

Thiago Calin

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE JUNTAS EM
EPDM AUTO-LUBRIFICADAS PARA RADIADORES DE
RESFRIAMENTO, EM TECNOLOGIA MECÂNICA, PARA
VEÍCULOS DE PASSEIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissionalizante).

São Paulo

2008

Thiago Calin

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE JUNTAS EM
EPDM AUTO-LUBRIFICADAS PARA RADIADORES DE
RESFRIAMENTO, EM TECNOLOGIA MECÂNICA, PARA
VEÍCULOS DE PASSEIO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Automotiva (Mestrado
Profissionalizante).

Área de Concentração:
Engenharia Automotiva

Orientador:
Flávio Augusto Sanzovo Fiorelli

São Paulo

2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Calin, Thiago

Desenvolvimento e aplicação de juntas em EPDM auto-lubrificadas para radiadores de resfriamento, em tecnologia mecânica, para veículos de passeio / T. Calin. – São Paulo, 2008. 114 p.

Trabalho de conclusão de curso (Mestrado Profissionalizante em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

**1. Lubrificação 2. Montagem do produto (Redução; custos)
3. Indústria automobilística 4. Linha de montagem (Processos)
5. Inovações tecnológicas I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. II. t.**

Aos meus pais, Cesário e Márcia,
pela dedicação e valores morais transmitidos,
além da compreensão e apoio sempre ilimitados.

À minha esposa, Marcela, pelo incentivo e amor.

Ao meu filho, Matheus, pelo carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Augusto Sanzovo Fiorelli, que com sua liderança, grande conhecimento e suporte constantes, foi fundamental no desenvolvimento e sucesso deste projeto.

A todos do Laboratório, Engenharia de Métodos e Processo, Engenharia da Qualidade da Valeo Térmico Motor do Brasil.

Ao parceiro Hutchinson do Brasil, às equipes do Laboratório, Desenvolvimento e Qualidade, pelo empenho para a conclusão e sucesso deste trabalho.

E a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, na execução deste.

*“Saber não basta, devemos aplicar.
Desejar não basta, devemos fazer”.*

Goethe (1749-1832)

RESUMO

Com o aumento na produção de veículos automotores para atender aos mercados locais e globais, notadamente os do segmento de entrada (A/B), e a busca cada vez maior dos consumidores por automóveis que apresentem melhor custo-benefício, as melhorias técnicas no processo produtivo são essenciais à manutenção da competitividade para os fabricantes de autopeças. No processo de montagem de radiadores de resfriamento veicular, do tipo mecânico (fixação dos tubos às aletas por expansão), a lubricidade das juntas é um aspecto importante para uma montagem dos diversos componentes que garanta a adequada estanqueidade do conjunto. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é validar a utilização em produção seriada de juntas em EPDM auto-lubrificada na montagem de radiadores de tecnologia mecânica, substituindo juntas pós-lubrificadas atualmente em uso. Como esta substituição resultará em redução no custo de fabricação tanto da junta quanto dos radiadores, o desenvolvimento tecnológico contou com a colaboração do fornecedor na formulação e processamento do composto auto-lubrificante. Além dos aspectos técnicos ligados às propriedades físico-químicas deste composto e ao fenômeno migratório do aditivo de deslizamento à superfície da junta, foram analisados o comportamento dimensional, realizados testes de validação da junta auto-lubrificada na linha de montagem de radiadores para avaliação de indicadores de rejeitos da linha de montagem, e levantados os valores de força de inserção na interface da junta para quantificar a redução da força de atrito pela migração do lubrificante à superfície do EPDM. O resultado do trabalho demonstrou a viabilidade técnico-comercial (com retorno do investimento em 1 ano) na utilização do composto auto-lubricado, pela redução de custo direto na compra do componente junta, redução de rejeitos de linha na montagem do radiador e determinação de um critério quantitativo para controle da condição de lubrificação da junta, até então feito subjetiva.

Palavras-chave: Radiadores de resfriamento veiculares. Juntas. EPDM auto-lubrificado.

