma resistência de contacto existente entre as superfícies. Resistência térmica interfacial é uma medida da resistência do fluxo térmico. Para estudo das propriedades térmicas de qualquer material é de importância primordial ter em conta a resistência térmica na interface entre dois materiais. As interfaces contribuem frequentemente de forma significativa para as propriedades dos materiais.

Para quantificar a facilidade com que um meio em particular conduz, utiliza-se a condutividade térmica, também conhecida como a constante de condutividade ou o coeficiente de condução, k . Na condutividade térmica, k , é definido como "a quantidade de calor, Q , transmitida no tempo (t) por meio de uma espessura (L), numa direção perpendicular a uma superfície de área (A), devido a uma diferença de temperatura (δT). A condutividade térmica é uma propriedade do material que é principalmente dependente da fase do meio, temperatura, densidade, e ligação molecular.

Condução transiente

Em qualquer lugar dentro de um objeto, sempre que as temperaturas mudam com o tempo, o modo de fluxo de energia térmica é denominado condução transitória. Outro termo é *non steady-state* de condução, referindo-se a dependência em relação ao tempo dos campos de temperatura de um objeto. Situações não estacionárias aparecem após uma mudança na temperatura imposta numa superfície do objeto. Podem também ocorrer com alterações de temperatura no interior de um objeto, como resultado de uma nova fonte ou dissipador de calor. A introdução de calor dentro de um objeto, faz com que temperaturas próximas da fonte possam mudar com o tempo [9].

Quando uma perturbação da temperatura acontece, as temperaturas dentro do sistema vão mudar com o tempo, até atingirem um novo equilíbrio com as novas condições. Após ser atingido o equilíbrio, o fluxo de calor para o sistema irá igualar o fluxo de calor para fora, e as temperaturas em cada ponto dentro do sistema irão estabilizar. Uma vez que isto acontece, a condução transiente é terminada e o sistema fica no estado estacionário de condução mesmo havendo fluxo de calor. Se as mudanças de temperaturas externas ou mudanças de geração interna de calor são muito rápidas para o equilíbrio de temperaturas acontecer, então, o sistema nunca atinge um estado de equilíbrio de temperatura e o permanece num estado transitório.

Um exemplo de condução transiente é o motor do automóvel. Neste caso, a fase de condução térmica transiente inicia-se quando se dá a ignição e só termina quando o motor atingir o estado estacionário de operação. Neste estado de equilíbrio estacionário, as temperaturas variam muito dentro dos cilindros do motor mas os restantes componentes mantêm-se a temperaturas constantes. Ou seja, após algum tempo de funcionamento, o motor deve atingir um estado estacionário de funcionamento. Após o estabelecimento deste estado, a fase de condução transiente de transferência de calor termina [3].

A análise de sistemas no estado não-estacionário de condução é mais complexo do que no estado estacionário de sistemas, e (exceto para as formas simples) exige a aplicação de teorias de aproximação ou análise numérica por computador. Um método popular gráfico envolve o uso de gráficos Heisler. Neste trabalho através de simulação numérica espera-se poder representar este sistema corretamente utilizando uma análise transiente, ou seja dependente do tempo.

6.1.2 Convecção

A convecção consiste na transmissão de energia através do movimento aleatório de moléculas, mais a energia transmitida pela advecção. Este movimento é defendido pela equação de Newton:

$$q'' = h(T_s - T_{\text{inf}})$$

Sendo que o coeficiente de transferência de calor que caracteriza o movimento de energia é o h , em unidades S.I. W/m^2K .

O caso em estudo, transferência de calor entre o pistão e os componentes circundantes apresenta um exemplo de convecção. Este pode ser definido aproximadamente como convecção forçada num prato liso com fluxo de calor constante. Para esta aproximação ser verdadeira temos de ter em conta pequenas áreas e considerar os parâmetros adaptados

a estas áreas. Ou seja, a velocidade do fluxo de ar, a área, a temperatura do ar e as suas propriedades têm de ser as de cada ponto a calcular.

6.1.3 Radiação

A radiação térmica é a radiação eletromagnética gerada pelo movimento térmico de partículas carregadas. Toda a matéria com uma temperatura maior do que o zero absoluto emite radiação térmica. O mecanismo é que os corpos com temperatura acima do zero absoluto têm átomos ou moléculas com energias cinéticas que estão mudando, e essas mudanças resultam no comando de aceleração e de oscilação / ou dipolo das acusações que compõem os átomos. Este movimento de cargas produz radiação eletromagnética na forma usual [9]. Esta energia é quantificada através da lei de Stefan boltzman:

$$q'' = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

No caso em estudo, as temperaturas são relativamente baixas ,ou seja, a energia implicada neste processo é desprezável.

A radiação é uma das principais causas da detonação. A radiação emitida pela coroa do pistão irá provocar a ignição da mistura de combustível-ar mais próximo da coroa.

6.2 Influência da variação de temperatura

O componente em estudo tem uma amplitude de temperaturas de funcionamento relativamente grande. Ou seja, tem de manter as suas características numa vasta gama de temperaturas.

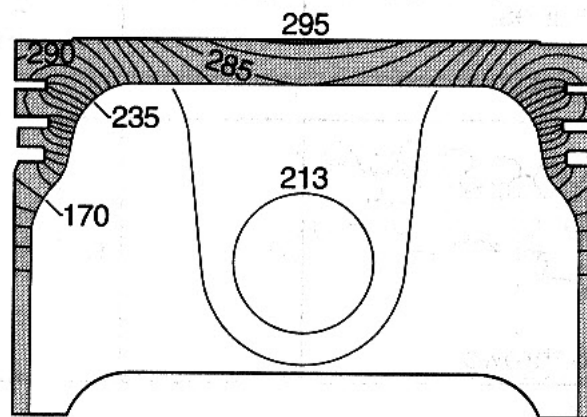


Figura 6.1: Variação das temperaturas dentro de um pistão de um motor a gasolina [36]

Como sabemos as propriedades dos materiais estão intrinsecamente ligadas com a temperatura a que estes se encontram. A influência da temperatura não se limita apenas às propriedades do material. A geração de calor, a interação entre dois corpos de que resulta uma deformação plástica ou atrito também vai influenciar as propriedades do material.

Existem casos em que a amplitude térmica no mesmo componente é grande, quer seja causada devido a calor perdido por condução, convecção, radiação ou mesmo resultante do atrito através do contacto entre duas ferramentas. Sendo assim é necessário ter em conta estes gradientes pois estes podem vir a ter influência em tensões e deformações inesperadas. Desta forma a inclusão da temperatura nos casos de estudo de forma a determinar de uma forma mais precisa o comportamento mecânico das ligas de alumínio torna-se muito importante.

Os primeiros cálculos e técnicas numéricas apresentadas não tinham em conta a variação da temperatura pois daí acrescia um investimento a nível de computação muito elevado. Com o aumento da capacidade de processamento e a consequente diminuição de custos, o processo utilizado hoje em dia tem em conta as temperaturas do material mesmo que seja de uma forma mais simplificada.

Coefficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica é a tendência da matéria para alterar o seu volume com a temperatura. Quando uma substância é aquecida, as suas partículas começam a agitar-se cada vez mais criando um maior espaço entre elas. Por conseguinte espaçamento médio entre partículas aumenta.

Materiais que contraem com o aumento da temperatura são atípicos. Este tipo de efeito é limitado em termos de amplitude da contração e só ocorre em amplitudes de temperatura específicos. O grau de expansão dividido pela diferença de temperatura é chamado o coeficiente de expansão térmica e geralmente varia com a temperatura.

Existem alguns fatores que afetam o coeficiente de expansão térmica. Ao contrário dos gases ou líquidos, os sólidos têm a tendência a manter a sua forma quando estão sujeito a uma expansão térmica.

A expansão térmica geralmente diminui com o aumento da energia de ligação, que também tem um efeito no ponto de fusão dos sólidos. Desta forma materiais com um elevado ponto de fusão são mais propensos a terem um ponto de fusão mais baixo.

O coeficiente de expansão térmica descreve como varia o tamanho de um objeto com a temperatura. Mais especificamente, mede a mudança fracional de um objeto com a mudança de temperatura a pressão constante. Existem vários tipos de coeficientes, volumétricos, área e lineares. Estes são usados dependendo da aplicação particular na qual as dimensões são consideradas mais importantes [9].

O coeficiente de expansão volumétrico é o mais básico e o mais utilizado em geral. As substâncias expandem ou contraem quando a temperatura muda. Os materiais isotrópicos expandem com o mesmo rácio em todas as direções.

Normalmente tem de se ter em conta a variação da pressão quando se lida com gases ou líquidos, mas com sólidos tal não é necessário. No caso dos sólidos a pressão não afeta significativamente as dimensões do objeto. Desta forma podemos ter em conta os dados para pressões que variam.

Hoje em dia, os sólidos, têm coeficientes de expansão térmica que não variam significativamente numa amplitude de temperaturas na qual estes são supostos ser usados. Desta maneira podemos fazer uma média para representar o seu coeficiente se as temperaturas variarem apenas dentro do limite estipulado pelo fabricante.

Para uma primeira aproximação, a mudança em comprimento de um objeto devido à expansão térmica está relacionado com a temperatura através de um coeficiente de

expansão térmica linear. Tendo isto em conta podemos escrever:

$$\alpha_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dT}$$

Onde L é um comprimento particular medido e α é o rácio de mudança da dimensão linear com a variação da temperatura.

A mudança na dimensão linear pode ser descrita como:

$$\frac{\delta L}{L} = \alpha_L \delta T$$

Esta equação funciona bem desde que a expansão linear não mude muito com a temperatura. Caso varie muito a equação tem de ser integrada.

Para um sólido podemos ignorar os efeitos da pressão no material e o coeficiente de expansão térmica pode ser escrito como:

$$\alpha_V = \frac{1}{V} \frac{dV}{dT}$$

Onde V é o volume do material, e α é o rácio de mudança do volume com a temperatura. Isto significa que o volume de um material muda uma quantidade fixada.

Por exemplo um bloco de alumínio com um volume de 1 metro cúbico pode expandir para 1.002 metros cúbicos quando as temperaturas aumentam 50°C. Isto significaria uma a expansão de 0.2% . Alterando o volume, o bloco de alumínio alteraria sempre 2%. Simplificando, isto significaria que existe uma variação de 0,004% por grau C. Se já soubermos o coeficiente de expansão podemos calcular as mudanças de volume através de:

$$\frac{\delta V}{V} = \alpha_V \delta T$$

Onde δV é a mudança fracional de volume (ex. 0.002) e δT é a mudança de temperatura (ex. 50°C)

O caso acima assume que a mudança de temperatura é pequena o suficiente para o coeficiente de expansão térmica não mudar muito. mas para variações de temperaturas maiores tem de se proceder à integração a fim de obter resultados mais realistas. Para tal deve-se ter em conta a seguinte equação:

$$\frac{\delta V}{V} = \int_{T_0}^{T_0+50} \alpha_V(T) \delta T$$

Finalmente podemos analisar os valores do coeficiente de expansão térmica volúmica na tabela 6.1. Podemos ver que o coeficiente não varia consideravelmente com a temperatura de utilização. Tendo em conta que o objeto em causa irá variar entre temperaturas na ordem dos 100-400°C podemos assumir uma média para o coeficiente de expansão térmica de 19×10^{-6} . Neste trabalho utilizou-se uma recta de valores de forma a obter valores mais aproximados mesmo tendo em conta que o valor do coeficiente de expansão térmica é muito baixo e varia pouco.

Temperatura °C	Coefficiente de expansão térmica ($10^{-6}K$)
25	18,5
100	18,65
200	19,17
300	19,72
350	19,93

Tabela 6.1: Variação do coeficiente de expansão térmica com a temperatura

Temperatura °C	Difusividade Térmica (cm^2/s)
25	0,525
100	0,519
200	0,506
300	0,489
350	0,480

Tabela 6.2: Variação da difusividade térmica com a temperatura

Difusividade térmica

A difusividade térmica é normalmente definida pela letra α mas a, k ou D também são utilizadas. Esta é definida pela condutividade térmica a dividir pela densidade e pelo calor específico a pressão constante. Tem como unidades SI m^2/s . E pode ser representada através da fórmula:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$$

Onde k é a condutividade térmica ($W/(m \cdot K)$) ρ é a densidade (kg/m^3) c_p é o calor específico ($J/(kgK)$) Juntos ρc_p representam a capacidade de calor volumétrico ($J/(m^3K)$). Como pode ser visto na equação

$$\frac{\delta T}{t} = \alpha_V \nabla^2 T$$

A difusividade térmica é o rácio da temperatura em relação ao tempo, quantificando a velocidade na qual a temperatura estabiliza. Num certo sentido, a difusividade térmica é uma medida da inércia térmica. Numa substância com elevada difusividade térmica o calor move-se rápido através da mesma, porque esta tem uma condutibilidade térmica elevada em relação à sua capacidade de armazenar energia.

A difusividade térmica é medida através de um *flash metod*. Este método envolve aquecer uma tira de uma amostra com um pulso de energia numa extremidade e analisar a mudança de temperatura na outra extremidade.

Para o material em estudo a difusividade térmica atinge valores entre 0,52 e 0,48(cm^2/s) como podemos ver na tabela 6.2. A difusividade térmica tende a descer com o aumento de temperatura. Ou seja quanto mais elevadas são as temperaturas, menor é a capacidade do material de difundir o calor.

Temperatura °C	Calor específico ($J/kg.K$)
25	820
100	874
200	915
300	952
350	990

Tabela 6.3: Variação do calor específico com a temperatura

Calor específico

O calor específico reflete a energia cinética média das partículas enquanto o calor é transferido de zonas com temperatura mais elevada para zonas de temperatura mais baixa. Energia térmica transmitida pelo calor é armazenada sob a forma de energia cinética dos átomos e das moléculas enquanto estes se movem e rodam. Adicionalmente alguma energia térmica pode ser armazenada como energia potencial. Nestes casos estão associados modos de vibração de elevada energia, que ocorrem em ligações inter atômicas de todas as substâncias. Translações, rotações e uma combinação de tipos de energia em vibrações (cinética e potencial) atômicas representam os graus de liberdade de movimentos que contribuem para a capacidade de armazenar energia a nível atômico.

A uma escala microscópica, cada sistema de partículas absorve energia térmica sob vários níveis dos graus de liberdade acima mencionados. A temperaturas elevadas este processo contribui para uma aproximação do calor específico de um valor por mole de partículas que está determinado pela lei de Dulong-Tetit. Este limite é cerca de 25 joules por kelvin por mole de átomos e é atingido para alguns sólidos a temperaturas normais de funcionamento.

Devido a limitações quânticas, a qualquer temperatura, alguns destes graus de liberdade podem não estar disponíveis ou apenas parcialmente disponíveis para armazenar energia. Nestes casos o calor específico será apenas uma fração do máximo estipulado. Ao aproximar da temperatura do zero absoluto o calor específico de um sistema também se aproxima do zero, devido à diminuição dos graus de liberdade. A teoria quântica pode ser utilizada quantitativamente de forma a prever o calor específico para sistemas simples [9].

Isto leva-nos à análise da tabela 6.3 em que podemos ver uma aproximação dos valores de calor específico para o material em estudo. Como podemos ver o calor específico aumenta com a temperatura e tem uma variação de $170(J/kg.K)$ no seu ciclo de funcionamento. Este facto torna assim essencial ter em conta esta variação aquando da realização de ensaios térmicos.

Condutividade térmica

Em termodinâmica a condutividade térmica é normalmente denominada por k e é a propriedade que um material tem de conduzir calor. Esta é determinada através da lei de Fourier para condução de calor.

A transferência de calor ocorre em proporções maiores em materiais com condutividade mais elevada. Sendo assim faz sentido que materiais com maior condutividade sejam utilizados em aplicações *heat sink* e materiais com condutividade mais baixa sejam utili-

Temperatura °C	Condutividade térmica ($W/m.K$)
25	120
100	125
200	128
300	129
350	131,4

Tabela 6.4: Variação da condutividade térmica com a temperatura

zados como isolantes. A condutividade térmica, tal como muitas outras propriedades, é dependente da temperatura. A propriedade recíproca da condutividade é a resistividade térmica.

As unidades SI da condutividade térmica são ($W/m.K$). Também se utilizam unidades imperiais, o $BTU/(hr ftF)$.

Os valores da condutividade térmica da liga em estudo podem ser consultados na tabela 6.4. Aqui podemos verificar que a condutividade aumenta com a temperatura. Mesmo que não seja um aumento significativo é um aumento que deve ser tido em conta.

6.3 Variação do fluxo de calor durante o ciclo de combustão

As condições fronteira para um cilindro variam muito de zona para zona. Desta forma simplificou-se o pistão essencialmente como duas zonas: a zona que se encontra em contacto com a parede do cilindro e por conseguinte se mantém a uma temperatura relativamente constante; o topo do pistão que está sujeito a amplitudes térmicas muito grandes e fluxos de calor positivos e negativos várias vezes por segundo.

A transferência de calor através do pistão pode ser simplificada fazendo um balanço energético, tendo em conta a potência produzida, a energia perdida pelo escape, o calor que atravessa o pistão e o calor que nunca atravessa o pistão.

Segundo a Bosh [36] podemos simplificar de acordo com a seguinte equação:

$$P_t = \frac{P_{util}}{0.3}$$

$$P_t = \frac{P_{escape}}{0.35}$$

$$P_t = \frac{P_{pisto}}{0.18}$$

$$P_t = \frac{P_{cilindro}}{0.17}$$

Tendo em conta que a potência útil do carro debitada é de 75 cv, o raio do pistão é 36mm e o motor tem 4 cilindros podemos determinar o fluxo de calor que atravessa o pistão utilizando uma função criada no matlab no CD em anexo.

Sendo assim o valor de fluxo de calor que é fornecido ao pistão obtido foi de $8,5 \times 10^5 W/m^2$, tal pode ser comprovado nas equações seguintes[1].

Capítulo 7

Comportamento Estrutural

7.1 Influência dos esforços em frequência

A falha por fadiga resulta da aplicação de cargas pequenas relativamente à tensão de cedência do material. A aplicação repetitiva causa deformações ou mesmo falha do material. A causa deste tipo de forças pode resultar num episódio de falha estrutural, em particular no aparecimento de uma fractura que surge e se espalha ao longo do componente. O aumento das tensões internas acontece repentinamente e fraturas *brittle* aparecem [6].

Ligas não ferrosas como é o caso das ligas de Alumínio não têm limite inferior de tensão para o qual a falha não ocorre, caso o ensaio seja repetido vezes suficientes. Ou seja, a aplicação de uma força mesmo que esta seja muito pequena, resulta sempre na cedência do material. Desde que ensaio seja repetido vezes suficientes a fratura acabará por aparecer. Para estas ligas o número de ciclos para o qual a falha deve ocorrer situa-se entre os 10^8 e 10^9 ciclos, mais ou menos consoante a liga e os tratamentos a que esta foi sujeita.

Um dos maiores problemas em motores de combustão interna são as deformações e mesmo a quebra devido à fadiga de componentes cruciais como o pistão. Quando temos um componente como o pistão que é sujeito a mais de 10^9 ciclos de tensões superiores a 8 MPa aproximamo-nos dos limites físicos do material [6].

A falha por fadiga acontece sempre no ponto de maiores tensões. Este ponto pode ser determinado pela forma da peça ou pela aplicação da força no componente. Também pode resultar do acabamento de uma superfície, como marcas de ferramentas, vazios internos, falhas devido ao encolhimento, e rachas de arrefecimento em soldas e defeitos introduzidos durante a maquinagem. Isto torna a realização de simulações muito importante, de forma a tentar prevenir estas falhas através da identificação destes pontos críticos.

Outra característica do comportamento da fadiga é a relação com a distribuição de defeitos ao longo do material. A análise de simulações de fadiga deve ter em conta um elemento probabilístico já que a falha não irá ocorrer sempre no mesmo ciclo para a mesma força. Ou seja, os resultados devem ser entendidos como existindo uma maior probabilidade de ocorrer falha devido à fadiga em torno destes valores. Para contrabalançar estes resultados devem-se realizar vários ensaios para tensões diferentes de forma a obter uma visão geral do problema e ter uma perceção do intervalo de confiança.

7.2 Variação da pressão durante o ciclo de combustão

Durante o ciclo de combustão normal existem variações de pressão. Estas estão ligadas ao movimento do pistão e à ignição do combustível. Como podemos ver no gráfico 7.1 a pressão dentro do cilindro varia de 8MPa, durante a explosão, a valores negativos de 3MPa durante o escape. Durante a ignição é quando a pressão apresenta valores mais altos. Desta forma qualquer análise estrutural terá de ter por base este máximo de pressão.

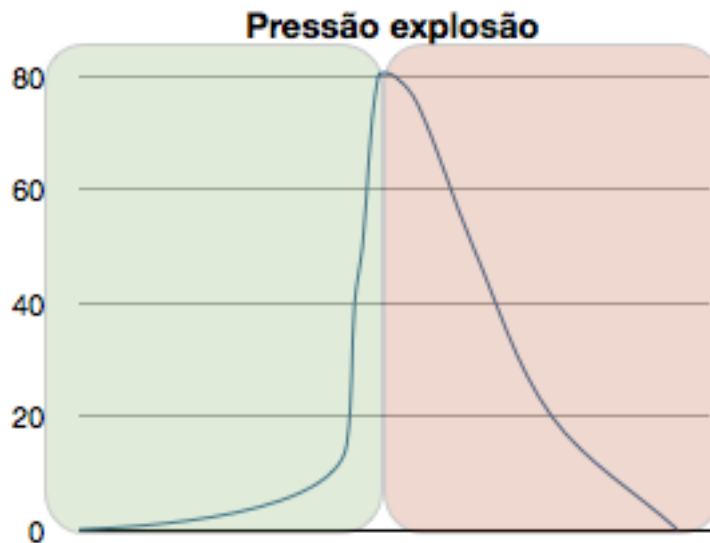


Figura 7.1: Pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição

Existem vários estudos que demonstram as deformações causadas por estas pressões. Entre os mais importantes está o realizado por M. R. Ayatollahi, F. Mohammadi and H. R. Chamani, intitulado *Thermo-Mechanical Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Piston* e também o estudo realizado por Yanxia Wang and Hui Gao, intitulado *Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss*. Infelizmente ambos os estudos são referentes a motores diesel, mas os pistões são constituídos do mesmo material daí que os limites estruturais sejam os mesmos. Deste estudo retira-se a necessidade de ter tolerâncias de forma na ordem dos $30\mu\text{m}$ de maneira a evitar o desgaste e a perda de performance do sistema, bem como tensões de von mises que nunca ultrapassem os 160MPa.

7.3 Cálculo de forças internas causadas pelas acelerações

Como foi calculado no capítulo 5.1 as acelerações no componente são significativas e causam esforços adicionais que podem causar stresses inesperados. Desta forma, a determinação destas ajuda a representar o sistema mais fidedignamente.

Através das equações do capítulo 5.1 podemos deduzir quando estas são máximas e qual o seu valor. Estas atingem o seu valor máximo na fase da explosão mais corretamente

no ângulo $7616'$ com um valor de $5.76m/s^2$. Tendo em conta o peso do pistão de 327g chegamos a valores de forças criadas pela inércia do pistão na ordem de 1.88N.

7.4 Configurações Críticas

Segundo F.S.Silva [6] existem várias situações possíveis para a iniciação de falhas catastróficas. Como podemos ver na imagem 7.2 o início da falha deu-se junto à fixação da cavilha. Conseguimos ver isso através das marcas de propagação que estão assinaladas. A figura 7.3 consiste num pistão a diesel no qual a falha se iniciou junto ao bordo da coroa e se propagou em direção ao suporte da cavilha.

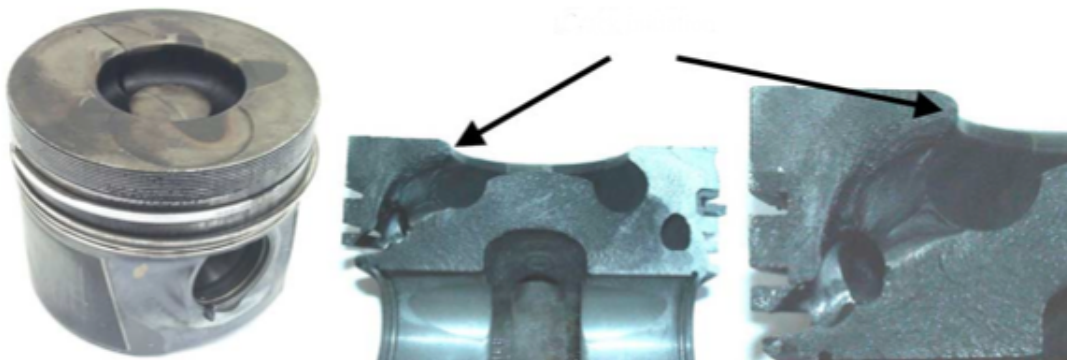


Figura 7.2: Aparecimento de fraturas num pistão de um motor a gasolina [6]

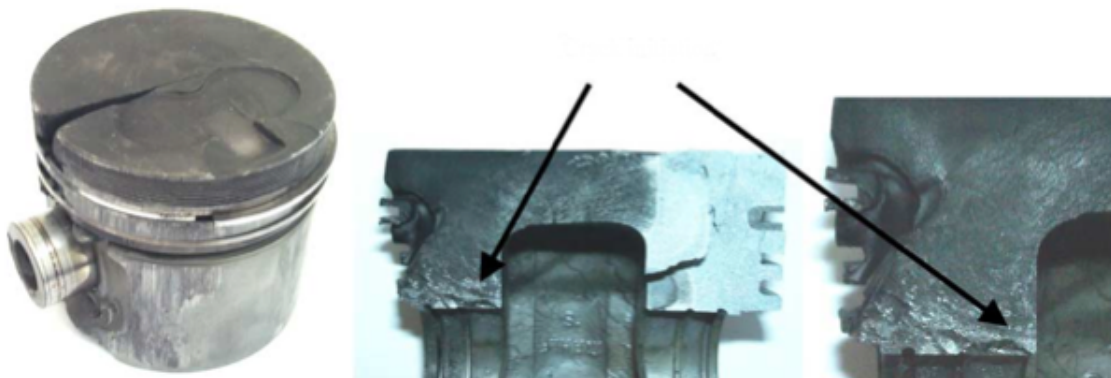


Figura 7.3: Aparecimento de fraturas [6]

É importante referenciar que a maioria das falhas se dá segundo o eixo da cavilha. Isto deve-se ao facto de o pistão fletir em torno do apoio e da fadiga acabar por atingir as zonas onde a compressão e extensão são maiores durante mais ciclos.

Os rasgos dos segmentos representam um ponto crítico pois são "alhetas" que estão sujeitas aos esforços criados pelo atrito nos segmentos. A falha neste local pode acontecer como podemos ver na figura 7.4.

É claro que há uma concentração de tensão sobre o raio de tensão do rasgo, quando o anel de compressão não é no interior da ranhura. A face interior do anel está localizada a uma distância média do rasgo. Isto causa um efeito de alavancagem que aumenta os esforços em questão. Assim, existe um crescimento exponencial das tensões de Von Mises, quando a distância entre o anel e a parede do pistão aumenta. O mesmo é dizer que há um aumento da tensão na ranhura do êmbolo, quando a folga entre o pistão e o cilindro aumenta.

Como podemos verificar a maioria das falhas ocorrem devido à fadiga mas acontecem sempre em pontos que apresentam tensões elevadas. Desta forma, podemos identificar estas configurações críticas ao identificar os pontos que apresentem tensões mais elevadas.

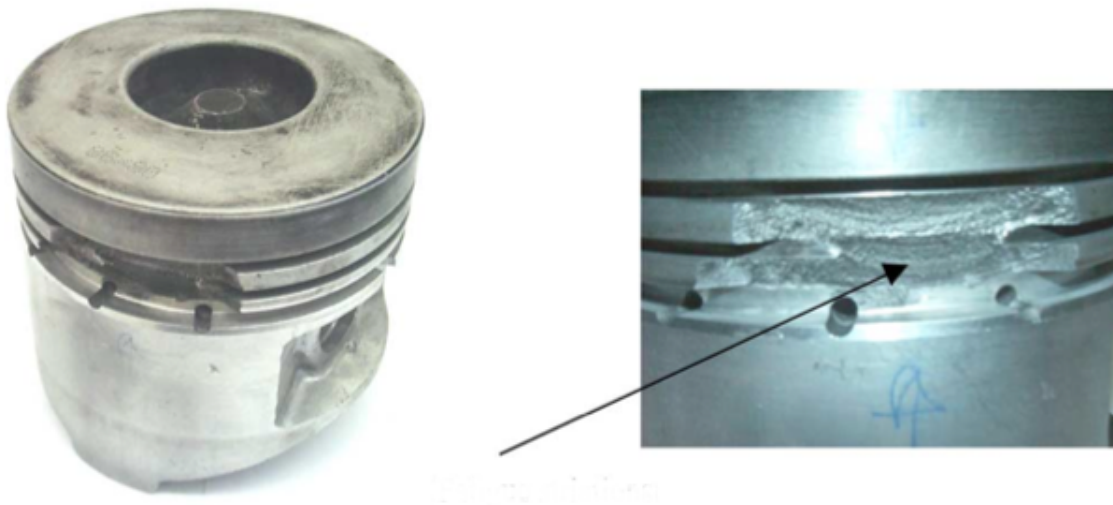


Figura 7.4: Aparecimento de fraturas por fadiga [6]

7.4.1 Resumo das propriedades

Nesta secção podemos encontrar as principais propriedades estruturais do alumínio utilizado. Como podemos ver no gráfico 7.5 consoante as ligas, as propriedades do alumínio variam consideravelmente. Para a liga em causa podemos confirmar com o gráfico 7.5 os valores da tabela 7.1 retirados da referência [4].

Tensão limite de elasticidade	320MPa
Tensão de cedência	350MPa
Limite de alongamento	12%
Módulo de Young	69GPa
Poisson	0.33

Tabela 7.1: Propriedades estruturais da liga de alumínio T6061 [40]

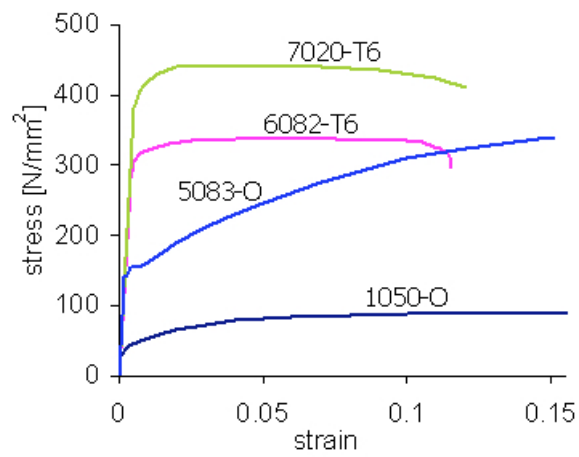


Figura 7.5: Curvas Tensão-Deformação para várias ligas de Alumínio

Capítulo 8

Fluxo de ar dentro do cilindro

Uma análise térmica simplificada normalmente, não inclui a influência do fluxo de ar da admissão dentro do cilindro. Hoje em dia o comportamento dos fluxos dentro do cilindro estão bem definidos. Existem simulações publicadas de quase todos os tipos de pistão . Os casos que mais se aproximam dos elementos utilizados neste trabalho são as simulações realizadas por M.M.Rahman e Brandstatter em *The effect of inlet port geometry on In cylinder flow structures SAEpaper 850499,1985* .

8.1 Definição do caso em estudo

Neste capítulo a influência das transferências de calor durante a fase de admissão irá ser caracterizada. Para tal tem de se estimar as transferências de calor entre o pistão e o ar da admissão. De forma a poder calcular-se o fluxo de calor, optou-se por calcular médias locais do fluxo de calor tendo em conta a velocidade do fluxo, as características do ar na temperatura de admissão e as características ligadas à temperatura de cada secção do pistão. O processo de obtenção do fluxo de calor médio para cada área foi obtido comparando cada secção a um plano com um fluxo de ar paralelo. Como é demonstrado na figura 8.1 podemos ver a temperatura do ar a aumentar e o calor a ser transferido para o ar.

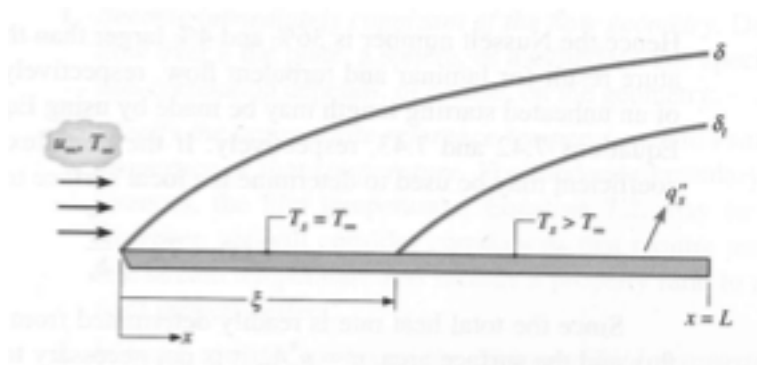


Figura 8.1: *Flat plate* num fluxo paralelo [9]

A utilização deste método aproximativo pode proporcionar uma ideia das transferências de calor que estão a acontecer. Esta metodologia de aproximação apresenta erros

muito elevados e podem chegar a 25 % em casos extremos. Uma descrição detalhada destes erros pode ser encontrada em [3].

Para podermos obter resultados mais fiáveis em condições constantes de funcionamento do motor, considera-se o fluxo de calor constante durante a admissão.

8.1.1 Simulação CFD por Brandstatter

Dos estudos analisados o de Brandstatter é o que mais se aproxima da realidade abordada neste trabalho. As principais características do estudo em causa são: a superfície da coroa do pistão ter duas cavidades para as válvulas e a válvula de admissão ser helicoidal. Estas características coincidem com o nosso caso de estudo e desta forma esta investigação pode ser utilizada como referência no que concerne a valores e direcções do fluxo de ar. A válvula helicoidal é geralmente utilizada para formar um turbilhão na entrada de ar no cilindro. O fluxo de entrada e as condições fronteira de admissão são as mesmas do caso de estudo o que torna comparável os dois. Brandstatter utiliza uma malha curvilínea que expande e contrai de acordo com as características do cilindro. A malha foi definida com 16000 pontos com elementos quadrados. Aplicou um método iterativo com diferenciação de fluxos ascendentes e descendentes e modelos de turbulência $K \epsilon$.

A válvula encontra-se fora do centro do pistão e o turbilhão gerado pela válvula helicoidal torna os resultados obtidos mais complexos. O estudo apresenta uma vista em corte do cilindro como podemos ver na figura 8.2 . Os resultados que nos interessam são as velocidades junto à superfície do pistão. Esta velocidade é que vai ser utilizada para estipular o fluxo médio convectivo de calor.

Como se pode constatar, existe uma circulação em torno da válvula. As velocidades máximas encontram-se diretamente debaixo da válvula e atingem velocidades elevadas.

