IGOR GONZAGA PORTO

**Interferências tribológicas na união do cabeçote
associados à vedação e seus efeitos no processo de
aperto da junta aparafusada**

São Paulo

2017

IGOR GONZAGA PORTO

**Interferências tribológicas na união do cabeçote
associados à vedação e seus efeitos no processo de
aperto da junta aparafusada**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Engenharia
Automotiva

Orientador: Prof. Dr. Tiago Cousseau

São Paulo

2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às três pessoas que dão real sentido a minha vida: meu pai José Vicente, minha mãe Margaret e minha irmã Gabriela. Vocês são a razão de todas minhas conquistas!

AGRADECIMENTOS

- A Scania, por ter apostado em mim e ter dado todo suporte para que a pesquisa pudesse ser feita com tranquilidade e profundidade necessária.
- Aos meus colegas de trabalho, principalmente ao Torque Team, Guilherme de Freitas, Henrique Moura, Osvaldo de Souza, Jurandir Amaral, Eduardo Soares, Damon Henrique, Arnaldo Gomes, Eduardo Xavier e Delson Menezes, que mesmo sob alta demanda de trabalho e dificuldades do dia a dia, souberam batalhar lado a lado e compreender minhas limitações.
- Às minhas lideranças, Daniel Chiapesan e Fernando Pazzotti, que compreenderam as minhas ausências, me apoiaram em todas as necessidades e incentivaram a busca pelo conhecimento. Sem o apoio dos senhores não teria sido possível.
- Ao meu orientador Tiago Cousseau, que foi parte integrante de todas as buscas dessa pesquisa, mapeando todas as direções e contribuindo para ideias, tanto teoricamente quanto experimentalmente.
- Ao professor Dr. Amilton Sinatora, pela orientação competente e atitude positivista nos momentos de discussões.
- Ao Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento da “Metalac SPS Indústria e Comércio Ltda”, especialmente ao Kauê Cruz e Michele Pérola, que contribuíram decisivamente nos ensaios realizados no próprio laboratório da empresa, propondo ideias e melhorias, além de ajudarem com toda presteza e atenção.
- Aos colegas mestrandos, Luis Antônio Ferraz, Pedro Santos, Ewerton Correa, Marina dos Santos, Alexandre Tanaka e Gustavo Martioli, sempre ao meu lado na busca por trabalhos de alto nível.
- Aos meus amigos verdadeiros, que me deram forças para não desistir.
- A Deus por ter me dado saúde e estar comigo sempre.

RESUMO

O meio corporativo, principalmente quando se trata de montadoras automotivas, é carente de conhecimento dos fatores que podem influenciar o processo de união entre pares tribológicos. Quando há um fim específico, como o tema deste trabalho: assegurar níveis de controle capazes de eliminar os riscos de uma vedação deficiente na câmara de combustão com custo mínimo, tal carência é ainda maior. O estudo da tribologia inerente à união entre cabeçote e bloco do motor diesel é fundamental para se compreender a que ponto é possível garantir a melhor estanqueidade possível, especialmente no que esteja relacionado ao processo rotineiro de aperto na linha de produção. Nesse sentido, a investigação proposta neste trabalho tem o claro objetivo de propor melhores condições técnicas de vedação ao caso particular da união entre cabeçote e bloco do motor de forma a eliminar / minimizar qualquer influência externa durante o aparafusamento do par supracitado. Adicionalmente, o conhecimento aqui exposto poderá ser difundido a muitas outras aplicações similares nas quais a fixação aparafusada está atrelada a funções que não apenas de fixação, podendo estas estarem inclusive em outros universos do produto, tais como motores, cabinas, eixos e transmissão.

ABSTRACT

The automobile corporate field has a lack of knowledge when the subject is related to tightening specific issues, especially regarding tribological studies. When there is a specific goal as this thesis theme: ensure all the control levels to eliminate sealing deficiency risks inside combustion chamber in a low investment cost, the needs are even higher. The tribological study between diesel engine block and its cylinder heads assembly is essential to comprehend what is necessary to have the best possible sealing, mostly when it's related to the routine on the assembly tightening process. Thinking on that, this work has the goal to propose the best condition on fastening technique that guarantees the sealing to any superficial topography roughness. Additionally, the acquired knowledge will be spread to other similar applications that are not unequally associated to bolted joints, but also in other vehicle universes, such as engines, cabs, axles and transmissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de aperto na linha de montagem	14
Figura 2 – Vista superior do cabeçote	15
Figura 3 - Conversão de junta concentricamente carregada em modelo mecânico de mola simples. Legenda: F_A (solicitação axial), δ_s (resiliência de fixador) e δ_p (resiliência de junta).	16
Figura 4 - Ilustração do número de fixadores necessários para atingir 230 kN.	22
Figura 5 - Sistema de aperto multifuso.....	23
Figura 6 - Curva de aperto do controlador da ferramenta de aperto – torque x ângulo	24
Figura 7 - Resultados da análise em elementos finitos de superfícies de contato entre pares tribológicos – compactação superficial.....	25
Figura 8 - Gráfico Comparativo – compactação superficial	26
Figura 9 - Janela de Aperto	29
Figura 10 - Gráfico de aperto até a ruptura – torque x ângulo	30
Figura 14 - Máquina de ensaio DTT	31
Figura 15 - Inserto do bloco do motor e contra peça do cabeçote	31
Figura 11 - Ilustração da trajetória da onda sonora.....	32
Figura 12 - Ensaio de teste de força de união via ultrassom.....	33
Figura 13 - Formas de utilização do ultrassom sem cristal piezoelétrico (a), com cristal piezoelétrico (b).....	33
Figura 16 - Corpos de prova para análise topográfica	36
Figura 17 - Perfilometria Óptica CCI, Taylor Hobson	36
Figura 18 - Resultado do gráfico de ruptura 1	40
Figura 19 - Resultado do gráfico de ruptura 2	40
Figura 20 - Resultado do gráfico de ruptura 3	41
Figura 21 - Janela de Aperto para pré-aperto	41
Figura 22 - Ensaio de resiliência combinada, torque alvo 210 Nm.....	42
Figura 23 - Ensaio de resiliência combinada, medida por ultrassom	42
Figura 24 - Gráfico de aperto do cabeçote 1 – 100 Nm + 300°	46
Figura 25 - Gráfico de aperto do cabeçote 2 – 100 Nm + 300°	46
Figura 26 - Curva de ruptura – torque x ângulo.....	47

Figura 27 - Projeção isométrica (a) e distribuição de alturas e curva de Abbott-Firestone (b)	48
Figura 28 - Distribuição espacial de picos correspondentes	51
Figura 29 – Pré-ensaio de perda de carga com combinações de perfis	52
Figura 30 - Medição de rugosidade da interface dos cabeçotes	52
Figura 31 - Medição de rugosidade da interface do bloco.....	52
Figura 32 - Numeração dos fixadores medidos.....	53
Figura 33 - Encosto do parafuso no bloco lixado	54
Figura 34 – Curva Coeficiente de atrito x Rugosidade	55
Figura 35 – Gráfico de aperto do parafuso 12, estratégia 100 Nm + 300°	59
Figura 36 – Gráfico de aperto do parafuso 31, estratégia 100 Nm + 300°	59
Figura 37 – Gráfico de distribuição de perdas de carga para amostras 2,0 μm	60
Figura 38 – Gráfico de distribuição de perdas de carga para amostras 0,2 μm	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resiliências combinada, do parafuso e da junta	43
Tabela 2 - DTT real	43
Tabela 3 – Comparativo das parametrizações da estratégia de aperto atual e sugerida	44
Tabela 4 - Resultados da validação da nova estratégia de aperto.....	45
Tabela 5 – Parâmetros de altura das superfícies	49
Tabela 6 – Parâmetros de Abbott-Firestone.....	50
Tabela 7 - Resultados de rugosidade medida	53
Tabela 8 - Resultados obtidos para cabeçote alterado nas duas interfaces	54
Tabela 9 - Resultados obtidos para cabeçote alterado apenas na interface com a junta de vedação	54
Tabela 10 – Comparativo entre as perdas de carga dos fixadores para as duas condições de alterações topográficas	56
Tabela 11 – Perdas de carga para perfis topográficos de rugosidade aritmética 2,0 μm	57
Tabela 12 – Perdas de carga para perfis topográficos de rugosidade aritmética 0,2 μm	58
Tabela 13 – Parâmetros topográficos para os diferentes acabamentos superficiais estudados.....	62

SUMÁRIO

1	Introdução	10
1.1	Objetivo Geral.....	12
1.2	Objetivos Específicos	12
2	Justificativa.....	13
3	Unidade de Análise	14
3.1	Objeto de Análise	15
4	Revisão Bibliográfica	16
4.1	Juntas Rigidamente Aparafusadas.....	16
4.2	Tratamento Superficial e Fricção no Processo de União.....	18
4.3	Controle de Torque e Ângulo Pós Escoamento.....	20
4.4	Sistemas de Aperto	22
4.5	Fenômenos Tribológicos	24
4.5.1	Vedação	25
4.5.2	Compactação Superficial.....	25
5	Metodologia	27
5.1	Redimensionamento de Aperto	27
5.1.1	Procedimento de Cálculo Analítico.....	27
5.1.2	Ensaio Experimentais	30
5.2	Estudo topográfico associado a perda de carga.....	35
5.2.1	Análise topográfica	35
5.2.2	Ensaio de perda de carga e combinação de perfis topográficos extremos	37
6	Resultados	39
6.1	Redimensionamento dos parâmetros de aperto.....	39
6.2	Estudo topográfico associado a perda de carga.....	47
7	Discussão.....	63

8	Conclusão	65
9	Trabalhos futuros	66
10	Anexo	67
11	Referências	68

1 Introdução

A vedação entre o bloco e o cabeçote no motor diesel é fator primordial para o funcionamento eficaz em que se espera garantir o mínimo de perda de pressão interna na câmara de combustão. Para tanto, é preciso assegurar o melhor assentamento possível entre peça e contra peça e, por isso, caso este não ocorra, seja por ineficiência no processo de união ou por deficiência no acabamento superficial das faces das peças, o desempenho do processo de geração de potência certamente será comprometido.

O diagnóstico das influências da admissão de ar dentro da câmara de combustão, diante de sua magnitude, é algo ainda pouco explorado dentro do universo interno dos motores diesel e um dos fatores que poderia estar associado a eficiência da mistura durante a entrada do fluxo de ar é a vedação entre cabeçote e seu respectivo bloco.

Existem alguns meios de se garantir a estanqueidade os quais são comumente feitos empiricamente e, por esse motivo, caberiam investigações de grande significância que trariam maior conhecimento não somente para a montagem em questão, mas também para diversos pontos de alta criticidade tanto em motores quanto nas demais estruturas que compõem o veículo, tais como chassis, cabinas, transmissões e eixos.

O caso em destaque no presente trabalho é a montagem do cabeçote ao bloco do motor. O mesmo é composto por seis cilindros sob os quais estão montados seis cabeçotes com seis parafusos prisioneiros que o unem ao bloco do motor por meio de um sistema de aperto automatizado composto por seis fusos. O sistema realiza mediante uma estratégia pré-determinada as sequências, velocidades e controles de torque e ângulos de giro durante o aparafusamento. Uma das formas de se assegurar a estanqueidade da câmara de combustão é promover o melhor rendimento possível da geração de força dos fixadores. É importante ressaltar que à medida em que se tem rendimentos maximizados, melhor será o aproveitamento na extração de força por parte do fixador, haja visto que o processo de união é uma composição de tensões de tração e torção, sendo a primeira a responsável por manter os pares de junta unidos. Sendo assim, ao maximizar a capacidade de extração do fixador minimiza-se as perdas de energia que promovem torção e, conseqüentemente maiores tensões de tração.