ABSTRACT

The increase of the vehicle production to supply local and global markets, mainly segments A/B, and consumer searching even more for products which represent a better cost-benefit ratio, makes the technical improvements in the production process essential to competitiveness maintenance among auto parts manufacturers. In the cooling radiators assembly process, mechanical type (tubes and thins are mechanically expanded) the lubrication of gaskets is a relevant issue for the proper assembly of all components to assure a final product leakage proof. As this project will result directly in cost reduction of radiator manufacturing, the technological development of the gasket occurred with the support of supplier designer, for compound formulation and processing of the self lubricated gasket. Besides technical issues related to the physical-chemical properties of the compound and surface migratory phenomenon of the slip agent, both dimensional behavior and assembly performance of the gasket in the radiator assembly line were done in order to validate the proposal and check the reduction of non-conformous radiators after autolub gaskets introduction. The insertion forces values were raised at the gasket interface to quantify how friction reduces during the time by the migration of the slip agent on the surface of the EPDM.

The results of this paper demonstrates technical-commercial feasibility (a year payback return) during the auto lubricated compound use, by the direct cost reduction on the gasket purchasing process and rejects decrease on the radiator assembly line. Also the lubrication property had an objectively quality control test method developed instead of the subjective way done so far.

Keywords: Engine cooling radiators. Gaskets. Self-lubricated EPDM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Balanço energético de um motor de combustão interna (Nomoto, 2006).....	9
Figura 2.2. Componentes do sistema de arrefecimento de um veículo de passeio (Nomoto, 2006)	10
Figura 2.3. Grupo moto-ventilador: visão de conjunto e vista explodida.....	11
Figura 2.4. Bomba d'água: exemplos e vista em corte	12
Figura 2.5. Radiador	13
Figura 2.6. Vaso de expansão.....	14
Figura 2.7. Termostato.....	14
Figura 2.8. Radiador de tecnologia mecânica (Nomoto, 2006)	16
Figura 2.9. Radiador brasado (Nomoto, 2006).....	16
Figura 2.10. Componentes básicos de um radiador de tecnologia mecânica	17
Figura 2.11. Tubos em alumínio utilizados em radiadores.....	18
Figura 2.12. Detalhe de uma aleta em alumínio	19
Figura 2.13. Caixa do radiador de tecnologia mecânica: vista lateral e inferior	20
Figura 2.14. Exemplos de coletores (à esquerda) e detalhes de um coletor para tubos cilíndricos (vistas inferior e superior).....	21
Figura 2.15. Exemplo de junta em EPDM; nos detalhes, vista inferior (esquerda) e superior (direita)	21
Figura 3.1. Distribuição de agente de deslizamento no produto fundido (acima) e migração para superfície no produto formado (Wypych, 2005)	31
Figura 3.2. Processo atual de fabricação da junta em EPDM.....	34
Figura 3.3. Misturador “Banbury”	36
Figura 3.4. Extrusora de mantas em EPDM	36
Figura 3.5. Máquina e molde de injeção da junta, durante a extração por robô.....	37
Figura 3.6. Autoclave	39
Figura 3.7. Lubrificação: (a) tambor de aplicação da solução de silicone e (b) componentes sobre a grelha para remoção de excesso.....	40
Figura 3.8. Processo proposto de fabricação da junta em EPDM com aditivo de deslizamento agregado ao composto.....	43
Figura 4.1. Célula de montagem em “U” de radiadores de tecnologia mecânica	45
Figura 4.2. Processo de montagem do radiador de tecnologia mecânica	46
Figura 4.3. Operação de montagem manual da junta no coletor: (a) alinhamento entre os componentes; (b) pressão manual para encaixe das golas nos furos do coletor; (c) vista do conjunto montado	47
Figura 4.4. Prensa de transferência do subconjunto junta-coletor à colméia e expansão dos tubos (no detalhe, colméia com os tubos ainda não expandidos).....	48