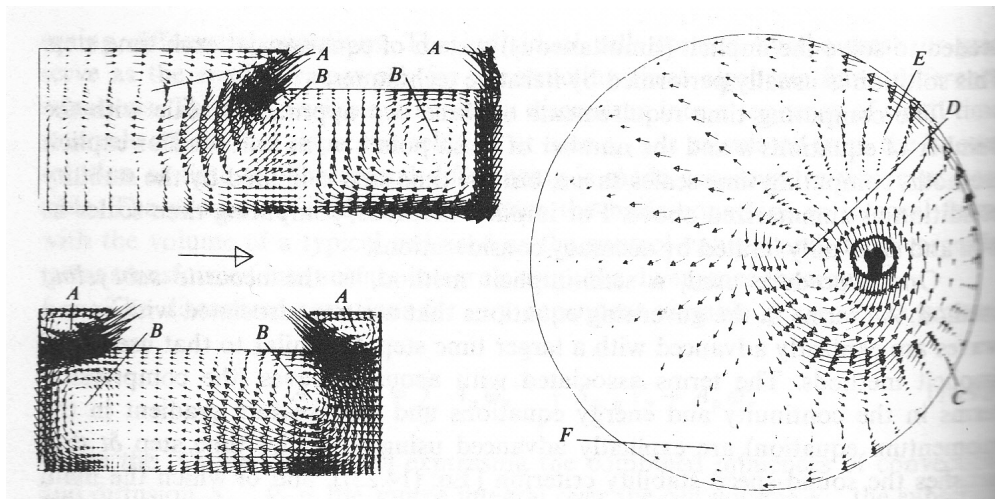


Figura 8.2: Fluxo de ar durante a admissão. Vector de referência 250 m/s. Zonas Baixa pressão ABCDEF [35]

Como se pode ver nas figuras 8.2 existe uma maior velocidade do ar do lado direito do cilindro o que pode significar uma assimetria na dispersão térmica do pistão. Desta forma uma análise mais cuidada desta situação torna-se essencial.

	Área 1	Área 2	Área 3	Área 4
Velocidade média	30	50	104	20

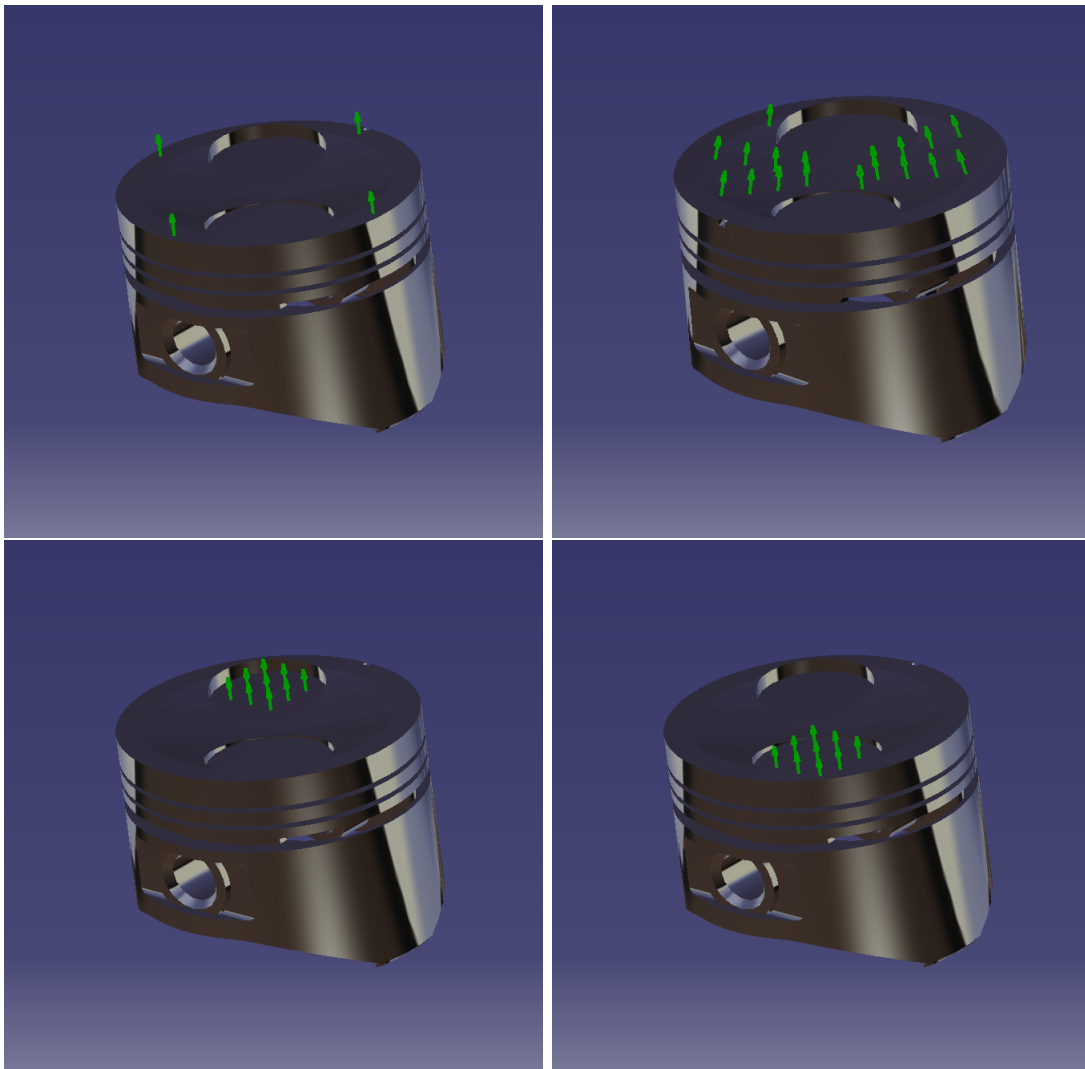
Tabela 8.1: Velocidades médias em cada área m/s 

Figura 8.3: Definição das diferentes áreas 1,2,3 e 4 respetivamente

Capítulo 9

Programas de Modelação

Toda a modelação neste trabalho é realizada tendo por base dois softwares. Sabendo que o Abaqus utiliza métodos iterativos melhores e que o CATIA tem um CAE melhor, tentou-se descobrir uma forma de interligar os dois. Para tal, recorreu-se a um pacote extra para o CATIA chamado ABAQUS for CATIA. Apesar deste pacote diminuir as opções existentes, caso se utilize diretamente o ABAQUS, estas são suficientes para a análise em causa. Desta maneira o trabalho é muito mais eficiente, simplificado e preciso.

Todo o trabalho de modelação e definição dos parâmetros de simulação foi feito no Software CATIA V5 R22 com os cálculos da simulação numérica a serem executados no ABAQUS 6.10.1 através de um software de interface que permite a interação entre os dois softwares.

Optou-se por esta metodologia pois possibilita uma flexibilidade de modelos e uma maior experimentação de diversos fatores com um menor tempo gasto na preparação da simulação, conservando os resultados em valores muito aproximados ao real.

Mantendo todos os processamentos numéricos no Abaqus assegura-se que os resultados são processados num software fiável e utilizando o CATIA como principal software de CAE torna a abordagem do problema muito mais *user friendly* e, após ter realizado algumas simulações, torna as alterações mais fáceis de implementar.

9.1 Elementos finitos

Os elementos finitos influenciam grandemente os resultados das simulações. Sendo assim, a escolha dos elementos finitos a utilizar para cada tipo específico de simulação é um elemento fulcral do estudo. A geometria da peça, as características elásticas e plásticas do material, condições fronteiras e tempo de cálculo são fatores que devem ser tidos em conta aquando da escolha dos elementos. Apesar da existência de um elevado número de elementos no software Abaqus a versão utilizada apenas possui dois tipos de elementos tetraédricos.

9.1.1 Tipos de Elementos

O software utilizado apresenta cerca de 20 tipos de elementos para a formulação da malha. Como podemos ver na tabela 9.2 e 9.1 existem elementos desde B, C,S,STRI, DC e DS. Para mais, temos ainda elementos híbridos, elementos tetraédricos parabólicos modificados, integração reduzida ou completa, elementos casca e elementos membrana.

Elemento da malha	Elemento Abaqus	Descrição
Vector linear	B31	Elemento linear com 2 nós
Vector linear	B32	Elemento linear com 3 nós
Sólido linear	C3D4	Tetraedro linear com 4 nós
Sólido linear	C3D6	prisma linear com 6 nós
Sólido linear, Estrudido	C3D8R	Hexaedro linear com 8 nós integração reduzida
Sólido parabólico modificado	C3D10M	Tetraedro modificado com 10 nós
2D linear	S3R	Casca triangular com 3 nós
2D linear	S4R	Casca quadrangular curva com 4 nós

Tabela 9.1: Tabela de elementos para análise estrutural e a sua descrição

Elemento da malha	Elemento Abaqus	Descrição
Sólido linear	DC3D4	Tetraedro linear com 4 nós
Sólido linear	DC3D6	Prisma linear com 6 nós
Sólido linear, Estrudido	DC3D8	Hexaedro linear com 8 nós integração
Sólido linear	DC3D10	Tetraedro com 10 nós
Sólido linear	DC3D15	Prisma triangular com 15 nós
Sólido linear	DC3D20	Hexaedro com 20 nós
2D linear	DS3	Casca triangular com 3 nós
2D linear	DS4	Casca quadrangular com 4 nós
2D parabólico	DS6	Casca triangular com 6 nós
2D parabólico	DS8	Casca quadrangular com 8 nós

Tabela 9.2: Tabela de elementos para análise térmica e a sua descrição

[5]. Desta forma, aumenta assim a escolha para cerca de 80 tipos distintos de elementos, cada um com características específicas para uma determinada simulação.

Desta forma, a escolha do elemento certo implica alguma reflexão. No caso de análise de temperaturas optou-se por um elemento DC3D4, ou seja um tetraedro de 4 nós específico para análises térmicas. Para as simulações estruturais utilizou-se o elemento C3D4 ou seja um tetraedro linear de 4 nós. Ambos estes elementos são simples, de cálculo rápido e têm como contrapartida a obrigatoriedade da utilização de números maiores de elementos para garantir a sua fiabilidade.

Os elementos tetraédricos com 4 nós, um ponto de integração e funções de interpolação trilineares estão representados na figura 9.1. Como podemos ver estes elementos são mais simplificados. Para se obterem valores reais para deslocamentos e deformações quanto maior for o número de elementos melhor será o resultado.

Para uma análise mais aproximada em ensaios elásticos podemos utilizar elementos tetraédricos com 4 nós e funções de interpolação trilineares mas que utilizem 4 pontos de integração. Na figura 9.1 podemos ver o elemento representado e os 4 pontos de integração.

Os elementos sólidos sofrem uma desvantagem para o cálculo da plasticidade. O carácter da deformação plástica é isocórico e a integração completa leva ao aumento da rigidez do elemento. Para contrariar este efeito, quanto menos pontos de integração se utilizarem melhor serão os resultados. [19]. Quando é analisada a deformação plástica, estes elementos são os que se aproximam mais da solução real pois apesar de serem

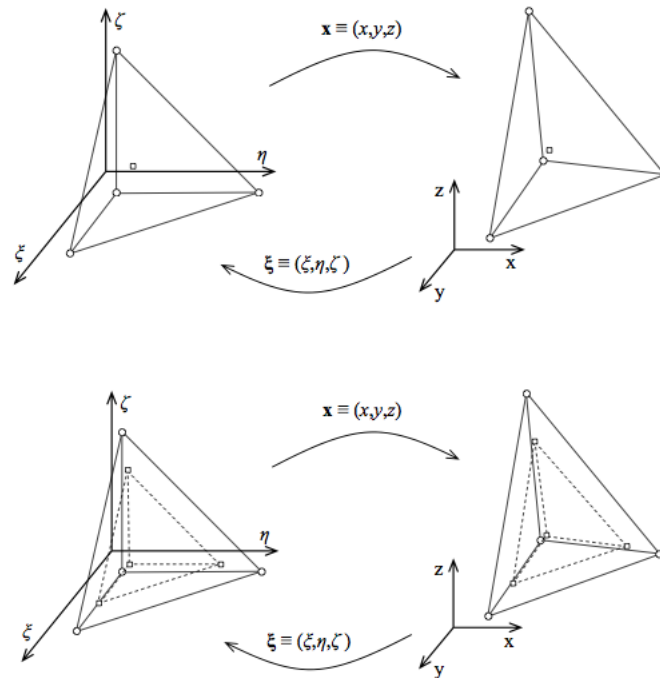


Figura 9.1: Elemento finito com 1 e 4 pontos de integração. Pontos encontram-se definidos por um quadrado e nós por um círculo. [19]

elementos sólidos apenas apresentam um ponto de integração.

Sendo assim, de forma a obter resultados viáveis, a quantidade de elementos tem de ser grande o suficiente para suplantar as deficiências que este tipo de elemento apresenta quando é utilizado em números baixos. No caso em estudo do aumento do número de elementos espera-se um aumento dos tempos de simulação mas a simulação manter-se-á "leve" e os resultados serão melhores.

9.2 Fases de processamento

Todas as simulações irão passar por 4 fases. A definição e aplicação das condições fronteiras será a primeira, seguida do pré processamento, pós processamento e a apresentação gráfica. Cada uma destas fases é fundamental para a verosimilhança dos resultados e a prova de viabilidade da simulação.

9.2.1 Definição e aplicação das condições fronteira e das características do material

Para cada caso em análise as condições fronteira têm de ser definidas e estipuladas de forma a que a simulação represente valores aproximados da realidade do processo em estudo. Para tal é necessário fundamentar as condições com valores obtidos por dados experimentais. As condições fronteira específicas dos casos de simulação térmica são essencialmente temperaturas iniciais, fluxos de calor. Em casos estruturais, os tipos de

movimentos permitidos e condições de contacto são as principais condições fronteira.

O material do objeto em análise tem de ser definido de forma a garantir que o programa consegue obter valores para o definir. No caso em estudo, o material tem características dependentes da temperatura. Sendo assim a definição destas características deve ter em conta os limites de atuação do material.

9.2.2 Pré-processamento

O pré-processamento é a etapa em que a geometria do sólido, as características do material, a malha de elementos e as condições fronteira são inseridas por esta ordem no software. Ou seja, é a fase em que se colocam todos os dados recolhidos na interface do programa. Qualquer erro nesta fase pode causar posteriormente dados incorretos no processo, logo uma fase pré processamento cuidada assegura uma simulação sem percalços.

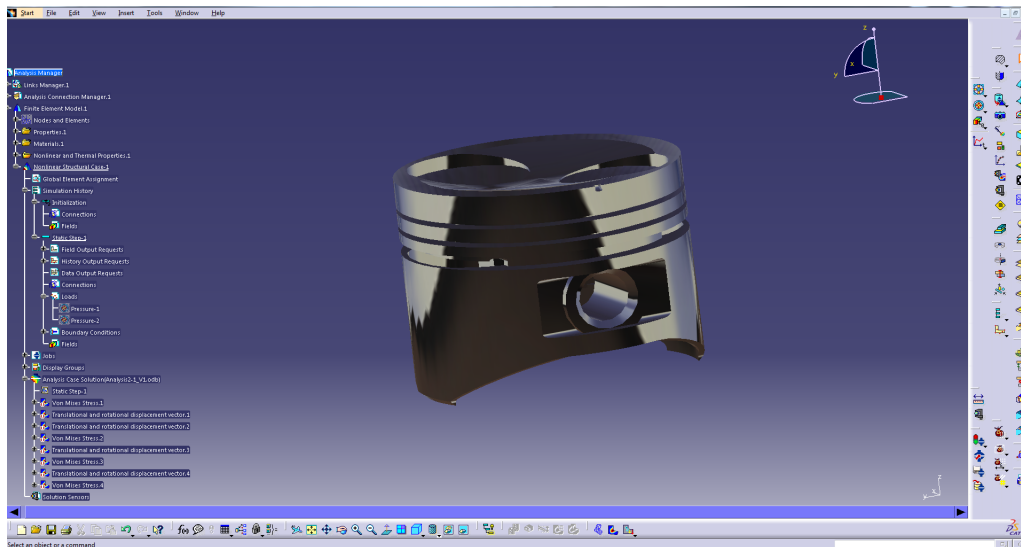


Figura 9.2: Interface do software

9.2.3 Pós-processamento

Após a introdução cuidada de todos os dados na fase de pré processamento o CATIA transfere todos os dados para o ABAQUS e a simulação corre normalmente como podemos ver na imagem 9.3. Nesta fase, podemos ir determinando se os intervalos da interpolação estão grandes ou pequenos de mais. Tendo em conta o decorrer da simulação podemos torná-la mais eficiente de forma a que esta corra mais rapidamente.

9.2.4 Apresentação gráfica

Quando a fase de pós-processamento termina existem várias opções de forma a demonstrar os resultados obtidos de uma maneira clara. Desde a escolha do fator de amplificação de deslocamentos ou a amplitude de temperaturas que devemos representar são exemplos de escolhas que podem tornar os resultados de uma simulação muito mais claros.

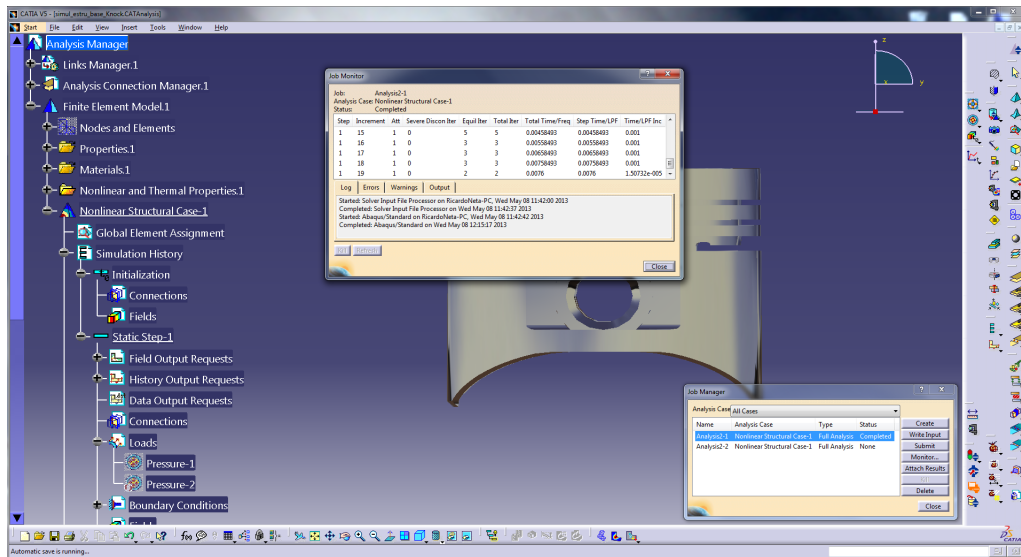


Figura 9.3: Monitorização do programa em funcionamento

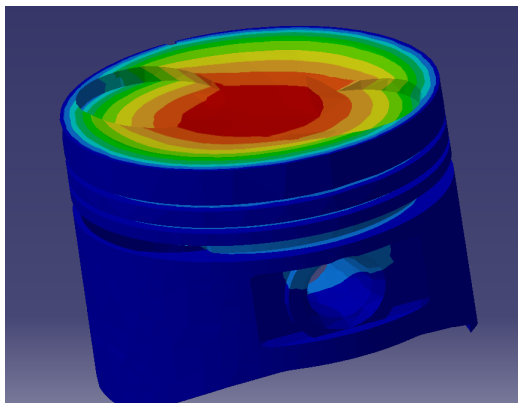


Figura 9.4: Exemplo de apresentação gráfica numa análise térmica

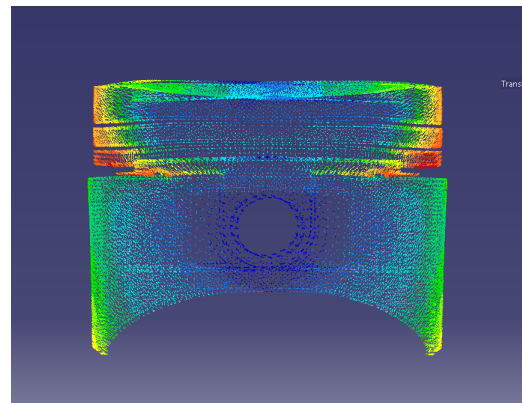


Figura 9.5: Exemplo de apresentação gráfica numa análise estrutural

Capítulo 10

Parametrização dos problemas em estudo

A partir deste capítulo o trabalho vai começar a referenciar as diferentes simulações feitas. De forma a verificar se o programa está a produzir resultados verosímeis optou-se por realizar duas simulações de um caso base. Os casos base já foram simulados em estudos anteriores [36]. Caso os resultados dos casos base com as simulações dos estudos forneça resultados semelhantes podemos assumir que estes estão bem defendidos e que o programa está a dar valores aproximados da realidade.

Sendo assim, os primeiros exemplos testados servirão de comprovação para os resultados das análises seguintes.

10.1 Caso base

De forma a garantir uma comparabilidade de simulações todas elas partem de um caso base, para o qual são definidas as propriedades que irão ser a base de todas as simulações.

10.1.1 Definição dos parâmetros utilizados

Existem dados comuns a todas as simulações. As propriedades do material são um exemplo disso. As propriedades do material vão ser sempre as mesmas e estão representadas no Capítulo 7 e 8.

Caso térmico

Nesta secção os fluxos de calor e as envolventes fazem toda a diferença na simulação. Desta forma, os dados a utilizar têm muita importância. Tal como foi referido no Capítulo 7.3 a variação do fluxo de calor pode ser definida através da função de matlab criada `heatflow(cv,r,c)`. Dando a potência produzida pelo motor em cavalos, o raio do pistão e o número de cilindros, o programa faz uma estimativa dos valores de Potência total, Potência perdida pelo escape, potência perdida pelo pistão, potência perdida pelo cilindro e a potência perdida através do pistão por unidade de área. Daqui se tira o valor do fluxo que vai atravessar o pistão. Neste caso para um motor de 75cv, raio do pistão de 0.078 e 4 cilindros obtemos o valor de $Q'' = 830000W/m^2$

Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4
20	50	30	134

Tabela 10.1: Tabela de fluxos criados pelo ar de admissão em W/m^2

As paredes do cilindro encontram-se a uma temperatura constante de 90°C de forma a evitar a evaporação da água dentro dos canais de refrigeração. Sendo assim podemos assumir que as paredes do pistão que estão em contacto com o cilindro também irão estar a uma temperatura constante.

Caso estrutural

No caso base estrutural são definidas as características estruturais do material e os esforços presentes no sistema simplificado. Como foi abordado no Capítulo 8, as características estruturais do material estão bem definidas e podem ser lidas diretamente. Os esforços presentes neste sistema estão mencionados no capítulo 7.2 e 7.3.

Desta forma podemos definir simplesmente o caso estrutural como se pode ver na figura 11.10. Apenas uma pressão no topo do pistão, a força causada pela aceleração aplicada no centro de massa e o apoio no ponto de contacto são necessários para definir este sistema.

10.2 Influência do fluxo de ar frio da Admissão

Como foi referido nos Capítulos 7 e 9 o fluxo de ar de admissão pode causar um fluxo de calor adicional ao caso base. O fluxo de ar não é simétrico, logo mesmo que este represente valores pequenos, vai causar sempre uma assimetria térmica na coroa do pistão. A assimetria térmica dentro do pistão pode causar deformações no pistão que levem a um desgaste maior e por consequência a um menor tempo de vida do componente. Desta forma a quantificação da influência deste fenómeno é de uma importância significativa.

Em primeiro lugar é necessário estimar o fluxo de calor do pistão para o ar de admissão. O pistão foi dividido em zonas como podemos ver na figura 11.11, de forma a estimar um coeficiente de convecção local. Sabendo as velocidades médias para cada uma das zonas, assumindo que a temperatura do ar é uniforme ou tem variações desprezáveis e comparando cada uma das zonas a um prato liso, podemos estimar o fluxo de calor local para cada uma destas zonas.

Na tabela 10.1 podemos ver as velocidades médias de cada uma das secções tal como foi retirado do trabalho de Brandstatter. Podemos constatar que existe uma disparidade de valores significativos, o que substancia a importância da realização deste estudo.

O objetivo é determinar o fluxo de calor Q'' entre o pistão e o ar. Para tal, em primeiro lugar determina-se o fluxo é laminar ou turbulento na secção através da equação:

$$Re_l = \frac{u_{\text{inf}} \times L}{\nu}$$

em que se o Re for inferior a 10^5 temos um fluxo laminar e se for superior temos fluxo turbulento. Para cada um dos casos procede-se da seguinte forma:

Fluxo turbulento

$$Nu = 0,0296 \times Re^{4/6} \times Pr^{1/3}$$

Fluxo laminar

$$Nu = 0,664 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3}$$

Com o valor do número de Nusselt podemos obter:

$$h = \frac{Nu \times K}{L}$$

e finalmente

$$Q'' = h \times A \times (T_{\text{inf}} - T_s)$$

Aplicando este pensamento a cada uma das áreas, obtemos uma estimativa do fluxo de calor médio para cada uma das secções. Com este valor já podemos realizar as simulações da influência do ar da admissão. De forma a obter os valores do fluxo de calor para as várias áreas, criou-se um programa no Matlab que, para cada uma das características específicas das regiões em análise, calcula o valor de fluxo de calor tendo em conta as equações acima descritas. O programa pode ser visto no CD em Anexo.

O pistão foi dividido em 3 zonas tendo em conta a variação de temperaturas e as velocidades do fluxo de admissão nessa zona. Na figura podemos ver as diferentes zonas representadas.

10.3 Atrito e fricção

Uma percentagem da potência produzida pelo motor perde-se por atritos entre a parede do cilindro e o pistão. Por fricção entendem-se todas as forças que resultam da interação entre dois corpos relacionando o seu movimento e as forças quando estes se movimentam. A fricção pode ser tão grande entre certos pontos da superfície que cria pontos quentes, que podem chegar a soldar as duas superfícies. Daí que a criação de movimento com o mínimo de atrito seja muito importante.

Quando duas superfícies sólidas de um motor se encontram em contacto num motor, estas tocam-se em alguns pontos. A única forma de diminuir estes contactos é criando uma camada de lubrificação entre as duas superfícies. Esta camada deve ser suficientemente grande para abranger todas as incoerências da superfície mas não pode ser grande demais senão as peças ficariam com muita folga. Sendo assim podemos assumir que o dimensionamento do filme de lubrificação está intimamente ligado à suavidade das superfícies maquinadas e deve ser minimizado de forma a diminuir folgas mas evitando o contacto entre as superfícies.

Os óleos de lubrificação aderem às superfícies sólidas e quando as superfícies se movem, uma em relação à outra, o óleo é arrastado com a superfície. O óleo faz com que as superfícies se mantenham a uma distância média uma da outra. Com o óleo, o único atrito que temos entre as duas superfícies é a resistência do fluido criada pelo movimento das mesmas que é muitíssimo inferior ao atrito entre as duas. O óleo deve ter algumas características essenciais de forma a funcionar da melhor maneira. Deve aderir a superfícies sólidas. Deve conseguir resistir à compressão entre duas superfícies, mesmo sob pressões elevadas. Em contrapartida deve ser fácil de movimentar camadas adjacentes do mesmo, ou seja deve ter uma viscosidade baixa.

Os componentes que mais contribuem para a fricção são os pistões e os segmentos. As forças atingem máximos perto do TDC e do BDC tal como podemos ver na figura 10.1

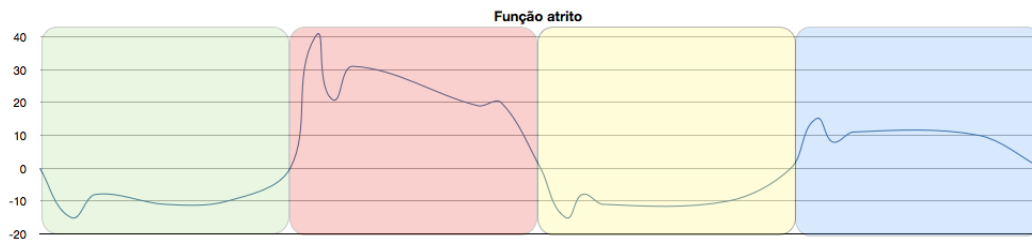


Figura 10.1: Atrito em kPa ao longo dos 4 estágios do ciclo. Verde- Compressão, Vermelho-Ignição, Amarelo-Escape, Azul-Admissão

(página 419) logo após o pistão ficar estacionário. Quando não existe movimento relativo entre as duas superfícies o filme de óleo entre estas duas superfícies é comprimido e forçado a sair entre as duas superfícies. Desta forma quando o pistão inicia o seu movimento existe uma camada de óleo muito pequena o que faz com que haja algum contacto metal-metal e conseqüentemente aumenta os valores de fricção. Consoante o pistão avança sob a superfície já lubrificada do cilindro, o atrito diminui pois o movimento do pistão arrasta óleo resultando na flutuação hidráulica dos componentes.

Pode ser constatado na figura 10.1 que mesmo quando o pistão atinge os TDC e BDC, onde a velocidade do pistão é zero, ainda existe alguma fricção causada por deflecções no pistão devido às pressões exercidas e inércia do próprio pistão. Desta forma, as velocidades médias do pistão ficam limitadas entre os 5 e 20 m/s pois as deflecções causadas pela inércia seriam muito elevadas. Estas deflecções acabariam por causar um desgaste elevado no pistão e no cilindro, obrigando ao aumento dos coeficientes de segurança e por conseguinte a maiores custos.

A magnitude das forças causadas pela fricção é quase sempre a mesma na admissão como na compressão e no escape. Contudo é substancialmente mais elevada durante a expansão, como seria de esperar em resultado das elevadas pressões e forças que ocorrem neste ponto.

O atrito entre o pistão e o cilindro representa cerca de 50 % do total dos atritos do motor e pode chegar a 75% quando o motor funciona no *ralenti*. Os segmentos contribuem em média para 20% do total dos atritos o que significa que a relação pistão, segmentos e cilindro representa quase a totalidade dos atritos presentes no motor. [35]

Tendo em conta esta informação, percebe-se a importância da otimização deste sistema. Uma das formas de diminuir o atrito causado pelos segmentos é diminuir a espessura dos mesmos. Em carros de competição, os segmentos chegam a atingir apenas 1mm de espessura e são utilizados como forma de diminuir o atrito. Estas técnicas irão ser relevantes na fase de melhoramento do produto.

10.4 O efeito da detonação no pistão

A detonação faz parte de um dos muitos resultados da combustão anormal. Estes fenómenos de combustão anormal quando ocorrem podem dar aso a danos sérios no motor e causar a falha catastrófica do mesmo ou em casos menos severos podem fazer aumentar o ruído produzido pelo motor e diminuir significativamente a eficiência do mesmo. Se falarmos com um mecânico de certeza que ele irá descrever este problema como o grilar do motor, pois este faz um barulho semelhante a um grilo mas mais grave.

O *Knock* é o som que o motor faz quando este fenómeno está a ocorrer, e resulta da combustão espontânea de uma porção da mistura de: ar, combustível e gás residual. Quando este processo de combustão anormal acontece dá-se uma libertação extremamente rápida da energia química da mistura, causando pressões locais muito elevadas e ondas de propagação com uma amplitude significativa ao longo de toda a câmara de combustão. Este fenómeno pode ocorrer antes da ignição por parte da vela *preignition* ou após *postignition*. Normalmente este efeito ocorre junto à coroa do pistão criando uma queima superficial da coroa do pistão, podendo assim gerar danos no mesmo devido ao aumento de temperaturas. Após esta fase de auto ignição a chama propaga-se de forma semelhante ao que faria normalmente caso fosse gerada pela vela.

Como a ignição espontânea pode ocorrer devido a vários fatores como temperatura, pressão e dispersão dos gases em combustão vários fenómenos de *knock* podem acontecer. Uma combustão normal consiste num processo que é iniciado apenas pela ignição da vela e na qual a chama se propaga ao longo da câmara de uma forma constante, uniforme e a velocidade constante. Sendo assim podemos considerar como combustão anormal, qualquer processo no qual a frente da chama é iniciada de forma anormal, quer por *hot spots*, por ignição superficial ou por um adiantamento ou atraso da vela.

Em primeiro lugar temos o *spark knock* que é recorrente e facilmente identificável pelo ruído produzido. Este resulta de um atraso ou adiantamento da vela causando uma combustão fora de tempo. Este fenómeno é controlável pelo avanço ou recuo da ignição. Avançando a ignição aumenta a intensidade da detonação e recuando a ignição reduz a intensidade.

O caso mais preocupante e mais diverso é o da ignição superficial causada quer por hotspots quer por depósitos na câmara de combustão. Ignição superficial consiste em qualquer tipo de ignição causada por qualquer que seja a superfície quente para além da vela. Este tipo de ignição pode ser dividido em 6 vertentes:

- *Knocking* é um tipo de *knock* que resulta da ignição superficial pré-ignição e não é controlável através do avanço ou recuo da ignição.
- *Run-on* é caracterizado pela continuação do funcionamento do motor mesmo após se ter desligado a ignição.
- *Non knocking* é um tipo de ignição superficial de baixa influência e da qual não resulta nenhuma detonação.
- *Runaway* é um género de ignição superficial que se vai adiantando cada vez mais no ciclo, criando temperaturas cada vez mais altas, podendo dar aso a danos estruturais graves no motor.
- *Rumble* é um batimento grave acompanhado por um mau trabalhar do motor. Este é causado pelo facto da ignição se dar cedo demais associado a pressões dentro do motor muito elevadas.
- *Wild ping* é um tipo de detonação que resulta da ignição superficial, pré-ignição, causada por partículas de depósito que se foram acumulando dentro da câmara de combustão. É caracterizado por uma ou mais batidas.

Sendo que a detonação ocorre principalmente quando o acelerador está completamente a fundo, este restringe grandemente a performance do motor. Também restringe

a sua eficiência visto limitar a temperatura e pressão final do gás de escape. Também limita o rácio de compressão do motor. A recorrência e severidade deste fenómeno dependem em grande parte das características anti detonantes do combustível. Isto implica a introdução do conceito de octanas. Hoje em dia existem várias formas de determinar o conceito de octana mas os dois principais são através de pesquisa (ASTM D-2699) e através de utilização de um motor standardizado de um cilindro (ASTM D-2700). No método do motor, um combustível standardizado é utilizado de forma a parametrizar o número de octanas e a detonação produzida. Em seguida, uma válvula altera o combustível injetado no motor pelo que está em estudo e a intensidade da detonação é avaliada. Após uma iteração com diversos combustíveis até obter um que tenha valores de detonação inferiores e um que tenha valores superiores. Para combustíveis abaixo de 100 ON o combustível de referência são misturas de iso-octano e n-heptano; a percentagem por volume de iso-octano é o número de octanas. No caso de combustíveis com valores superiores a 100 ON a qualidade anti detonante do combustível é determinada em termos de iso-octano mais mililitros de aditivo anti detonante, tetraetilo de chumbo por galão Americano. Resumidamente, quanto maior o número de octanas maiores são as propriedades anti detonantes do combustível. Existem gasolinas comercializadas com valores de octanas entre 85 e 130. Sendo assim a detonação depende tanto do combustível como das características criadas pelo designer do motor, de forma a reduzir a detonação ao mínimo.

A variação de pressão dentro do cilindro durante uma combustão com detonação pode indicar de uma forma mais explícita o que ocorre na realidade. Nas figuras 10.2, 10.3, 10.4 podemos observar a variação de pressão dentro de um cilindro em 3 ciclos individuais de combustão: combustão normal, detonação ligeira e detonação severa. Quando a detonação ocorre são observadas variações de pressão de alta frequência cuja amplitude diminui com o tempo [35]. As figuras 10.2 e 10.3 têm as mesmas condições de operação e o mesmo avanço nas velas. Cerca de um terço dos ciclos decorridos nestas condições apresentam resultados sem problemas e dados de variação de pressão sem picos como é demonstrado na figura 10.2. Nos restantes ciclos ocorreu sempre algum tipo de *knock*, com maior ou menor gravidade. A detonação da figura 10.3 representa uma detonação ligeira e sem graves problemas adicionados ao funcionamento do motor. A detonação demonstrada na figura 10.4 é resultado de um avanço maior na vela de ignição e como podemos ver apresenta o mesmo padrão de repercussão do anterior mas com uma amplitude muito maior. Existe um aumento de cerca de 30 % a 35 % na pressão dentro do cilindro para além das repercussões se fazerem sentir durante mais tempo após a detonação.