Outro fator de grande influência e pouco explorado é a topografia das interfaces parafuso-cabeçote-junta de vedação-bloco, haja visto que as rugosidades das faces interferem diretamente no torque do aperto, nas deformações elastoplásticas promovidas pelas forças de aperto e conseqüentemente na vedação, sendo portanto, um dos fatores principais das perdas de energia supracitadas conforme posto nas análises descritas do artigo do Garcia (2008)

Nessa linha, sente-se a necessidade de melhor compreender os mecanismos de estanqueidade das interfaces cabeçote-junta de vedação-bloco, os quais incluem o sistema de fixação por parafusos, bem como o acabamento superficial da interface.

Adicionalmente, pode-se alcançar em uma análise aprofundada a otimização do acabamento superficial das interfaces parafuso-cabeçote-junta de vedação-bloco que garanta a estanqueidade com o menor número de processos de usinagem e menor força de aperto, podendo em última instância até mesmo eliminar ou reduzir a espessura da junta de vedação.

Almeja-se, portanto, estudar a tribologia envolvida no processo de montagem aparafusada do conjunto parafuso-cabeçote-junta de vedação-bloco utilizando as teorias de contato envolvidas na vedação da junta, bem como no processo de união aparafusada, para quantificar, através de conhecimentos científicos a situação 'ideal' dos pares tribológicos envolvidos.

Adicionalmente, pretende-se avaliar de que forma o assentamento das peças, mesmo após o relaxamento proporcionado pelas mudanças de temperatura e vibrações do motor, interfere na união entre as peças e na vedação entre as mesmas.

É importante ressaltar que o roteiro de cálculo para dimensionamento de fixadores e método de processo de união utilizado pelas montadoras automotivas com maior participação no mercado mundial em seus projetos de união aparafusadas é a VDI 2230. No entanto, o roteiro, apesar de nortear a parametrização para escolha mais plausível acerca das tensões suportáveis pelo fixador e junta, não propõe experimentação prática que promova maior assertividade nos dimensionamentos, principalmente no que diz respeito a técnicas de montagem mais precisas. Nesse sentido, fica sob critério do dimensionador optar por alguns dados de entrada. Sendo assim, esse trabalho visa realizar ensaios que agreguem precisão ao

dimensionamento da estratégia de união para se atingir os objetivos esperados e incorporá-los à metodologia de dimensionamento.

1.1 Objetivo Geral

Obter a melhor estratégia de aperto que otimize a utilização da capacidade de geração de força do conjunto de fixadores do cabeçote para condições diversas de perfis topográficos de face de encosto, garantido a melhor vedação possível.

1.2 Objetivos Específicos

- Estudar os efeitos tribológicos associados à força de união gerada pelos seis fixadores de cada cabeçote por bloco, bem como pela deformação a nível de rugosidades da interface entre cabeçote e tampa do cabeçote.
- Apurar e aperfeiçoar a estratégia de aperto para o assentamento das peças após os testes de funcionamento do motor de forma que seja possível melhorar os níveis de relaxamento da junta aparafusada.
- Ensaiair corpos de prova em condições adversas de perfis topográficos de face do cabeçote e bloco de forma a validar ou descreditar a estratégia de aperto dimensionada, no sentido de avaliar máximas e mínimas perdas de carga.

2 Justificativa

O acabamento superficial das interfaces dos cabeçotes utilizadas no produto, bem como dos seus fixadores, são controlados rotineiramente, tanto pelo fabricante quanto pela montadora, pois sua influência é crucial na maioria dos métodos de união utilizados nas ferramentas em linha de produção. O artigo de Garcia (2008) demonstra de maneira simples os impactos do controle de fricção no aparafusamento. A montagem dos seis fixadores que assentam o cabeçote ao seu bloco é parcialmente influenciada pelas características superficiais dos mesmos e, por esse motivo, o método de aperto utilizado em linha de produção depende do controle de acabamento para ser executado com a qualidade esperada. Os impactos da falta de controle dos níveis de acabamento superficial refletem diretamente no processo de geração de força e posteriormente na perda de carga dinâmica, isto é, decréscimo de tração dos fixadores após a junta sofrer esforços de fadiga.

Todas pesquisas e testes experimentais em busca de otimizar e controlar o *swirl* do motor diesel partem do pressuposto de que exista perfeita estanqueidade entre peça e contra peça. Portanto, entende-se que o bom assentamento entre o par que sofre esforços naturais do funcionamento do motor como vibrações e constantes ciclos de aquecimento e resfriamento é vital para o controle do *swirl*. Tendo em vista que é necessária a estanqueidade perfeita para o bom funcionamento do motor, o aperto entre cabeçote e bloco é superdimensionado. Este pode ser otimizado visto que internacionalmente já se verificam pesquisas visando remoção da junta de vedação, como mostra o artigo da Nagel (2009).

Além da aplicação citada, existem diversas outras em que a influência tribológica do fixador é fator determinante para se ter juntas mal assentadas que gerem problemas de desempenho do produto e/ou riscos de segurança. Vale apontar que a relação das forças de fixação necessárias para garantir a estanqueidade com o acabamento superficial do cabeçote e tampa do cabeçote são desconhecidas. Há uma preocupação da organização em evoluir seus métodos de união de maneira a se esquivar de interferências no processo de montagem e, por isso, o desenvolvimento do objeto de estudo é de grande valia por ter como externalidade todo o universo de uniões aparafusadas.

3 Unidade de Análise

Na linha de montagem da fábrica de motores são realizados os apertos dos seis parafusos do cabeçote sob junta de vedação e bloco de forma automatizada. Cada motor é composto por cinco cabeçotes (pode variar de acordo com a configuração do mesmo), e as uniões são feitas utilizando ferramenta de múltiplos fusos estacionários. A figura 1 demonstra o processo de montagem e em destaque os fixadores:

Figura 1 – Processo de aperto na linha de montagem
Fonte: o autor

Cada cabeçote é unido ao bloco por seis parafusos prisioneiros métricos M16 de classe 10.9, com flange, com tratamento superficial de fosfato de zinco quase amorfo e óleo secativo. Trata-se de uma aplicação crítica onde os fixadores devem apresentar alta estabilidade tribológica, fato que justifica a utilização desse tratamento superficial.

A figura 2 é a vista superior extraída do desenho de um dos cabeçotes que indica as seis posições dos fixadores.

Figura 2 – Vista superior do cabeçote
Fonte: SCANIA LATIN AMERICA (1994)

O laboratório de análises será o ambiente onde serão simulados comportamentos para diferentes assentamentos da junta e seus fixadores. Os ensaios são de grande valia para o estudo e permitem uma análise crítica das variáveis relacionadas ao aperto.

Já o laboratório de fenômenos superficiais da Escola Politécnica da USP contribuirá com as análises de superfícies e na compreensão da resposta tribológica do sistema. Além disso, estudar-se-á efeitos de rugosidade, lubrificação e estratégias de aperto dos fixadores rosqueados com auxílio do laboratório do fornecedor do parafuso sob análise (Metalac).

3.1 Objeto de Análise

Pretende-se estudar o cabeçote, junta de vedação, bloco do motor e seus seis fixadores. Portanto estarão envolvidos sistemas de aperto por fusos e seus respectivos *softwares* de controle.

4 Revisão Bibliográfica

4.1 Juntas Rigidamente Aparafusadas

Primeiramente é preciso compreender o que é uma junta rigidamente aparafusada. Segundo Silva (2014), trata-se de uma união entre duas ou mais partes desmontáveis de materiais de alta resistência mecânica que compartilham a mesma superfície de contato por meio de fixadores roscados.

O que mantém as partes unidas é a força de união, ou força de grampeamento (em inglês, *clamping force*). Este é o principal parâmetro considerado no mundo dos sistemas aparafusados e o mesmo pode ser influenciado por diversos fatores, dentre os quais está o fator tribológico entre fixadores e a junta, mais especificamente entre a face de encosto do fixador e o contato da rosca do mesmo com a rosca da peça ou porca.

O processo de aperto pode ser compreendido pelo modelo mecânico de mola simples, o qual obedece as leis de Hooke, onde as forças são diretamente proporcionais à deformação. A figura 3 ajuda a compreender o comparativo entre modelo e realidade.

Figura 3 - Conversão de junta concentricamente carregada em modelo mecânico de mola simples.
 Legenda: F_A (solicitação axial), δ_S (resiliência de fixador) e δ_P (resiliência de junta).
 Fonte: VDI 2230 (2003)

O método para extrair forças de união dos fixadores é por aplicação de torque, isto é, aplicar energia sob os fixadores de modo que os mesmo sofram alongamento elástico. Nesse sentido, o momento (ou, torque) aplicado no parafuso ou porca é a energia promovida pelo sistema de aperto que resulta em força.

Em média 40% da energia promovida pelo torque durante o aperto é dissipada para superar o atrito na rosca do fixador, 50% para superar o atrito entre junta e face de assentamento do fixador e apenas 10% da energia é utilizada para unir as peças efetivamente.

Diante das porcentagens é possível se ter dimensão de o quanto o fator tribológico influencia diretamente no processo de geração de força, haja visto que apenas 10% de toda energia fornecida no aperto é utilizada para manter os pares unidos.

O processo de união é uma composição de tensões de tração e torção, ou seja, estado combinado. Parte da energia proveniente do aperto promove torção, isto é, não gera qualquer força de grampeamento para manter a junta unida. Nesse sentido, as parcelas de torção e tração dependerão de fatores geométricos do parafuso e de fatores de fricção entre o contato da rosca do parafuso e a rosca da peça (ou porca, se for o caso). Quanto maior o parcela de tração, maior o rendimento dos fixadores e maior o seu nível de utilização. Quando se pensa em maximização do uso do parafuso para se utilizar diâmetros cada vez menores o objetivo é reduzir essa parcela de torção. Para se calcular o rendimento, utiliza-se a seguinte equação extraída da norma VDI 2230:

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1+3\left[\left(\frac{3}{1+(d_3/d_2)}\right)\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}+1,155 \cdot \mu_G\right)\right]}} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde,

η – rendimento do fixador

μ_G – coeficiente de atrito na rosca

d_2 – diâmetro efetivo da rosca

d_3 – diâmetro interno da rosca

p – passo da rosca

4.2 Tratamento Superficial e Fricção no Processo de União

A união por aperto em juntas aparafusadas ocorre pela rotação da porca ou cabeça do parafuso mediante a aplicação de esforços cisalhante e normal resultantes das tensões combinadas de tração e torção. Nesse sentido, no processo de geração de força responsável por manter peça e contra peça unidas, os coeficientes de atrito do fixador tanto em sua rosca quanto no contato da sua face com a junta de união influenciam diretamente nas parcelas de energia que são canalizadas para tensões de tração. O momento total aplicado (M_A) pode ser definido como a soma entre momento torçor na rosca (M_G) e momento sob a cabeça do parafuso (M_K):

$$M_A = M_G + M_K \quad (\text{Eq.2})$$

Segundo SILVA (2014), o momento torçor na rosca M_G pode ser definido pela mecânica dos planos inclinados pela seguinte equação:

$$M_G = F_M \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') \quad (\text{Eq.3})$$

$$\tan(\varphi) = \frac{p}{\pi \cdot d_2} \quad (\text{Eq.4})$$

$$\tan(\rho') = \frac{\mu_G}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

F_M – Força de união

φ – ângulo de hélice da rosca

ρ' – ângulo de atrito da rosca

Por definição o momento torçor na cabeça do parafuso é dada por:

$$M_K = F_M \cdot \frac{d_{KM}}{2} \cdot \mu_K \quad (\text{Eq.6})$$

Onde,

μ_K – coeficiente de atrito na cabeça do parafuso/porca

D_{KM} – diâmetro relativo

$$D_{KM} = \frac{2}{3} \left(\frac{d_K^3 - d_B^3}{d_K^2 - d_B^2} \right) \quad (\text{Eq.7})$$

Onde,

d_K – diâmetro do filete

D_B – diâmetro do furo

Para rosca com ângulo primitivo (α) de 60° , bastante comum à roscas métricas, temos a seguinte simplificação:

$$M_A = F_M \left[\frac{d_2}{2} \cdot \tan(\varphi + \rho') + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right] \quad (\text{Eq.8})$$

Portanto, o momento total aplicado é:

$$M_A = F_M \left[0,16 \cdot p + \mu_G \cdot 0,58 \cdot d_2 + \frac{D_{Km}}{2} \cdot \mu_K \right] \quad (\text{Eq.9})$$

Dessa forma está evidente pela equação do momento total aplicado que os atritos da rosca e da cabeça do parafuso estão diretamente associados à relação momento/força de montagem.