Figura 4.5. Conjunto junta-coletor-colméia após a operação de transferência, com os tubos expandidos e as extremidades rebordeadas.....	48
Figura 4.6. Operador inserindo o conjunto junta-coletor ao berço superior.....	49
Figura 4.7. Dispositivo de teste de baixa pressão: (a) dispositivo livre; (b) radiador em teste.....	50
Figura 4.8. Prensa de cravação das caixas do radiador.....	52
Figura 4.9. Operação de cravação: (a) radiador semi-acabado, sem cravação das caixas laterais (dentes do coletor perpendiculares à junta); (b) radiador com a caixa cravada (dentes dobrados a 90° sobre a caixa).....	52
Figura 4.10. Teste de estanqueidade a alta pressão.....	53
Figura 4.11. Junta cortada.....	55
Figura 4.12. Falhas no processo de montagem do radiador: à esquerda, tubo maior; à direita, tubo menor.	56
Figura 4.13. Junta levantada.....	57
Figura 4.14. Junta ensacada.....	58
Figura 4.15. Célula para retrabalho de juntas com lubrificação insuficiente.....	59
Figura 4.16. Produção mensal de radiadores de tecnologia mecânica.....	60
Figura 4.17. Índice de mensal de ocorrência de falhas nas linhas de montagem de radiadores de tecnologia mecânica.....	61
Figura 4.18. Custos mensais médios associados às falhas ocorridas.....	61
Figura 5.1. Fluxograma do processo de introdução da junta auto-lubrificada na produção de radiadores de tecnologia mecânica.....	64
Figura 5.2. Posicionamento do subconjunto junta/coletor na prensa de transferência.....	73
Figura 5.3. Detalhe do varão superior de encaixe do subconjunto junta/coletor na prensa de transferência.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Resultados dos testes físico-químicos de pré-validação do composto.	67
Tabela 5.2. Parâmetros do teste de montagem com a junta auto-lubrificada.....	71
Tabela 5.3. Tabela comparativa das principais juntas e redução de gastos	87

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BRDS	Banned, Restricted and Declarable Substances
CKD	Completely knocked down
EPDM	Etileno Propileno Dieno Copolímero
FTIR	Fourier transform infrared
IMDS	International Material Data System
MTBF	Mean Time Between Failures
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
phr	parts per hundred resin
PP	Polipropileno
ppm	Partes por milhão
SBR	Poliestireno butadieno

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS.....	XII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS E MÉTODOS DO TRABALHO	5
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
2. O SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA MOTORES DE CICLO OTTO	8
2.1. COMPONENTES DO SISTEMA	10
2.1.1. Grupo moto-ventilador (GMV).....	10
2.1.2. Líquido de arrefecimento	11
2.1.3. Bomba d'água	12
2.1.4. Radiadores	12
2.1.5. Vaso de expansão.....	13
2.1.6. Termostato.....	14
2.2. RADIADORES DE RESFRIAMENTO DE TECNOLOGIA MECÂNICA.....	15
2.2.1. Componentes do radiador.....	17
2.2.1.1. Tubos.....	17
2.2.1.2. Aletas.....	18
2.2.1.3. Caixas.....	19
2.2.1.4. Coletores	20
2.2.1.5. Juntas de vedação.....	20
3. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS DE VEDAÇÃO DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA	24
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS	24
3.2. ADITIVAÇÃO DE ELASTÔMEROS: AGENTES DE DESLIZAMENTO.....	28
3.3. LUBRIFICAÇÃO PARA PROCESSO DE MONTAGEM (CRITÉRIO SUBJETIVO).....	32