Figura 10.2: Influência da ignição na pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição

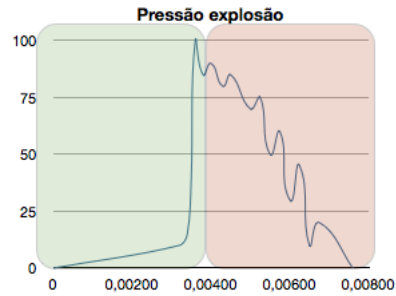


Figura 10.3: Influência da detonação na pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição

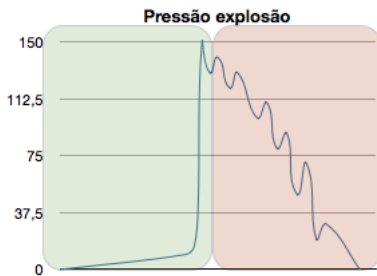


Figura 10.4: Influência da detonação de elevada magnitude, na pressão da ignição em bar em função do tempo em segundos para uma velocidade de funcionamento de 3000rpm. Fase verde-Compressão Fase Vermelha-ignição

Capítulo 11

Modelação Numérica

11.1 Simulação numérica dos casos base

Ao longo dos últimos quarenta anos, várias correlações empíricas foram desenvolvidas para estimar os fluxos de calor a partir das câmaras de combustão dos motores de combustão interna. Algumas destas expressões são baseadas em correlações para calcular o número de Nusselt, por convecção forçada em fluxo turbulento no interior de tubos circulares. Frequentemente, as correlações que preveem fluxos de calor em cilindros têm um único termo que inclui tanto a convecção e radiação. Em alguns casos, um termo adicional é incluído para cobrir a parte da radiação .

A adequação fundamental deste tipo de modelo empírico na representação dos processos altamente complexos no cilindro de transferência de calor é questionável. Na prática, os modelos têm vindo a melhorar, devido à contribuição de diversos pesquisadores. Existem outras equações com menos base teórica do que aquelas que utilizam o número de Nusselt. Fórmulas deste tipo têm sido obtidas a partir da aplicação de simples técnicas estatísticas para grandes conjuntos de dados, tendo em conta os parâmetros de funcionamento do motor, e vários tipos de motores. Numerosos modelos de complexidade variável em que se representa a variação do fluxo de calor têm sido propostos para quantificar fluxos de calor resultantes da combustão. Os modelos podem ser agrupados de acordo com o fluxo de calor que pretendem prever e o propósito específico de cálculo. Assim, existem correlações para prever o fluxo de calor, tempo médio, correlações para prever o fluxo de calor instantâneo e as correlações para prever os fluxos de calor instantâneos locais.

11.1.1 Simulação numérica do caso base térmico em termos de fluxos e variações de temperaturas

A criação de uma simulação numérica de um caso base térmico tem por objetivo verificar a veracidade dos resultados produzidos pelo estudo e em segundo lugar determinar as temperaturas de funcionamento do componente. A determinação das temperaturas de funcionamento do componente é importante pois as características do material mudam com a temperatura. Para simulações futuras esta diferença pode ajudar na obtenção de melhores resultados.

Utilizando as características do material definidas nos capítulos anteriores, a malha é o próximo passo a abordar. Inicialmente criou-se uma malha de elementos tetraédricos

menos refinada de forma a verificar que o programa estava a correr e que utiliza menos tempo de processamento 11.1.

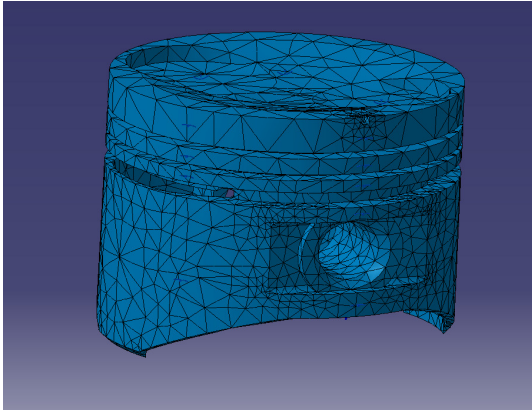


Figura 11.1: Malha utilizada no modelo simplificado, elementos com faces de 10mm

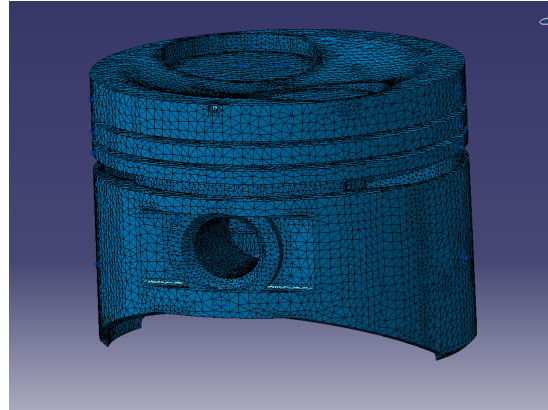


Figura 11.2: Malha utilizada no modelo final para todos os ensaios, elementos com faces de 1mm

A malha foi definida como elementos tetraédricos de faces lineares com um tamanho máximo das faces de 1mm. Nos pontos críticos como podemos ver na figura 11.3 foram definidos como critério obrigatório um *local sag* de 0.002mm de forma a obrigar a malha a estar exatamente nestas arestas, com o objetivo da definição da malha se aproximar o máximo da realidade.

Como podemos ver na figura 11.2, a distribuição dos elementos não é uniforme. Isto deveu-se à escolha de certas áreas como áreas de maior importância, em que a densidade de elementos teria de ser proporcional enquanto outras áreas menos relevantes podem ter uma densidade de elementos menos substancial. O parâmetro definido para evitar desvios não esperados é *Skewness*.

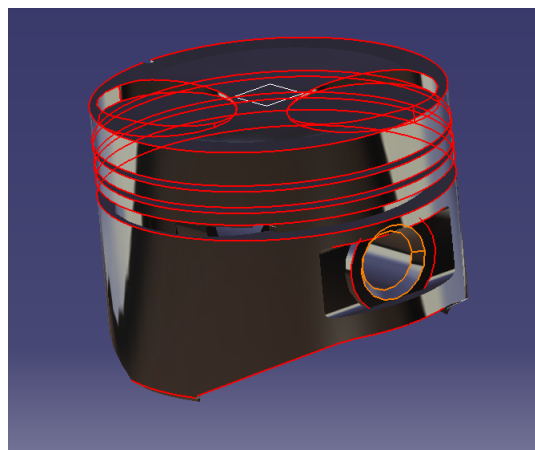


Figura 11.3: Pontos essenciais para a boa criação de malha

Para a criação de uma boa malha é essencial a definição dos pontos críticos, de forma a evitar que estes sejam aproximados e que a sua importância não seja menosprezada na

criação da malha. Os parâmetros para a escolha destes pontos críticos foram: serem uma aresta que limita o pistão, apresentar uma geometria muito detalhada e serem pontos onde se espera que os esforços sejam elevados.

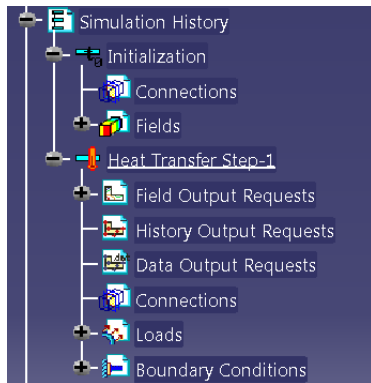


Figura 11.4: Histórico de simulação

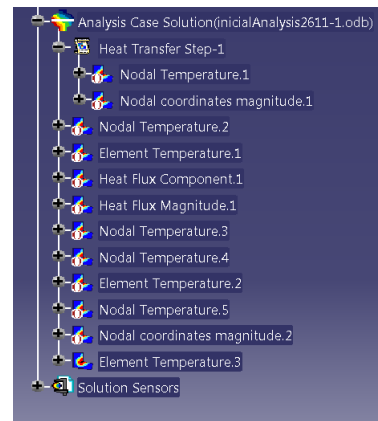


Figura 11.5: Soluções requisitadas

O próximo passo é a definição de condições iniciais. Temperaturas, conexões e envolventes são definidas. Neste caso definiu-se que a envolvente exterior do pistão que estava em contacto com o cilindro e com o carter se encontra a uma temperatura constante de 100°C e que a temperatura inicial do pistão seria de 100°C. Ou seja, assumiu-se que o motor estava em funcionamento a baixa rotação e depois procedeu-se a uma aceleração à potência máxima. Na figura 11.4 podemos ver onde estes parâmetros foram definidos.

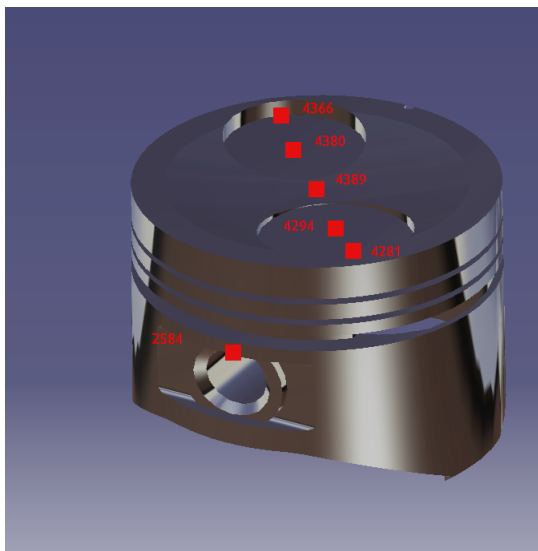


Figura 11.6: Pontos de controlo na coroa para análises térmicas assinalados a vermelho

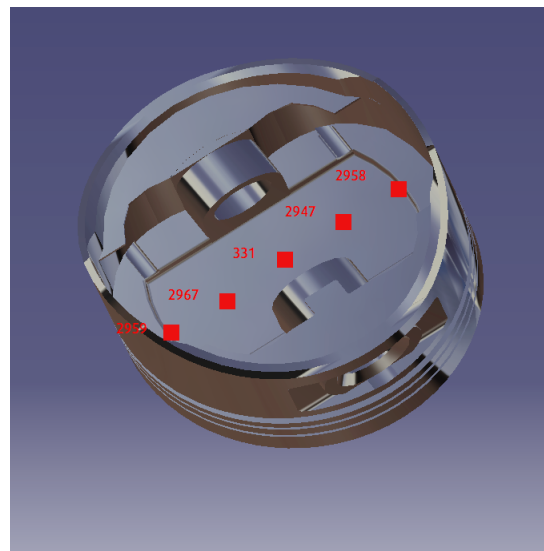


Figura 11.7: Pontos de controlo na base para análises térmicas assinalados a vermelho

Finalmente definiram-se os parâmetros que se querem analisar com o programa. Desta forma, neste primeiro step, como se pode ver na figura 11.5, definiram-se como *output* a temperatura nodal, a temperatura elementar, coordenadas nodais e fluxos de calor.

Definiram-se também os history outputs dos pontos de controlo. No caso do modelo térmico, estes pontos foram divididos por 3 locais: a coroa, a cavilha e a superfície de baixo da coroa. Na figura 11.7 podemos ver a escolha dos pontos de controlo que iram ser iguais para todos os ensaios térmicos de forma a poder haver um termo de comparação.

11.1.2 Simulação numérica do caso estrutural base

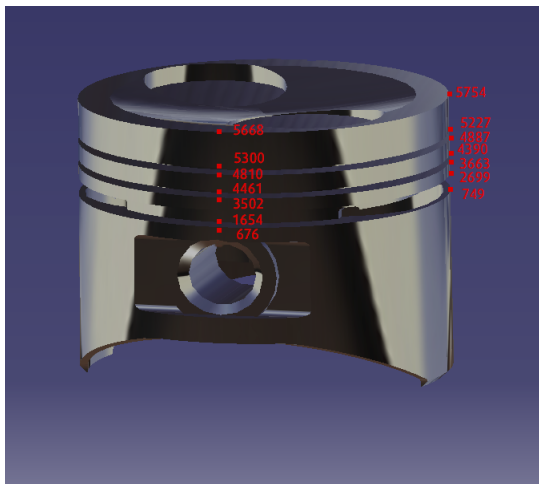


Figura 11.8: Pontos de controlo para deslocamentos

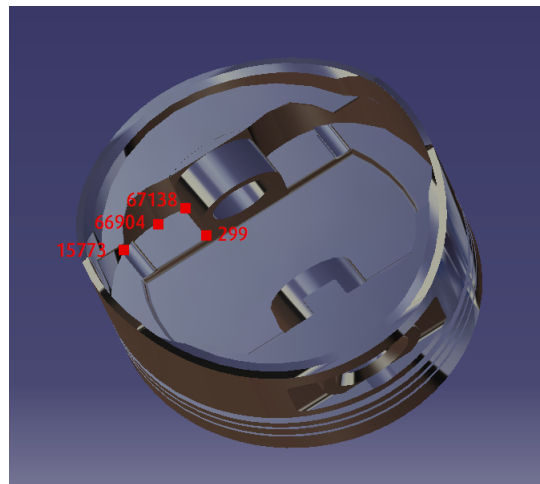


Figura 11.9: Pontos de controlo para tensões de Von Mises

Nesta secção foi analisada a influência das pressões exercidas sobre o pistão. Para tal iniciou-se por definir a malha como no caso anterior. A malha foi definida usando os mesmos parâmetros de forma a utilizar a mesma malha para os dois ensaios para poder haver compatibilidade de dados entre a componente térmica e estrutural em análises futuras.

Seguidamente importaram-se as temperaturas obtidas na simulação térmica de forma a tornar a análise dependente da temperatura.

Definiu-se a força no centro de massa relativa à aceleração do pistão e tendo em conta a massa do mesmo a variar com o tempo. O passo seguinte foi definir a pressão no topo do pistão e a fixação no encaixe da biela. Na figura 11.10 podemos ver a definição destas forças e a sua representação no programa.

A variação de pressão ao longo do tempo foi definida como está representada no capítulo 7.2.

A comparação de resultados entre simulações foi assegurada utilizando sempre os mesmos pontos. No caso dos deslocamentos, os pontos escolhidos foram os representados na figura. Como os ensaios resultaram em valores simétricos apenas se utilizaram pontos centrais e laterais para a comparação de deslocamentos. Para as tensões de Von Mises escolheram-se pontos junto aos locais mais críticos e que demonstravam uma maior amplitude de tensões.

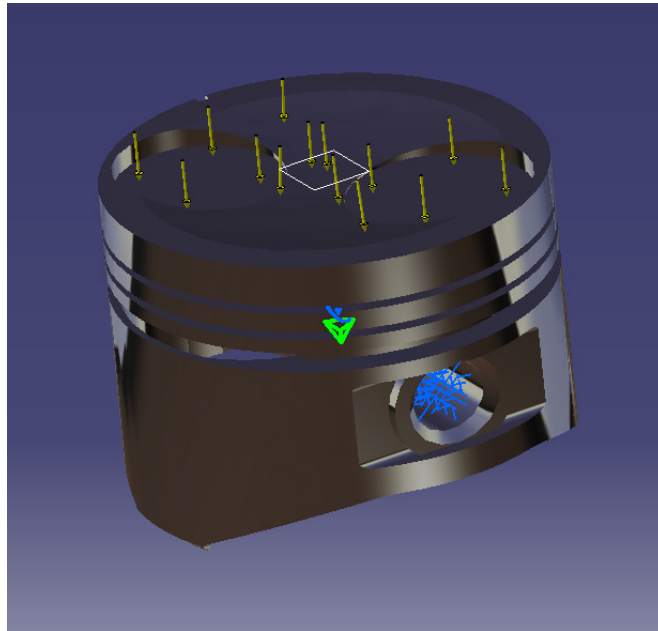


Figura 11.10: Pressão aplicada na coroa do pistão e fixação

Fluxo 1	Fluxo 2	Fluxo 3	Fluxo 4
90	1019	300	1200

Tabela 11.1: Tabela de fluxos criados pelo ar de admissão em W/m^2

11.2 Simulação numérica de casos alternativos

11.2.1 A influência do ar da admissão na assimetria térmica

O primeiro dos casos testados com apenas algumas alterações aos casos base de forma a representar a realidade em causa foi a influência do ar de admissão na assimetria térmica do pistão. Este caso tem por base a simulação térmica base e apenas tem uma alteração. Todos os restantes passos no processo de simulação foram iguais à simulação numérica do caso base térmico. Incluindo a definição da malha, as condições fronteira, os pontos em análise e as características do material.

A única alteração ao caso base foi a adição de fluxos representativos da influência do ar da admissão a circular dentro do cilindro. De forma a representar a influência do fluxo de ar da admissão no topo do pistão criaram-se 4 fluxos para as 4 áreas previamente definidas no capítulo 8.1.

Os 4 fluxos foram calculados utilizando as funções do capítulo anteriormente referido e estão representados na figura 11.11. De forma a calcular, estipulou-se uma velocidade média para cada uma das áreas tendo em conta a investigação por Brandstatter [35].

Podemos ver os valores dos fluxos na tabela 11.1.

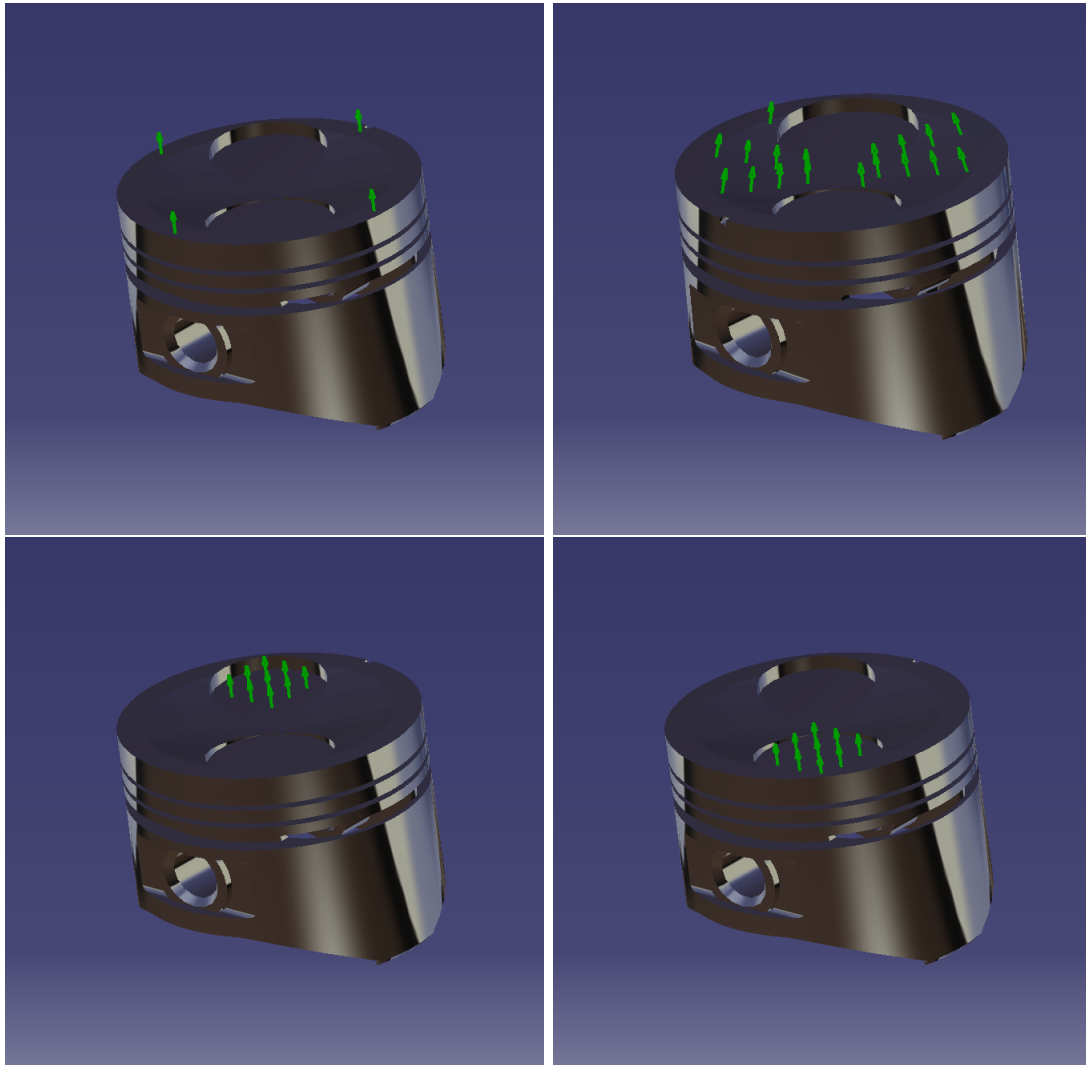


Figura 11.11: Fluxos térmicos causados pelo ar de admissão

11.2.2 A influência do atrito dos segmentos e da parede do cilindro

Os atritos são uma constante no movimento do pistão devido às baixas tolerâncias a que este trabalha. Como foi referido no capítulo 10.3 o atrito varia no decurso do movimento do pistão segundo a função representada pelo gráfico 10.1. Nesta fase utilizou-se a simulação estrutural como base e apenas se adicionou uma força representada na figura 11.12. A força foi aplicada nas paredes do pistão e nas arestas onde os segmentos aplicam o seu esforço.

Todas as outras variáveis do sistema mantiveram-se iguais ao caso base para apenas se comparar o efeito do atrito.

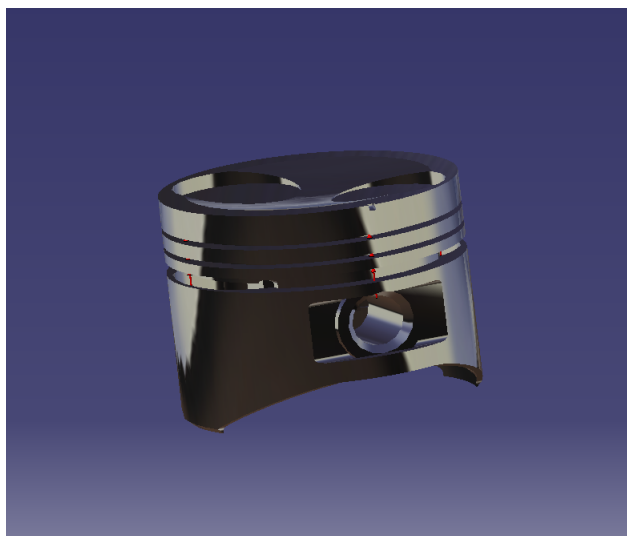


Figura 11.12: Aplicação das forças de atrito

O resto da simulação numérica foi definida tendo por base a simulação do capítulo 11.1.2.

11.2.3 A influência de um evento singular de detonação ligeira

Nesta secção foi analisada a influência das pressões exercidas sobre o pistão durante a ocorrência de um único evento de detonação ligeira. Para tal começou por definir a malha e tal como no caso anterior esta foi definida utilizando os mesmos parâmetros de forma a utilizar a mesma malha para todos os ensaios e assim poder haver compatibilidade de dados entre análises.

A pressão no topo do pistão durante o evento de detonação foi discutida no capítulo 10.4. Utilizou-se a mesma função de variação de pressão representada na figura 10.3 para definir a variação da pressão ao longo do ensaio.

11.2.4 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com elevada relevância

Para a simulação da influência de uma detonação de potência elevada apenas se alterou a função da pressão de detonação relativamente ao estudo 11.2.3. A função utilizada

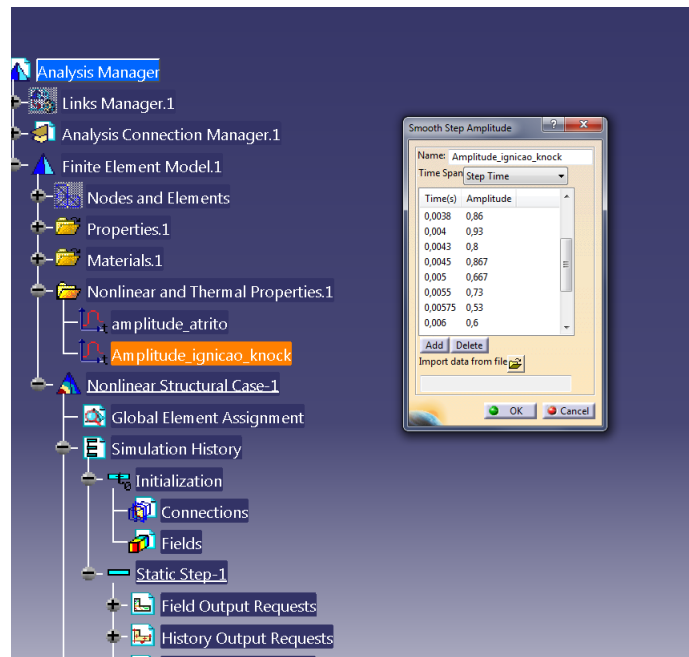


Figura 11.13: Criação da função de amplitude do knock

passou a ser 10.4 e foi inserida como mostra a figura 11.13. Todos os outros parâmetros foram mantidos de uma análise para a outra.

11.3 O efeito dos melhoramentos no pistão

Após a realização de todos os ensaios criou-se um design de pistão que mantendo o mesmo peso consegue melhorar as propriedades estruturais do mesmo. Para tal optou-se por aplicar um reforço que liga a coroa do pistão ao suporte da cavilha. Eliminaram-se as arestas vivas onde existia concentração de tensões e diminuiu-se a espessura do topo do pistão.

Todas as outras variáveis do sistema mantiveram-se iguais ao caso base para apenas se comparar o dos melhoramentos.

O resto da simulação numérica foi definida tendo por base a simulação do capítulo 11.1.2.

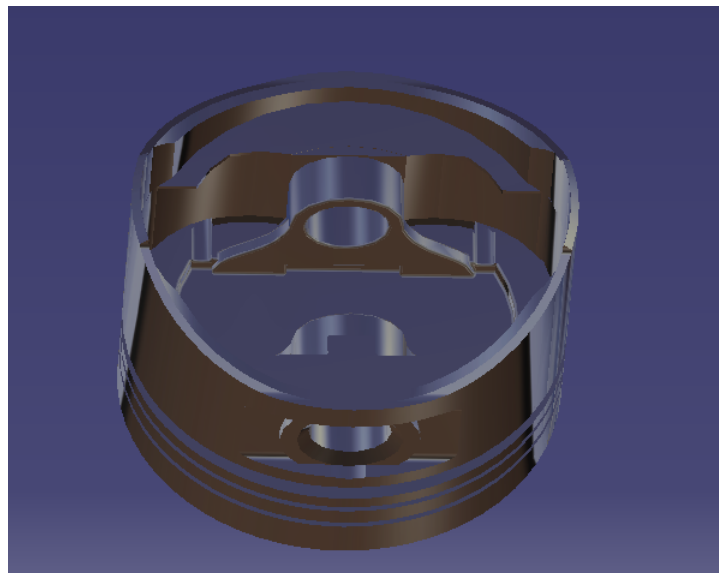


Figura 11.14: Pistão com melhoramentos

Parte III

Resultados e Discussão

Capítulo 12

Resultados Numéricos

Este capítulo consiste numa apresentação de resultados de todas as simulações numéricas e estabelecimento de correlações entre eles e estudos realizados anteriormente.

12.1 Análise térmica base

12.1.1 Simulação numérica do caso térmico base

Temperatura Nodal

Um dos pontos principais deste trabalho é estimar como varia a temperatura num pistão em funcionamento, ao longo de um determinado período de tempo. Como podemos ver na figura 13.1 o pistão está representado nos diversos pontos do percurso de aquecimento. Apenas analisando a figura 13.1 conseguimos constatar que o aquecimento se dá da coroa para a saia. A partir daí variação de temperatura estabiliza e mesmo para períodos superiores a 40 segundos as zonas abaixo do segundo segmento têm uma variação de temperatura muito baixa.

A dispersão de temperaturas é praticamente simétrica. As temperaturas no pistão evoluem muito rapidamente nos segundos iniciais mas a partir dos 26 segundos começam a estabilizar e praticamente não se alteram até ao final da simulação.

Analisando as vistas em corte da figura 12.36 podemos constatar que as temperaturas mais elevadas se encontram no centro do componente, como seria de esperar. Apesar das semelhanças entre os dois cortes, podemos afirmar que as principais diferenças estão na dispersão de temperaturas junto aos rasgos inferiores, sendo as temperaturas da figura 12.36 do lado direito ligeiramente mais elevadas.

Tanto a saia como os rasgos se encontram a uma temperatura estável ao longo de toda a simulação, apresentando valores em torno dos 400 a 415 K .

Podemos comparar a figura 12.36 do lado direito com a figura 12.37 obtida de um estudo realizado pela Bosh [36] de forma a corroborar a veracidade dos resultados. Apesar de algumas diferenças, as dispersões térmicas são muito semelhantes, apresentando apenas algumas diferenças que podem ser atribuídas às diferentes geometrias dos pistões em causa.

Analisando a imagem 12.3 podemos constatar a simetria de temperaturas entre pontos opostos do pistão como está indicado pelas setas azuis. As linhas de temperatura sobrepõem-se entre pontos simétricos. Nomeadamente o nó 4366 e 4281, o nó 4380 e

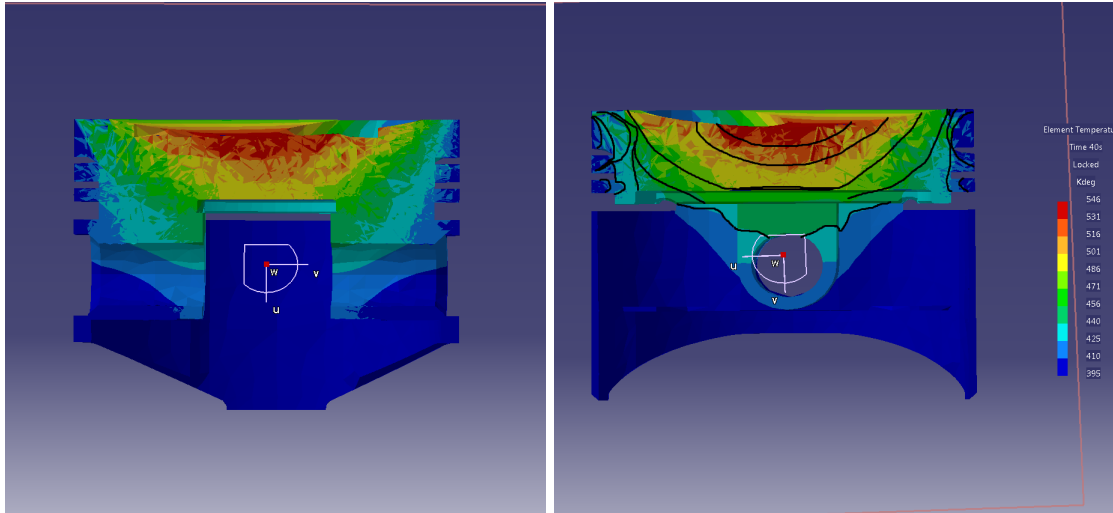


Figura 12.1: Dispersão térmica vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin

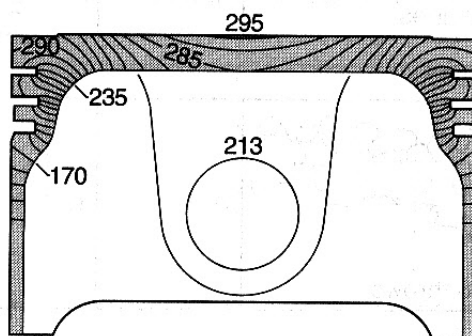


Figura 12.2: Dispersão térmica vista em corte para comparação temperatura em graus Célsius

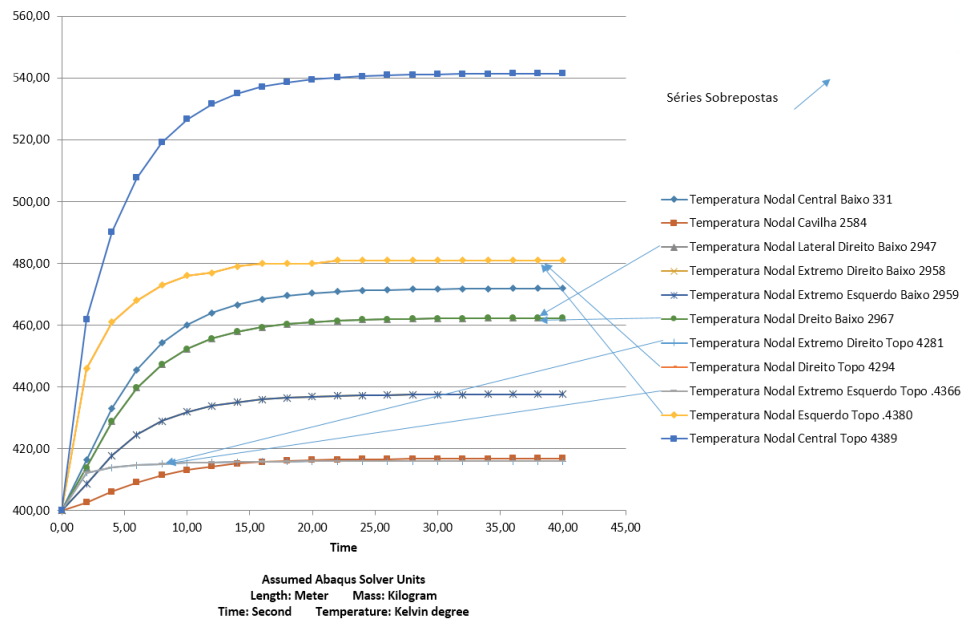


Figura 12.3: Gráfico das variações de temperatura ao longo de 40 segundos

4294, o nó 2967 e 2947 sobrepõem-se pois são simétricos. O ponto 2584 atinge a mesma temperatura final dos nós 4366 e 4281. Tal não passa de uma coincidência pois como podemos ver a rapidez com que a temperatura demora a atingir a estabilidade é diferente.

Quanto mais afastados se encontram os pontos do centro do pistão e da coroa mais tempo demoram a atingir a temperatura estável. Tal pode ser constatado no gráfico 12.3 comparando os nós do topo com os nós de baixo. Os nós de baixo têm uma subida de temperatura mais lenta enquanto os pontos do topo aumentam de temperatura de uma forma mais rápida.

O nó 4389 tem a temperatura mais elevada e atinge os $542K$. Os 3 nós com temperatura mais baixa são os 2584, 4366 e 4281 e atinge os $418K$. Existe uma maior diferença de temperaturas entre os nós centrais do que entre os médios ou extremos. Entre o nó central de topo e central baixo vão $70K$. Os médios estão separados por $20K$ bem como os extremos que estão separados pela mesma amplitude.

12.2 Análise estrutural base

12.2.1 Simulação numérica do caso estrutural base

Os resultados obtidos através da análise estrutural deste componente levantaram algumas questões sobre a estrutura do pistão e se este será capaz de sustentar as pressões que nele são exercidas.

Tensões de Von Mises

As tensões e deformações tridimensionais são desenvolvidas em várias direções. Uma forma habitual de expressar estas tensões multidirecionais consiste em resumi-las a uma tensão equivalente, também denominada tensão de von-Mises. Um sólido tridimensional

tem seis componentes de tensão. Em alguns casos, um teste de tensão uniaxial encontra experimentalmente propriedades do material. A combinação dos seis componentes de tensão numa tensão equivalente única está relacionada com o sistema de tensões reais.