Para um determinado momento aplicado pode-se ter forças de união maiores caso os coeficientes de atrito no fixador sejam baixos e ter forças baixas para coeficientes de atritos altos. Por esse motivo que as montadoras exigem dos seus fornecedores de parafusos e porca o controle rigoroso dos acabamentos superficiais em lotes. Cada montadora estabelece seus limites máximos e mínimos de coeficientes de atrito de acordo com seus critérios de projeto, porém a maior parte delas trabalha entre 0,10 e 0,16. Normalmente os dois parâmetros considerados em uma análise técnica profunda são μ_G e μ_K (atritos na rosca e cabeça, respectivamente), no entanto, para simplificar a análise de qualidade um único parâmetro denominado μ_{GES} é tido como referência de média entres os atritos.

Atualmente, as organizações têm aprimorado a forma de avaliar as fricções entre fixadores e suas juntas distinguindo o tipo de material da junta e rosca fêmea envolvidos. Por exemplo, um parafuso interagindo com rosca de aço tem comportamentos distintos de quando interage com rosca de alumínio, conseqüentemente deve ter diferentes tolerâncias de controle. O mesmo ocorre nas interações de cabeça do fixador com a peça, seja ela de aço, alumínio, pintura a pó ou ferro fundido.

É importante salientar que estes limites, se reduzidos, trarão benefícios econômicos importantes na fixação aparafusada de qualquer componente. No entanto, a utilização

de baixos atritos com intuito de gerar níveis de força superiores esbarra-se em uma questão de limitação quanto ao controle de processo do fornecimento de tratamentos superficiais que garantam estabilidade para manter o processo capaz. Além disso, conforme o roteiro de cálculo VDI 2230, o uso de baixos atritos na rosca do fixador pode prejudicar o auto travamento do mesmo e gerar altas dispersões.

Em algumas aplicações onde se busca menores dispersões de atrito, utiliza-se recursos como óleo secativo para estabilizar a dispersão ou tratamentos superficiais mais sofisticados que garantam a restrição da faixa de valores. Isso normalmente é feito para situações excepcionais em que a mudança de classe do fixador, aumento de torque ou aumento da bitola seriam inviáveis, opta-se por consumir um item com maior custo mas que esteja sob níveis de atrito estável em faixa mais restrita.

O controle dessa faixa é primordial para se ter domínio da qualidade de união no processo de montagem, pois é um fator fundamental (além de outros que também influenciam) para ocorrência de um possível alongamento elastoplástico exagerado do fixador em decorrência de força excessiva (em casos de coeficiente de atrito baixos) ou união ineficaz causada por força baixa (em casos de coeficiente de atrito altos).

4.3 Controle de Torque e Ângulo Pós Escoamento

Em fase de dimensionamento da junta aparafusada são comumente utilizados pelos projetistas da indústria automotiva basicamente dois métodos de aperto, são eles: controle por torque e por torque e ângulo. A escolha do método influi diretamente nas precisões do processo na capacidade de força extraída e, portanto, nas geometrias (por esse motivo exigem mais ou menos investimento em ferramental).

O método de controle por torque é o mais simples, mais fácil de se executar e por isso não exige ferramental de alto custo, porém promove maiores imprecisões. É dimensionada para trabalhar no limite elástico do fixador e por controlar apenas o parâmetro torque, o dimensionamento é feito considerando-se maiores dispersões, devido a dependência do torque com o atrito (Equação 9), o qual é função dos materiais envolvidos, do acabamento superficial e das condições de aparafusamento.

Já o método torque e ângulo é mais preciso, pois define pré-aperto e posteriormente aplicação de ângulo, o que gera precisão na execução e reduz os efeitos da fricção no processo de geração de força, porém, necessita-se de ferramental mais sofisticado controlado por painel e transdutores que monitoram a execução e garantem menores dispersões. Este método pode ser dimensionado para utilização máxima das capacidades mecânicas do parafuso, isto é, o fixador deforma-se plasticamente sem sofrer falha funcional. Isso ocorre porque parafusos dimensionados por esse método possuem alta ductilidade, ou seja, a capacidade de se deformar em zona elastoplástica sem se romper, ou iniciar a estricção, é alta para os possíveis esforços, portanto, os riscos de falhas são controláveis. A fase ângulo do aperto (a última) é a mais precisa e seu dimensionamento é feito para que ultrapasse o escoamento em 100% dos casos. Por esse motivo extrai-se a máxima força do mesmo e menores dispersões precisam ser consideradas em cálculo. A consequência disso é que esse método permite que sejam utilizados parafusos menores para se ter a força esperada e manter a junta em funcionamento, conforme é reforçado por Garcia (2008) em sua terceira parte.

A ilustração da figura 4 representa conjuntos de parafusos necessários para se atingir o alvo de 230 kN de força de união. Observa-se que os métodos promovem a mesma força de grampeamento, no entanto a quantidade necessária de fixadores é diferente. Comparando-se as duas primeiras colunas da esquerda, o mesmo fixador, com as mesmas características mecânicas têm diferentes extrações de força de união para diferentes métodos. É preciso 10 fixadores de mesma classe e diâmetro utilizando controle por torque para gerarem a mesma força de 5 fixadores pelo método torque e ângulo pós escoamento. E ainda, ao comparar a coluna vermelha com a azul, percebe-se que para se ter 5 fixadores utilizando-se controle por torque, o diâmetro dos mesmos devem ser M14 em detrimento de M10. E finalmente as terceira e quarta colunas comparam o efeito da mudança de classe de resistência para o mesmo método de aperto, onde é preciso 10 parafusos M12 de mesmo método de aperto e somente 7, caso a classe fosse 10.9 em vez de 8.8. É importante observar que é mais eficiente utilizar o método torque ângulo com menor diâmetro e menos fixadores do que aplicar torque, subir a classe de resistência e diâmetro.

Figura 4 - Ilustração do número de fixadores necessários para atingir 230 kN.
Fonte: TOTH (2006)

4.4 Sistemas de Aperto

Os sistemas de união em linha de montagem utilizados para apertos de alta criticidade possuem normalmente excelentes controles de precisão quando estão em perfeito estado de calibração. Com as mais diversas possibilidades de monitoramento e recursos para garantir o máximo de assertividade nos torques aplicados, a ferramenta de fuso estacionário e aplicação automatizada realiza os apertos acionados por motor elétrico, equipada com comando eletrônico e *softwares* apropriados com estratégias de aperto programáveis, as quais podem variar de acordo com cada aplicação e nível desejado de controle. Logicamente, quanto maior o nível de controle, maior a qualidade da execução e por conseguinte maior o número de possíveis rejeições em decorrência da detecção de avaria nas peças ou fixadores, haja visto que a máquina tem o papel de barrar tais incoerências em prol da qualidade. A figura 5 apresenta a imagem de um sistema de multifuso estacionário automatizado:

Figura 5 - Sistema de aperto multifuso
Fonte: o autor

Para a aplicação em estudo, o processo de união acontece mediante uma estratégia de aperto com multiestágios criada para se obter o melhor assentamento das peças, isto é, a cada etapa de transferência de energia via torque aplicado é feito um sincronismo entre os fusos com o objetivo de ir acomodando aos poucos os cabeçotes no bloco.

O gráfico da figura 6 mostra uma curva torque x ângulo de um aperto realizado por um dos fusos onde se representa o torque aplicado à medida que o soquete gira. A curva representa a execução completa do processo de união, composta por 4 estágios. Através dos estágios, define-se as velocidades, janelas de monitoramentos e demais controles do processo. Como se pode notar utiliza-se o aperto por controle torque e ângulo pós escoamento, cujo alvo do pré aperto é 250 Nm seguido pelo aplicação de mais 90°.

Figura 6 - Curva de aperto do controlador da ferramenta de aperto – torque x ângulo
Fonte: o autor

É interessante observar que os vales são representados pela mudança de estágio e que o pico da curva é o final do aperto onde a representação em verde indica a janela de controle do monitoramento de ângulo. Isso significa que para finalização do aperto existe uma janela de ângulo aceitável pela máquina, o que pode ser entendido como um controle de qualidade que assegura o nível aceitável de grampeamento entre peça e contra peça. Essa janela de aceitação também contempla um máximo e mínimo torque resultante que contribui para o monitoramento ideal esperado, neste caso entre 270 e 420 Nm e 88° e 93°, conforme mostra a curva de aperto.

Além da aplicação do ângulo final, as janelas de monitoramento de ângulo em verde podem rejeitar os apertos caso seja detectado alguma avaria no fixador ou juntas. O acabamento superficial do fixador é um fator que, por influenciar diretamente nas transferências de energia destinadas a efetivamente unir as peças, pode ser alvo de detecção do sistema de aperto, haja visto que um possível excesso de resistência presente na rosca impede seu giro e por isso a reprovação do sistema pode ocorrer por ângulo baixo. O contrário também pode ocorrer, isto é, caso exista algum agente com característica anti-deslizante na rosca ou cabeça, o mesmo facilitará o giro durante o aperto podendo ocasionar falha funcional dos fixadores. Nesse caso o monitoramento rejeita a execução por ângulo excessivo.

4.5 Fenômenos Tribológicos

Dentre as parcelas de energia fornecida por meio da aplicação de torque uma grande parte é dissipada em atrito e deformação das superfícies. Portanto, fenômenos tribológicos tais como atrito, deformação e até mesmo transferência de matéria ocorrem nas regiões da face de assentamento da cabeça do elemento fixador e no contato de suas roscas com a peça a ser unida.

O estudo das superfícies de contato através de análises topográficas permite avaliar em detalhe os níveis de acabamento das superfícies, e com auxílio da teoria de mecânica do contato, definir um modo ótimo de topografia para garantir máxima estanqueidade e eficiência de aperto. Torna-se assim mais palpável a avaliação da energia despendida no processo de deformação elastoplástica dos picos no momento da união. A determinação da maior e menor distância pico-vale seria um dos

resultados valiosos que se extrai de uma análise como esta, pois permite redefinir o processo de usinagem das faces de contato.

4.5.1 Vedação

A vedação entre duas peças pode ser tida como suficiente quando se elimina todos os caminhos de vazios por onde o fluido de trabalho tenha possibilidade de passar. O acabamento superficial do par tribológico tem portanto sua influência no processo de compactação e a união irá determinar a intensidade em que os vazios são eliminados em função das irregularidades e reentrâncias, denominados topografia de superfície.

4.5.2 Compactação Superficial

Brandão (2007) analisou o contato entre superfícies rugosas de válvulas de bloqueio esféricas utilizando elementos finitos para estimar a área de contato em função da força aplicada e consequentemente sua capacidade de estanqueidade. Deste estudo foram predefinidos dois “caminhos” ou perfis de linha mais favoráveis pela comparação de resultados de força de compactação x interferência.

Os resultados em elementos finitos da sequência de compactação dos perfis de contato para o primeiro caminho escolhido é apresentado na figura 7 e o comparativo entre as forças de compactação para os dois caminhos está sendo mostrada na figura 8 pelo gráfico.

Figura 7 - Resultados da análise em elementos finitos de superfícies de contato entre pares tribológicos – compactação superficial.

Legenda: Cores intensas azuis escuras representam pouco ou nenhum contato e verdes, máximo contato.

Fonte: BRANDÃO (2007)

Figura 8 - Gráfico Comparativo – compactação superficial
 Fonte: BRANDÃO (2007)

O gráfico da figura 8 compara esses dois caminhos de modo que a curva vermelha representa melhor compactação para os mesmos esforços, em módulo. Observa-se que para toda faixa de força o caminho 2 apresenta ligeira superioridade em termos de interferência. O principal objetivo aqui é mostrar que as características superficiais do par tribológico e suas interações impactam diretamente no seu poder de vedação.