3.4 FLUXO DE FABRICAÇÃO DAS JUNTAS DE VEDAÇÃO.....	33
3.4.1. Fluxo atual: fabricação com lubrificação por pós-siliconização	33
3.4.2 Fluxo proposto: fabricação com aditivação.....	41
4 O PROCESSO DE MONTAGEM DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA.....	44
4.1. LINHA DE MONTAGEM	44
4.2. O PROCESSO DE MONTAGEM	45
4.2.1. Montagem manual da junta no coletor.....	46
4.2.2. Transferência dos conjuntos junta-coletor à colméia e expansão dos tubos.....	47
4.2.3. Teste de estanqueidade a baixa pressão (vácuo).....	49
4.2.4. Cravação das caixas laterais.....	51
4.2.5. Teste de estanqueidade a alta pressão	51
4.2.6. Embalagem do produto acabado	53
4.3. MODOS DE FALHA NA MONTAGEM DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA	54
4.3.1. Junta cortada.....	55
4.3.2. Variação dimensional / geométrica dos tubos.....	56
4.3.3. Junta levantada.....	57
4.3.4. Junta ensacada	58
4.3.5. Retrabalho das juntas	58
4.4 HISTÓRICO DE QUALIDADE E ÍNDICES DE REJEITO DA JUNTA PÓS-LUBRIFICADA	60
5. INTRODUÇÃO DE JUNTA AUTO-LUBRIFICADA NA PRODUÇÃO DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA	63
5.1. FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO	63
5.2. VALIDAÇÃO DO COMPOSTO DA JUNTA	64
5.3 VALIDAÇÃO DIMENSIONAL DAS JUNTAS	68
5.4 VALIDAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO RADIADOR.....	69
5.5. ESTUDO DO COMPORTAMENTO MIGRATÓRIO DO ADITIVO DE DESLIZAMENTO DA JUNTA.....	76
5.5.1. Metodologia adotada	77
5.5.2 Resultados obtidos.....	80
5.6. AVALIAÇÃO DO IMPACTO ECONÔMICO DA INTRODUÇÃO DA JUNTA AUTO-LUBRIFICADA.....	84
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	89
7. REFERÊNCIAS.....	95

1. INTRODUÇÃO

No momento em que a indústria automotiva inicia seu segundo século, uma confluência de inovações tecnológicas está levando a modificações fundamentais na estrutura industrial, dinâmica competitiva e arquitetura de produto.

Os avanços nos processos de desenvolvimento de produto tornaram-se ainda mais significantes, com ciclos cada vez menores em função da adoção da engenharia simultânea pelas empresas.

A terceirização de parte do sistema fabril, por meio da transferência da produção e da responsabilidade no desenvolvimento de componentes pelos fabricantes de veículos para seus fornecedores, foi intensa durante a década de 1990. Essa migração intensiva combinou-se com desenvolvimento modulares, ou *co-designs*, fazendo a cadeia de suprimentos ser radicalmente remodelada.

Surge desta maneira um novo modelo de organização da cadeia industrial, baseado no repasse de atividades antes desenvolvidas pelas montadoras a seus fornecedores, nascendo concomitantemente uma nova forma de gerenciamento da cadeia de suprimentos, que pressupõe a organização das empresas da cadeia em rede por meio da existência de cooperação e coordenação, o “*comakership*” (Christopher, 2007).

O “*comakership*” é uma das formas mais desenvolvidas de acordo entre clientes e fornecedores, baseada numa visão sistêmica e integradora da cadeia de suprimentos, abordando estratégias, políticas e aspectos operacionais relacionados à questão da qualidade, escolha e avaliação de fornecedores e logística que promovem a competitividade global da cadeia. Segundo Merli (1994), o “*comakership*” é uma relação evoluída entre cliente e fornecedor, e é considerado um fator prioritário na estratégia industrial”.

No entanto, esta relação só é duradoura se custo e qualidade são mantidos, e o constante aumento de custo das matérias-primas, bem como contratos de fornecimento com cláusulas de reduções de custo anuais impostas pela quase totalidade dos fabricantes de automóveis pressionam os fornecedores a investirem continuamente no aprimoramento de técnicas e processos produtivos com o intuito de reduzir custos operacionais, aumentar os níveis de produtividade e reduzir falhas no processo.

Na manufatura, melhorias incrementais que levem a reduções de custo são fonte de vantagem competitiva para estabelecimento destas parcerias. Estas reduções de custo têm sido o principal foco dos sistemistas e montadoras, pressionados ainda pela queda de barreiras comerciais, aumento de competição global e negociação de contratos corporativos.