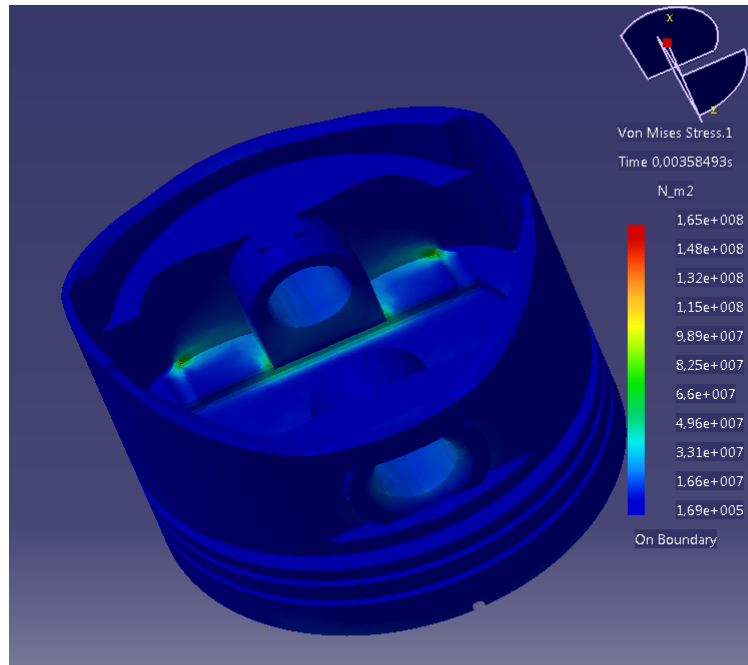


Figura 12.4: Tensões de Von Mises máximas

Com a figura 12.4 podemos aperceber-nos de alguns pontos de concentração de tensões. As tensões são relativamente baixas e uniformes em todo o componente exceto no canto do rasgo do segmento do óleo e na base do apoio da cavilha. Nestas secções as tensões atingem uma média de valores na ordem de $1.1 \times 10^8 N/m^2$. O rasgo para a saída do óleo do segmento é o ponto mais crítico com picos de tensão de $1.66 \times 10^8 N/m^2$. Apesar de estar muito abaixo de passar para o limite elástico, o efeito do cansaço do material é algo a estudar pelo facto de este componente estar sujeito a este esforço várias vezes por segundo o que o tornará mais suscetível a ultrapassar os limites.

À exceção deste ponto o pistão encontra-se dentro dos limites aconselháveis e não apresenta qualquer ponto preocupante tal como se pode ver na figura 12.4.

Podemos comparar as tensões obtidas nesta simulação com os resultados demonstrados no trabalho *Thermo-Mechanical Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Piston* [38]. Apesar do modelo de pistão não ser o mesmo, a magnitude das forças aplicadas no estudo, mesmo sendo inferiores às utilizadas, foram suficientemente similares para podermos fazer uma ponte entre os dois. As tensões de Von Mises no estudo comparativo atingem valores na ordem dos $1.52 \times 10^8 N/m^2$ enquanto para a mesma localização do nosso estudo atingem-se valores da ordem de $1.66 \times 10^8 N/m^2$. Mesmo tendo em conta que são pistões diferentes do caso em estudo, as tensões a que o material está sujeito devem ser as mesmas. Uma discrepância entre resultados existe se relacionarmos apenas o local exato onde o pistão atinge máximos mas tal deve-se à geometria diferente dos mesmos.

Ao analisarmos o gráfico da figura 12.6 podemos deduzir que a maior parte dos

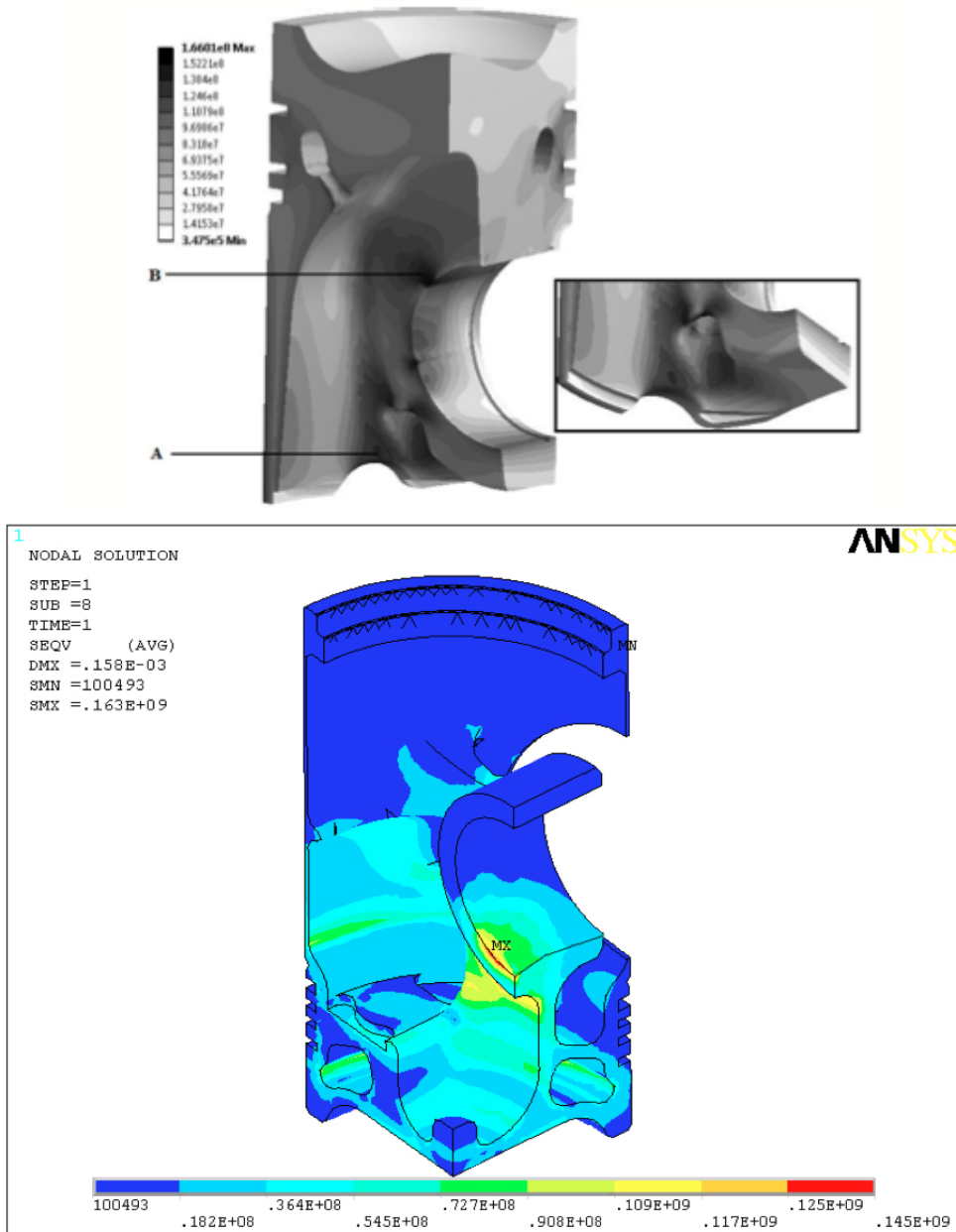


Figura 12.5: Tensões de Von Mises máximas retirado de *Thermo-Mechanical Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Piston* [38] e de *Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss* [38] [39]

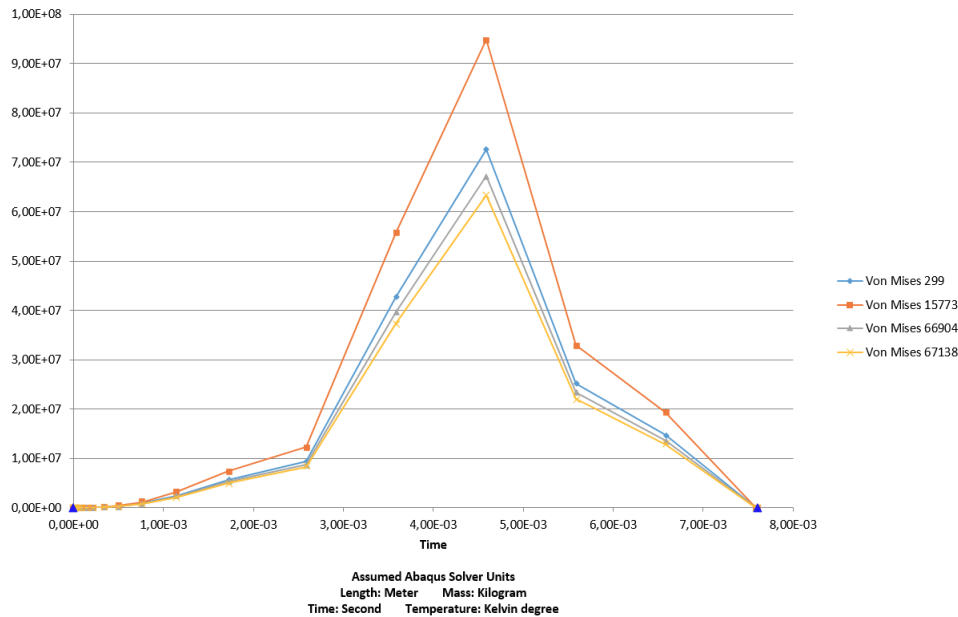


Figura 12.6: Gráfico das variações das tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos

elementos analisados apresenta tensões máximas na ordem de $0.6 \times 10^8 N/m^2$ a $0.9 \times 10^8 N/m^2$. O pico das tensões encontra-se sempre após pico da pressão aplicada. O elemento 15733 é o que apresenta valores mais elevados. A variação das tensões ao longo do ensaio é similar entre elementos.

Deslocamentos

A pressão exercida na coroa do pistão vai criar deformações neste e pode suscitar vários problemas no funcionamento do mesmo. O caso examinado demonstra uma deformação máxima de $30\mu m$ que está dentro dos limites estipulados de tolerância para o funcionamento do pistão [2]. Mas em termos de deformação apenas no eixo dos x ou y os deslocamentos nunca excedem os $2\mu m$ na direção U1 e $5\mu m$ em u2 o que significa que o pistão não vai ter problemas dimensionais, pois as deformações ocorrem primariamente no eixo U3.

Como se pode constatar nos vários pontos de controle conseguimos ver os valores dos deslocamentos e a forma como eles variam para o mesmo nível. Tal como se pode ver, os pontos no eixo do pino da biela têm uma deformação muito menor do que os dois pontos na direção oposta. Os valores estão representados no gráfico da figura 12.21, 12.22, e 12.23, e confirmam este pensamento.

Os gráficos das figuras 12.21,12.22,12.23 representam os deslocamentos em x,y,z respetivamente e como podemos constatar z é o eixo que apresenta os deslocamentos máximos. O gráfico dá uma visão mais detalhada dos movimentos máximos numa direção. Podemos afirmar que os pontos centrais apresentam deslocamentos na ordem de $0.2\mu m$ na direção U1, $2\mu m$ na direção U2 e $5\mu m$ na direção U3. Enquanto os nós laterais atingem valores ligeiramente mais elevados $2\mu m$ na direção U1, $15\mu m$ na direção U2 e $45\mu m$ na direção U3.

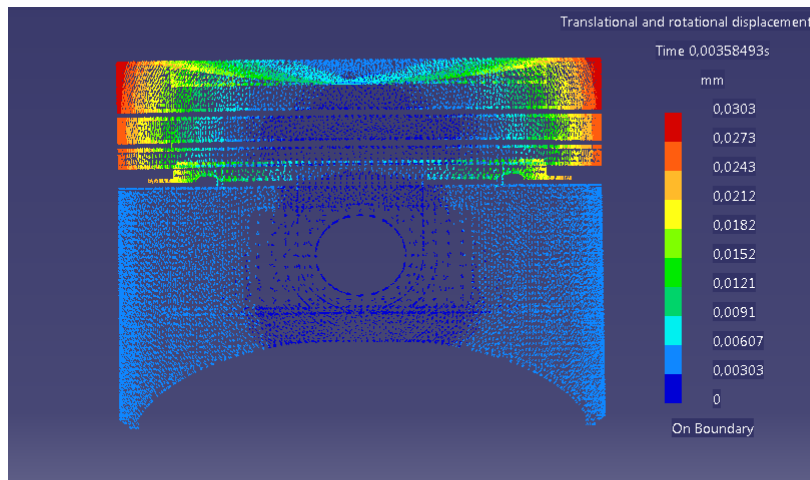


Figura 12.7: Deslocamentos máximos

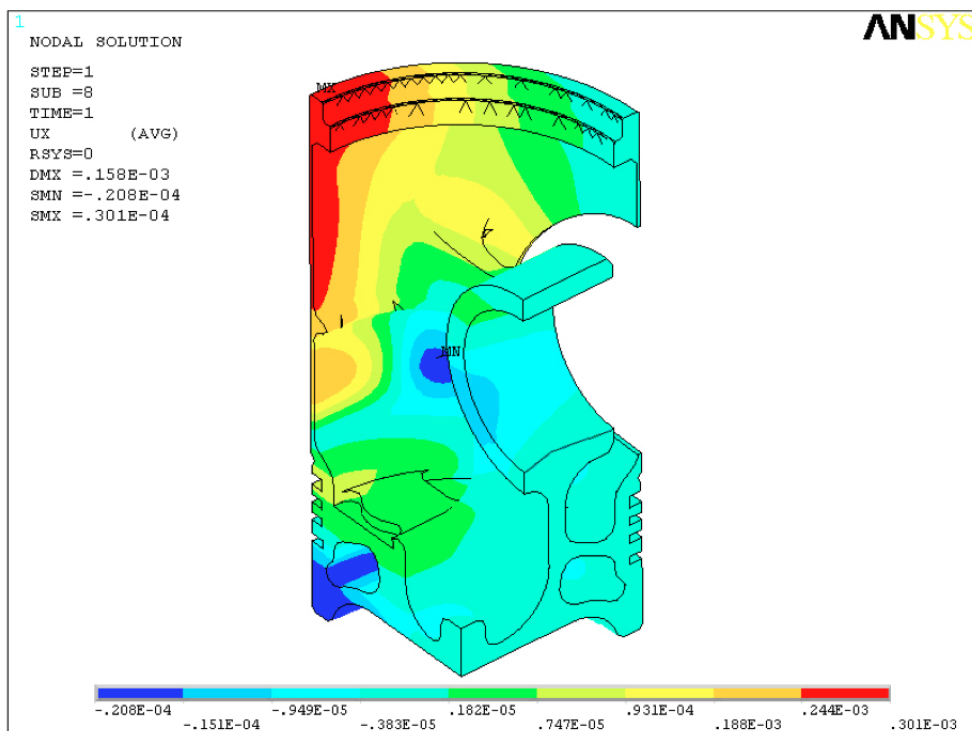


Figura 12.8: Deslocamentos máximos retirado de *Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss* [38]

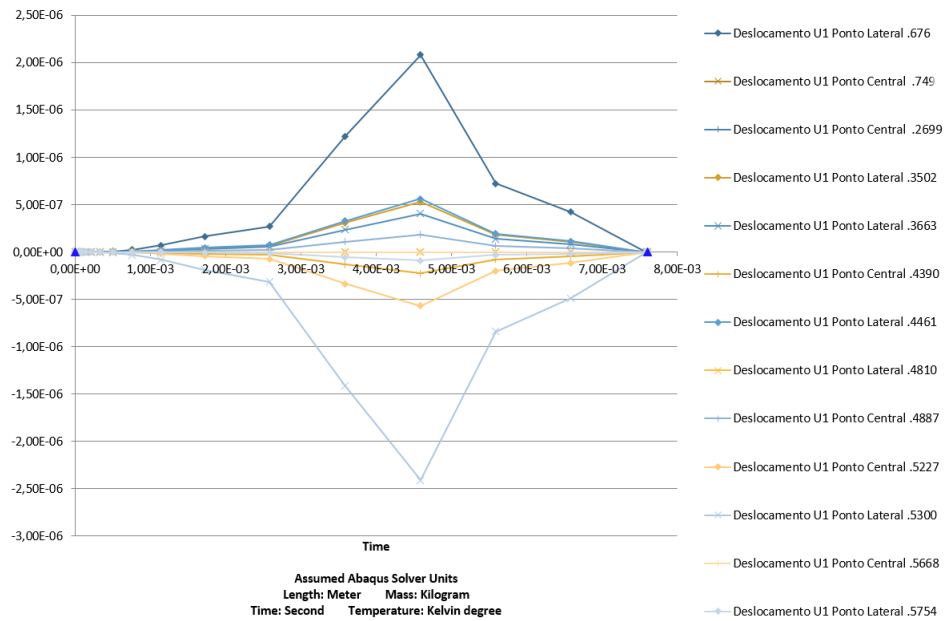


Figura 12.9: Gráfico das variações deslocamentos na direção U1 ao longo de 40 segundos

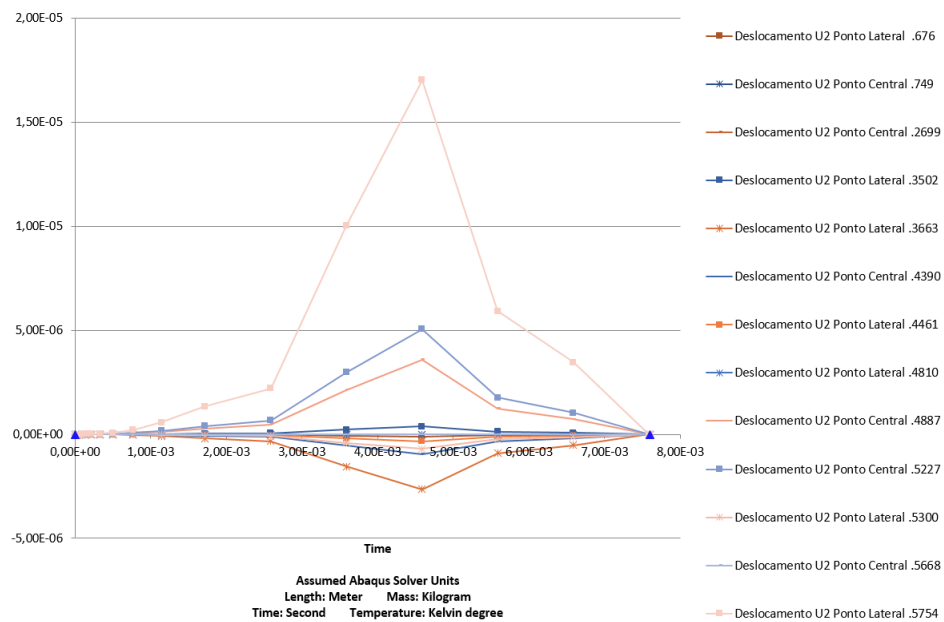


Figura 12.10: Gráfico das variações de deslocamentos na direção U2 ao longo de 40 segundos

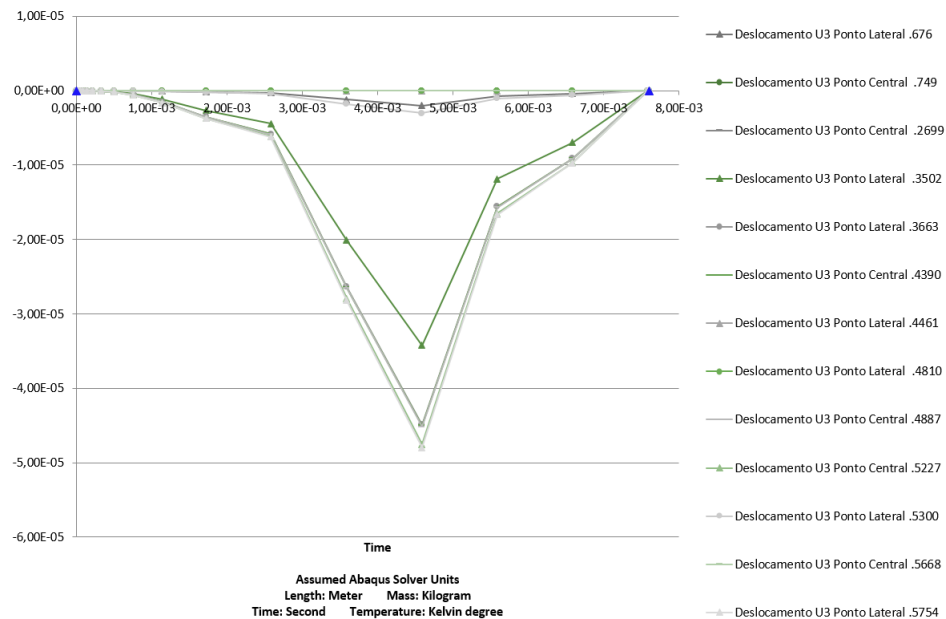


Figura 12.11: Gráfico das variações de deslocamentos na direção U3 ao longo de 40 segundos

Os rasgos tendem a mover-se segundo o eixo z uniformemente (nó superior e inferior) mas em termos dos eixos x e y encontramos uma diferença entre os nós superiores e inferiores. Os nós superiores afastam-se do centro do pistão movimentando-se positivamente em x enquanto os nós inferiores se movimentam negativamente em x.

Os pontos analisados normalmente só são máximos numa direção. Por exemplo o ponto 5668 é o que tem valores de deslocamento maiores na direção U1. Se verificarmos as outras direções constatamos que este tem valores mínimos. O mesmo acontece para o ponto 5754 no eixo U2 e no ponto 3502 para U3.

Erro do método

Este método apresentou uma precisão bastante aceitável como podemos ver na figura 12.12 em que podemos constatar que apenas num elemento houve um aumento do erro de 1.06×10^{-10} para 2.4×10^{-3} . Este caso poderá ser possivelmente resolvido aumentando o número de elementos nesta área de forma a minimizar esta falta de precisão.

A análise dos pontos de controlo veio a revelar que todos os pontos têm o mesmo valor de erro o que significa que o problema foi bem dimensionado em termos de dimensionalização da malha à exceção do nó no rasgo do óleo.

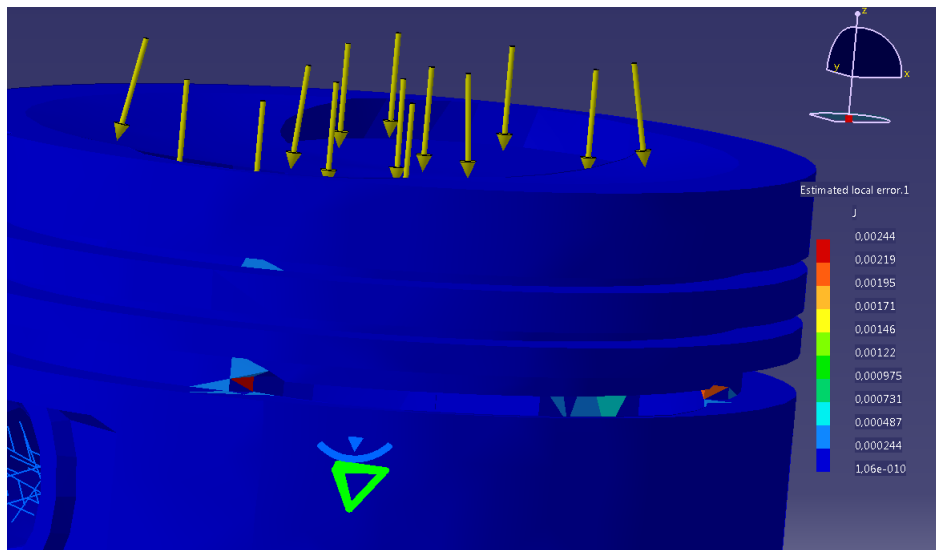


Figura 12.12: Erro do método

12.3 Influência do fluxo do ar da admissão

12.3.1 Simulação térmica da influência do ar da admissão

Temperatura Nodal

Um dos pontos principais desta simulação é estimar como varia a temperatura num pistão em funcionamento ao longo de um determinado período de tempo e se o fluxo de ar causa assimetrias significativas que possam levar ao desgaste do pistão. Como podemos ver na figura 13.4 o pistão está representado nos diversos pontos do percurso de funcionamento. Apenas analisando a figura 13.4 conseguimos constatar que o aquecimento se dá da coroa para a saia como no caso base. A variação da temperatura ao longo do pistão assemelha-se muito ao caso base. Ou seja, as temperaturas no pistão evoluem muito rapidamente nos segundos iniciais mas a partir dos 26 segundos começam a estabilizar e praticamente não se alteram até ao final da simulação.

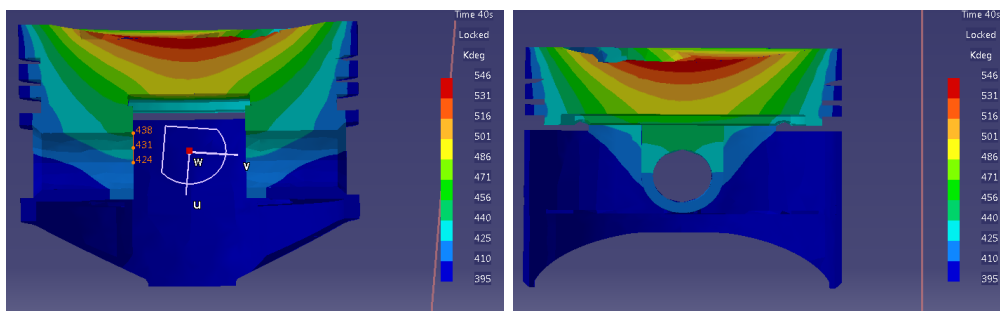


Figura 12.13: Dispersão térmica vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin

Analisando as vistas em corte da figura 12.13 podemos constatar que as temperaturas mais elevadas se encontram no centro do componente, como seria de esperar. Apesar das

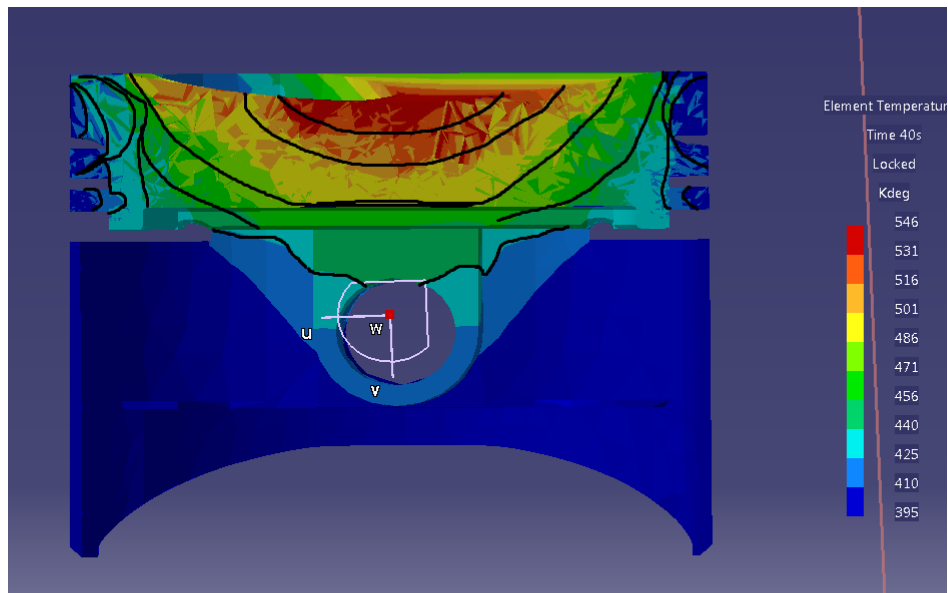


Figura 12.14: Dispersão térmica vista em corte do caso base ao fim de 40 segundos para comparação

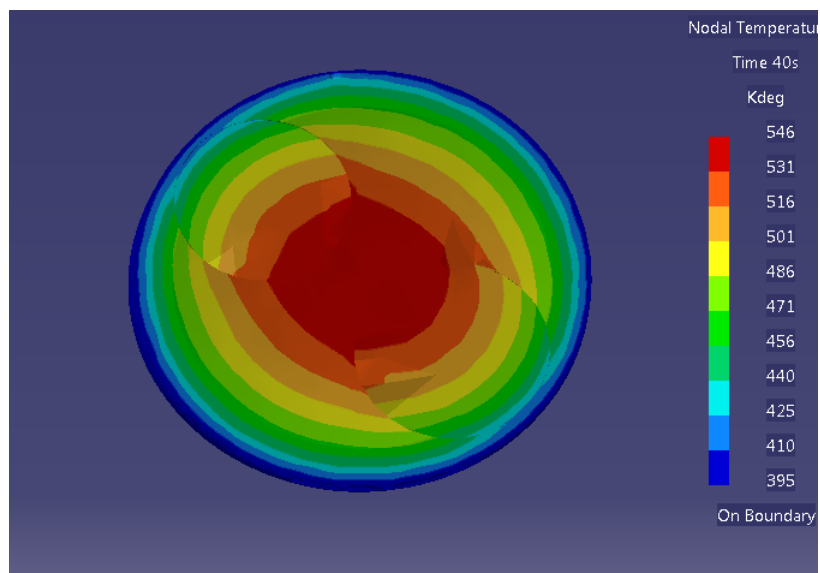


Figura 12.15: Dispersão de temperaturas ao final de 40 segundos de funcionamento vista de topo

semelhanças entre os dois cortes podemos afirmar que as principais diferenças estão na dispersão de temperaturas junto aos rasgos inferiores, sendo as temperaturas da figura 12.13 do lado direito ligeiramente mais elevadas tal como acontece no caso base.

Tanto a saia como os rasgos se encontram a uma temperatura estável ao longo de toda a simulação, apresentando valores em torno dos 400 a 415 K .

Podemos comparar a figura 12.13 do lado direito com a figura 12.37 obtida de um estudo realizado no caso base de forma a tentar averiguar diferenças entre os dois. Apesar de algumas diferenças as dispersões térmicas são muito semelhantes. Com uma análise apenas visual das imagens não é perceptível uma assimetria significativa entre o lado sujeito à admissão e o lado do escape. Para tal é necessário recorrer à comparação do gráfico do estudo base com o gráfico desta simulação.

Através do gráfico da figura 12.16 conseguimos constatar as assimetrias não detetáveis a "olho nú". Pontos simétricos que durante a análise base tinham a mesma variação de temperaturas passam agora a ter diferenças de cerca de 5 a 10 K . Ao analisar os mesmos pontos podemos inferir que os pontos do lado direito sofreram uma diminuição de temperaturas. Todos os pontos simétricos sofreram aproximadamente a mesma variação de temperaturas.

Todas as outras características das curvas de temperatura, tal como a velocidade de subida e tempo de estabilização se mantiveram de acordo com o caso base. Apenas existe uma diminuição da temperatura do lado direito do pistão.

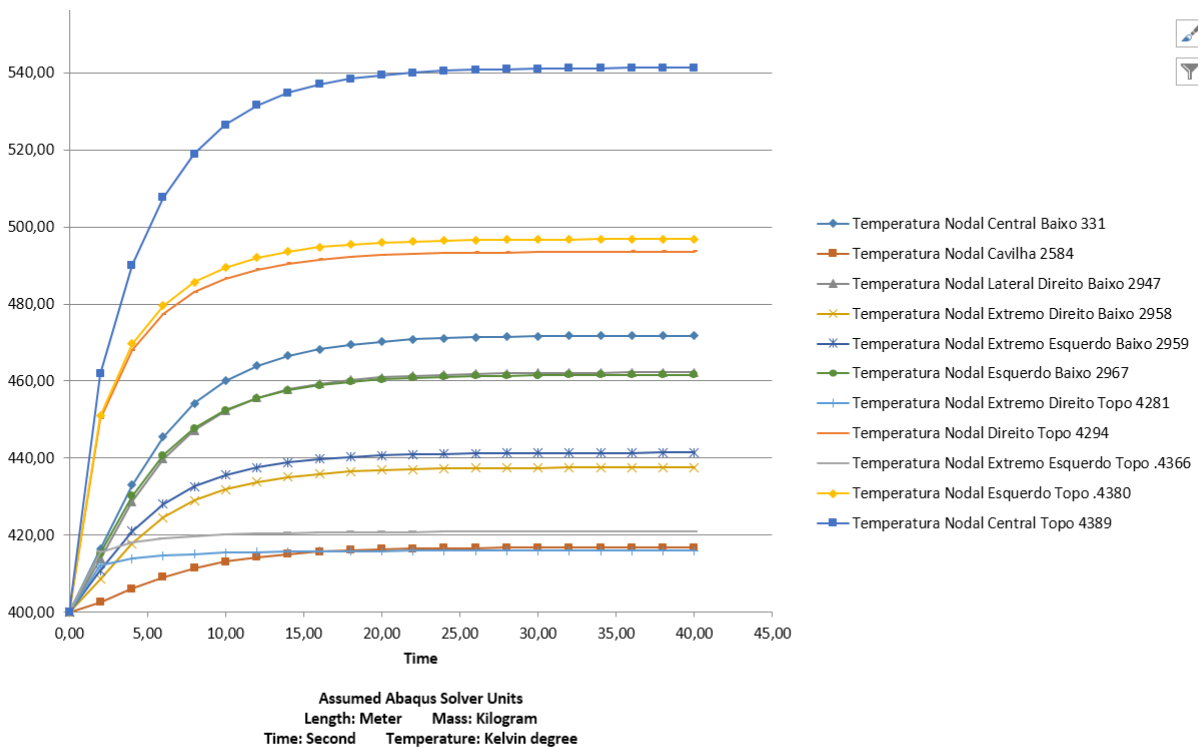


Figura 12.16: Gráfico das variações de temperatura ao longo de 40 segundos

12.4 Influência do Atrito e da fricção

12.4.1 Simulação estrutural da influência do atrito

Tensões de Von Mises

As tensões e deformações causadas pelo atrito podem ser deduzidas comparando com o caso base e detetando as diferenças. No entanto apenas comparando as imagens não se consegue distinguir quaisquer diferenças no que concerne às tensões de Von Mises. Os valores máximos são os mesmos e encontram-se nos mesmos locais.

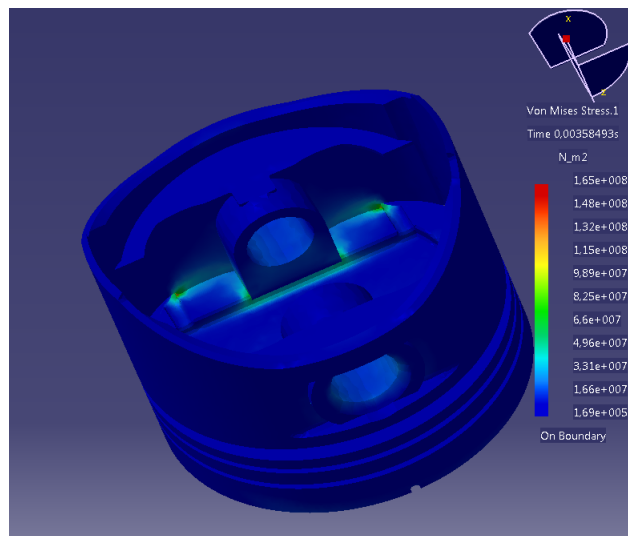


Figura 12.17: Tensões de Von Mises máximas com o efeito do atrito

Na figura 12.17 podemos aperceber-nos de alguns pontos de concentração de tensões. As tensões são relativamente baixas e uniformes em todo o componente exceto no canto do rasgo do segmento do óleo e na base do apoio da cavilha tal como acontece no caso base. Nestas secções as tensões atingem uma média de valores na ordem de $0.9 \times 10^8 N/m^2$. O rasgo para a saída do óleo do segmento é o ponto mais crítico com picos de tensão de $1.6 \times 10^8 N/m^2$. Mais uma vez apesar de estar muito abaixo de passar para o limite elástico, o efeito do cansaço do material é algo a estudar pelo facto de este componente estar sujeito a este esforço várias vezes por segundo o que o tornará mais suscetível a ultrapassar os limites.

Podemos comparar as tensões obtidas nesta simulação com os resultados demonstrados com a simulação estrutural base. Apesar de algumas mudanças para representar o atrito ao longo do ciclo, estes valores demonstram que não existem quaisquer alterações representativas nas tensões de Von Mises. As tensões de Von Mises no estudo base atingem valores máximos na ordem dos $1.6 \times 10^8 N/m^2$ enquanto para a mesma localização no caso do atrito atingem-se valores da ordem de $1.6 \times 10^8 N/m^2$. Ou seja, não existem diferenças perceptíveis graficamente entre os dois ensaios.