Com a análise é possível buscar melhorias no processo de fabricação dos pares tribológicos de maneira que se trate a superfície e/ou altere o material envolvido para que a compactação seja mais eficiente mediante os esforços realizados durante a união e a estanqueidade garantida.

Além disso, a mesma técnica pode ser utilizada a fim de controlar a característica topográfica das faces com movimento relativo entre parafuso, bloco e cabeçote, sendo que o contato entre estas é diretamente proporcional a energia despendida para se atingir uma força de montagem conforme detalhado nas equações 1 a 6.

5 Metodologia

5.1 Redimensionamento de Aperto

O redimensionamento dos parâmetros de apertos são feitos complementarmente em duas frentes que são desenvolvidas paralelamente. A primeira, analítica guiada pelo roteiro da VDI 2230 (vide anexo) e a segunda, empírica por meio de ensaios experimentais.

5.1.1 Procedimento de Cálculo Analítico

- Cálculo da força de trabalho axial máxima, verificação da condição de validade e verificação preliminar da pressão superficial;

Os dados de entrada para iniciar os cálculos são: pressão máxima de combustão no cilindro, excentricidade da força de trabalho, resistência mecânica das peças, faixa de atrito, momento de inércia das interfaces, momento de inércia do sólido, comprimento da junta, resistência a compressão do cabeçote, diâmetro do cilindro, diâmetro do chanfro do furo e dimensões do bloco e cilindro.

Utiliza-se a solicitação de carga máxima externa ao fixador em posição mais crítica para determinar a força de trabalho axial máxima sobre a qual o mesmo trabalha. A partir de então estima-se o diâmetro e classe de resistência, além de checar a condição de validade para tal e verificar a pressão máxima superficial sob a cabeça do fixador escolhido. Como o caso em discussão trata de um projeto pré-existente, o fixador escolhido nesse primeiro momento do cálculo é o utilizado na montagem do cabeçote ao bloco atual, isto é, M16 de passo de rosca 2 mm.

- Determinação do fator de dispersão (α_A);

O fator α_A busca cobrir as dispersões inerentes à imprecisões promovidas tanto pela ferramenta de aperto quanto pela escolha do método de união. Tem sua importância, pois interfere diretamente na força mínima necessária para manter a união em funcionamento. Por esse motivo, quando mal escolhido, esse fator pode sobre ou sub dimensionar o diâmetro do fixador. A tabela A8 do roteiro da VDI2230 estima essas dispersões para cada regime de montagem.

- Determinação da força residual mínima que mantém a união aparafusada em funcionamento (F_{kerf});

Como se trata de um caso de aplicação de força de trabalho excêntrica, é preciso calcular a parcela dessa força que deve ser gerada pelo fixador para garantir que não haja abertura unilateral quando estiver sob carga.

- Determinação da resiliência do parafuso;

A resiliência do parafuso está associada a seu comportamento elástico e irá influenciar no fator de carga. Tal fator está associada à parcela de carga proveniente da força externa de trabalho que cai sobre o parafuso. Calcula-se por meio da soma de todas as resiliências das porções do parafuso, sendo elas: cabeça do parafuso, núcleo da parte engajada da rosca mais o deslocamento elástico dos filetes e comprimento da parte se rosca.

- Estimativa da perda de carga (F_z)

O roteiro sugere uma estimativa para o cálculo de perda de carga, porém a mesma é utilizada apenas como referência já que os dados experimentais são muito mais confiáveis e precisos.

- Determinação da força tensora mínima requerida

É a soma entre força mínima requerida para manter a junta em funcionamento (F_{kerf}), parcela de força externa sobre a junta calculada a partir dos comportamentos elásticos do fixador e junta e perda de carga (F_z). Essa soma fornece a força mínima que deve ser gerada pelo fixador após a aplicação de torque.

Nesse ponto, portanto, calcula-se os rendimentos máximos e mínimos para a faixa de atrito considerada, pois a partir dos resultados verifica-se se a força mínima gerada para os atritos máximos atenderia à força esperada, isto é, se supera ou não a força mínima requerida. Em caso positivo, propõe-se o torque e ângulo que geraria tal força.

- Janela de Aperto

Como ferramenta auxiliar ao roteiro, foi desenvolvida para esse trabalho uma ferramenta simples que permite avaliar, sem qualquer dado experimental, em quais pontos o parâmetro torque pode gerar menos ou mais força de acordo com seus coeficientes de atrito máximos e mínimos. A ferramenta auxilia no sentido de se avaliar quais valores de torque poderiam estar ou não próximos ao limite de escoamento. A figura 9 foi extraída desta ferramenta:

Figura 9 - Janela de Aperto
Fonte: o autor.

Por meio dos dados dimensionais dos fixadores e junta e suas características mecânicas, é possível calcular suas capacidades elásticas e prever para os atritos máximo e mínimos considerados quais seriam as resultantes de forças para a dispersão de aperto considerada. No caso da figura, o torque especificado de 200 +/- 20 Nm promove 53,3 kN de força mínima e 98,5 kN de força máxima, estando estes consideravelmente distantes dos limites de escoamento.

- Verificação da força máxima de trabalho sobre o parafuso

Com o fator de carga calculado, é possível determinar qual parcela da carga externa atua sobre o parafuso. Como é sabido quanto suporta em carga máxima de tração, essa checagem é necessária para averiguar se não há sobrecarga que levaria à ruptura.

- Determinação da tensão de fadiga

Em muitos casos, os esforços oscilantes provocam quebra prematura do fixador. Essa parte do roteiro avalia as cargas de fadiga por meio das equações do item 5.5.3 da VDI2230, haja visto que em alguns casos há necessidade de solicitar aumento da dureza de rosca por meio de rolagem pós tratamento.

- Verificação do cálculo de pressão superficial.

Há possibilidade de haver uma pressão excessiva no contato do fixador com a peça causando a fluência localizada, o que promove futura perda de carga excessiva. O roteiro busca prever essa pressão superficial entre cabeça do fixador e o cabeçote. Utiliza-se a máxima força extraída do fixador calculada a partir do máximo rendimento aplicada sobre a mínima área de contato da cabeça com a peça e obtém-se a máxima pressão superficial.

5.1.2 Ensaios Experimentais

- Ruptura

Dois cabeçotes, isto é, doze fixadores são apertados continuamente até a sua ruptura para que seja possível visualizar as curvas torque x ângulo. O ensaio ocorre sob bancada em ambiente de laboratório e fusos estacionários, porém com juntas e fixadores reais. O objetivo do ensaio é iniciar o entendimento do comportamento da junta de aperto para que no redimensionamento dos parâmetros a pré-carga seja a mais próxima possível do ponto de encosto (*snug point*). É importante ressaltar que a pré-carga favorece a precisão do aperto quando está próxima do ponto de encosto, pois a partir de então utiliza-se o ângulo para ultrapassar o ponto de escoamento do parafuso.

A figura 10 mostra um gráfico extraído do aperto até a ruptura e seus pontos de importância:

Figura 10 - Gráfico de aperto até a ruptura – torque x ângulo
Fonte: o autor.

- Determinador torque tensão real (DTT) – Ensaio de atrito;

O DTT é um método de medição comumente utilizado para ensaiar juntas rigidamente fixadas através de células de carga sensorizadas por strain gauges.

A figura 11 mostra a máquina de ensaio DTT a qual é composta por um fuso estacionário, componentes de fixação da junta padrão, sistema de monitoramento, acionamento e sua estrutura de sustentação:

Figura 11 - Máquina de ensaio DTT
Fonte: MUNIZ (2007)

No ensaio, para obtenção dos atritos reais, a máquina será utilizada sem o bloco padrão, pois almeja-se extrair os atritos provenientes das interações entre peça real, rosca real e fixadores. Para tanto, são usinados insertos e contrapeças provenientes do bloco e cabeçote, conforme mostra a figura 12 abaixo:

Figura 12 - Inserto do bloco do motor e contra peça do cabeçote
Fonte: o autor.

O software que monitora os sensores gera os gráficos força x torque x ângulo proveniente das interações bem como a lista de coeficientes de atrito. Tais dados são necessários para se estimar os rendimentos reais e especificar a pré carga com maior precisão.

- Ultrassom

O medidor nada mais é do que um dispositivo capaz de precisar a medida do comprimento do corpo do parafuso. As ondas do ultrassom percorrem a distância de ida e de volta, o equipamento lê a velocidade com que essa onda propagou e calcula com base no tipo de material qual o tempo percorrido. Assim, obtém-se a diferença de comprimento a partir da qual se calcula, por meio das resiliências, a força de grampeamento. Para facilitar o entendimento, a figura 13 ilustra a trajetória da onda no corpo do parafuso.

Figura 13 - Ilustração da trajetória da onda sonora
Fonte: OLSSON (2008)

Utiliza-se o medidor ultrassônico para medir o alongamento antes e após a realização do aperto. Para tanto, os elementos fixadores são preparados da seguinte forma:

- a. Usinagem das suas faces do parafuso (cabeça e face do final de rosca);
- b. Medição prévia do comprimento utilizando micrômetro;
- c. Colagem do cristal piezoelétrico na superfície;
- d. Ajuste das velocidades e comprimentos de onda no medidor ultrassônico, bem como ajuste de sinal;
- e. Montagem do fixador utilizando sistema de aperto com transdutor eletrônico;
- f. Medição do comprimento do fixador utilizando medidor ultrassônico;
- g. Após aperto, medição do comprimento do fixador;

- h. Compilação dos valores e cálculo das forças com base nas resiliências combinadas;
- i. Construção dos gráficos de dispersão de força de união.

A figura 14 demonstra uma medição de ensaio utilizando o equipamento de ultrassom:

Figura 14 - Ensaio de teste de força de união via ultrassom
Fonte: o autor

Existem duas maneiras de fazer medição de fixadores via comprimento ultrassônico: a primeira e mais precisa, representada na figura 15b, pela utilização de um cristal piezoelétrico colado e posicionado na região central da cabeça do fixador. O cristal é a referência do transdutor para a coleta de medições e promove maior precisão ao método pois garante que sempre serão coletados valores do mesmo ponto de partida e retorno da onda, antes, depois do aperto e após o teste a quente. A segunda maneira e mais comum, figura 15a, o cristal está integrado ao transdutor e a referência central não existe podendo esta variar conforme a habilidade de quem está medindo. No entanto, é comum utilizar um elemento condutor elétrico que facilite a coleta.

Figura 15 - Formas de utilização do ultrassom sem cristal piezoelétrico (a), com cristal piezoelétrico (b).

Fonte: SILVA (2014)

Com esse ensaio os alongamentos obtidos permitirão calcular a partir das características geométricas e de material dos fixadores e juntas, os níveis de força de

grampeamento existentes em cada ponto. Essas medidas são tomadas também após o teste quente realizado sob o motor, pois deseja-se evidenciar qualquer relaxamento decorrente das dilatações e acomodações dos elementos que sofrem oscilações de temperatura e vibrações, ocasionando a perda de carga.

- Resiliência combinada;

O comportamento elástico do parafuso e da junta são necessários para calcular as forças mínimas requeridas que mantêm a junta em funcionamento. Porém, ao contrário do cálculo da resiliência do parafuso, a resiliência de junta é imprecisa ao se considerar o modelo sugerido pela VDI2230, principalmente quando se tem dois elementos de materiais cujos comportamentos elásticos são completamente distintos, como o caso da junta de vedação e o próprio cabeçote. Nesse sentido, propõe-se um ensaio que combina a obtenção da curva de aperto com a medição de alongamento elástico por meio do ultrassom.

Para obter a resiliência elástica da junta utiliza-se então a equação abaixo:

$$\varphi = \frac{360}{p} \cdot F_M \cdot (\delta_s + \delta_p) \quad (\text{Eq.10})$$

φ – ângulo de giro

p – passo da rosca

F_M – força de montagem

δ_s – resiliência do parafuso

δ_p – resiliência da junta

O ensaio é feito pelo seguinte procedimento: aperta-se os parafusos com um parâmetro de torque conhecido sem se aproximar da zona elastoplástica (tal parâmetro é previsto pela janela de aperto já montada anteriormente e/ou pelas curvas de ruptura) e mede-se o alongamento elástico via medidor por ultrassom. A partir dos gráficos é possível saber o ângulo de giro, o passo é um dado geométrico, a força de montagem obtém-se do ultrassom e a resiliência elástica do parafuso é calculada. Tem-se portanto todos os dados para calcular a resiliência combinada pela equação acima.