Os sistemistas, particularmente, são forçados a melhorar seu desempenho inovando produtos e aumentando a eficiência de seus processos produtivos. Os ganhos em produtividade advindos desse processo de melhoria contínua, em troca, aumentam a competitividade e geram vantagens sustentáveis, com produtos de maior valor agregado e custo inferior (Acker, 2007). Esse processo encoraja os sistemistas a desenvolverem as habilidades que necessitam para competir, introduzindo inovações em produto e processo e adotando inovações de outros segmentos ou mesmo concorrentes. Esse processo pode ser ilustrado em 4 etapas, exemplificando a dinâmica de mercado (cf. Baily *et al.*, 2005):

1. efeitos do mercado: a competição gera mudanças nas fatias de mercado e nas margens de lucros, como consequência da combinação entre preço e valor agregado que estão sendo oferecidos aos consumidores e da relação preço/custo dos sistemistas;
2. construção de habilidades: os sistemistas respondem aos desafios de mercado e redução em suas margens construindo novas habilidades, introduzindo inovações próprias em produtos e processos ou adotando inovações desenvolvidas e compartilhadas por outros;

3. oferta de produto e custos: as habilidades desenvolvidas pelos sistemistas são combinadas de forma a produzir uma gama de veículos com determinado grupo de características sob um custo particular. As inovações em processos melhoram custos com eficiência, enquanto que as inovações em produtos promovem a habilidade para construir e melhorar novos modelos. Os dois tipos de inovação acabam por influenciar a qualidade do veículo;
4. preços e posição competitiva: os sistemistas estabelecem preços baseados na demanda de veículos, propostas de valores, estrutura de custo, bem como preço e disponibilidade de marcas concorrentes. O sucesso nas vendas de veículos depende diretamente da melhor relação custo / benefício ofertada pelo mercado.

É neste contexto de necessidade de redução de custo, aumento do valor agregado e qualidade percebida por meio de melhoria técnica de produto e processo, que o desenvolvimento e aplicação de uma junta em EPDM auto-lubrificada na montagem de radiadores de tecnologia mecânica será abordado nesse trabalho.

As juntas auto-lubrificadas apresentam uma inovação ao processo de montagem do conjunto radiador e ao seu próprio processo produtivo, neste último pela eliminação de pós lubrificação da junta acabada através da inclusão de agente deslizando à massa do produto, no estágio inicial de produção. Já para seu uso final, a montagem do radiador, a junta possui característica auto-lubrificante crescente com o tempo, e não permanece mais suscetível às intempéries de tempo, com a evaporação da solução a base de silicone, o que impossibilitaria a utilização da mesma. O desenvolvimento da junta auto-lubrificada, em parceria com o fornecedor desta família de produto, buscou inicialmente a redução do custo do radiador, através da validação técnica da massa do composto de EPDM aditivado e da utilização desta nova junta na linha de produção seriada de montagem de radiadores.

A característica de lubrificação da junta é necessária durante o processo de montagem do radiador, para que ela possa ser facilmente posicionada nos dispositivos de montagem, e para que os tubos de alumínio possam ser adequadamente inseridos através das denominadas golas (furos cilíndricos). Se a lubrificação da junta não for adequada (junta “seca”), a montagem fica dificultada e pode-se gerar peças não-conformes pelo aparecimento de defeitos de montagem do tipo “junta ensacada” ou “golas cortadas”, que serão detalhados nos capítulos seguintes.

Na condição atual (junta pós-lubrificada), o processo de lubrificação do componente se dá pela imersão completa de determinada quantidade de juntas já vulcanizadas em uma solução de óleo de silicone, com posterior centrifugação para remoção do excesso de lubrificante. O processo é manual, e não considera variações de temperatura e umidade relativa. Nas épocas mais quentes e/ou secas nota-se um aumento na quantidade de peças não-conformes na montagem do radiador, devido à volatilização do silicone superficial, o que implica em um retrabalho do lote a ser utilizado, com conseqüente perda de produtividade.

Utilizando-se os conceitos de engenharia e análise de valor, em um desenvolvimento co-participativo (sistemista e fornecedor), identificou-se que poderia ser realizada uma melhoria no produto, tanto em termos do processo produtivo da junta quanto da montagem do radiador, por meio da eliminação do processo pós-siliconização e inclusão de aditivo de deslizamento na etapa de composição da massa utilizada para a produção do componente.