Existindo uma discrepância entre resultados esta será apenas visível através das tabelas utilizadas na criação dos gráficos. Comparando os valores do gráfico da figura 12.18 com os do caso base podemos constatar que não existem diferenças visíveis nesta escala. Para ter a certeza podemos verificar as tabelas em anexo e aí podemos dizer que

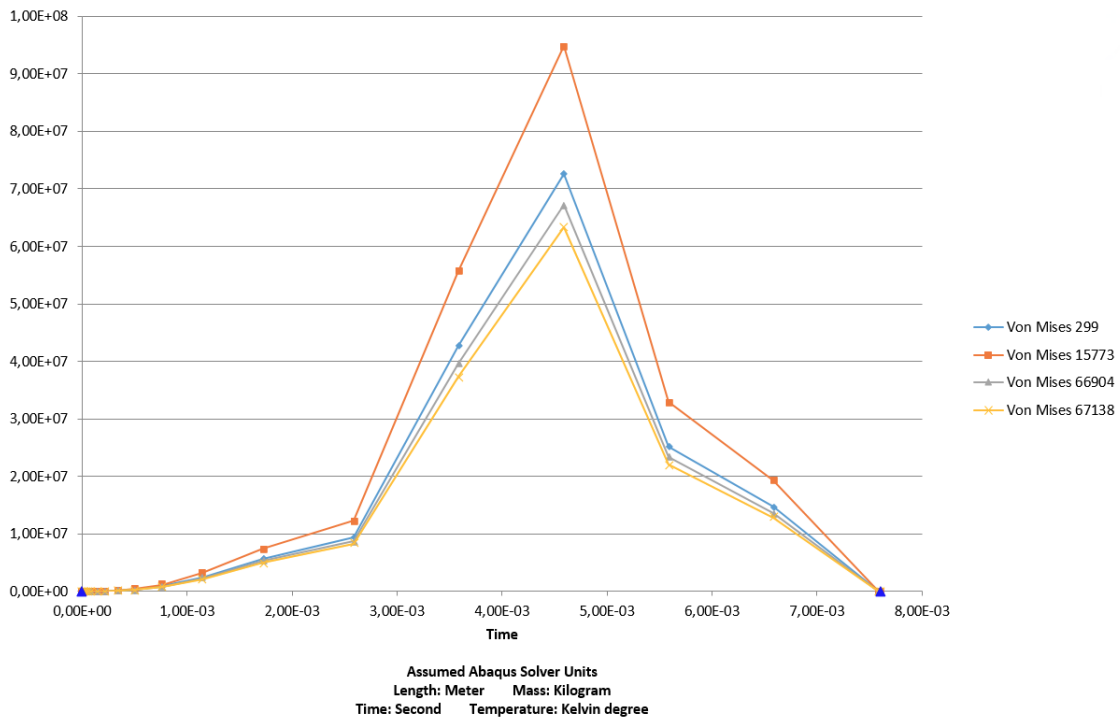


Figura 12.18: Gráfico das variações das tensões de von mises ao longo de 40 segundos

existem diferenças mas muito pequenas. Diferenças na ordem de $-1.5 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ são as maiores constatadas. É significativo acentuar que no ensaio com atrito existe sempre uma redução, mesmo que ligeira, das tensões existentes.

Deslocamentos

A pressão exercida na coroa do pistão vai criar deformações, no entanto o atrito contraria o movimento do pistão e por conseguinte vai diminuir estes deslocamentos e deformações. O caso examinado demonstra uma deformação máxima de $100 \mu\text{m}$ que é muito similar aos deslocamentos do caso base. Comparando com os valores do caso base existe uma diminuição apenas constatada no eixo U3.

Como se pode constatar nos vários pontos de controle conseguimos ver os valores dos deslocamentos e a forma como eles variam para o mesmo nível. Tal como se pode ver os pontos no eixo do pino da biela têm uma deformação muito menor do que os dois pontos na direção oposta. O mesmo coincide com a análise base realizada.

Os rasgos tendem a mover-se segundo o eixo z uniformemente, nó superior e inferior, mas em termos dos eixos x e y encontramos uma diferença entre os nós superiores e inferiores. Os nós superiores afastam-se do centro do pistão movimentando-se positivamente em x enquanto os nós inferiores se movimentam negativamente em x. Todas estas características são iguais ao caso base.

Comparando com o caso base, os deslocamentos em x e y quase não sofrem alteração. Os deslocamentos segundo o eixo do z diminuem marginalmente, mas todos os outros se mantêm relativamente iguais.

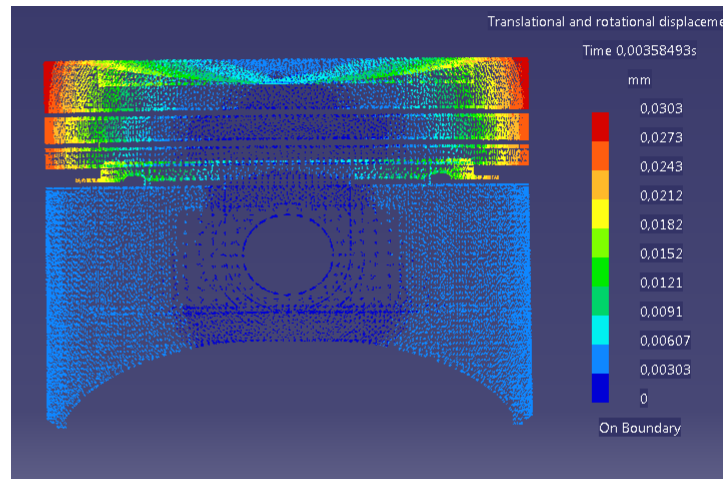


Figura 12.19: Deslocamentos máximos

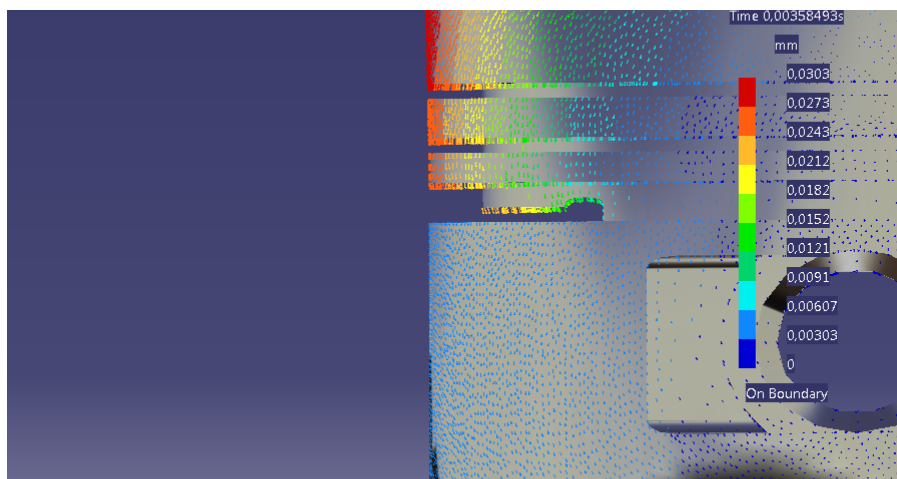


Figura 12.20: Deslocamentos máximos

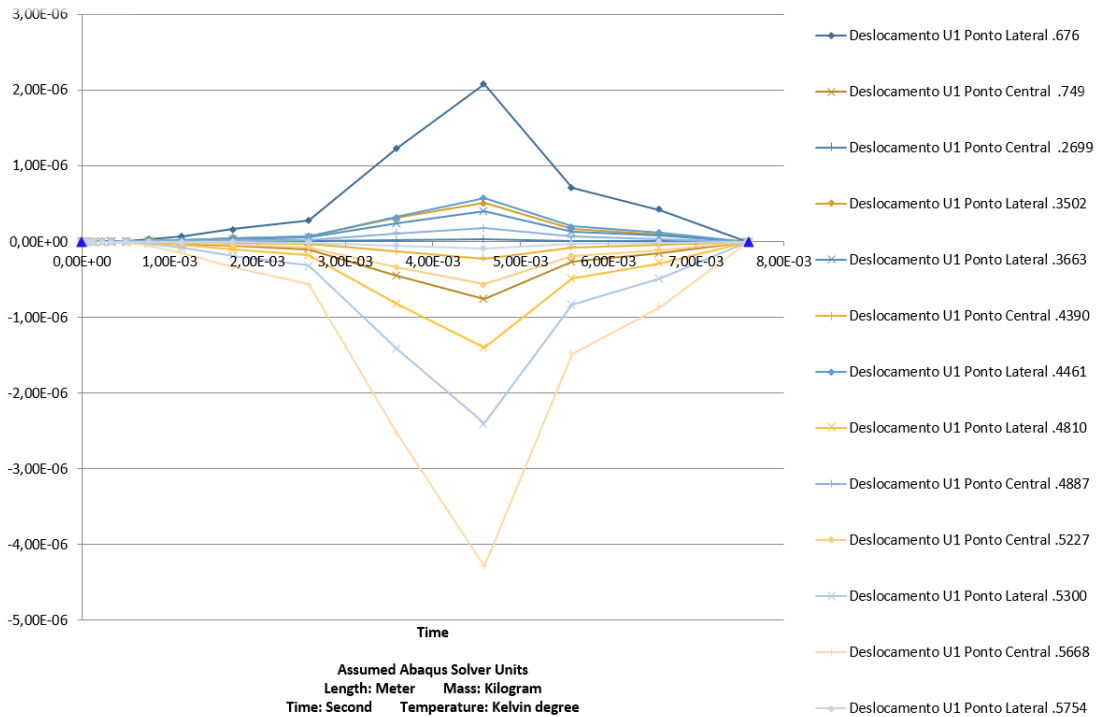


Figura 12.21: Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos

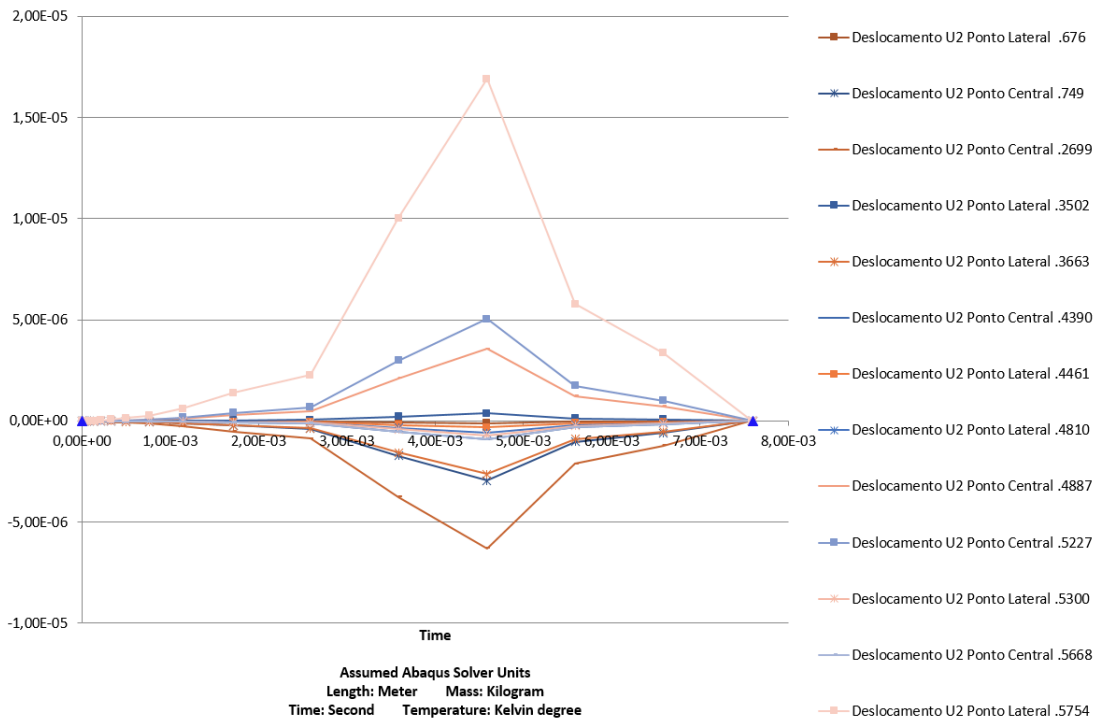


Figura 12.22: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos

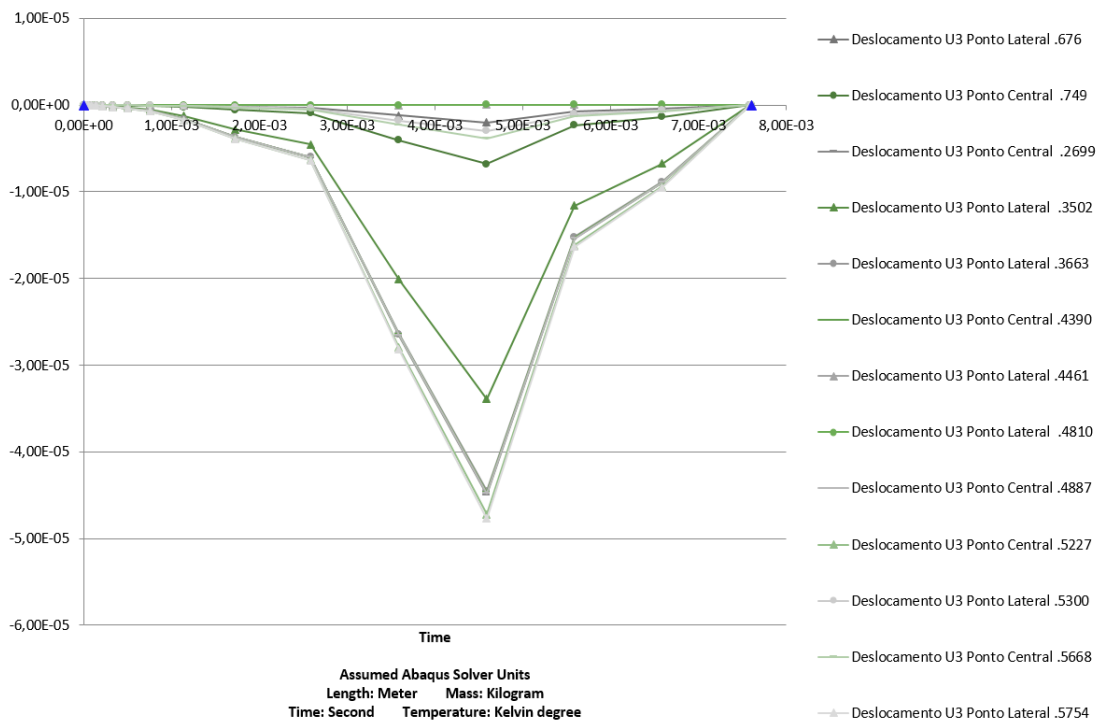


Figura 12.23: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos

O atrito não causa grandes alterações nos deslocamentos exceto no eixo U3/z em que estes diminuíram.

Erro do método

A precisão nesta simulação é igual à do caso base. Ou seja todos os elementos da malha estão bem dimensionados e têm o mesmo erro. Apenas num elemento houve um aumento do erro em relação a todos os outros elementos de $1,06 * 10^{-10}$ para $2,4 * 10^{-3}$. Este caso poderá ser possivelmente resolvido aumentando o número de elementos nesta área de forma a minimizar esta falta de precisão.

12.5 O efeito do detonação

12.5.1 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com baixa relevância

Tensões de Von Mises

As tensões e deformações tridimensionais proporcionam uma visão bastante clara do efeito da detonação no componente em estudo. Tal como seria de esperar as áreas atingidas são as mesmas, mas apenas existe uma elevação nas tensões máximas.

Com a figura 12.24 podemos constatar que os pontos de concentrações de tensões se encontram nos mesmos locais do caso base. As tensões atingem um máximo no rasgo para a saída do óleo do segmento. É o ponto mais crítico com picos de tensão de $3,01 \times$

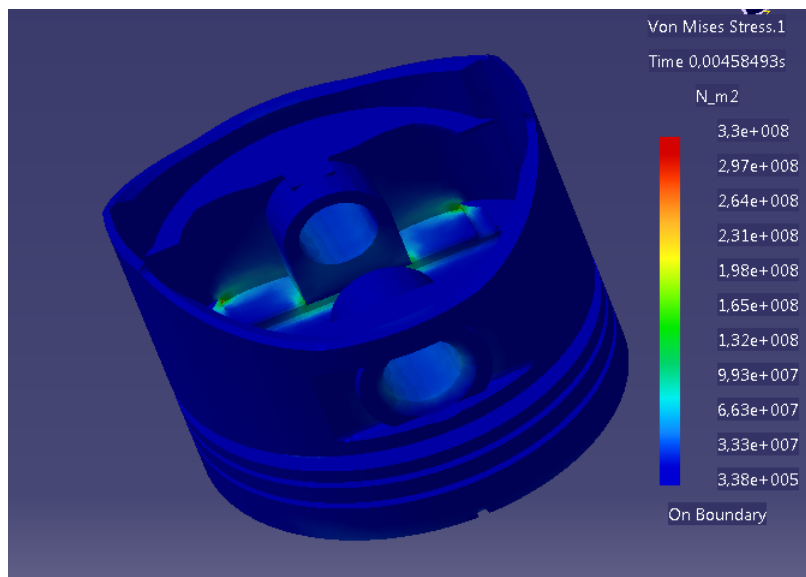


Figura 12.24: Tensões de Von Mises máximas criadas por um evento de detonação de baixa relevância

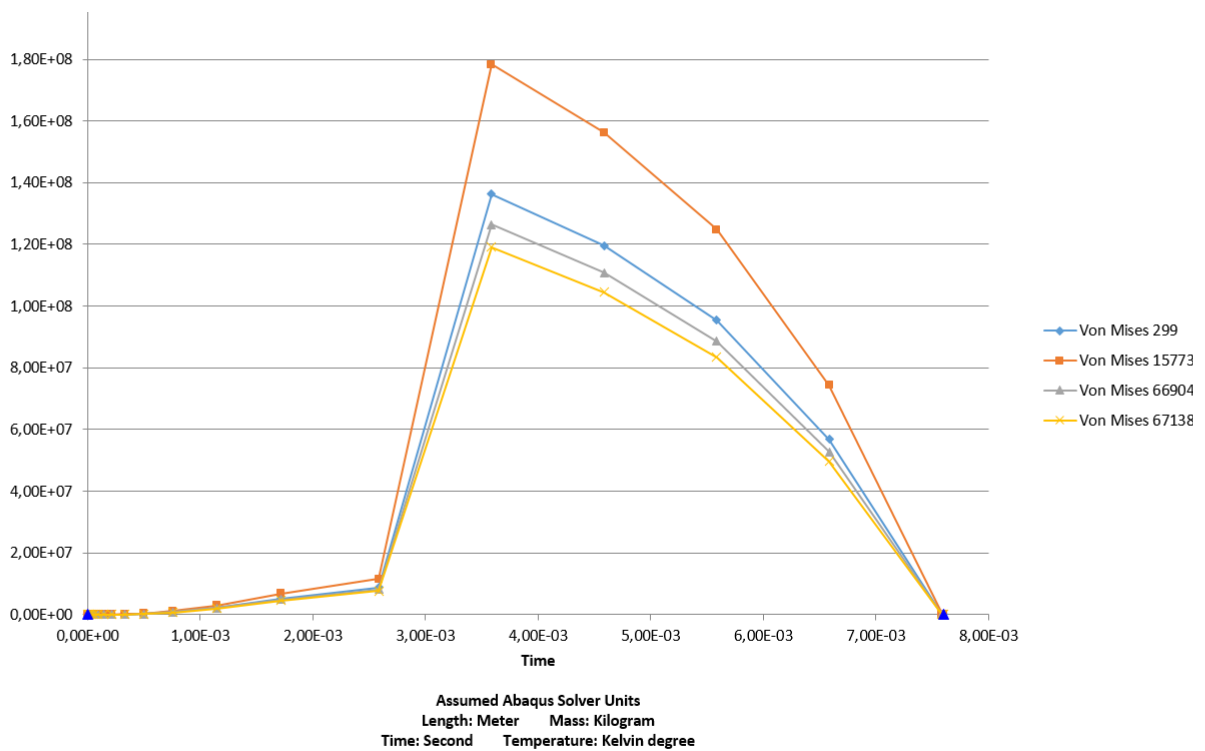


Figura 12.25: Gráfico das variações de tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos, criadas por um evento de detonação de baixa relevância

$10^8 N/m^2$. Nas áreas de tensões máximas atingem-se valores médios de $1.65 \times 10^8 N/m^2$ que é quase duas vezes mais do que acontece no caso base e nos estudos comparativos.

De forma a termos uma melhor ideia de como se comportam as tensões ao longo do tempo podemos analisar o gráfico da figura 12.25. O primeiro aspeto que salta à vista é o aumento de todos os pontos de controlo para valores duas vezes superiores. O decréscimo a partir da tensão máxima é muito mais lento, criando um maior período de tempo em que as tensões são elevadas. Isto significa que para além de existir um maior esforço relacionado com as tensões serem mais elevadas, o componente tem de estar exposto durante muito mais tempo.

A velocidade a que as tensões decrescem está ligada às ondas de pressão criadas por uma combustão irregular do combustível.

Deslocamentos

A pressão extra criada pela detonação exercida na coroa do pistão vai criar deformações neste e pode suscitar vários problemas no funcionamento do mesmo. A detonação causa deformações que atingem valores muito elevados. Os deslocamentos máximos encontram-se nos mesmos locais. Os valores dos deslocamentos atingem $40\mu m$ o que excede os limites para o funcionamento sem problemas.

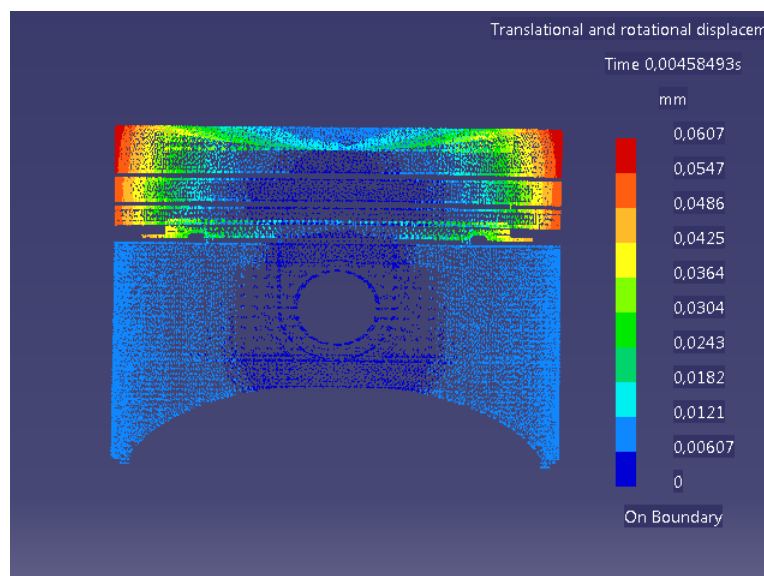


Figura 12.26: Deslocamentos máximos criados por um evento de detonação de baixa relevância

Como se pode constatar nos vários pontos de controle conseguimos ver os valores dos deslocamentos e a forma como eles variam para o mesmo nível. Tal como se pode ver os pontos no eixo do pino da biela têm uma deformação muito menor do que os dois pontos na direção oposta.

Analisando os gráficos das figuras 12.27, 12.28 e 12.29 o eixo z/U3 apresenta os deslocamentos máximos. Podemos afirmar que os pontos centrais apresentam deslocamentos muito baixos, quase nulos. Comparativamente com o caso base os deslocamentos atingem valores 4 vezes superiores.

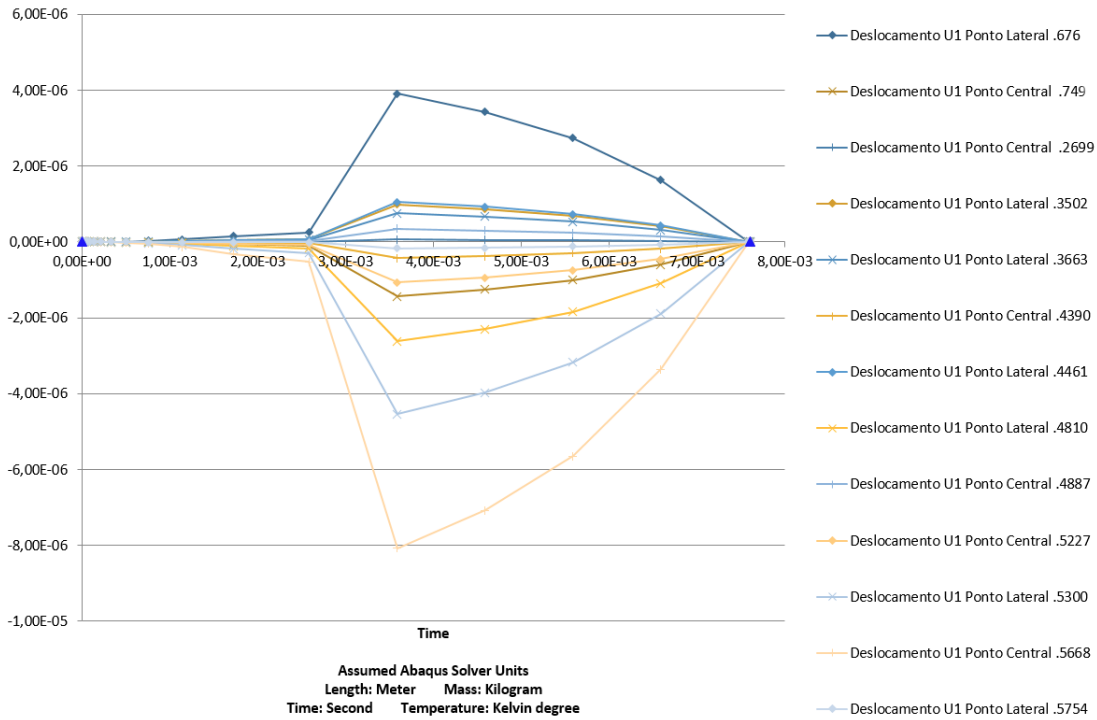


Figura 12.27: Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por um evento de detonação de baixa relevância

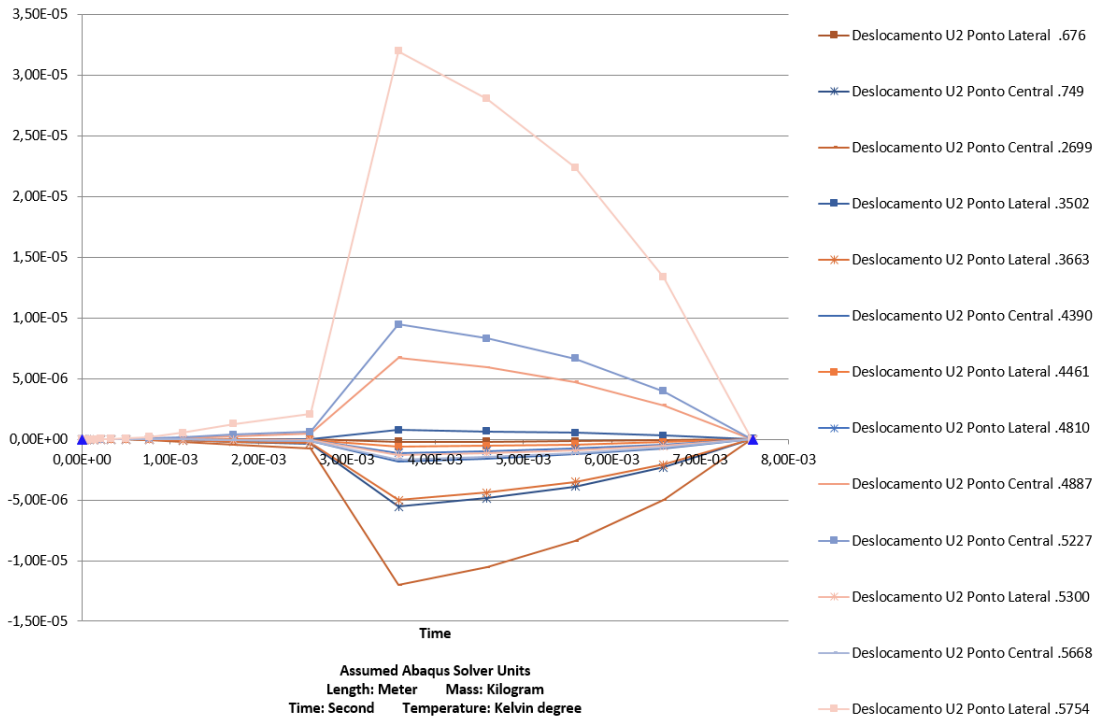


Figura 12.28: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por um evento de detonação de baixa relevância

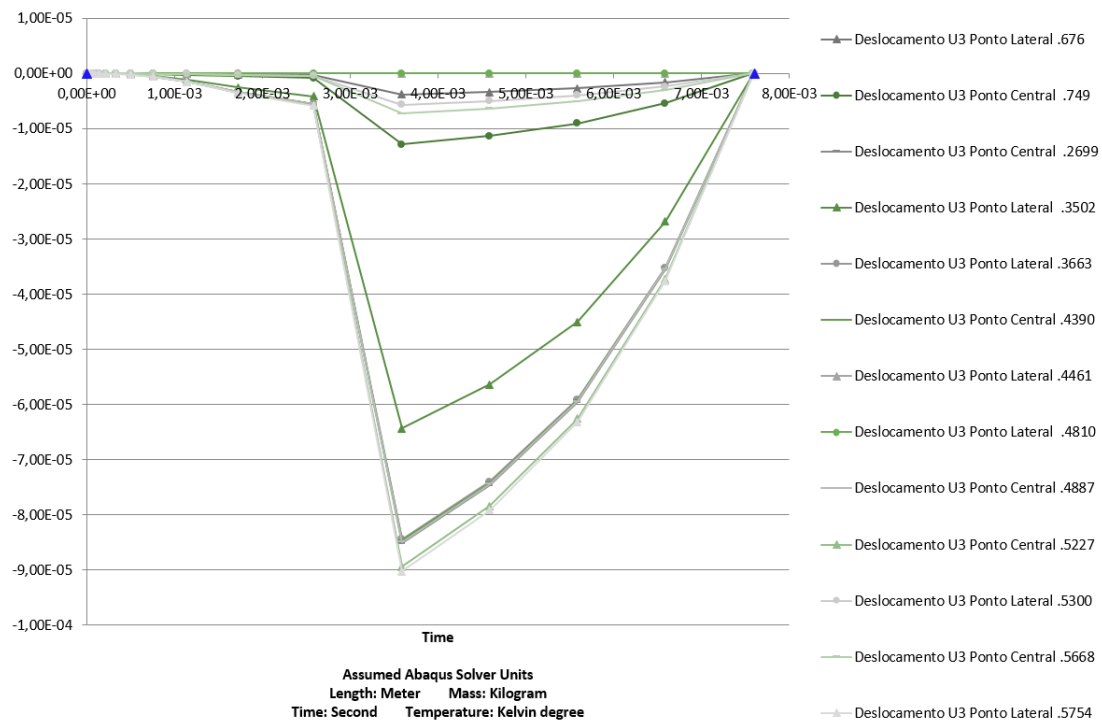


Figura 12.29: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por um evento de detonação de baixa relevância

Os rasgos tendem a mover-se segundo o eixo z uniformemente (nó superior e inferior) mas em termos dos eixos x e y encontramos uma diferença entre os nós superiores e inferiores. Os nós superiores afastam-se do centro do pistão movimentando-se positivamente em x enquanto os nós inferiores se movimentam negativamente em x. A única diferença em relação ao caso base é o aumento dos deslocamentos.

Erro do método

Este método apresentou uma precisão bastante aceitável. O erro é igual ao caso base ou seja apenas num elemento houve um aumento do erro de 1.06×10^{-10} para 2.4×10^{-3} .

12.5.2 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com elevada relevância

Tensões de Von Mises

O efeito de uma detonação de elevada relevância espera-se que tenha resultados ainda mais elevados do que o caso de detonação ligeira. As tensões e deformações tridimensionais proporcionam uma visão bastante clara do efeito da detonação no componente em estudo. Tal como seria de esperar as áreas atingidas são as mesmas, mas apenas existe uma elevação nas tensões máximas. A tensão máxima é de $7.54 \times 10^8 N/m^2$ o que significa que em relação ao caso base aumentou mais de 5 vezes.

Com a figura 12.30 podemos constatar que os pontos de concentrações de tensões

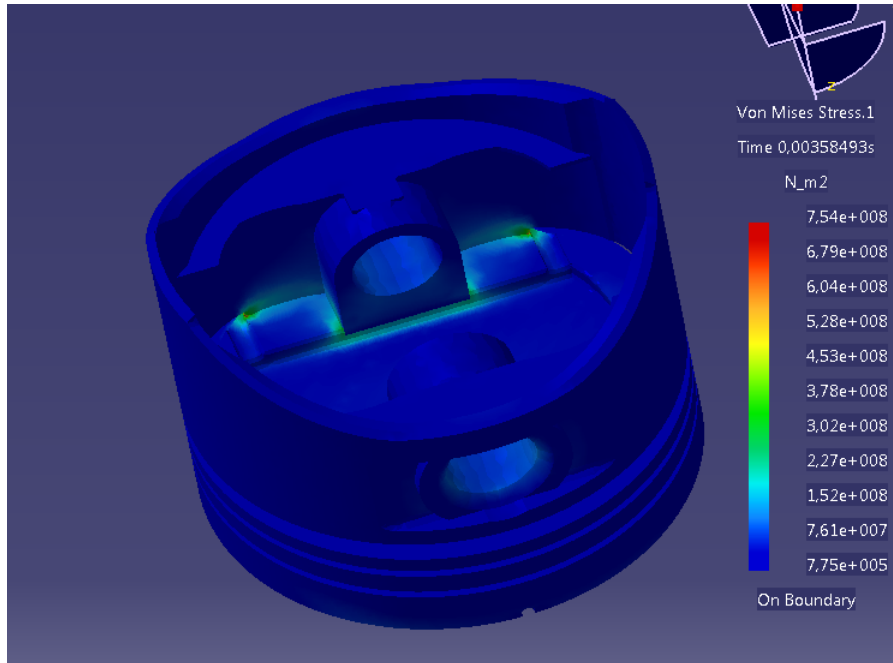


Figura 12.30: Tensões de Von Mises máximas criadas por evento singular de detonação com elevada relevância

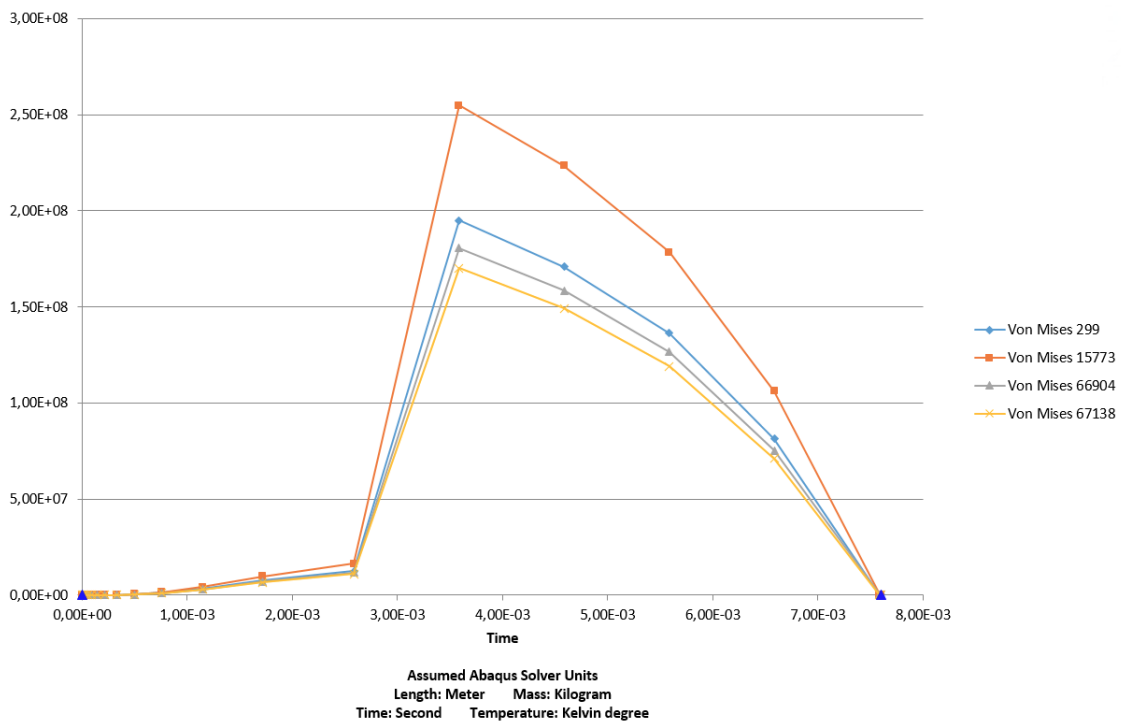


Figura 12.31: Gráfico das variações de tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos para o efeito da detonação de elevada relevância

se encontram nos mesmos locais do caso base. As tensões atingem um máximo no rasgo para a saída do óleo do segmento. O ponto mais crítico atinge picos de tensão de $7.54 \times 10^8 N/m^2$. Para além do aumento das tensões no ponto crítico, as zonas marcadas a verde obtêm valores de tensão de Von mises muito mais elevadas do que num exame base rondando os $1.66 \times 10^8 N/m^2$

De forma a termos uma melhor ideia de como se comportam as tensões ao longo do tempo podemos analisar o gráfico da figura 12.31. O primeiro aspeto que salta à vista é o aumento de todos os pontos de controlo para valores 5 vezes superiores. O decréscimo a partir da tensão máxima é muito mais lento, criando um maior período em que as tensões são elevadas, similar ao que acontece no ensaio anterior. Isto significa que para além de existir um maior esforço relacionado com as tensões serem mais elevadas, o componente tem de estar exposto durante muito mais tempo às mesmas.