- Perda de carga estática

O ensaio consiste em apertar dois cabeçotes (doze parafusos) para prever a redução do alongamento elástico após alguns minutos e medir o alongamento via ultrassom.

As forças logo após o aperto e alguns minutos posteriores podem ser obtidas pelas diferenças de alongamento e calculadas pela resiliência elástica do parafuso. É válido ressaltar que esse ensaio não contempla a perda de carga após a junta de aperto sofrer esforços externos (carga de trabalho), o que promove potencial perda de carga. Por esse motivo, o ensaio é denominado estático.

- Validação dos parâmetros de aperto

A validação dos testes consiste em apertar dois cabeçotes com os parâmetros obtidos nos cálculos do roteiro, de maneira a promover o alongamento elastoplástico pelo método de torque-ângulo pós-escoamento. Com os resultados obtidos nesse ensaio, é possível comparar as estratégias de aperto atual e sugeridas no dimensionamento de maneira que se evidencie as melhorias e riscos de cada uma. O objetivo principal nessa etapa do trabalho é buscar a evidenciação da melhoria proposta, associando o resultado teórico ao experimental.

5.2 Estudo topográfico associado a perda de carga

É sabido que perfis topográficos diversos afetam diretamente as perdas de carga dinâmicas e estáticas da junta de aperto, no entanto, a presença do elemento vedante (junta de vedação do bloco) promove algumas controvérsias no sentido de contribuir com o desempenho de vedação ou dificultá-lo, já que grandes oscilações de perfil promoveriam maior deformação do elemento, porém menores oscilações favoreceriam melhor assentamento das interfaces.

A avaliação em questão contempla a união de duas ciências: estudo de fenômeno superficial e o de juntas rigidamente aparafusadas. Para o primeiro, a metodologia de estudo está associada à análise topográfica de interface de contato e para o segundo a avaliação de perdas de carga.

5.2.1 Análise topográfica

As medições são realizadas nas interfaces dos corpos de prova (figura 16) utilizando perfilometria óptica por interferência confocal coerente (CCI), fabricado por Taylor Hobson, no laboratório de fenômenos superficiais da Escola Politécnica da USP. A máquina e sua representação funcional podem ser vistas na figura 17:

Figura 16 - Corpos de prova para análise topográfica
Fonte: o autor

Figura 17 - Perfilometria Óptica CCI, Taylor Hobson
Fonte: o autor

Aquisição da superfície é realizada com uma lente de ampliação de 10x (campo de visão de: 1,71 x 1,71 mm com resolução lateral de 3,3 μm). A área medida foi de 20 x 3 mm, com o objetivo de ter representatividade estatística dos parâmetros obtidos. Outras áreas de mesma dimensão em locais distintos do cabeçote devem ser medidas para verificação da representatividade da superfície medida.

As medidas são tratadas conforme procedimento interno do Laboratório de Fenômenos de Superfície, que resume-se em:

1 - *Leveling*: Realiza-se o nivelamento da superfície por meio de algoritmos que rotacionam a matriz medida como um corpo rígido de modo que a mesma apresente-se perfeitamente horizontal;

2 – *Thresholding*: Elimina-se os valores medidos que aparecem com frequência inferior a 0,2% baseado na consideração que tais valores são "bad pixels", ou seja, valores mau medidos, ou influenciados por sujidade;

3 - *Fill Non-Measured Points*: Os pontos não medidos são preenchidos baseado em interpolação dos 8 vizinhos mais próximos.

Depois das medições, as superfícies são filtradas (filtro Gaussiano de microrugosidade) segundo a norma técnica indicada (ISO1302 e DIN4768). O tipo de filtro utilizado elimina as componentes de alta frequência espacial (i.e. ruído / microrugosidade) e sepeira ondulação de rugosidade.

Posteriormente, parâmetros estatísticos são calculados por meio do software *Talymap* de *Taylor Hobson* sobre toda a superfície medida. Parâmetros de amplitude são discutidos com ajuda da visualização da superfície em vista isométrica, e o correspondente histogramas de alturas e curva de Abbott- Firestone. Enquanto os parâmetros de amplitude fornecem principalmente informação sobre o núcleo da topografia, a curva de Abbot-Firestone permite comparar as informações relacionadas com a distribuição de picos e vales nas superfícies.

Também utiliza-se a função *Slices* (*Software Talymap* de *Taylor Hobson®*) que apresenta a área projetada sobre um plano ideal sem massa que desce e corta a superfície em uma determinada separação (h) do plano de referência da superfície avaliada. Assim, a função fornece informação a respeito da localização geográfica e a distribuição dos pontos de contato preferenciais de uma superfície, em outras palavras, permite uma visualização da área real de contato. Esta metodologia simplificada correlaciona muito bem com os modelos estocásticos de contato mecânico, conforme apontado por Tomanik (2005).

5.2.2 Ensaio de perda de carga e combinação de perfis topográficos extremos

- Pré-ensaio

Para extrair conhecimento prévio dos possíveis resultados a serem alcançados e perceber a magnitude do reflexo das alterações nos resultados de perda de carga, é feito o pré-ensaio. Consiste em utilizar como corpo de prova o bloco do motor e dois cabeçotes cujas topografias das interfaces são alterados por lixas de granulometria 80,120 e 600, nessa ordem.

O teste de perda de carga para este ensaio é realizado da mesma forma que os procedimentos indicados no item 5.12.

- Ensaio de perda de carga com perfis extremos

Dois tipos de perfis foram escolhidos para se avaliar a perda máxima de carga estática. O objetivo principal nesse ensaio é avaliar a estratégia de aperto dimensionada para dois casos extremos, isso é, para tais perfis deseja-se conhecer o quanto a estratégia de união sugerida está vulnerável à oscilação de acabamento dos pares tribológicos a ponto de comprometer a capacidade de vedação da junta do cabeçote.

Os corpos de prova (bloco e cabeçotes) têm suas interfaces de aperto retificadas da seguinte forma:

- 1°, 2° e 3° cilindros e cabeçotes: alvo de 0,2 μm rugosidade aritmética média S_a ;
- 4°, 5° e 6° cilindros e cabeçotes: alvo de 2,0 μm rugosidade aritmética média S_a .

Sabe-se que a superfície padrão do cabeçote obtida por fresamento apresenta uma rugosidade aritmética média (S_a) na ordem de 1,2 μm e, com base nessa informação, os padrões de topografias a serem avaliados são atribuídos. Porém, durante o desenvolvimento das análises tais padrões podem ser alterados visando menor perda de carga e melhor assentamento que promova vedação.

A primeira parte do ensaio é feita para avaliação de perda de carga estática combinando os cabeçotes e blocos com rugosidades aritméticas máximas e mínimas entre si. O parâmetro dimensionado nos cálculos analíticos do item 5.1.1 e validados nos ensaios do item 5.1.2 serão configurados no sistema de aperto para realizar o teste em questão. Após executada a união, mede-se os alongamentos elásticos via medidor ultrassônico e após 1,5 horas mede-se novamente. Ao desmontar o fixador é preciso medir o alongamento elastoplástico para que seja descontado do valor total de alongamento. Por meio dos valores de resiliência elástica do parafuso e os dados coletados de alongamento nos 36 fixadores obtém-se as forças de união.

Com o objetivo de condicionar a estratégia de aperto sugerida à extremos que proporcionariam vedação adversa da junta do cabeçote, após esse ensaio a medição topográfica é feita em todos os tipos de corpos de prova. A partir de então é possível entender o quão oscilante ou estável é a perda de carga em cada perfil topográfico e, adicionalmente, entender o quanto cada perfil sofreu deformações elastoplásticas em seus picos e vales. Portanto, ao final desse ensaio é possível chegar a duas conclusões: a estratégia sugerida promove segurança no processo de união pós perda de carga estática ou não garante qualquer situação topográfica extrema.

6 Resultados

Com base nas metodologias descritas anteriormente, esse tópico expõe o efeito dos cálculos analíticos executados nos ensaios conforme explanado. É preciso considerar que à medida que se tem resultados empíricos, a parte analítica é recorrentemente revista a fim de se buscar resultados condizentes com a realidade e evitar erros de considerações. E ainda, conforme descrito anteriormente, os resultados dos ensaios são complementares ao roteiro de dimensionamento, ou seja, o teor analítico é retroalimentado pelos resultados experimentais.

6.1 Redimensionamento dos parâmetros de aperto

- Ensaios de ruptura

Os parafusos dos dois cabeçotes levados até a ruptura fornecem base de dados para começar o entendimento do comportamento da junta e os limites de carga do parafuso, bem como noções acerca dos regimes plásticos, elastoplástico e elásticos. Proporcionam também o entendimento sobre o ponto de encosto (*snug point*) para o qual quanto menor, maior a fase de ângulo e maior a precisão do processo de união, conforme evidenciado no artigo de Garcia (2008).

As figuras 18, 19 e 20, mostram os gráficos de ruptura para três fixadores. Nota-se a evidência de um comportamento dúctil expressivo da junta aparafusada, observado na grande área abaixo da curva pós ponto de escoamento, o que contribui com a fase de parâmetro de aplicação do ângulo menos crítica, pois quanto maior a ductilidade menos risco existe de se atingir o limite de resistência mecânica do fixador na aplicação do ângulo. Ainda, com esse resultado, é possível especificar um parâmetro de torque intermediário apenas para extração de resultados dos ensaios de resiliência combinada. Observa-se já nesse primeiro momento que a parametrização de pré-aperto de 250 Nm, estipulada para a aplicação, está muito acima do ponto de encosto, o que pode ser algo comprometedora do ponto de vista de precisão. Isso é evidenciado pelo ponto de inflexão do gráfico em torno de 400°, onde as peças começam a ser efetivamente unidas.

Figura 18 - Resultado do gráfico de ruptura 1
Fonte: o autor

Figura 19 - Resultado do gráfico de ruptura 2
Fonte: o autor

Figura 20 - Resultado do gráfico de ruptura 3
Fonte: o autor

- Janela de aperto

Com base nos dados dimensionais dos fixadores e junta, é possível estipular um comportamento de torque e geração de força para uma determinada faixa de atrito. Conforme previamente estipulado, todos os apertos por uniões rigidamente aparafusadas seguem a faixa de atrito de 0,10 a 0,16. Para tal faixa, aplicando-se o pré-aperto de 250 Nm com variação de 10% desse alvo, isto é, máximo de 275 Nm, observa-se uma proximidade com o limite de escoamento do fixador (ver figura 21).

Figura 21 - Janela de Aperto para pré-aperto
Fonte: o autor

- Resiliência Combinada

Os dois cabeçotes são unidos aplicando-se 210 Nm, valor atribuído ao ensaio por ser conhecido pelos gráficos de ruptura que tranquilamente se distancia da transição para zona elasto-plástica. Coletando-se os dados de medida por ultrassom e inclinação da curva de aperto, teremos os valores de resiliência combinada.