A produção de uma junta auto-lubrificada garantirá uma condição de montabilidade adequada independentemente das condições climáticas, uma vez que o lubrificante estará incorporado ao material da junta e não se volatilizará. Além disso, o aditivo tende a migrar do interior do EPDM para a superfície do componente, o que fará com que característica de lubrificação superficial melhore com o passar do tempo. A validação do composto (matéria-prima) e da aplicação seriada da junta auto-lubrificada no processo de montagem permitirá a preconização dessa tecnologia para todos os radiadores de tecnologia mecânica do fabricante.

1.1. OBJETIVOS E MÉTODOS DO TRABALHO

Em função do exposto, esse trabalho tem por objetivo:

- a validação do uso de juntas auto-lubrificadas na produção seriada de radiadores de resfriamento de tecnologia mecânica;
- a verificação do comportamento de migração do agente lubrificante na superfície do componente;
- a definição de critérios objetivos para controle da condição de lubrificação da junta no fornecedor e no recebimento.

Para atingir esses objetivos, foram inicialmente realizados testes de validação do composto de EPDM sugerido pelo fornecedor, em consonância aos requisitos normatizados pelo fabricante de radiador, por meio de corpos de prova enviados para laboratório na França, acreditado pelo sistemista (cliente).

A seguir, foi produzido um lote inicial de juntas auto-lubrificadas com o composto validado, que passou por um procedimento de validação dimensional e foi posteriormente utilizado para uma jornada de plena cadência em 300 conjuntos de radiadores para avaliação da utilização em série e confiabilidade (rejeitos de linha nos testes de estanqueidade).

Do mesmo lote de juntas auto-lubrificadas utilizadas na jornada de plena cadência, 30 amostras foram separadas para utilização na verificação do comportamento migratório do agente lubrificante, por meio da medição da força de inserção na região das golas (interface) com o passar do tempo. A partir desse estudo foi definido um procedimento de verificação objetiva da condição de lubrificação da junta, a ser utilizado tanto pelo fornecedor quanto pelo sistemista, na liberação do lote fabricado e inspeção de recebimento, respectivamente.

Finalizando o desenvolvimento, procedeu-se a uma avaliação da redução de custo na produção de radiadores de tecnologia mecânica em função da utilização do novo tipo de junta.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta uma breve introdução sobre o sistema de arrefecimento do motor de combustão interna de ciclo Otto utilizado em veículos de passeio. É apresentada uma descrição de cada um dos principais componentes do sistema, com ênfase no radiador de resfriamento de tecnologia mecânica, amplamente utilizado em veículos de passeio com propulsores até 1.600 cm³.

As diversas peças utilizadas na fabricação do radiador são também apresentadas no capítulo 2, com destaque para a junta de vedação, de forma a fornecer ao leitor uma base teórica para compreensão da sua função e interfaces de montagem, visando facilitar o entendimento dos ganhos obtidos com a introdução de uma tecnologia auto-lubrificante na fabricação da junta.

A seguir é apresentada, no capítulo 3, uma revisão sobre a fabricação de juntas em EPDM e discutidos aspectos ligados à aplicação de aditivos de deslizamento (“*slip agents*”) em substituição à lubrificação superficial pós-vulcanização, a partir de onde todo o estudo será desenvolvido até a validação final do produto (junta auto-lubrificada) para uso seriado.

Esse capítulo apresenta também o processo corrente de fabricação da junta pós-lubrificada e as alterações propostas visando a fabricação de uma junta auto-lubrificada, demonstrando os ganhos a serem obtidos nas etapas da produção da junta. Ao final do capítulo discute-se o critério subjetivo atualmente utilizado para detectar não-conformidades na lubrificação das juntas, e as dificuldades de controle associadas à falta de um padrão quantitativo para essa avaliação.

O capítulo 4 descreve as diversas operações que compõem o processo de montagem do radiador de tecnologia mecânica, indicando em quais delas a lubrificação da junta é relevante e os efeitos sentidos na linha pela ausência ou insuficiência da mesma. O histórico dos rejeitos de linha apresentado quantifica a relevância desta característica da junta, detalhando os principais mecanismos de falha, causas-raiz associadas e seus efeitos para o produto.