A velocidade a que as tensões decrescem está ligado às ondas de pressão criadas por uma combustão irregular do combustível.

Deslocamentos

A pressão extra criada pela detonação exercida na coroa do pistão vai criar deformações neste e pode suscitar vários problemas no funcionamento do mesmo. A detonação causa deformações que atingem valores muito elevados. Os deslocamentos máximos encontram-se nos mesmos locais. Os valores dos deslocamentos atingem $58 \mu m$ o que excede os limites para o funcionamento sem problemas. Em termos de deformações apenas no eixo dos x ou y os deslocamentos.

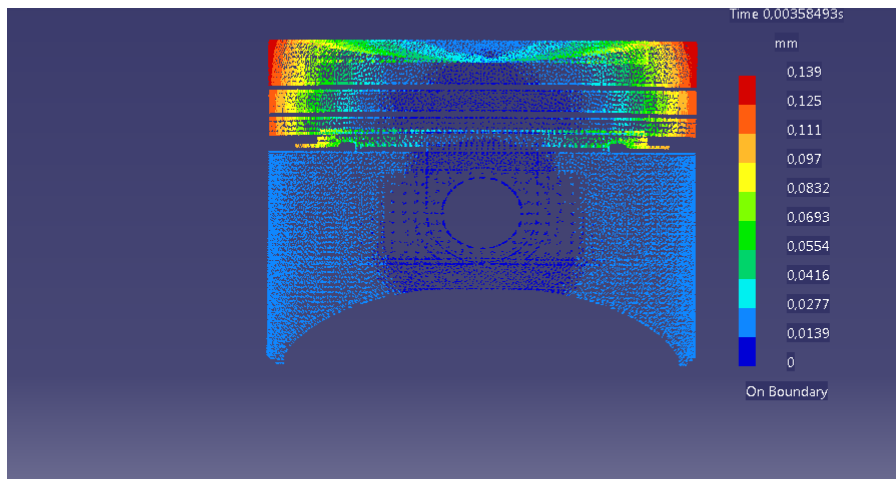


Figura 12.32: Deslocamentos máximos

Como se pode constatar nos vários pontos de controlo conseguimos ver os valores dos deslocamentos e a forma como eles variam para o mesmo nível. Tal como se pode ver os pontos no eixo do pino da biela têm uma deformação muito menor do que os dois pontos na direção oposta.

Analisando os gráficos das figuras 12.42, 12.43 e 12.44 o eixo z/U3 apresenta os deslocamentos máximos. Podemos afirmar que os pontos centrais apresentam deslocamentos menos elevados que os pontos laterais mas todos os pontos centrais e laterais apresentam

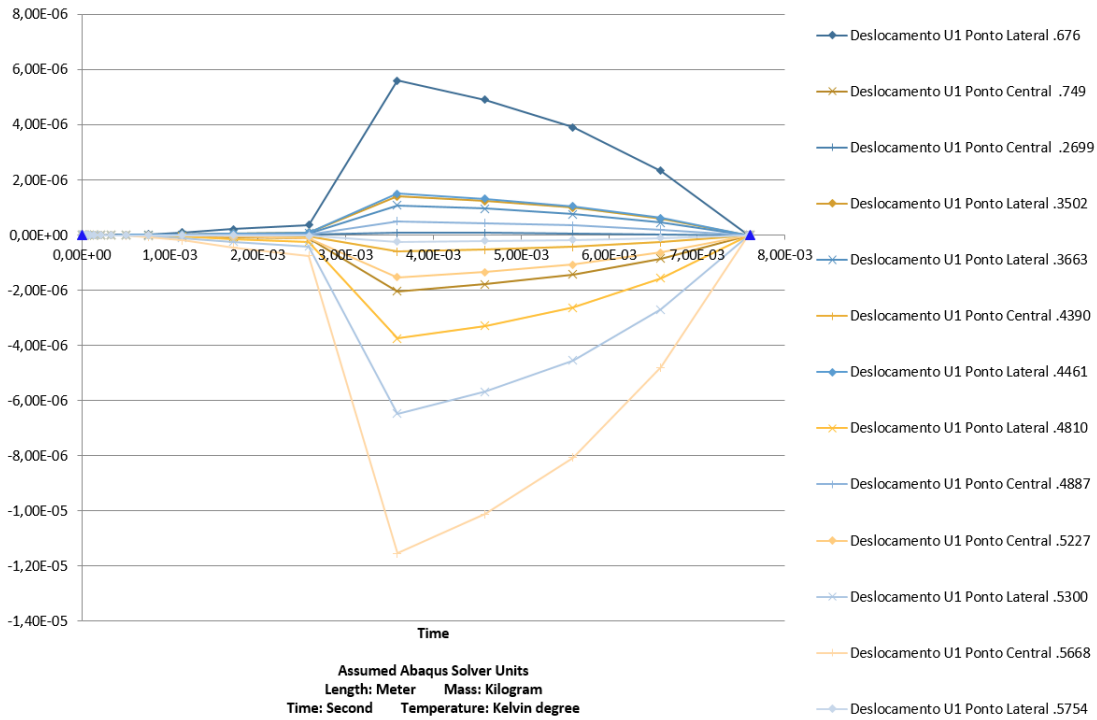


Figura 12.33: Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por evento singular de detonação com elevada relevância

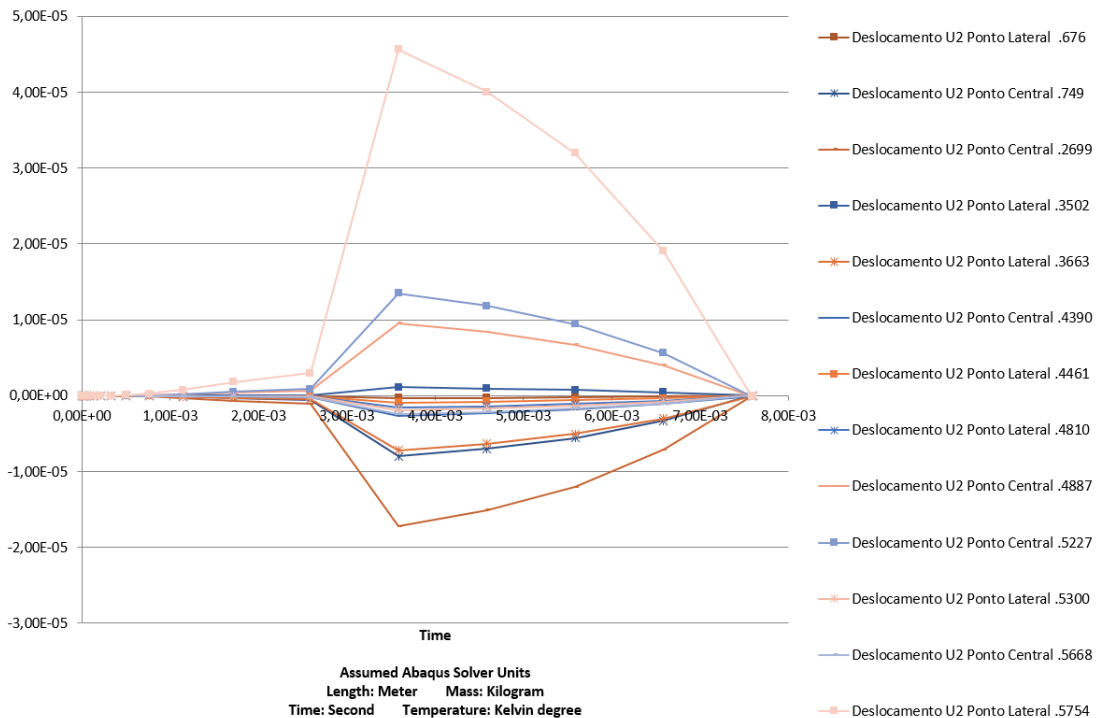


Figura 12.34: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por evento singular de detonação com elevada relevância

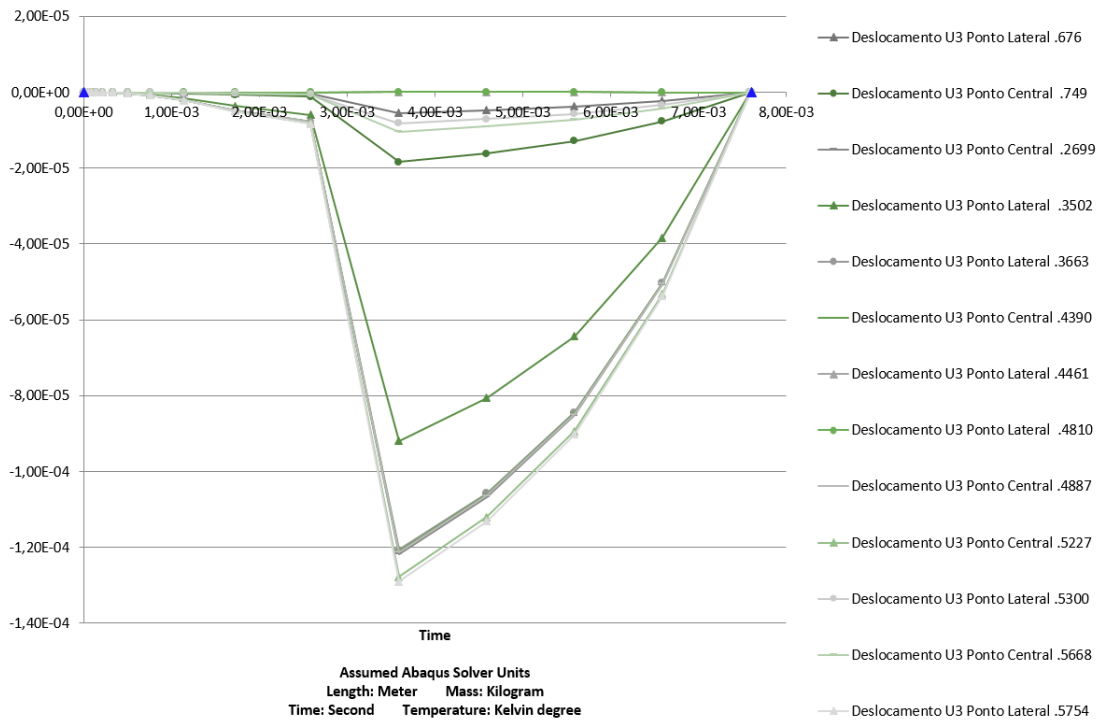


Figura 12.35: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, criados por evento singular de detonação com elevada relevância

deslocamentos preocupantes. Comparativamente com o caso base os deslocamentos atingem valores 5 vezes superiores ao caso base. Em todas as direcções existem deslocamentos capazes de causar elevados danos nas paredes do cilindro e no pistão. Um exemplo são os $45\mu\text{m}$ no deslocamento na direcção $y/U2$ do nó 5754 que vai causar pressões muito elevadas na parede do cilindro, bem como os $-30\mu\text{m}$ do nó 3663 que podem causar o efeito contrário e criar perdas de pressão e queima de óleo exagerada.

Os rasgos tendem a mover-se segundo o eixo z uniformemente (nó superior e inferior) mas em termos dos eixos x e y encontramos uma diferença entre os nós superiores e inferiores. Os nós superiores afastam-se do centro do pistão movimentando-se positivamente em x enquanto os nós inferiores se movimentam negativamente em x . A única diferença em relação ao caso base é o aumento dos deslocamentos para valores muito maiores, mas os movimentos em si mantêm-se iguais.

Erro do método

A precisão nesta simulação manteve-se em valores normais como podemos ver na figura 12.12 em que podemos constatar que apenas num elemento houve um aumento do erro de 1.06×10^{-10} para 2.4×10^{-3} . Estes valores vão de encontro a todas as simulações realizadas anteriormente.

12.6 Simulações do pistão melhorado

12.6.1 Análise térmica

Temperatura Nodal

Um dos pontos principais deste trabalho é estimar como varia a temperatura num pistão em funcionamento ao longo de um determinado período de tempo. Como podemos ver na figura 13.1 o pistão está representado nos diversos pontos do percurso de aquecimento. Apenas analisando a figura 13.1 conseguimos constatar que o aquecimento se dá da coroa para a saia. A partir daí variação de temperatura estabiliza e mesmo para períodos superiores a 40 segundos as zonas abaixo do segundo segmento têm uma variação de temperatura muito baixa.

A dispersão de temperaturas é praticamente simétrica. As temperaturas no pistão evoluem muito rapidamente nos segundos iniciais mas a partir dos 26 segundos começam a estabilizar e praticamente não se alteram até ao final da simulação.

Analisando as vistas em corte da figura 12.36 podemos constatar que as temperaturas mais elevadas se encontram no centro do componente, como seria de esperar. Apesar das semelhanças entre os dois cortes podemos afirmar que as principais diferenças estão na dispersão de temperaturas junto aos rasgos inferiores, sendo as temperaturas da figura 12.36 do lado direito ligeiramente mais elevadas.

Tanto a saia como os rasgos se encontram a uma temperatura estável ao longo de toda a simulação, apresentando valores em torno dos 395 a 410 K.

Podemos comparar a figura 12.36 do lado direito com a figura 12.37 obtida no caso base. Daqui podemos inferir que existe uma diminuição nas temperaturas máximas de 7 graus.

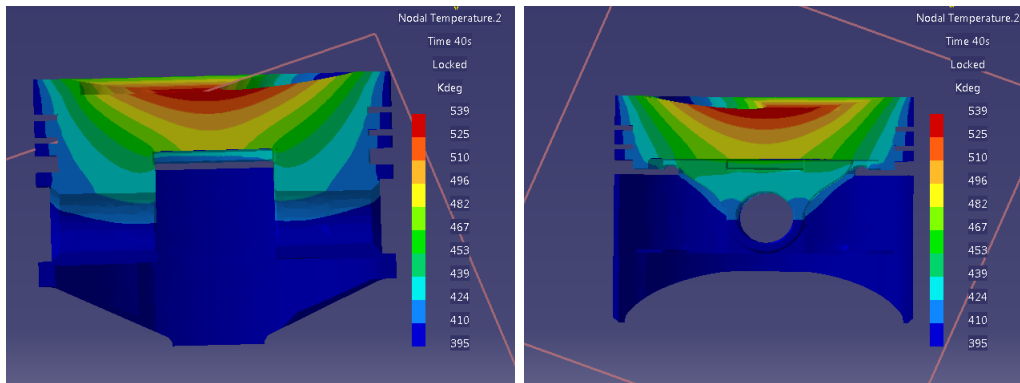


Figura 12.36: Dispersão térmica no caso melhorado, vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin

Analisando a imagem 12.3 podemos constatar a simetria de temperaturas entre pontos opostos do pistão como está indicado pelas setas azuis. As linhas de temperatura sobrepõem-se entre pontos simétricos. Nomeadamente o nó 4366 e 4281, o nó 4380 e 4294, o nó 2967 e 2947 sobrepõem-se pois são simétricos.

Quanto mais afastados se encontram os pontos do centro do pistão e da coroa mais tempo demoram a atingir a temperatura estável. Tal pode ser constatado no gráfico 12.3 comparando os nós do topo com os nós de baixo. Os nós de baixo têm uma subida de

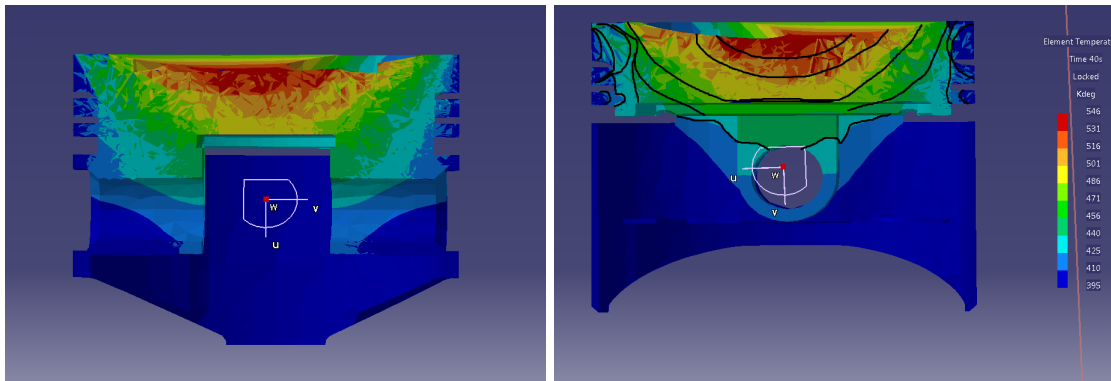


Figura 12.37: Dispersão térmica no caso base vista em corte ao fim de 40 segundos temperatura em graus Kelvin

temperatura mais lenta enquanto os pontos do topo aumentam de temperatura de uma forma mais rápida. Isto está de acordo com o que acontecia no ensaio base.

O nó 4389 tem a temperatura mais elevada e atinge os $520K$ o que é 22° mais baixo. Os 3 nós com temperatura mais baixa são os 2584, 4366 e 4281 e atingem valores entre os $400e420K$. Existe uma maior diferença de temperaturas entre os nós centrais do que entre os médios ou extremos. Entre o nó central de topo e central baixo vão $60K$. Os médios estão separados por $20K$ bem como os extremos estão separados pela mesma amplitude.

12.6.2 Simulação estrutural

Tensões de Von Mises

O principal objetivo desta simulação é determinar se as alterações ao pistão obtinham melhoramentos em termos de tensões máximas atingidas. As tensões e deformações tridimensionais proporcionam uma visão bastante clara do desgaste a que o componente em estudo está sujeito. A tensão máxima é de $1.44 \times 10^8 N/m^2$ o que significa que em relação ao caso base diminuiu 70% . Existem mais áreas com concentrações de tensões mas as tensões são mais baixas, rondando os $0.9 \times 10^8 N/m^2$.

Com a figura 12.39 podemos constatar que os pontos de concentrações de tensões do caso base sofreram uma redução significativa nas tensões. As tensões atingem um máximo no rasgo para a saída do óleo do segmento, tal como acontece no caso base. Apenas existe uma redução em 70% do valor máximo atingido.

De forma a termos uma melhor ideia de como se comportam as tensões ao longo do tempo podemos analisar o gráfico da figura 12.40. As tensões atingidas nos pontos de controle são cerca de 70% menores do que as do caso base. As tensões máximas variam entre $0.45 \times 10^8 N/m^2$ e $0.65 \times 10^8 N/m^2$ para os pontos de controlo. Conseguiu-se diminuir as tensões máximas existentes no pistão criando zonas maiores de tensões mais baixas.

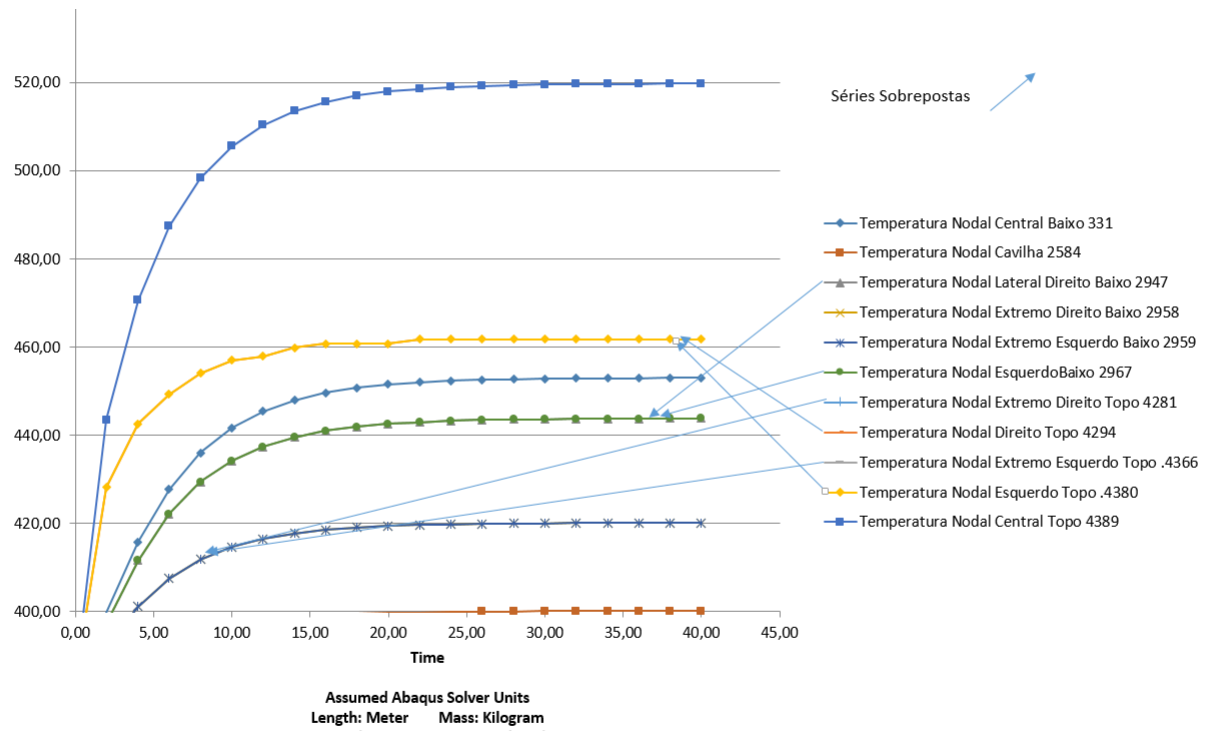


Figura 12.38: Gráfico das variações de temperatura ao longo de 40 segundos, para o caso melhorado

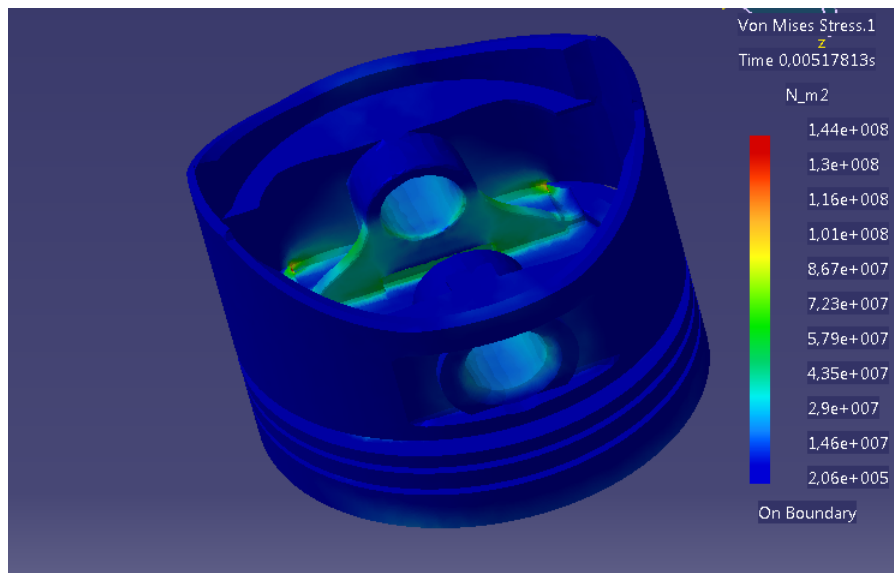


Figura 12.39: Tensões de Von Mises máximas no caso melhorado

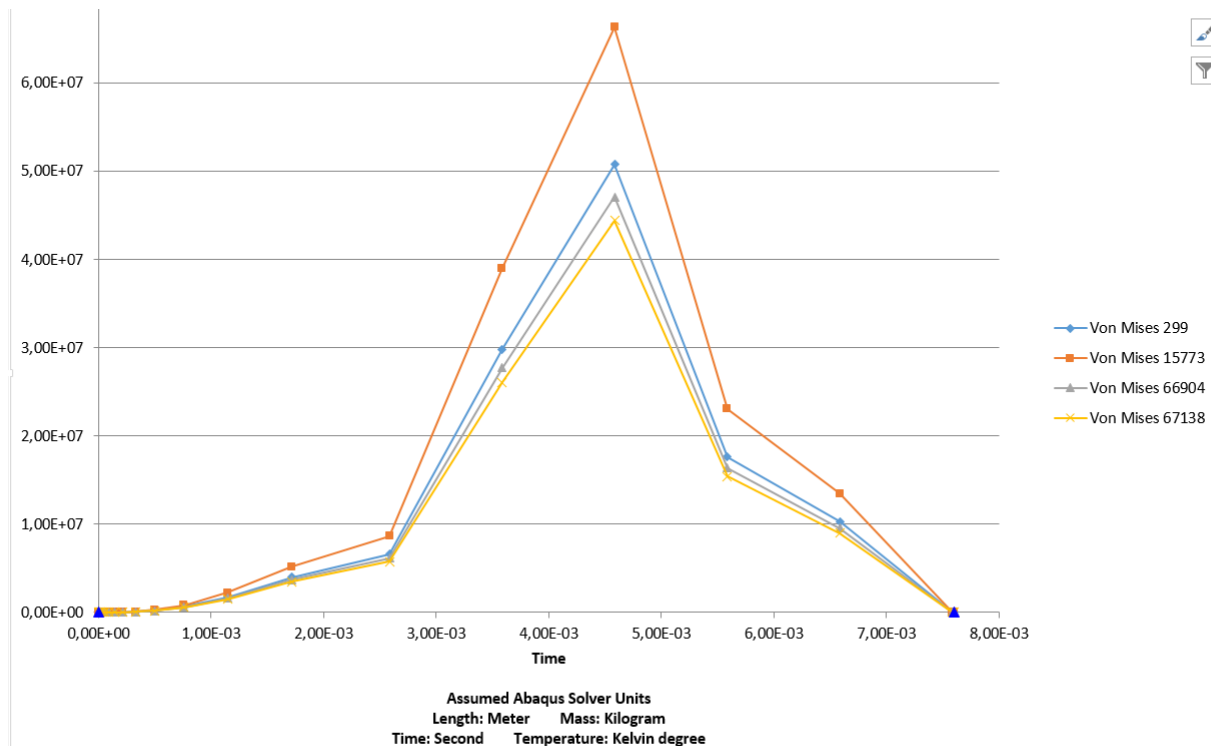


Figura 12.40: Gráfico das variações de tensões de Von Mises ao longo de 40 segundos, no caso melhorado

Deslocamentos

No caso dos deslocamentos as direções dos mesmos mantiveram-se iguais ao caso base. Obteve-se uma redução nos deslocamentos em cerca de 60%. Os deslocamentos máximos encontram-se nos mesmos locais. Os valores dos deslocamentos atingem $37\mu\text{m}$ o que melhora os valores obtidos no ensaio base. Em termos de deformações apenas no eixo dos x ou y os deslocamentos também sofrem uma redução em 60%.

Como se pode constatar nos vários pontos de controle conseguimos ver os valores dos deslocamentos e a forma como eles variam para o mesmo nível. Tal como se pode ver os pontos no eixo do pino da biela têm uma deformação muito menor do que os dois pontos na direção oposta.

Analisando os gráficos das figuras 12.42, 12.43 e 12.44 o eixo z/U3 apresenta os deslocamentos máximos. Podemos afirmar que os pontos centrais apresentam deslocamentos menos elevados, que os pontos laterais mas todos os pontos centrais e laterais apresentam deslocamentos maiores. Comparativamente com o caso base podemos utilizar o nó 5754 como exemplo. Este atinge $40\mu\text{m}$ no deslocamento na direção U3/z no caso base enquanto no pistão melhorado apenas atinge os $27\mu\text{m}$. O mesmo acontece nas outras direções.

Os rasgos tendem a mover-se segundo o eixo z uniformemente (nó superior e inferior) mas em termos dos eixos x e y encontramos uma diferença entre os nós superiores e inferiores. Os nós superiores afastam-se do centro do pistão movimentando-se positivamente em x enquanto os nós inferiores se movimentam negativamente em x. A única diferença em relação ao caso base é a diminuição dos valores de deslocamentos, mas os movimentos

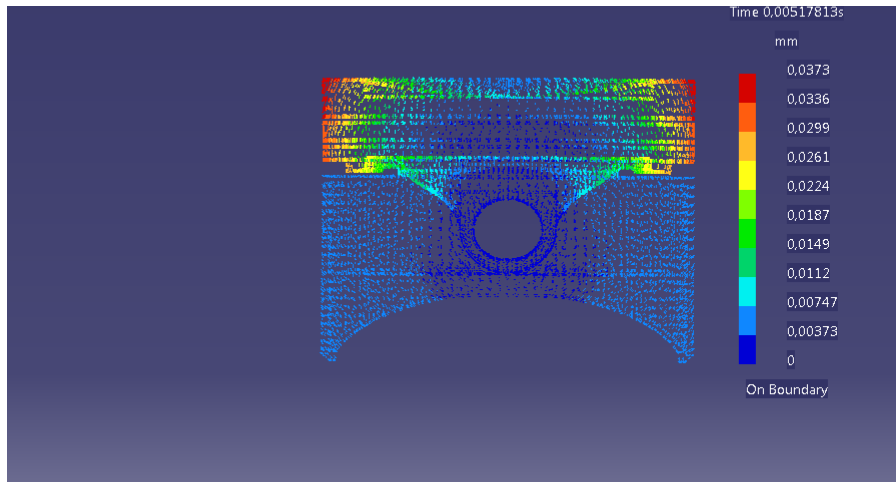


Figura 12.41: Deslocamentos máximos no caso melhorado

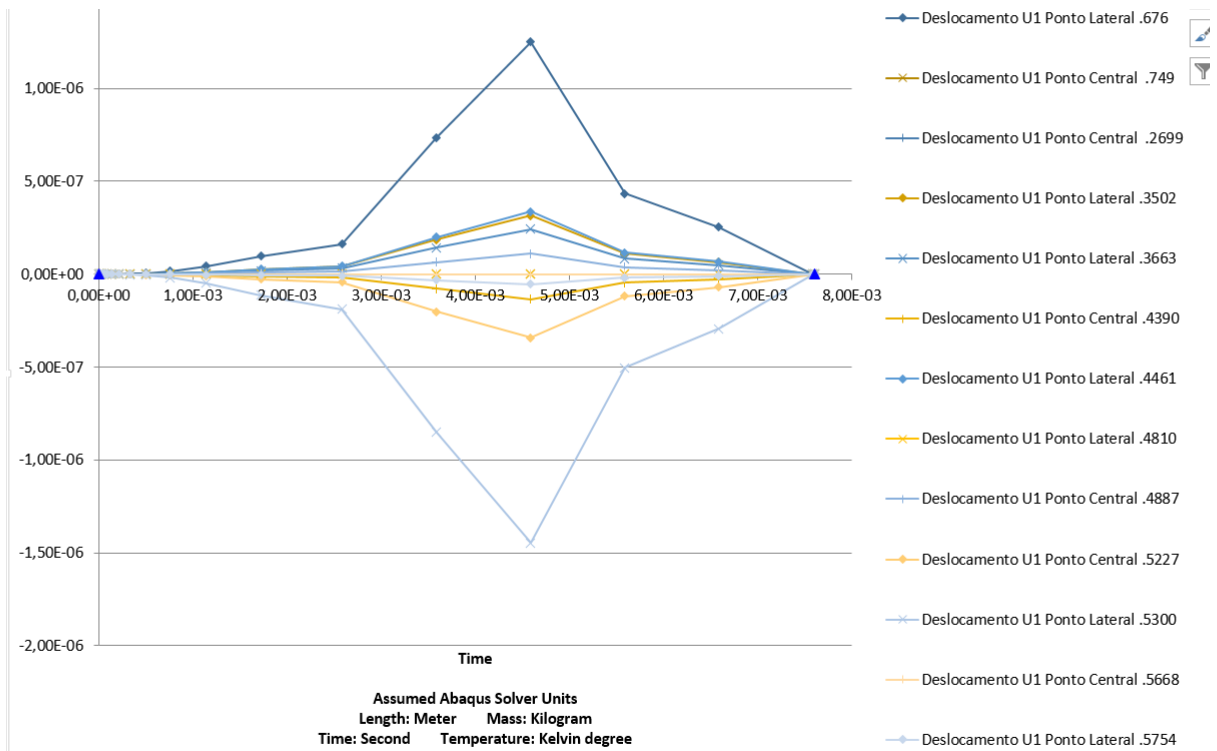


Figura 12.42: Gráfico das variações deslocamentos ao longo de 40 segundos, no caso melhorado

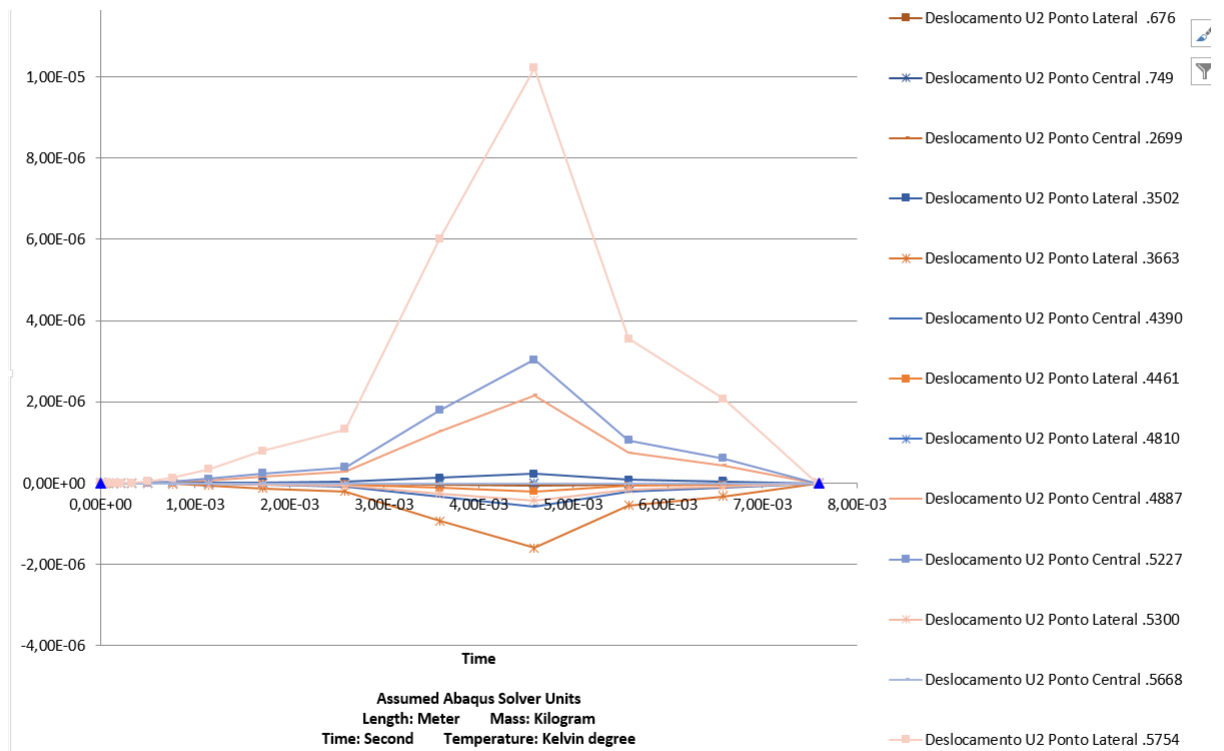


Figura 12.43: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, no caso melhorado

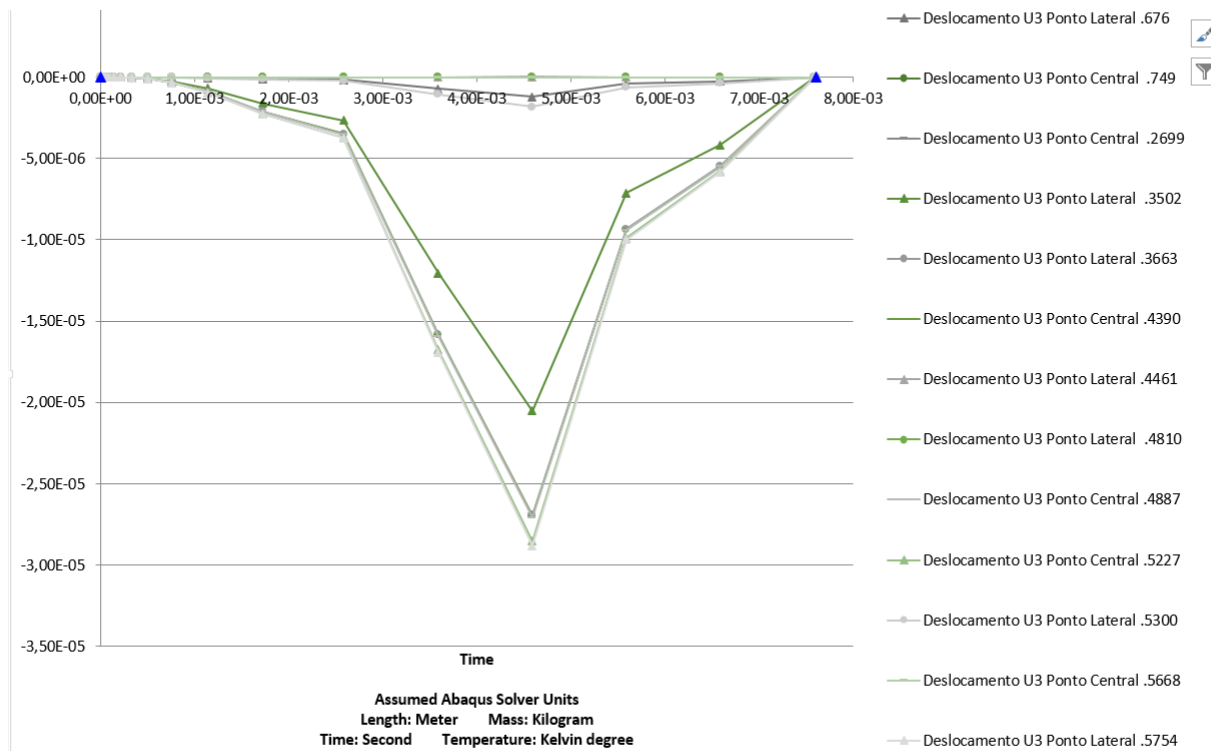


Figura 12.44: Gráfico das variações de deslocamentos ao longo de 40 segundos, no caso melhorado

em si mantém-se iguais.