Figura 22 - Ensaio de resiliência combinada, torque alvo 210 Nm.
Fonte: o autor

Figura 23 - Ensaio de resiliência combinada, medida por ultrassom
Fonte: o autor

Conhecida por meio de cálculos a resiliência do parafuso, utilizando-se da equação 10 determina-se a resiliência da junta, a qual é apresentada na tabela 1:

Tabela 1 – Resiliências combinada, do parafuso e da junta
Fonte: o autor

Resiliência Combinada	8,05 E-06	N/mm
Resiliência Parafuso	5,26 E-06	N/mm
Resiliência Junta	2,79 E-06	N/mm

- Atritos reais – DTT

Com os valores de atrito real entre as peças, é possível redimensionar os parâmetro de aperto com maior precisão. Na tabela 2 abaixo estão os valores coletados para 12 amostras:

Tabela 2 - DTT real
Fonte: o autor

Amostra	Força Aplicada	Torque	Torque na Rosca	Torque na Cabeça	Fator K	μG	μk	η	μGes
1	98,576	227,01	118,935	108,075	0,144	0,104	0,095	0,915	0,099
2	97,911	227,49	118,115	109,375	0,145	0,104	0,096	0,915	0,1
3	98,008	223,2	121,809	101,391	0,142	0,108	0,089	0,91	0,097
4	98,461	218,46	119,984	98,476	0,139	0,105	0,086	0,913	0,094
5	97,979	226,14	118,25	107,89	0,144	0,104	0,095	0,915	0,099
6	98,249	225,78	119,711	106,069	0,144	0,105	0,093	0,913	0,098
7	97,68	227,22	124,297	102,923	0,145	0,112	0,091	0,906	0,1
8	97,699	226,62	120,345	106,275	0,145	0,107	0,094	0,912	0,099
9	98,287	234,24	122,875	111,365	0,149	0,109	0,098	0,909	0,103
10	97,555	228,54	121,788	106,752	0,146	0,109	0,094	0,909	0,101
11	98,499	226,86	125,915	100,945	0,144	0,112	0,088	0,906	0,099
12	97,969	227,64	116,932	110,708	0,145	0,102	0,098	0,916	0,1
Média	98,073	226,6	120,746	105,854	0,144	0,107	0,093	0,912	0,099
Desvio	0,34	3,609	2,678	4,084	0,002	0,003	0,004	0,003	0,002
Média 3σ	99,091	237,428	128,781	118,106	0,152	0,117	0,104	0,922	0,105
Média - 3σ	97,054	215,772	112,712	93,601	0,137	0,097	0,082	0,901	0,093
Máximo	98,576	234,24	125,915	111,365	0,149	0,112	0,098	0,916	0,103
Mínimo	97,555	218,46	116,932	98,476	0,139	0,102	0,086	0,906	0,094
Range	1,021	15,78	8,984	12,889	0,01	0,01	0,011	0,011	0,008

- Validação da parametrização

A partir dos cálculos de redimensionamento dos parâmetros, estima-se que a nova estratégia de aperto extraia a força média de 150 kN. Esse valor é obtido por meio dos cálculos de força mínima requerida (F_{Kerf}) e o dimensionamento de forças máximas a serem extraídas do fixador para a solicitação de 180 bar de pressão de combustão máxima por cilindro. Como se trata de esforços excêntricos para parafusos também não concêntricos aos carregamentos externos (carga de trabalho), considera-se a condição mais desfavorável dentre os fixadores. Nesse sentido, deseja-se saber qual a extração de força do fixador para a qual sabe-se que atenderia o requerido, isto é, o fixador que se situa geometricamente mais distante do ponto de pico máximo de pressão no cilindro terá maior momento fletor e consequentemente maior solicitação externa.

Com os dados experimentais e teóricos desenvolvidos até esse ponto é possível determinar a menor pré-carga que se aproxima do ponto de inflexão (*snug point*) das curvas de ruptura e ao mesmo tempo promova o assentamento das peças para se iniciar a extração de força trativa. Posteriormente a fase de ângulo considera a janela que ultrapasse o ponto de escoamento em todos os limites de fricção considerados sem promover falha funcional por ruptura. É importante salientar que o fixador em estudo é dotado de uma zona dúctil consideravelmente extensa, o que gera conforto quanto a escolha da etapa de ângulo.

Sendo assim, a proposta de parametrização a ser validada no teste com suas tolerâncias e valores esperados estão na tabela 3 abaixo, assim como a estratégia atual utilizada:

Tabela 3 – Comparativo das parametrizações da estratégia de aperto atual e sugerida
Fonte: o autor

	Atual	Sugerida
Parâmetros de Aperto	250 Nm $\pm$ 5 Nm + 90° $\pm$ 5°	100 Nm $\pm$ 5 Nm + 300° $\pm$ 5°
Janela de Força esperada [kN]	118,1 - 175,3	144,3 - 176,3
Janela de Torque Resultante [Nm]	264 - 405	268 - 511

A tabela 4 mostra os alongamentos de cada parafuso e a respectiva força gerada a partir do torque resultante máximo aplicado no ensaio.

Tabela 4 - Resultados da validação da nova estratégia de aperto
Fonte: o autor

	Parafuso	Alongamento [mm]	F _M media [kN]	Torque máximo [Nm]
cabeçote 1	13	0,771	146,5	316,3
	14	0,782	148,6	318,2
	15	0,787	149,5	310,5
	16	0,781	148,4	300,6
	17	0,801	152,2	322,1
	18	0,759	144,2	312,8
	Desvio Padrão		2,71	7,47
	Média		148,2	313,4
cabeçote 2	19	0,801	152,2	331,1
	20	0,788	149,7	309,0
	21	0,759	144,2	314,3
	22	0,791	150,3	303,1
	23	0,802	152,4	314,6
	24	0,777	147,6	315,7
	Desvio Padrão		3,09	9,32
	Média		149,4	314,6
cabeçote 3	37	0,815	154,8	325,6
	38	0,816	155,0	308,4
	39	0,781	148,4	313,2
	40	0,770	146,3	310,5
	2	0,802	152,4	358,7
	3	0,800	152,0	363,7
	Desvio Padrão		3,51	24,94
	Média		151,5	330,0
cabeçote 4	4	0,800	152,0	308,5
	5	0,785	149,1	332,3
	6	0,769	146,1	312,5
	7	0,769	146,1	300,4
	8	0,787	149,5	311,9
	12	0,766	145,5	307,3
	Desvio Padrão		2,56	10,784
	Média		148,06	312,16

Os resultados de força de união média evidenciam que a estratégia de união sugerida é satisfatória, pois atinge os valores mínimos esperados em todas medições. É

importante ressaltar que apesar de os valores de torque resultante oscilarem, as forças extraídas de cada fixador se aproximam do valor esperado visto que as mesmas não são afetadas pelo atrito quando o controle por ângulo é dominante.

Os gráficos da figura 24 e 25 dos cabeçotes 1 e 2 mostram que a zona elasto-plástica está sendo atingida ao final do aperto, pois a constância do giro gera um patamar estável na curva sem que o torque aplicado altere seu valor. Tal fato ratifica a precisão da estratégia de união.

Figura 24 - Gráfico de aperto do cabeçote 1 – 100 Nm + 300°
Fonte: o autor

Figura 25 - Gráfico de aperto do cabeçote 2 – 100 Nm + 300°
Fonte: o autor

A utilização da pré-carga de 100 Nm proporciona maior precisão ao aperto e essa melhoria pode ser percebida na curva da figura 26, onde os valores de 250 Nm + 90° estão marcados em vermelho no gráfico. Ao analisar os pontos da curva é perceptível que, caso o aperto tivesse sido executado por meio da estratégia 250 Nm + 90°, o ponto final de aplicação de ângulo não necessariamente teria entrado na zona elasto-plástica, fato que evidencia imprecisão e possibilidade de menor extração de força do fixador. Como pode ser visto na curva, o segundo ponto poderia ter avançado um pouco mais para se extrair níveis de força superiores, ou mesmo, garantir que qualquer oscilação de fricção excessiva em pré-aperto cause impacto na extração de força trativa.

Além disso, com a pré-carga alta existe ainda a possibilidade de alongamento elasto-plástico antes mesmo da aplicação de ângulo. Isso poderia ocorrer caso em algum momento os atritos de cabeça e rosca estejam próximo ao mínimo aceitáveis, ocasionando falha prematura do fixador, o que pode ocorrer até mesmo durante a montagem. Essa ocorrência pode não ser tão evidente devido à alta ductilidade do fixador, porém o risco existe.

Figura 26 - Curva de ruptura – torque x ângulo
Fonte: o autor

6.2 Estudo topográfico associado a perda de carga

- Análise topográfica

A fim de entender o perfil topográfico original dos pares tribológicos e determinar parâmetros de referência para os posteriores ensaios, utilizou-se as amostras de cabeçotes que passaram por fresamento.

A coluna esquerda da figura 27 mostra a projeção isométrica da superfície do cabeçote e na coluna direita se observa uma superposição do histograma de alturas e da curva de Abbot-Firestone correspondente desta superfície. O histograma de alturas, mostrado na escala vertical da figura, permite observar a densidade da distribuição dos pontos medidos na superfície estudada. O eixo vertical se encontra especificado em alturas (em função do plano de referência da superfície) enquanto no eixo horizontal, é indicada a quantidade de pontos que pertencem a uma categoria de alturas determinada (expressado como porcentagem da totalidade dos pontos). Por sua parte, a curva de Abbott-Firestone (eng. bearing ratio curve), é uma curva que representa a área que se projeta sobre um plano ideal sem massa que corta uma porção do material em uma separação (h) determinada em relação ao plano de referência da superfície analisada. O eixo horizontal na curva de Abbott-Firestone representa a porcentagem de material cortado em função da separação. Deve ser notado que, embora a informação neste tipo de curvas seja apresentada em duas dimensões, a informação corresponde ao cálculo sobre a totalidade da área medida. Na figura 27a se observam as marcas de fresagem geradas pela ferramenta de corte. Os picos da topografia, zonas indicadas em vermelho, possuem uma periodicidade com espaçamento médio de $400\text{ }\mu\text{m}$ (distância no eixo y), enquanto a distribuição de alturas (figura 27b) indica que o desvio das alturas em relação ao plano de referência da superfície oscila entre $0,8$ e $8\text{ }\mu\text{m}$.

Figura 27 - Projeção isométrica (a) e distribuição de alturas e curva de Abbott-Firestone (b)
Fonte: o autor

A tabela 5 apresenta os parâmetros de altura das superfícies. Os valores registrados na tabela correspondem à média obtida a partir do processamento de 28 fotogramas. Os parâmetros incluídos na tabela são principalmente de dois tipos: a) parâmetros de dispersão de alturas (S_a e S_q), e b) parâmetros de valores dos

cinco pontos mais altos e mais baixos das alturas (S_{5p} , S_{5v} , S_{10z}). Os parâmetros de dispersão de altura das superfícies S_a (média aritmética das alturas) e S_q (valor r.m.s. das alturas) possuem informação referente ao núcleo da rugosidade e não proporcionam diferenciação entre picos e vales. Os parâmetros S_{5p} (média de altura dos cinco picos mais altos), S_{5v} (média de altura dos cinco vales mais profundos) e S_{10z} (diferença entre S_{5p} e S_{5v}) evidenciam essa diferenciação.

Tabela 5 – Parâmetros de altura das superfícies
Fonte: o autor

Processo	S_q [μm]	S_a [μm]	S_q/S_a	S_p [μm]	S_v [μm]	S_z [μm]	S_p/S_z [%]	S_v/S_z [%]
Cabeçote	1,253	0,983	1,275	4,006	4,948	9,954	40,25	49,75

Hutchings (1992) mostrou que para superfícies gaussianas, isto é, superfícies cuja distribuição de alturas apresenta um bom ajuste a respeito de uma distribuição normal, pode ser verificado que $S_q \approx 1.25 S_a$. Sob este critério verifica-se que a superfície fresada se aproxima de uma distribuição normal, e permite portanto, que modelos de contato sejam aplicados sejam baseados nesta consideração.

Nas duas colunas da extrema direita da tabela 6 são mostradas as relações S_{5p}/S_{10z} e S_{5v}/S_{10z} , que representam a altura máxima dos picos e a profundidade máxima dos vales, ambas em relação à altura máxima entre pico e vale. Pode ser notado que, em todos os casos, a profundidade máxima é predominante sobre a altura máxima, isto é, S_v maior que S_p . Este resultado pode estar relacionado com a quantidade de material de junta que terá que se deformar para garantir uma vedação plena do sistema cabeçote-junta-bloco. Portanto, para minimizar a importância da junta de vedação, é de interesse reduzir a razão S_{5v}/S_{10z} . No entanto, deve ser considerado que os parâmetros S_{5v} , S_{5p} , S_{5z} são valores praticamente extremos (médias dos cinco pontos extremos) e, portanto, correspondem a um valor único na superfície. Os parâmetros de Abbott-Firestone, por outra parte, são calculados sobre toda a superfície e oferecem informação mais completa sobre o núcleo da topografia, e as proporções dos picos e os vales. Na tabela 6 são apresentados os parâmetros Abbott-Firestone para a superfície original: S_k (altura do núcleo da superfície), S_{pk} (altura dos picos), S_{mr1} (porção superior de material), S_{vk} (profundidade dos vales) e S_{mr2} (porção inferior de material).