Capítulo 13

Conclusões

Ao longo do trabalho foram-se tirando conclusões e fundamentando possíveis ideias. Neste capítulo serão resumidas todas as conclusões mais importantes e serão justificadas todas as conjecturas que o trabalho possibilitou fazer.

13.1 Análise térmica base

O propósito da realização desta análise foi verificar se o software criava modelos realistas e replicáveis de dispersão de temperaturas. Tal foi verificado através das comparações com os estudos realizados pela Bosch [36]. A obtenção de uma dispersão de temperaturas confiável é fundamental para o trabalho pois esta seria utilizada em todas as análises estruturais como forma de definir mais precisamente as propriedades do material.

Apesar de algumas diferenças de temperaturas, os valores obtidos foram muito próximo do esperado. As temperaturas atingiram valores máximos de $546K$ enquanto no estudo realizado pela Bosch atinge os $568K$. Esta diferença de cerca de 20° pode ser atribuída às variações de geometria do pistão que existem entre os dois componentes em análise.

A forma como as temperaturas variam também foi um critério a avaliar. A simulação térmica tinha como parâmetro de paragem uma variação de temperatura inferior a $0.1^{\circ}K$ e as temperaturas no pistão estabilizaram ao fim de 40 segundos. Considera-se o valor obtido como real e aproximado de estudos realizados por Yanxia Wang and Hui Gao [39].

Para este ensaio poderia ter sido utilizado um modelo mais simplificado com apenas $1/4$ de pistão pois as temperaturas são simétricas, mas como para a análise seguinte sobre a assimetria causada pelo ar da admissão seria necessário realizar uma comparação de resultados optou-se por uma análise completa.

A saia manteve-se quase sem alterações de temperatura ao longo de toda a simulação. Os pontos mais afastados da coroa do pistão demoraram mais tempo a aumentar de temperatura, como se pode comprovar pelo gráfico 12.3. Uma das alterações possíveis num trabalho futuro seria estender o tempo da simulação durante mais de 5 minutos de funcionamento e verificar se os resultados obtidos nesta zona se mantinham ou se a temperatura da saia subia a um rácio inferior a $0.1^{\circ}K/s$.

13.2 Análise estrutural base

Através da análise estrutural base pretendeu-se confirmar se a simulação estava bem parametrizada e qual era o seu comportamento em relação a outros estudos. Os resultados obtidos também serão úteis no estudo à fadiga, principalmente na localização de pontos de falha catastrófica.

As tensões de Von mises dos casos de estudo comparativos revelam máximos pontuais de $1.5 \times 10^8 N/(m^2)$ e áreas de tensões máximas com valores na ordem de $1.1 \times 10^8 N/(m^2)$. Existe uma diferença muito pequena entre os valores máximos pontuais e o máximo relativo à área de tensão máxima. Nesta simulação os máximos pontuais atingem valores de $1.6 \times 10^8 N/(m^2)$ ou seja muito semelhante ao do caso de comparação, mas as tensões relativas a áreas de tensões máximas rondam os $0.9 \times 10^8 N/(m^2)$. A zona de erro máximo situa-se exatamente onde o ponto de tensão máxima se encontra, este facto pode ser um ponto a melhorar em trabalhos futuros.

As zonas de tensões máximas coincidem entre os vários estudos mesmo com algumas diferenças no que concerne ao nível de tensões atingidas. Podemos afirmar que a simulação no seu todo é válida, com alguns pontos que devem ser tratados com mais profundidade numa análise futura.

Os deslocamentos detetados apresentam valores dentro do esperado, ou seja na ordem dos $45 \mu m$. Apesar de ser acima da tolerância de fabrico do componente, para o funcionamento do pistão não causa problemas pois apenas são relativos ao eixo U3/z. Segundo o eixo U1 e U2 os deslocamentos variam entre $0.2 \mu m$ e $15 \mu m$. Estes deslocamentos vão fazer com que o pistão crie um estanquidade da câmara de combustão maior [35].

Existe uma distinção clara entre os nós laterais e centrais na direção U3/z. Como seria de esperar os pontos laterais têm deslocamentos maiores enquanto os pontos no eixo da cavilha têm deslocamentos menores. Isto deve-se ao rasgo do segmento do óleo criar uma fragilidade no pistão que impede a transmissão de forças para a saia. O apoio da cavilha faz com que haja um reforço estrutural na direção do eixo da mesma.

Os maiores deslocamentos encontram-se no eixo dos z, enquanto o x e o y apresentam deslocamentos menores. A direção U3/z é a única que não tem deslocamentos positivos em qualquer dos pontos de controlo. Os nós no topo das ilhas movimentam-se para o exterior do pistão, enquanto os nós na parte de baixo das ilhas se movimentam para o interior do mesmo.

Os resultados dos deslocamentos para um pistão em funcionamento foram coerentes com estudos já realizados, nomeadamente o estudo realizado por Yanxia Wang and Hui Gao *Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss* [39] que apresenta resultados semelhantes aos obtidos nesta análise.

Como única exceção é um elemento que apresenta valores de tensões de von mises 2 vezes superiores ao estudo comparativo e a qualquer valor da própria análise. Uma das razões para isto acontecer é o facto de este elemento se encontrar na zona que pode gerar erros maiores. Desta forma podemos desprezar este elemento considerando que o resto da simulação está muito similar aos estudos comparativos e indicar para estudos futuros que este é um ponto em que é necessário ter cuidado na geração da malha e que um refinamento da mesma neste local, seria algo a considerar.

Finalmente, podemos concluir que o pistão está bem dimensionado. Apresenta um factor de segurança superior a 2 relativamente à tensão limite de elasticidade. Todos os resultados estão coerentes com estudos realizados previamente.

13.3 Influência do fluxo do ar da admissão

Nesta secção a influência do fluxo do ar de admissão foi o centro do estudo. O principal objetivo deste ensaio era saber se as temperaturas variavam significativamente dentro do pistão devido ao fluxo do ar de admissão. Esta assimetria poderia criar deformações diferentes e possibilitar um desgaste adicional ao pistão.

Registou-se uma diminuição da temperatura dos nós diretamente debaixo da válvula de admissão em cerca de 5 a 10 K. Comparativamente os nós opostos mantiveram-se à temperatura registada no ensaio base. Daqui podemos retirar que existe uma assimetria criada pelo fluxo de admissão mas ao contrário do esperado a amplitude da mesma não é significativa. Uma diminuição de 10^0 não vai implicar uma alteração significativa das características do material.

Os métodos utilizados para a determinação dos fluxos também podem induzir erros de cerca de 15% em condições extremas [29] o que pode representar um aumento máximo de temperatura tendo em conta o erro de 11,5K o que por si só não se afasta muito dos resultados obtidos.

13.4 Influência do Atrito e da fricção

O atrito contribui para a diminuição dos deslocamentos, especialmente na direção U3/z já que a força de atrito aplicada é contrária à pressão da explosão. Como se pode constatar, o atrito vai ter uma influência quase insignificante tanto nas tensões máximas como nos deslocamentos. Apesar de se constatar uma diminuição dos deslocamentos no eixo U3/z, tal apenas é notável se for comparado a uma escala do micron. Graficamente quase não se percebe a diferença já que estas são muito baixas.

Apenas com uma comparação valor a valor se constatarem diferenças na ordem de $1.5 * 10^7 N/m^2$ nas tensões e de $1\mu m$ em deslocamentos. Estes valores eram esperados já que estamos a falar de uma pressão de atrito que atinge máximos de 20 kPa comparativamente com a pressão da explosão que cria 8MPa. Uma pressão 400 vezes inferior irá obrigatoriamente criar menos deslocamentos e as diferenças serão pouco perceptíveis.

Em conclusão o atrito criado pelo movimento do pistão causa uma diminuição das deformações e das tensões mas a um nível tão pequeno que pode ser considerado desprezável para efeitos de deslocamentos e de tensões de Von Mises. Este dado é útil caso se pretenda fazer uma análise mais detalhada em que todas as pequenas diferenças vão tornar a simulação o mais aproximada à realidade possível.

13.5 O efeito do detonação

13.5.1 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com baixa relevância

A detonação pode variar muito em termos de gravidade. Neste estudo testou-se uma detonação causada pelo adiantamento da ignição, ou seja, uma detonação ligeira. Como era esperado obtiveram-se valores de tensões de Von Mises máximas que rondam os $3.3 * 10^8 N/m^2$, 2 vezes superiores ao caso base de $1.65 * 10^8 N/m^2$. Mesmo nas áreas críticas as tensões atingiram médias de $1.65 * 10^8 N/m^2$ que é 1.5 vezes mais do que na análise base. Estes valores ultrapassam o limite de elasticidade do material nas localizações dos

máximos. É preciso ter em conta que os máximos foram determinados no elemento de maior erro. Excluindo este elemento não existem mais elementos que se encontrem acima da tensão limite de elasticidade de 320MPa.

A detonação em si pode não causar danos no pistão caso seja um evento singular, mas caso se repita mais do que uma vez a plastificação de alguns pontos do pistão pode criar um local de início de falha.

Uma das diferenças principais em relação ao ensaio base é a duração das pressões altas. Enquanto no ensaio base as tensões atingem um máximo e depois decrescem rapidamente, no evento de detonação a descida é muito mais lenta. Isto faz com que o componente esteja sujeito a pressões elevadas durante muito mais tempo.

Em termos de deslocamentos máximos, os valores limites definidos em *Internal Combustion Engine Fundamentals* [35] foram ultrapassados nos deslocamentos no eixo U3/z atingindo quase 0,041mm de deslocamentos. Com valores desta magnitude, danos na parede do cilindro e no pistão são muito prováveis de acontecer, devido ao aumento de atrito causado pelo aumento da pressão do pistão nas paredes do cilindro.

O pistão contrai mais do que é permitido o que vai causar perdas de pressão no cilindro e um aumento do gasto de óleo. A passagem de óleo entre a cambota e a câmara de combustão passa a ser possível pois as tolerâncias são excedidas.

Ao mesmo tempo a combustão deixa de ser tão eficaz e as cargas que o pistão tem de suportar são mais prolongadas. Isto deve-se ao facto de a pré-ignição criar ondas de choque e uma ignição menos controlada.

13.5.2 Simulação estrutural sobre a influência de um evento singular de detonação com elevada relevância

No caso da detonação de elevada relevância constatamos que apenas um evento pode produzir danos estruturais relevantes. Tendo em conta que quando estes eventos quando acontecem tendem a repetir-se os danos causados serão significativamente maiores do que os demonstrados para um evento singular.

O valor máximo para tensões de Von Mises atingido foi de $7.54 \times 10^8 N/m^2$ que é 5 vezes maior do que qualquer caso estudo, ou caso base. A fragilidade criada por estas tensões vai ser exacerbada pela quantidade de vezes que o evento de detonação ocorra. Nas áreas críticas as tensões máximas atingem valores médios de $3.78 \times 10^8 N/m^2$. Todos estes ultrapassam a tensão de limite de plasticidade e ficam muito perto da tensão de cedência de $4 \times 10^8 N/m^2$. Podemos concluir que existem uma grande quantidade de nós que podem atingir valores acima da tensão limite de elasticidade e alguns mesmo ultrapassam a tensão de cedência do material.

Os pontos de estudo têm o mesmo comportamento da detonação ligeira mas com uma amplitude maior. A duração dos picos de tensão é maior isto vai causar uma carga adicional.

Os deslocamentos continuam a ser maiores na direção dos U3/z do que nas outras direções como seria esperado. As diferenças entre topo e parte de baixo das ilhas em termos de deslocamentos mantém-se com o topo das ilhas a deslocar-se para o exterior e com a parte de baixo das ilhas a aproximar-se do interior do pistão.

Os pontos centrais obtêm menores deslocamentos na direção U3/z do que os pontos laterais, mas todos eles são maiores do que qualquer resultado obtido anteriormente. Em termos de deslocamento na direção U3/z atingem-se valores na escala dos 0.058mm, tal é

impensável para o normal funcionamento do motor. Isto vai causar a falha catastrófica do motor, quer seja pela cedência do pistão ou mesmo sobre aquecimento do motor devido ao atrito elevado.

Neste ensaio comprova-se o perigo da detonação para a integridade do pistão. Apenas um evento de detonação catastrófica pode causar danos no pistão e a falha catastrófica do mesmo. As zonas mais prováveis de início de cedência é o rasgo do óleo e a base do apoio da cavilha.

13.6 Análise térmica ao pistão melhorado

Em termos de simetria a dispersão térmica manteve-se igual à simulação base, ou seja existe simetria em todo o pistão. A simetria pode ser comprovada pela sobreposição dos pontos opostos.

Com as alterações no pistão obtém-se uma diminuição geral das temperaturas como se pode constatar através de uma comparação dos gráficos 12.38 e 12.3. As temperaturas máximas atingidas são de 539°K , o que significa uma diminuição de 6 graus em relação ao caso base.

O apoio da cavilha apresenta uma diminuição da temperatura generalizada devido ao aumento de material nesta zona que vai dissipar uma maior quantidade de calor. Isto deve-se tanto ao aumento de área de transmissão de calor como à maior inércia do mesmo.

O tempo demorado a atingir a estabilidade foi sensivelmente o mesmo, 26 segundos.

13.7 Análise estrutural ao pistão melhorado

O principal objetivo desta simulação é determinar se as alterações ao pistão obtinham melhoramentos em termos de tensões máximas atingidas e de deslocamentos quando expostos à mesma envolvente do caso base.

As tensões de Von mises dos casos de estudo revelam máximos pontuais de $1.44 \times 10^8 \text{N}/(\text{m}^2)$ e áreas de tensões máximas com valores na ordem de $0.9 \times 10^8 \text{N}/(\text{m}^2)$. Ou seja, denota-se uma ligeira redução das tensões generalizada.

As zonas de tensões máximas coincidem entre os vários estudos mesmo com algumas diferenças no que concerne ao nível de tensões atingidas. Podemos afirmar que da simulação resultam valores aproximados da realidade, com alguns pontos que devem ser tratados com mais profundidade numa análise futura.

Os deslocamentos detetados apresentam valores dentro do esperado, ou seja na ordem dos $45 \mu\text{m}$. Apesar de ser muito acima de qualquer tolerância de fabrico do componente, para o funcionamento do pistão não causa problemas pois apenas são relativos ao eixo U3/z. Segundo o eixo U1 e U2 os deslocamentos variam entre $0.2 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$. Estes deslocamentos vão fazer com que o pistão crie um estanquidade da câmara de combustão maior [35].

Existe uma distinção clara entre os nós laterais e centrais na direção U3/z. Como seria de esperar os pontos laterais têm deslocamentos maiores enquanto os pontos no eixo da cavilha têm deslocamentos menores. Isto deve-se ao rasgo do segmento o do óleo criar uma fragilidade no pistão que impede a transmissão de forças para a saia. O apoio

da cavilha faz com que haja um reforço estrutural na direção do eixo da mesma o que acaba por diminuir estes deslocamentos.

Os maiores deslocamentos encontram-se no eixo dos z, enquanto o x e o y apresentam deslocamentos menores. A direção U3/z é a única que não tem deslocamentos positivos em qualquer dos pontos de controlo. Os nós no topo das ilhas movimentam-se para o exterior do pistão, enquanto os nós na parte de baixo das ilhas se movimentam para o interior do mesmo.

Os resultados dos deslocamentos para um pistão em funcionamento foram coerentes com estudos já realizados, nomeadamente o estudo realizado por Yanxia Wang and Hui Gao *Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss* ?? apresenta resultados semelhantes aos obtidos nesta análise e apresenta melhoramentos em relação aos mesmos.

13.8 Cedência plástica e falhas catastrófica

Através da análise dos deslocamentos e concentrações de tensões podemos enumerar alguns locais onde será mais provável encontrar casos de cedência e falhas catastróficas. As concentrações de tensões ocorrem para todos os casos em 3 locais distintos: a base do suporte da cavilha, o rasgo do segmento do óleo e a aresta entre o apoio da cavilha e o rasgo do óleo.

Estes locais vão de encontro a resultados experimentais demonstrados por F.S.Silva [6] em que a maioria dos casos de falha catastrófica está ligada a a falhas iniciadas na base do apoio da cavilha ou nos rasgos dos segmentos.

Uma das propostas para um futuro trabalho seria cortar um pistão que tenha sido sujeito a trabalho durante um número significativo de horas e verificar o aparecimento de linhas de Lugers comprovativas da fadiga em locais críticos.

13.9 Discussão e Trabalhos Futuros

A associação de Softwares (CATIA+ABAQUS) cria resultados fisicamente corretos e possíveis de confirmar, quer por publicações anteriormente realizadas quer pelo histórico de falhas. A forma como se utilizou esta combinação de softwares possibilitou a diminuição do tempo preparação dos modelos e com algum ajustamento foi possível a diminuição do tempo de processamento em relação a outras publicações.

Resumidamente, com este trabalho podemos concluir que o efeito do atrito é insignificante e que, numa abordagem mais generalista, pode ser desprezado. A assimetria térmica no pistão existe mas apenas implica uma variação de temperaturas não muito relevante. A detonação ligeira não causa danos instantaneamente mas a repetição de um evento pode levar à deterioração do pistão mais rapidamente do que previsto. A detonação elevada pode causar a rutura do pistão em mais do que um local com apenas um evento. Por fim, é possível melhorar o design do pistão de forma a aperfeiçoar as suas propriedades térmicas e estruturais.

É de considerar numa próxima investigação a alteração da densidade da malha no rasgo do óleo, de forma a eliminar um ponto que causa erros elevados. Uma análise ao estudo da fadiga também seria interessante de forma a corroborar se o aparecimento de fraturas coincide com os pontos de tensões mais elevadas.

Parte IV

Anexos

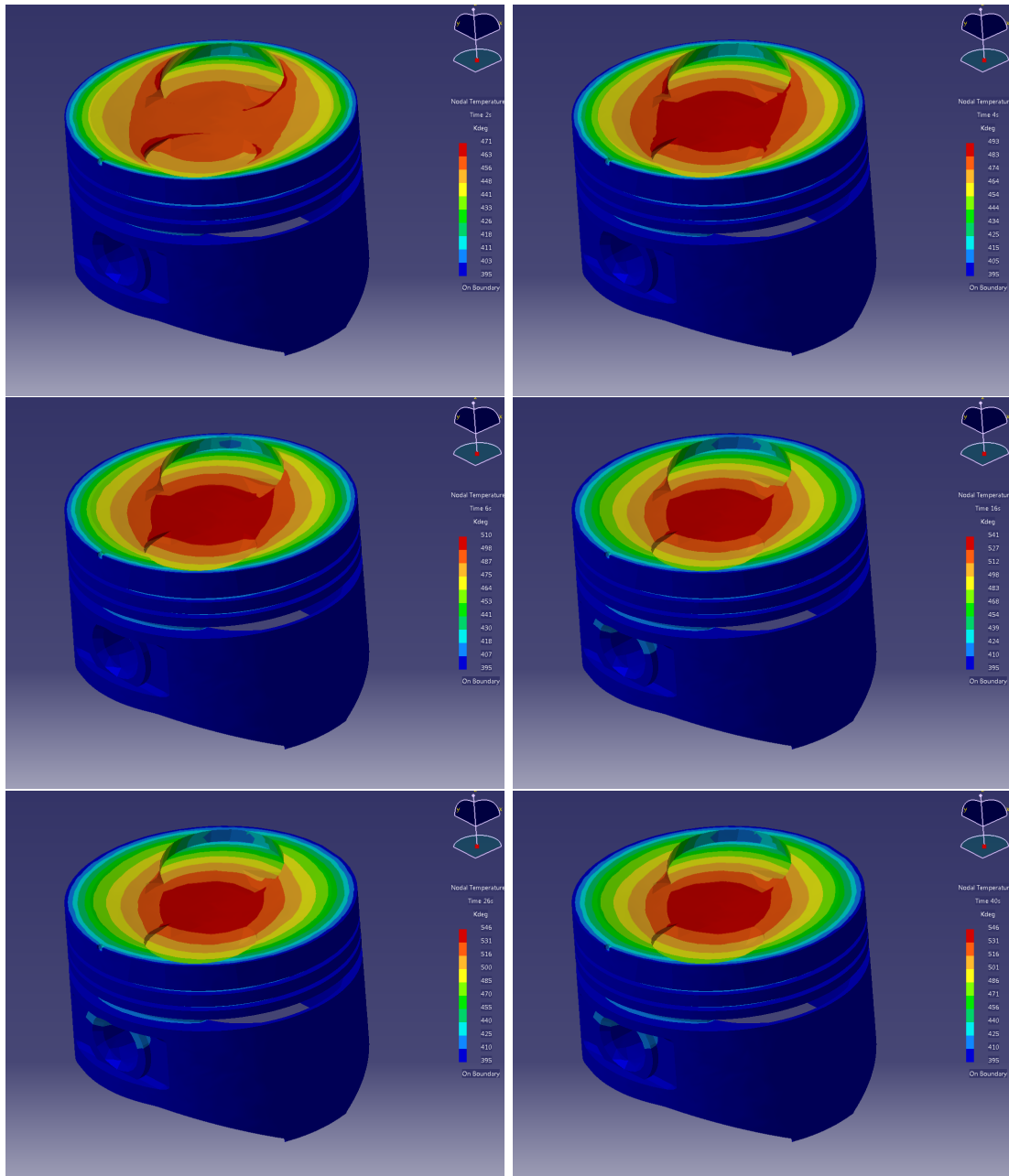


Figura 13.1: Variação da temperatura no componente ao longo de 40 segundos

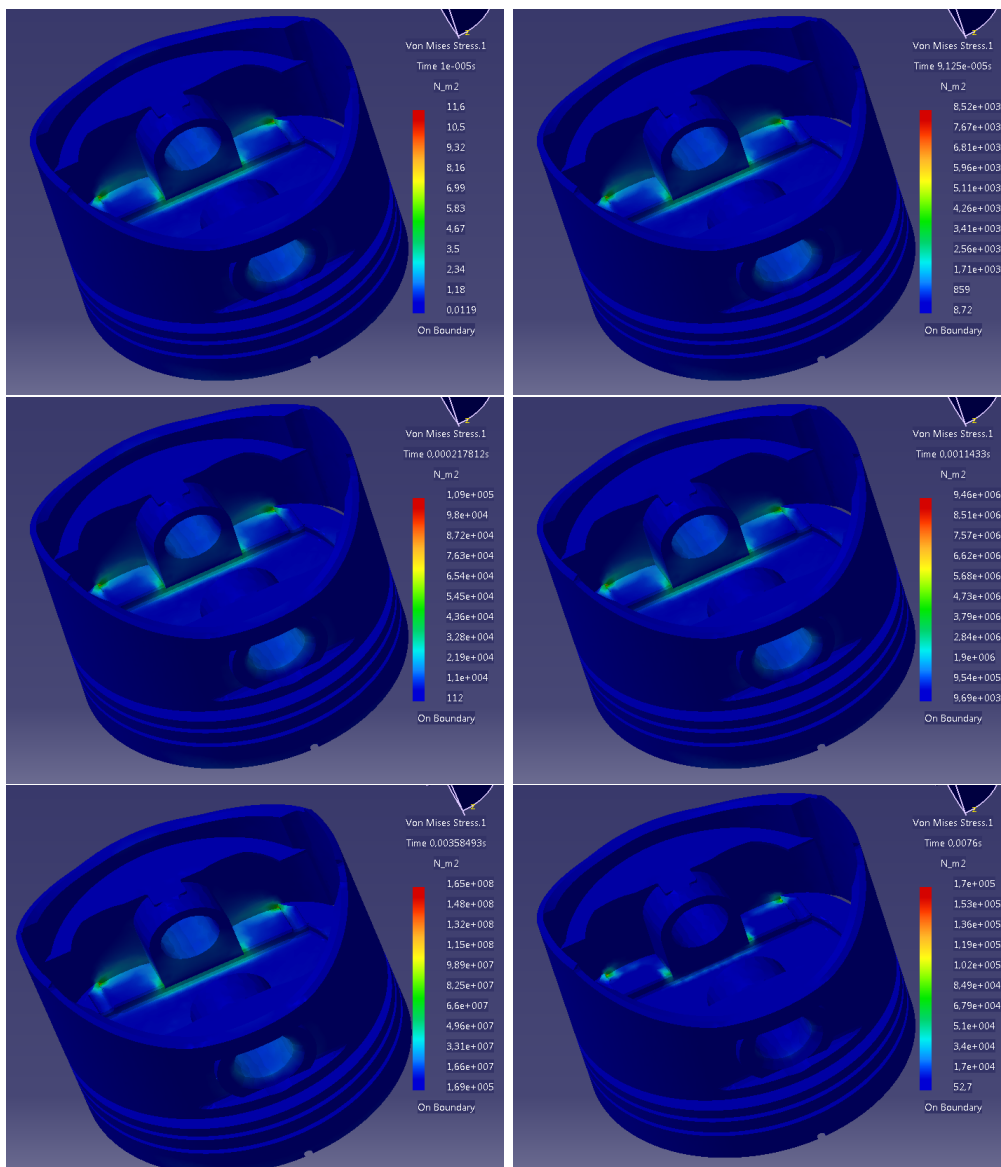


Figura 13.2: Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio estrutural base

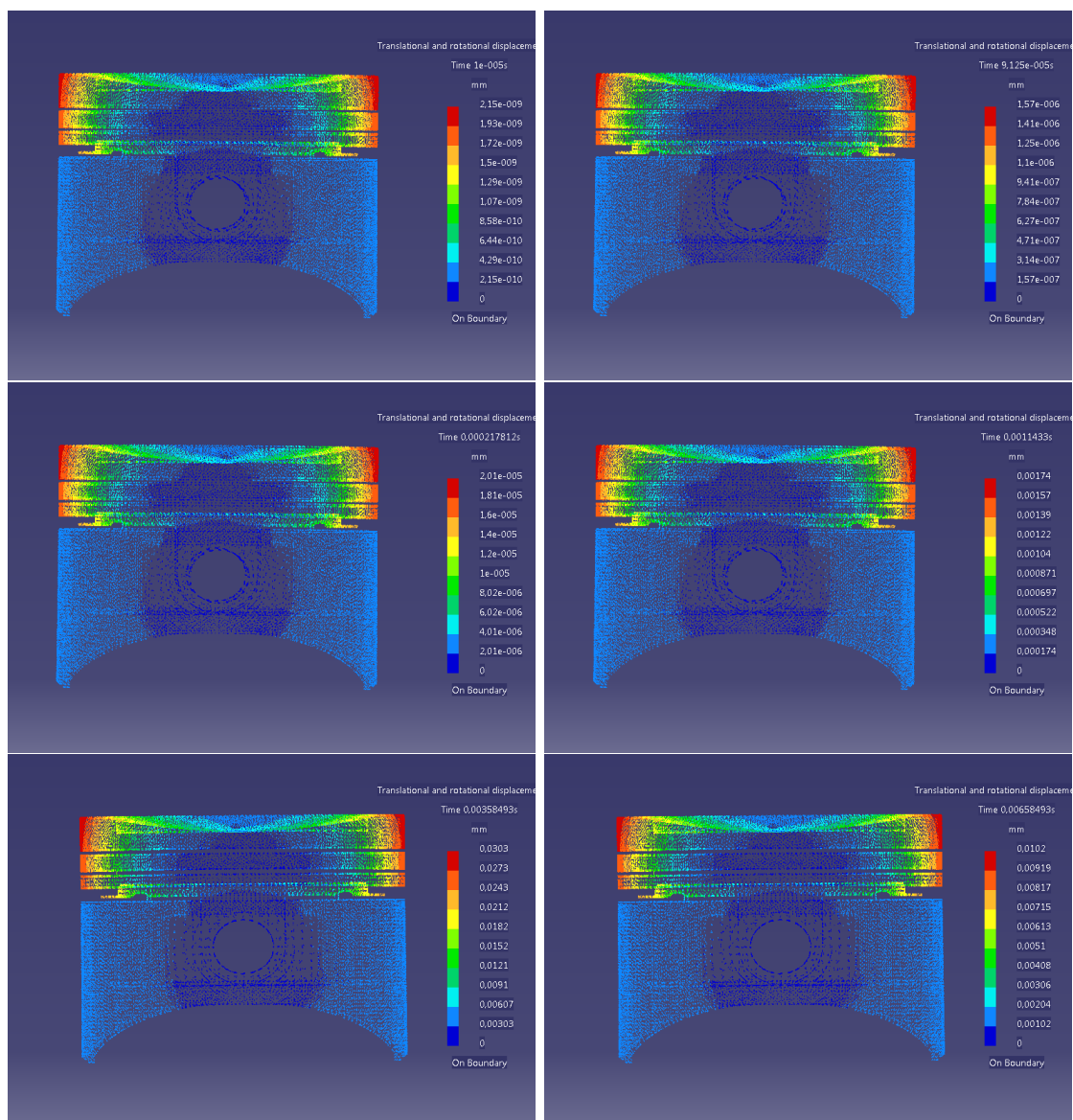


Figura 13.3: Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio estrutural base

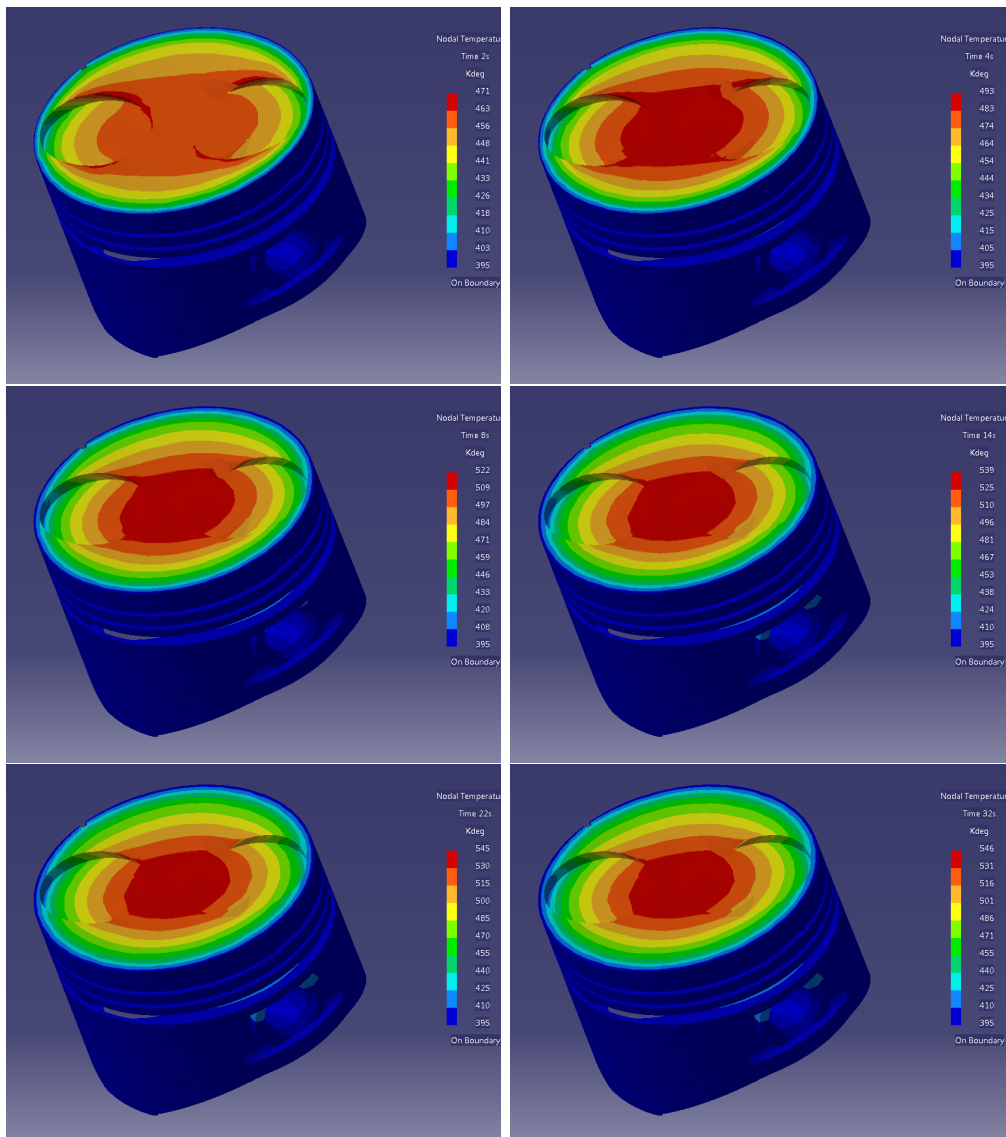


Figura 13.4: Variação da temperatura no componente com influência do fluxo de ar, ao longo de 40 segundos