Tabela 6 – Parâmetros de Abbott-Firestone
Fonte: o autor

Processo	S_k [μm]	S_{pk} [μm]	S_{mr1} [%]	S_{vk} [μm]	S_{mr2} [%]
Cabeçote	1,079	0,566	11,06	1,264	81,76

Nota-se que o valor de S_{vk} é maior que o valor de S_{pk} , o que indica a persistência da predominância dos vales sobre os picos, o que vai de encontro com a análise apresentada na tabela 5. Essa relação afeta significativamente o modo como a deformação elastoplástica da junta ocorrerá durante o fechamento do cabeçote. A princípio uma relação em que S_{pk} é maior que S_{vk} permitiria que a mesma vedação fosse alcançada (garantida por uma força de grampeamento mínima) utilizando menor energia de aperto (torque). Os parâmetros S_{mr1} e S_{mr2} caracterizam respectivamente a porcentagem de picos e vales de uma superfície dada. O parâmetro S_{mr1} é relevante para aplicações de contato a seco porque representa a porção de superfície que estará em contato inicialmente e, portanto, que será deformada primeiro. Já o parâmetro S_{mr2} indica a quantidade percentual de espaços a serem preenchidos pela junta.

A figura 28 apresenta graficamente a distribuição espacial de picos correspondente a um área projetada de $S_{mr1} = 11,06\%$ e $S_{mr2} = 18,24$ ($100-81,76$), obtida utilizando a função slices. Esta função permite visualizar graficamente (em cor rosa) quais as partes de uma superfície que se encontram acima de um plano (em cor verde) localizado a uma separação (h) dada, definida a partir do plano de referência da superfície, bem como a superfície abaixo deste (em cor azul). Verifica-se uma distribuição altamente heterogênea, direcional e com concentração de picos (cor rosa) e vales (cor azul) em regiões específicas. A homogeneidade da distribuição espacial de picos é importante para o contato mecânico, dado que são os picos da superfície que suportam o carregamento durante o contato. Assim, uma superfície com uma distribuição mais homogênea apresenta uma maior capacidade de vedação. De mesmo modo, a homogeneidade da distribuição espacial dos vales, bem como a redução da sua área final é desejável para se garantir a melhor vedação com o mínimo de energia de aperto.

Figura 28 - Distribuição espacial de picos correspondentes
Fonte: o autor.

Em resumo, mesmo que as juntas de vedação sejam mantidas, se a topografia tiver áreas rosas e azuis distribuídas mais uniformemente e predomínio de área verde teremos melhor vedação utilizando menos energia proporcionada pela extração de força proveniente dos fixadores.

- Pré-ensaio de perda de carga com combinações de perfis

A figura 29 abaixo ilustra o ensaio. Dentre os seis cilindros, dois são utilizados para o pré-ensaio de perda de carga com combinações de perfis e os demais utilizados na validação da estratégia de união a ser proposta. Antes do aparafusamento, as interfaces dos cabeçotes e bloco são medidas com rugosímetro antes e depois de executar a alteração de perfil conforme mostra as figuras 29, 30 e 31 e os dados na tabela 7:

Figura 29 – Pré-ensaio de perda de carga com combinações de perfis
Fonte: o autor

Figura 30 - Medição de rugosidade da interface dos cabeçotes
Fonte: o autor

Figura 31 - Medição de rugosidade da interface do bloco
Fonte: o autor

Figura 32 - Numeração dos fixadores medidos
Fonte: o autor

Tabela 7 - Resultados de rugosidade medida
Fonte: o autor

Peça	Rugosidade antes do lixamento (Rz) [μm]	Rugosidade após o lixamento (Rz) [μm]	Rugosidade após o lixamento (Ra) [μm]
Cabeçote 5	9,624	3,629	0,589
Cabeçote 6	8,562	4,081	0,617
Bloco	9,232	3,526	0,368

A interface superior de um dos cabeçotes foi modificada (lixada) em seu encosto de cabeça do parafuso, conforme está na figura 33. O objetivo dessa modificação é perceber a oscilação de força de grampeamento para condição topográfica diferente, já que se espera que em zona elastoplástica o atrito sob a cabeça do fixador modifique apenas o torque resultante e mantenha a estabilidade de força de união.

Figura 33 - Encosto do parafuso no bloco lixado

Fonte: o autor

A tabela 8 abaixo mostra os resultados para o cabeçote cujas interfaces de encosto do parafuso e da superfície inferior de contato com a junta de vedação foram alteradas por lixamento.

Tabela 8 - Resultados obtidos para cabeçote alterado nas duas interfaces

Fonte: o autor

Cabeçote 6	N° do Parafuso	Alongamento [mm]	F_M media [kN]	Torque Máximo [Nm]
	25	0,782	148,6	380,4
	26	0,808	153,5	364,9
	27	0,789	149,9	375,6
	28	0,776	147,4	366,5
	29	0,796	151,2	374,4
	30	0,790	150,1	346,0
	Desvio Padrão		2,12	12,23
	Média		150,1	368,0

Para o cabeçote que sofreu alteração de topografia apenas na superfície de contato com a junta de vedação, os resultados estão expostos na tabela 9:

Tabela 9 - Resultados obtidos para cabeçote alterado apenas na interface com a junta de vedação

Fonte: o autor

Cabeçote 5	N° do Parafuso	Alongamento [mm]	F_M media [kN]	Torque Máximo [Nm]
	31	0,786	149,3	306,6
	32	0,797	151,4	306,9
	33	0,788	149,7	301,8
	34	0,791	150,3	293,3
	35	0,763	145,0	298,0
	36	0,775	147,2	293,4
	Desvio Padrão		2,34	6,09
	Média		148,8	300,02

Comparando-se os resultados das tabelas 9 e 4, as alterações topográficas nas faces de contato com a junta não influenciaram o torque máximo despendido nem nas forças médias resultantes, o que já era esperado, já que tais modificações possivelmente terão mais impacto no processo perda de carga dinâmica.

Sendo assim, para se ter ideia de efetividade da estratégia, como as duas condições contém perfis topográficos alterados nas interfaces das juntas, independentemente da energia despendida, a tabela 10 mostra a perda de carga estática em ambas.

Tabela 10 – Comparativo entre as perdas de carga dos fixadores para as duas condições de alterações topográficas

Fonte: o autor

	Cabeçote com alteração topográfica na interface	Cabeçote com alteração topográfica na interface e encosto
Perda de carga %	12%	12%
	13%	13%
	12%	10%
	12%	12%
	11%	11%
	10%	11%
Desvio Padrão	0,0103	0,0105
Média	12%	12%

Embora o pré-teste considere apenas topografias grosseiras onde a junta de vedação se deformará em maiores proporções, a alteração não promoveu grandes perdas de carga para a estratégia de aperto 100 Nm + 300°.

- Ensaio de perda de carga com perfis extremos

A partir das considerações e resultados coletados no pré-teste, o ensaio de perda de carga em perfis extremos complementa este trabalho no sentido de entender os efeitos da vulnerabilidade dos acabamentos de interface com maior volume de dados e maior controle das topografias modificadas da junta aparafusada. Os três cabeçotes e blocos usinados em rugosidade máximas têm seus resultados dispostos na tabela 11 abaixo:

Tabela 11 – Perdas de carga para perfis topográficos de rugosidade aritmética 2,0 µm

Fonte: o autor

Corpos de prova com rugosidade aritmética 2,0 µm						
Cabeçote	Parafuso	Alongamento após montagem [mm]	Alongamento após relaxamento estático [mm]	Força após montagem [kN]	Força após relaxamento estático [kN]	Perda de carga estática [%]
A	1	0,721	0,713	137,0	135,5	1%
	2	0,780	0,702	148,2	133,4	10%
	3	0,755	0,707	143,4	134,3	6%
	4	0,728	0,666	138,3	126,5	9%
	5	0,760	0,716	144,4	136,0	6%
	6	0,788	0,740	149,7	140,6	6%
B	7	0,723	0,702	137,4	133,4	3%
	8	0,775	0,692	147,2	131,5	11%
	9	0,737	0,687	140,0	130,5	7%
	10	0,782	0,718	148,6	136,4	8%
	11	0,769	0,728	146,1	138,3	5%
	12	0,798	0,754	151,6	143,2	6%
C	13	0,751	0,731	142,7	138,9	3%
	14	0,764	0,683	145,1	129,8	11%
	15	0,757	0,701	143,8	133,2	7%
	16	0,770	0,699	146,3	132,8	9%
	17	0,784	0,743	148,9	141,2	5%
	18	0,793	0,746	150,7	141,7	6%
Média		0,763	0,713	145,0	135,4	7%
Máximo		0,798	0,754	151,6	143,2	11%
Mínimo		0,721	0,666	137,0	126,5	1%

Os outros três cabeçotes montados sob o bloco com rugosidades mínimas têm seus resultados de ensaio na tabela 12:

Tabela 12 – Perdas de carga para perfis topográficos de rugosidade aritmética 0,2 μm
Fonte: o autor

Corpos de prova com rugosidade aritmética 0,2 μm						
Cabeçote	Parafuso	Alongamento após montagem [mm]	Alongamento após relaxamento estático [mm]	Força após montagem [kN]	Força após relaxamento estático [kN]	Perda de carga estática [%]
D	19	0,754	0,740	143,2	140,6	2%
	20	0,787	0,713	149,5	135,5	9%
	21	0,768	0,710	145,9	134,9	8%
	22	0,781	0,720	148,4	136,8	8%
	23	0,774	0,730	147,0	138,7	6%
	24	0,769	0,722	146,1	137,2	6%
E	25	0,776	0,756	147,4	143,6	3%
	26	0,781	0,707	148,4	134,3	9%
	27	0,766	0,707	145,5	134,3	8%
	28	0,781	0,720	148,4	136,8	8%
	29	0,800	0,751	152,0	142,7	6%
	30	0,828	0,780	157,3	148,2	6%
F	31	0,726	0,712	137,9	135,3	2%
	32	0,781	0,717	148,4	136,2	8%
	33	0,742	0,684	141,0	129,9	8%
	34	0,801	0,739	152,2	140,4	8%
	35	0,767	0,723	145,7	137,4	6%
	36	0,779	0,731	148,0	138,9	6%
Média		0,776	0,726	147,4	137,9	6%
Máximo		0,828	0,780	157,3	148,2	9%
Mínimo		0,726	0,684	137,9	129,9	2%

Sem exceção, todos os apertos apresentaram curvas muito similares ao gráfico da figura 35 (relativa a corpos de prova em máxima rugosidade) e figura 36 (relativa a corpos de prova em mínima rugosidade). Isso ratifica a estabilidade da estratégia no sentido de ultrapassar o ponto de escoamento do fixador e maximizar a força trativa extraída.

Figura 35 – Gráfico de aperto do parafuso 12, estratégia 100 Nm + 300°

Fonte: o autor

Figura 36 – Gráfico de aperto do parafuso 31, estratégia 100 Nm + 300°

Fonte: o autor

Para facilitar a interpretação dos resultados do ensaio os gráficos das figuras 37 e 38 abaixo foram criados a partir das tabelas 11 e 12, onde fica mais evidente a oscilação das porcentagens de perdas de carga.

Figura 37 – Gráfico de distribuição de perdas de carga para amostras 2,0 μm
Fonte: o autor

Figura 38 – Gráfico de distribuição de perdas de carga para amostras 0,2 μm
Fonte: o autor

A fim de complementar os resultados dos ensaios de perda de carga por medições de força de união e tornar a pesquisa mais comparativa, medições topográficas de todas as amostras, tanto bloco como cabeçotes, estão descritas abaixo.