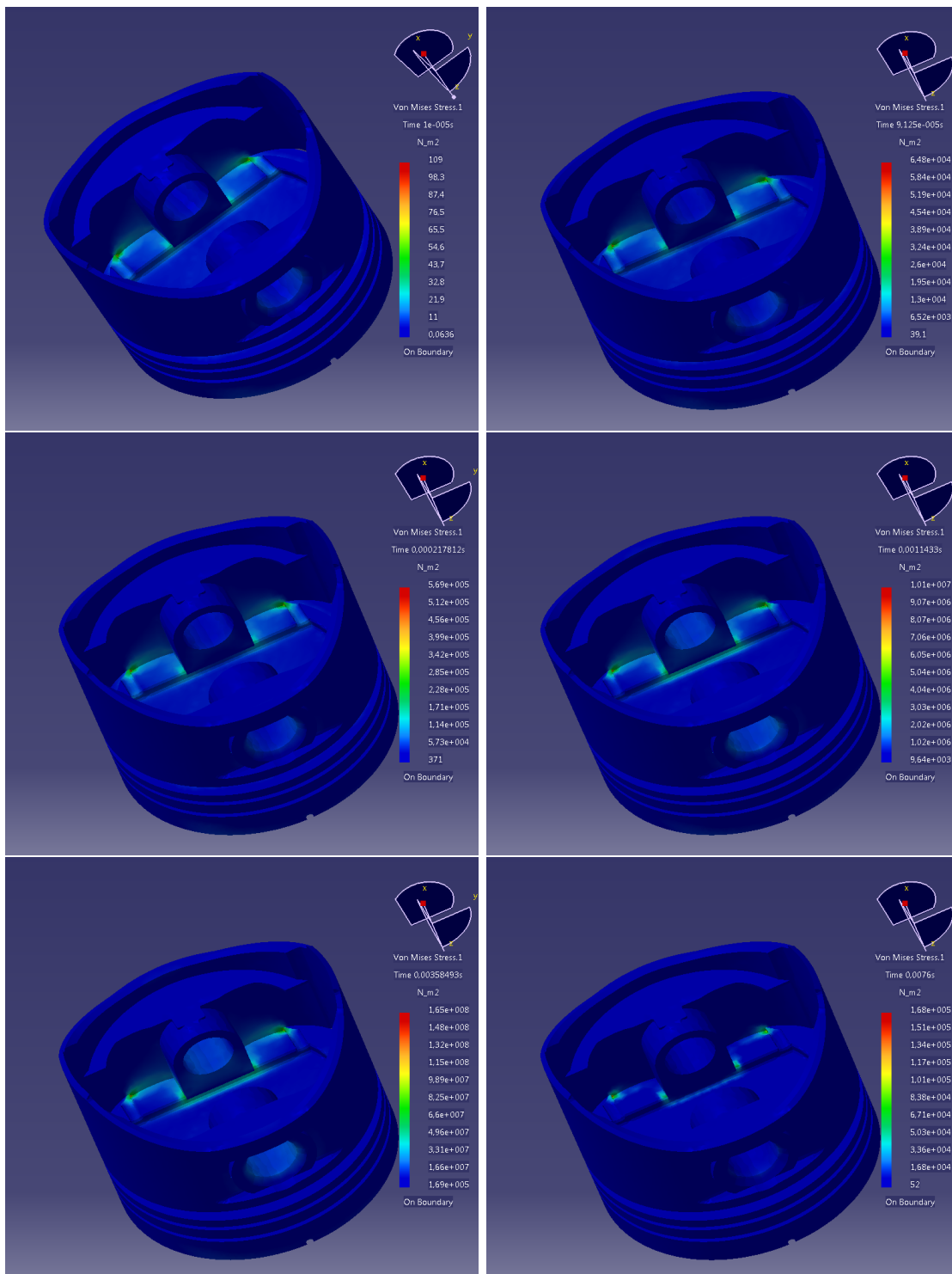


Figura 13.5: Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio estrutural sobre a influencia do atrito

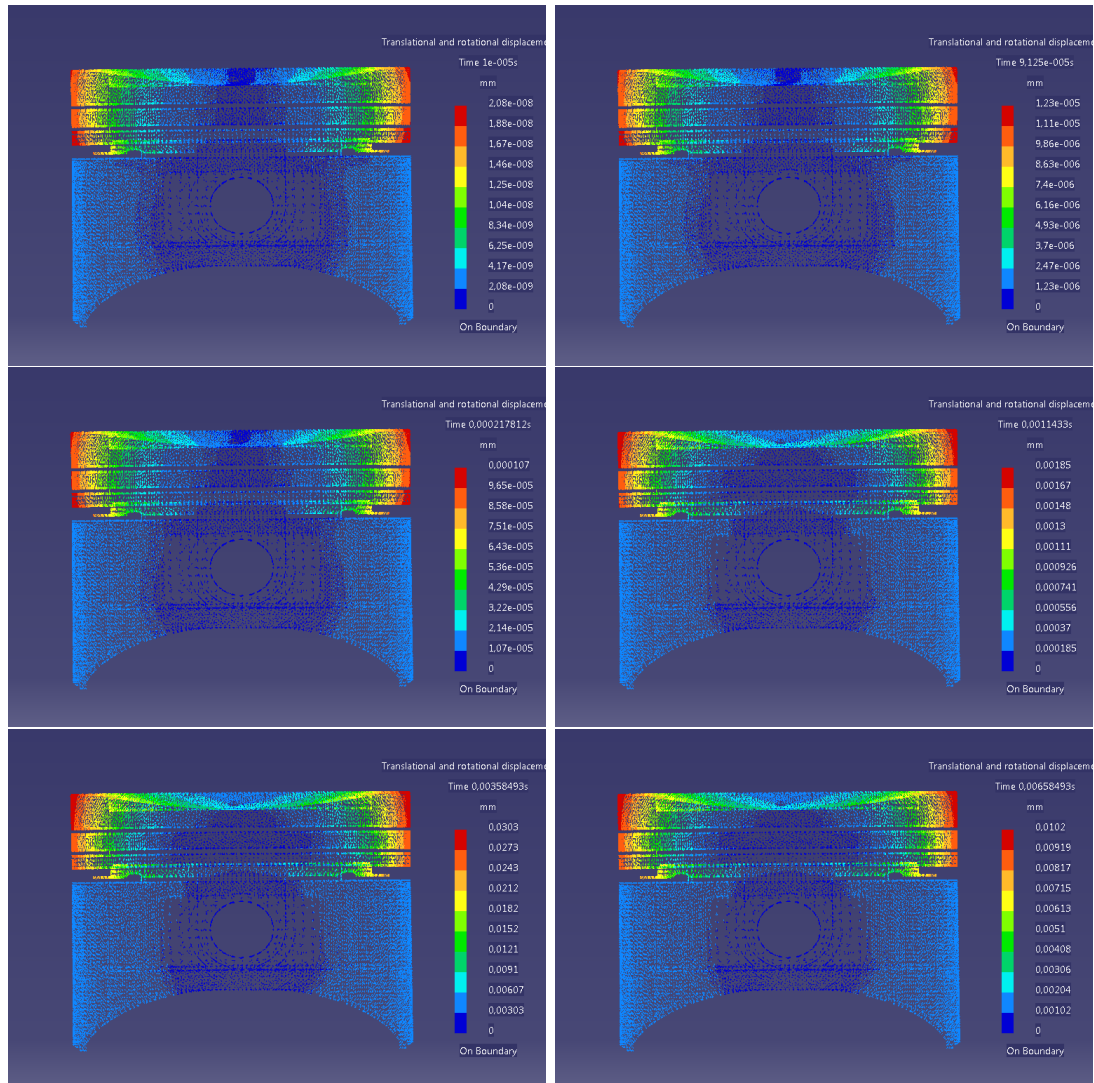


Figura 13.6: Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio de atrito

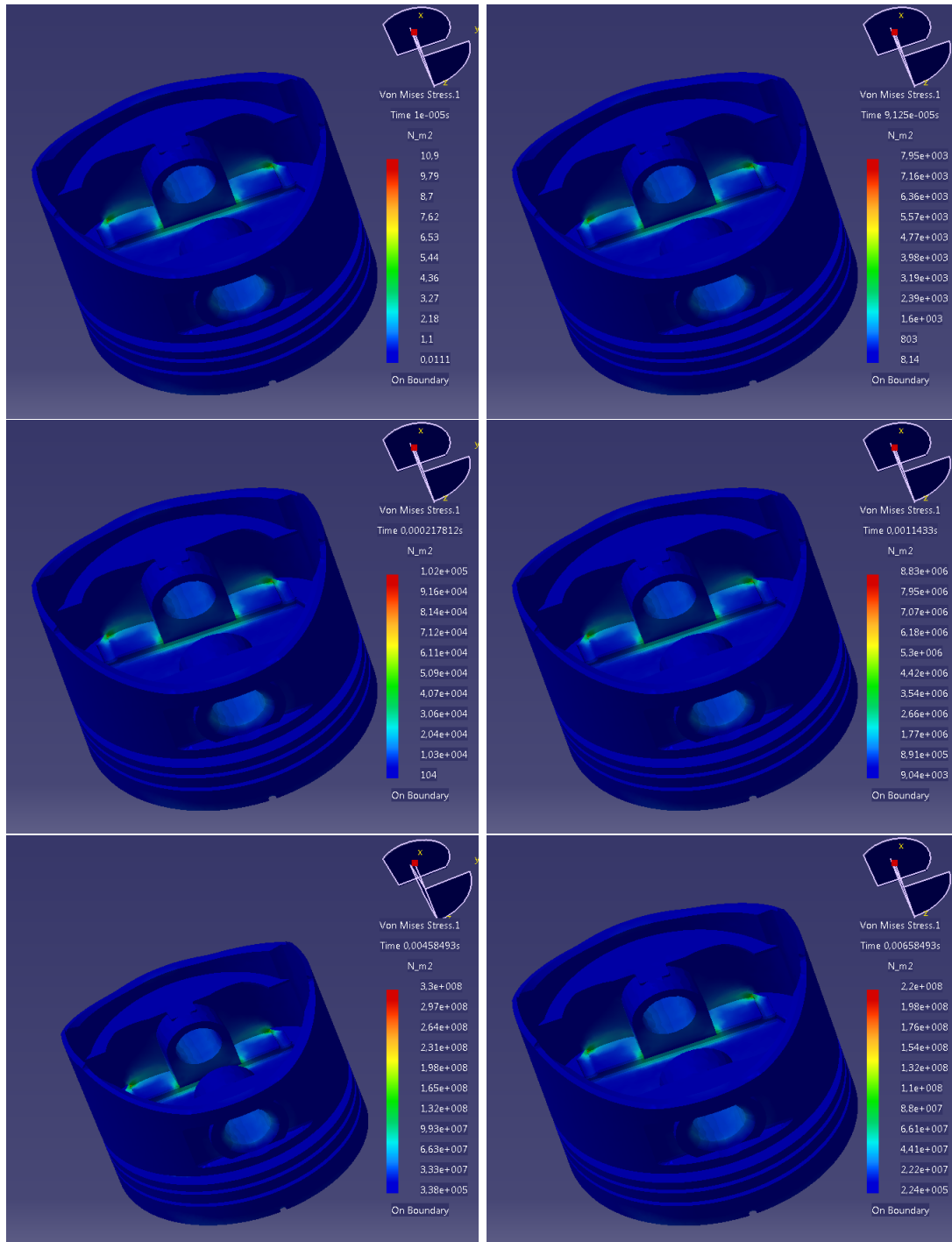


Figura 13.7: Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio de detonação ligeira

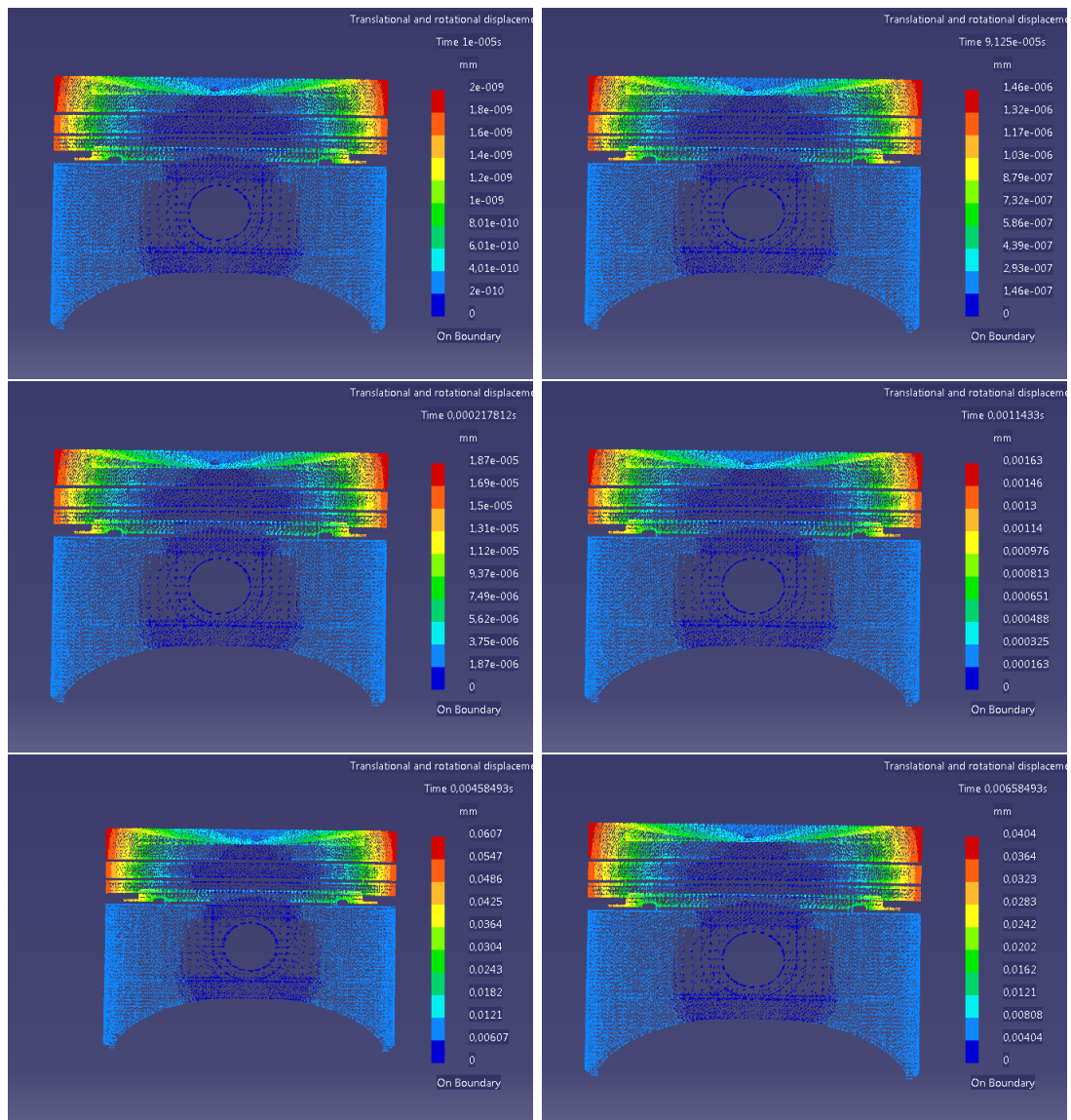


Figura 13.8: Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio de detonação ligeira

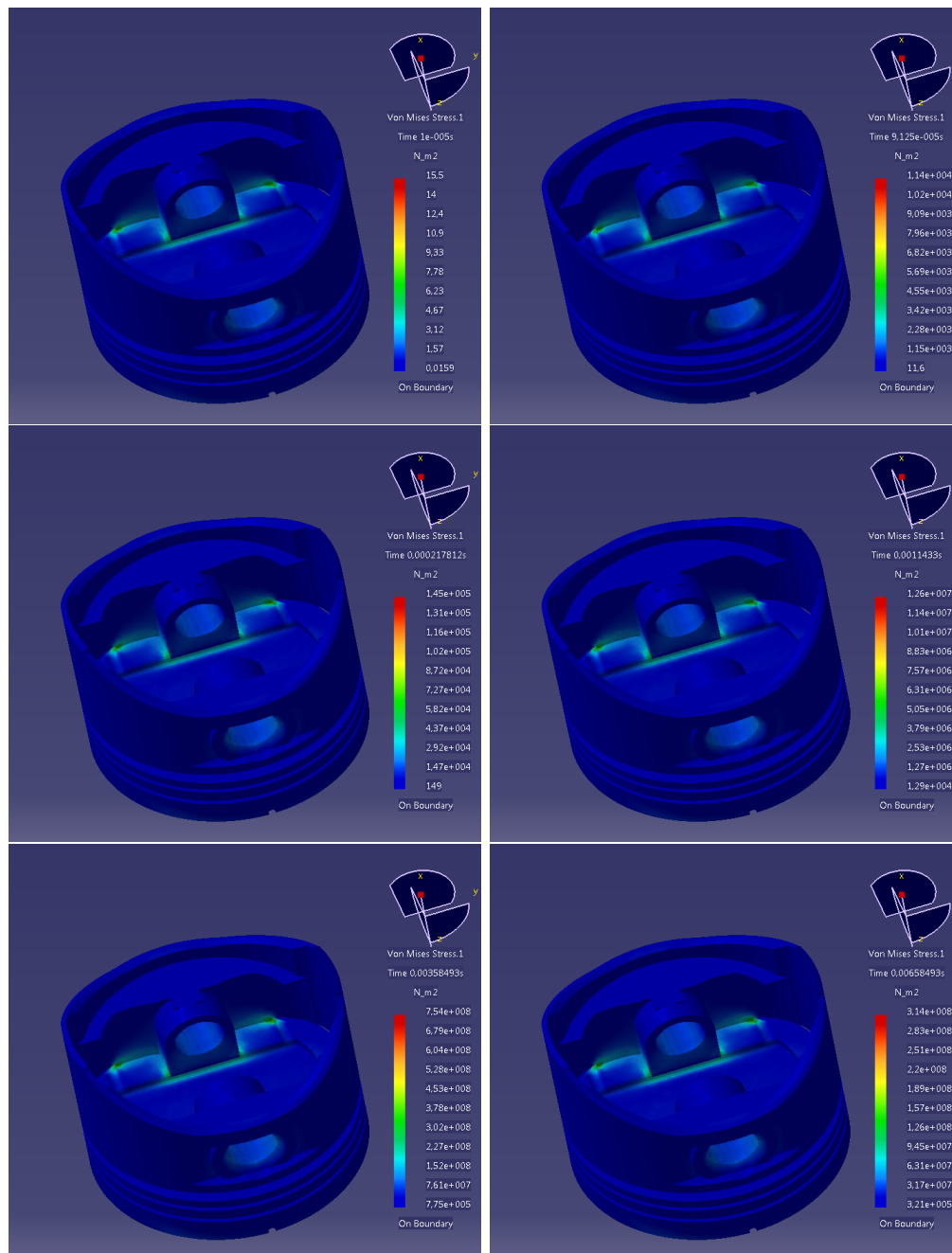


Figura 13.9: Variação da tensão de Von Mises ao longo do ensaio sobre a detonação elevada

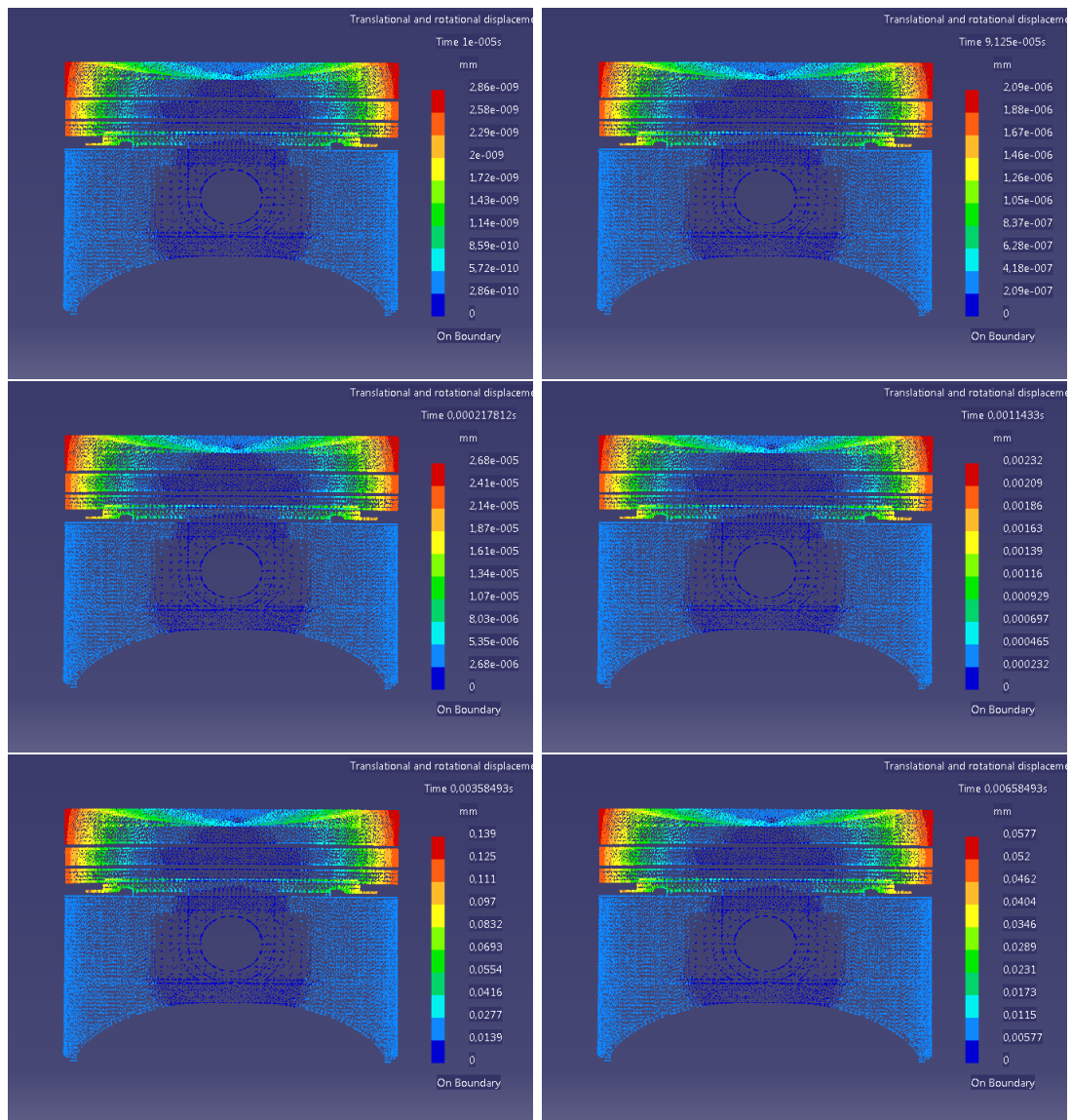


Figura 13.10: Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio sobre a detonação elevada

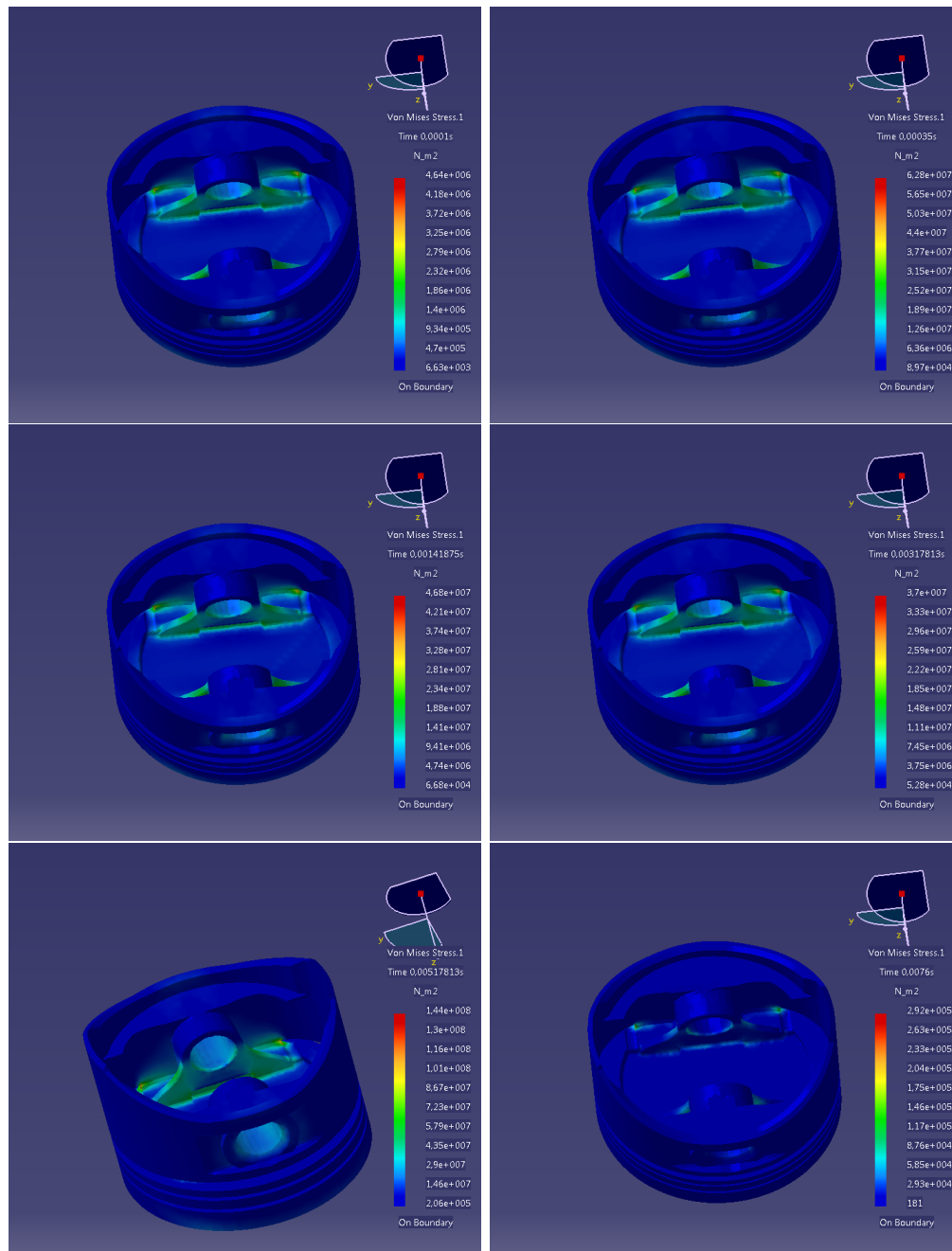


Figura 13.11: Variação da tensão de Von Mises durante um ciclo de compressão e explosão de acordo para o pistão melhorado

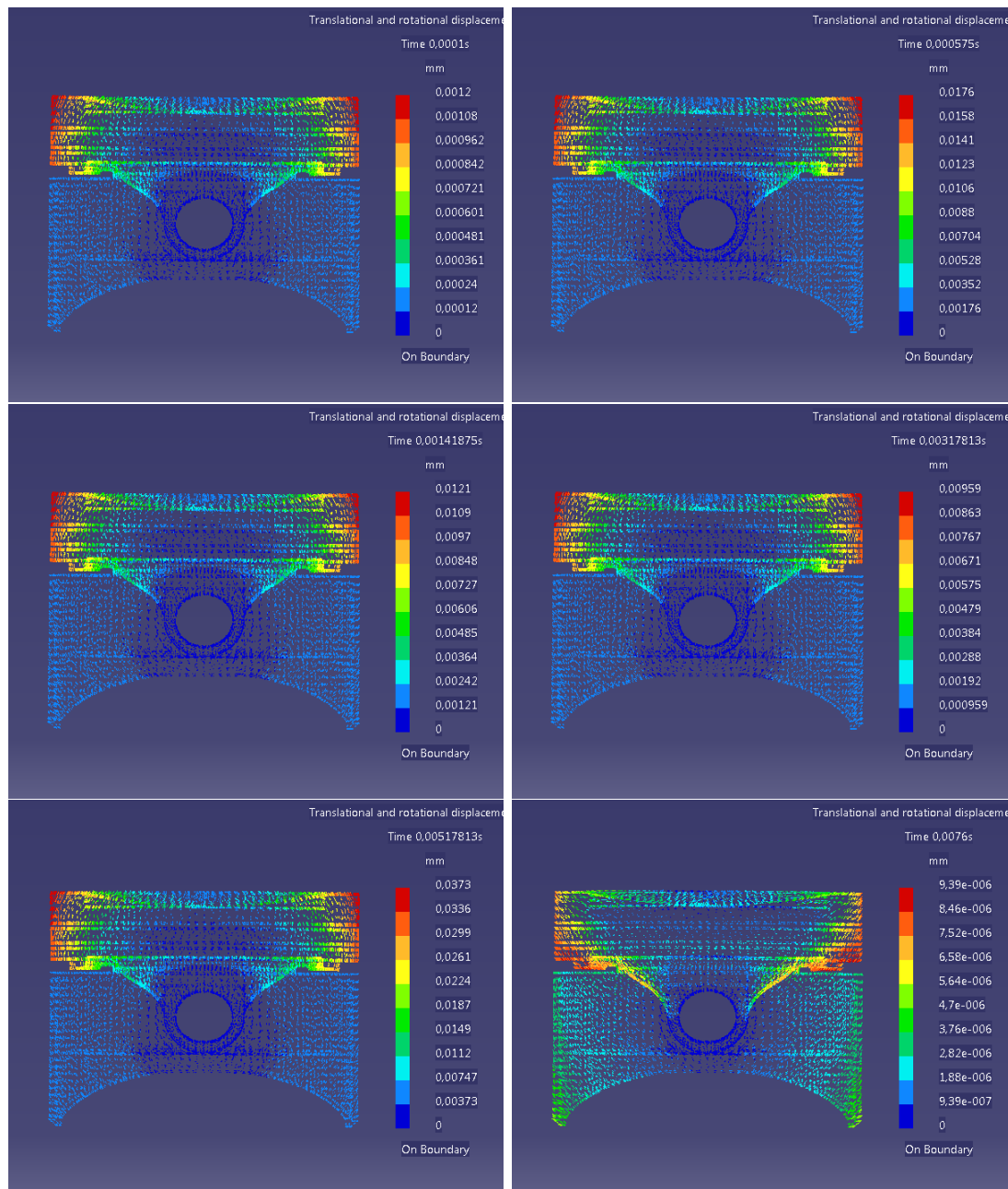


Figura 13.12: Variação dos deslocamentos ao longo do ensaio pistão melhorado

Bibliografia

- [1] Paras B. Shah. An Efficient Piston Design Methodology Including Secondary Dynamics and Elastohydrodynamic Lubrication *Dissertation for the degree of doctor of Mechanical Engineering* **36**, 2008.
- [2] S. Srinivasan. Automotive Engines. *Tata McGraw-Hill* , 2001.
- [3] Blair, M.F., J. Heat transfer 105,33 e 41, 1983
- [4] <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=217&pageid=2144417131>
- [5] ABAQUS 6.8. Pawtucket, RI: Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., 2008.
- [6] F.S.Silva. Fatigue on engine pistons-A compendium of case studies *Dissertation for the degree of doctor of Mechanical Engineering.* , 2004.
- [7] P.A.Lakshminarayanan, Nagaraj S.Nayak. Critical component Wear in heavy duty Engines *Cochrane Database Syst Rev* 2008.
- [8] T.Boukharouba, M. Elboujdaini, G Pluinage. Damage and fracture mechanics.Failure analisis of engineering materials. *Springer* , 2009.
- [9] C. Parra. Heat transfer investigations in a modern diesel engine *Dissertation for the degree of doctor of Mechanical Engineering University of Bath*, 2008
- [10] ZARUL SHAZWAN BIN ZULLKAFLI. FAILURE OF PISTON ENGINE USING FINITE ELEMENT ANALYSIS. *University of Malaysia*
- [11] Kevin L. Hoag. Vehicular Engine design *SpringerWienNewYork* ,2006
- [12] D.Apelian. Aluminum Cast Alloys:Enabeling Tools for Improved performance *North American Die Casting Association, Wheeling, Illinois.*,2009
- [13] Cho JR, Joo YS, Jeong HS. The Al-powder forging process: its finite element analysis. *J Mater Processing Technol* 111(1?3):204?9. 2001
- [14] Stolarski TA, Zhou Q. Temperature friction characteristics of used lubricant from two-stroke cross-head marine diesel engines. *Wear* 2002
- [15] ABAQUS 6.10. Pawtucket, RI. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc.
- [16] Soares, Pinto *Aços e Tratamentos Térmicos*

- [17] Smith, William *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, Mc Graw-Hill
- [18] Michael F. Ashby *An introduction to Microstructures, Processing and design*, Mc Graw-Hill
- [19] Campos, António Gil d'Orey de Andrade. *Modelação e Análise Numérica do Comportamento Mecânico e Térmico das Ligas de Alumínio*, Tese de Doutoramento de 2005
- [20] <http://www.mundialli.com.br> consultado em 06/02/2013
- [21] Filipe Miguel Ferreira Nascimento *Processamento por Fricção Linear: Caracterização e Análise de Ligas de Alumínio Processadas AA5083-O e AA7022-T6*, Tese de mestrado de 2007
- [22] T. S. Srivatasana, J. Mattingly. *Influence of heat treatment on the tensile Properties and Fracture Behaviour of alloy-ceramic particle composite*, University of Akron, USA
- [23] Totten, George E. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*, Mc Graw-Hill
- [24] <http://www.uddeholm.com> consultado em 05/02/2013
- [25] Dias, V. Dias *Mecânica e resistência dos materiais*, 3ª edição, 2004
- [26] Martins, Paulo ; Rodrigues, Jorge. *Tecnologia Mecânica: tecnologia de deformação plástica*, Volume I, Escolar Editora.
- [27] Dominique François, André Pineau; Zaoui, André. *Mechanical Behaviour of Materials*, Klumer Academic Publishers
- [28] Jacob Lubliner *Plasticity Theory*, University of California at Berkeley, 2006
- [29] De Wiitt; Bergaman; Lavine. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6ª edição
- [30] Willian D. Callister, JR. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*, e-text
- [31] Özisik, M. Necati *Transferência de calor: um texto básico*, Editora Guanabara
- [32] Padilha, Ângelo Fernando. *Materiais de Engenharia: Micro-estrutura e Propriedades*, edição Hemus
- [33] Fionn Dunne; Nik Petrinic. *Introduction to Computational Plasticity* , Oxford University Press, 2005
- [34] Filipe Miguel Ferreira Nascimento Farhad B Bahaaideen *Electroless Ni-PC(graphite)-SiC composite coating and its application onto pistons of a small two stroke utility engine*, Journal of Scientific & Industrial Research 2010
- [35] Internal Combustion Engine Fundamentals *McGraw-hill*, John B Heywood, 1988
- [36] Bosh. *Automotive Handbook*, Wiley, 2007

-
- [37] Willard W. Pulkrabek *Engeneering Fundamentals of the Internal Combustion Engine* Pearson 2003
- [38] M. R. Ayatollahi*, F. Mohammadi and H. R. Chamani *Thermo-Mechanical Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Piston* 2009
- [39] Yanxia Wang and Hui Gao *Research on Optimization for the Piston Pin and the Piston Pin Boss* 2011
- [40] Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.