A tabela 13 apresenta os parâmetros de contato mais relevantes de todas as superfícies testadas. Observa-se que em termos absolutos os valores apresentam diferenças de até uma ordem de grandeza. No entanto, proporcionalmente estes são semelhantes e apresentam a mesma tendência:

- $S_{pk} < S_{vk}$, o que indica a persistência da predominância dos vales sobre os picos para qualquer tipo de acabamento.
- S_q/S_a aproximadamente 1,30, o que indica que as superfícies apresentam uma distribuição de alturas normal;
- S_{mr1} aproximadamente 15% e S_{mr2} aproximadamente 83%, indicando que a distribuição de picos e vales é semelhante;

Tal similaridade na distribuição das asperezas destas peças, associada ao pequeno acréscimo na relação do aumento da altura das asperezas em relação a espessura da junta, faz com que a deformação imposta à junta seja semelhante, o que refletiu no assentamento das peças imediatamente após o processo de união e após sua perda de carga estática, tanto para as superfícies rugosas quanto para lisas.

Ao contrário do que se espera em comportamentos de perdas de carga para juntas cuja composição apresenta um de seus elementos mais vulneráveis a deformações elastoplásticas, superfícies mais rugosas apresentariam maior tendência a perdas de carga mais significativas, o que não ocorreu no presente estudo.

Observou-se a necessidade de maior resultante de torque final para as superfícies melhor acabadas (lixadas). Tal fato se deve a ocorrência de maior uniformidade das asperezas, que levam ao contato plástico face às topografias mais rugosas que apresentam comportamento completamente plástico.

Tabela 13 – Parâmetros topográficos para os diferentes acabamentos superficiais estudados
 Fonte: o autor

Parâmetros	S_q [μm]	S_a [μm]	S_q/S_a	S_k [μm]	S_{pk} [μm]	S_{mr1} [%]	S_{vk} [μm]	S_{mr2} [%]
Cabeçote liso	4,19	3,29	1,27	1,37	2,69	15,08	2,92	84,73
Cabeçote rugoso	10,2	8,17	1,25	2,51	5,51	16,94	5,83	83,24
Bloco liso	2,7	2,01	1,35	0,98	1,14	13,23	1,53	85,68
Bloco rugoso	8,54	6,59	1,30	2,18	4,13	15,80	4,62	82,30

7 Discussão

A princípio, toda formulação teórica proposta no roteiro de cálculo VDI2230 abrange qualquer necessidade analítica para se dimensionar uma determinada junta aparafusada, no entanto, a metodologia deste trabalho propõe algo complementar em que se retroalimenta com dados experimentais o desenvolvimento do cálculo. Isso proporciona resultados mais realísticos e consequentemente mais precisos. O próprio ensaio de fricção DTT considera interações entre amostras de peças reais, o que permite alcançar níveis mais reduzidos de tolerâncias na escolha dos parâmetros. Nesse sentido, a metodologia adotada incorpora a validação tanto em situação normal do processo de união, quanto em condições atípicas. Adicionalmente, por se tratar de uma junta aparafusada de alta criticidade onde a deformação do elemento junta de vedação é essencial para evitar qualquer risco de vazamento, o estudo topográfico constata eficiência ou ineficiência diante da variabilidade das interfaces do bloco e cabeçotes do motor.

A escolha da parametrização promove melhorias e evita qualquer possível avaria causada por alta pré-carga. Como a proximidade do pré-aperto sugerido aos pontos de inflexão das curvas de ruptura que contribui para melhoria da possível avaria por oscilação das fricções. A validação dessa constatação está na tabela 4. Adicionalmente, o comparativo da tabela 3 mostra que a estratégia sugerida reduz a faixas de força de união esperada, o que representa mais precisão em termos de grampeamento.

Sendo assim, a estratégia proposta especificada em $100 \text{ Nm} + 300^\circ$ foi construída analítica e experimentalmente conforme a metodologia e posteriormente testada para extremos topográficos em suas perdas de carga. Dessa maneira, o ensaio de validação confirma o comportamento apresentado no pré-ensaio e ratifica a estabilidade da força de união em todos fixadores.

Os 36 parafusos avaliados nos perfis modificados em extremos oscilam em perdas de carga até no máximo 11%, conforme mostra os gráficos das figuras 37 e 38. Ao se tratar de juntas em que se tem um elemento em alumínio que sofre deformações elastoplásticas para preencher vazios entre as peças, pode-se constatar que pela flexibilidade natural do sistema, a perda de carga é admissível. Além disso, conforme estava previsto no objetivo do ensaio, para as duas condições extremas de topografia,

as curvas de aperto mostraram comportamentos muito próximos, o que se confirma pela proximidade dos valores de perda de carga nos dois casos.

É preciso destacar o comportamento similar nos resultados de perda de carga em perfis adversos para parafusos na mesma sequência de apertos. Os fixadores foram apertados na ordem crescente dos números nas tabelas 11 e 12, e observa-se que pelos gráficos das figuras 37 e 38 as menores perdas de carga estão nos primeiros fixadores de cada cabeçote (1, 7, 13, 19, 25 e 31) independente de qual seja a rugosidade da interface. O mesmo ocorre com os máximos de perda de carga para o segundo fixador de cada cabeçote (2, 8, 14, 20, 26 e 32). Tal fato se deve à sequência adotada no ensaio em laboratório, unindo-se cada fixador por vez em sentido em cruzado pré-determinado, o que proporciona maiores assentamentos em alguns fixadores e menores em outros. No entanto, a disparidade é similar em ambas as condições e, por isso, reafirma a estabilidade das extrações de força e consequentemente da estratégia de aperto parametrizada.

Adicionalmente, ao contrário do que se espera e do que se propõe pelo roteiro da VDI 2230, superfícies menos bem acabadas promoveram perdas de carga similares às mais bem acabadas. Nesse sentido, observa-se na análise topográfica que a similaridade nas proporções de vale e picos para superfícies rugosas e lisas, associada ao pequeno acréscimo na relação do aumento da altura das asperezas em relação a espessura da junta, promovem mesmo comportamento em termos de perdas de carga estática.

No que diz respeito a tolerâncias de fabricação das interfaces em estudo, pode-se dizer que diante da análise topográfica pós processo de união realizada no ensaio de perda de carga, a estratégia de união sugerida permite que maiores dispersões podem ser adotadas sem qualquer prejuízo para vedação do sistema nas superfícies em contato com a junta, e que superfícies ainda mais rugosas trarão benefícios em relação a energia despendida durante o aperto.

8 Conclusão

A associação dos dois âmbitos científicos, parametrização dimensional de juntas rigidamente aparafusadas e estudos dos fenômenos trioblógicos, torna possível enxergar o efeito de uma condição adversa que poderia ser fonte de ineficiência da vedação. Como os perfis extremos foram escolhidos baseando-se na condição de fabricação original feita pela primeira análise topográfica do item 6.2, pode-se assumir que a parametrização de aperto sugerida terá eficiência garantida seja qual for a condição topográfica. Tal fato é comprovado pela similaridade entre as variações de perdas de carga no ensaio de corpos de prova em condições adversas de interfaces. Portanto, os novos parâmetros propostos no trabalho e suas respectivas tolerâncias geram condição estável ao processo de união. Observa-se que todos os valores de força de união apresentados para qualquer situação estiveram dentro dos limites esperados pós montagem.

A alteração topográfica de encosto da superfície do fixador no cabeçote não promove qualquer melhoria no processo de geração de força e, por esse motivo, não houve evidência científica para direcionar a pesquisa a esse aspecto.

Assim como os pares trioblógicos em questão, quaisquer fontes de avarias relacionadas a processos de união aparafusada podem ser inseridas na mesma metodologia abordada no trabalho. Embora cada junta aparafusada tenha sua finalidade, nem sempre associada à vedação, o procedimento de associação dos ensaios executados à teoria de roteiro da VDI2230 é a chave para se ter melhorias em busca de maiores níveis de aproveitamento dos fixadores, podendo o resultado culminar em reduções de diâmetro ou classe de resistência.

9 Trabalhos Futuros

1. Validação das estratégias e parâmetros sugeridos no presente trabalho a fim de se estudar o comportamento em termos de perdas de carga dinâmica, comparando-as às estáticas, verificando o quanto as solicitações externas e mudanças de temperatura do motor impactam diretamente nas forças de união.
2. Estudo de um lote maior de perfis extremos de bloco e cabeçote, com o objetivo de se detectar quais procedimentos de usinagem reduziriam as tolerâncias e, conseqüentemente, reduziriam os custos de produção para as mesmas garantias de vedação.
3. Estudo do procedimento de análise para outro caso crítico de junta aparafusada a fim de validar os métodos propostos no trabalho, com o intuito de aprimorar a filosofia atual em detrimento da típica europeia, em que se opta por alto pré-torque.

Roteiro VDI2230 - Dimensionamento de Juntas Aparafusadas

11 Referências

- BHUSHAN, B. **Introduction to Tribology**. Ohio, 1949.
- BRANDÃO, M. O. **Análise do contato de superfícies metálicas rugosas aplicada a válvulas de esfera de bloqueio**. Rio de Janeiro, 2007.
- BARBOZA, J., GARCIA, R., CIOTO, R., e COLLARES, A. **Fastener True Elongation Threshold as a Function of Thread Length and Tensile Strength**. SAE PAPER. 2001.
- CIOTO, R. e COLLARES, A. **Reduction of Fatigue Resistance on Bolts with Threads Rolled after Heat Treatment, as a Result of Superficial Treatment**. SAE PAPER. 2003.
- DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN - DIN 946. **Determination of Coefficient of Friction of Bol/Nut Assemblies under specified conditions**. 1991.
- GARCIA, R. **Conceitos gerais sobre torque e processos de torque**. Revista do Parafuso. São Paulo, 2008.
- HUTCHINGS, I. M.; **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. Londres: Edward Arnold. 1992.
- MANUAL DO USUÁRIO E DE REFERÊNCIA. **DTT Determinador Ensaio Tensão**. Metalac SPS Ind. e Com. Ltda. 1998.
- MUNIZ, J. M. **Fenômenos Tribológicos intrínsecos ao travamento de juntas de engenharia aparafusadas**. São Paulo, 2007.
- NAGEL Maschinen und Werkzeugfabrik GmbH. **Honen und Planschleifen in einer Maschine**. Nürtingen, 2011.
- NASCIMENTO, Hermano Jr. **Estudo da relação Torque x Força tensora e do coeficiente de atrito em parafusos revestidos isentos de cromo hexavalente**. Belo Horizonte, 2003.
- NASSAR, S. A., and T. S. Sun. **Surface roughness effect on the torque-tension relationship in threaded fasteners**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 221.2 (2007): 95-103.
- OLSSON, J. e SANDLUND, P. **From The Design Basis for Screw Joints**. Lulea, 2008.
- ECCLES W., SHERRINGTON I., ARNELL R.D. **Frictional changes during repeated tightening of zinc plated threaded fasteners**. Preston, 2009.
- Q. ZOU, T. S. SUN, S. A. NASSAR, G. C. BARBER, e A. K. GUMUL. **Effect of lubrication of friction and torque-tension relationship in threaded fasteners**. Oakland, 2006.

REIFF, J. D. **A Procedure for Calculation of Torque Specifications for Bolted Joints with Prevailing Torque.** Disponível em www.astm.org. 2005.

SILVA, K. C. **Fixadores Roscados e Juntas Aparafusadas**, Apostila do curso da Metalac SPS Ind. e Com. Ltda. 2014.

TOMANIK, Eduardo. **Modelling of the Asperity Contact Area on Actual 3D Surfaces**, SAE paper. São Paulo, 2005.

TOTH, G. **Torque and Angle Controlled Tightening of Bolted Joints**, Göteborg, 2006.

VEREIN DEUTSCHER INDUSTRIE. **VDI 2230 - Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen.** Berlin, 2003.