No capítulo 5 são apresentadas as etapas do desenvolvimento e aplicação da junta em produção seriada, desde o processo de desenvolvimento do composto em parceria com o fornecedor da junta até a validação na linha de montagem de radiadores. São apresentados os resultados de uma jornada de plena cadência para validação do uso da junta com a nova tecnologia na linha de produção seriada do radiador, comparando-se resultados de desempenho da nova junta com a junta pós-lubrificada atualmente em uso.

O capítulo 5 apresenta ainda os resultados do estudo realizado para quantificar a lubrificação superficial das juntas por meio da força de inserção de um punção no interior das golas, simulando-se assim a interface real de montagem, a partir dos quais foi possível estabelecer um critério quantitativo para controle na liberação do lote no início da montagem dos radiadores. Por fim, o capítulo 5 apresenta uma avaliação da redução de custos obtida com a utilização da junta de EPDM com composto auto-lubrificado em substituição ao pós-lubrificado.

2. O SISTEMA DE ARREFECIMENTO PARA MOTORES DE CICLO OTTO

A otimização dos sistemas de arrefecimento em veículos é um aspecto importante no processo de tornar os motores de combustão interna compatíveis com os requisitos cada vez mais severos de emissões de gases e consumo de combustível. Além da otimização da durabilidade e confiabilidade do sistema, a engenharia automotiva busca reduzir o custo de produtos com desempenhos cada vez melhores e passíveis de reciclagem, adequados às normativas de substâncias banidas, restritas e declaráveis, preconizadas pela Europa e que se tornaram requisito imposto pelas montadoras a seus sistemistas em todos os continentes, principalmente a partir do início desta década.

Embora os motores à combustão interna tenham evoluído muito, principalmente após a década de 1980 pelo aumento da eletrônica embarcada, a eficiência energética de um motor ciclo Otto moderno ainda varia na faixa de 20 a 25% (Moran & Shapiro, 2007), para taxas de compressão de 8:1 e 10:1, respectivamente.

Assim, a maior parte da energia gerada pela queima do combustível é convertida em calor (cerca de 70%), ficando o sistema de arrefecimento do motor responsável pelo controle da temperatura dos fluidos e componentes mecânicos, evitando danos por superaquecimento, como mostrado na Figura 2.1.

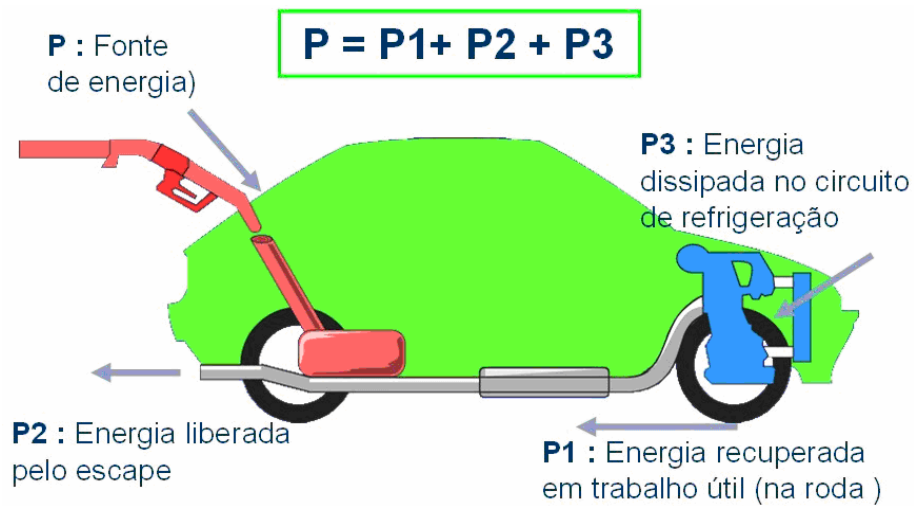


Figura 2.1. Balanço energético de um motor de combustão interna
(Nomoto, 2006)

Também são funções do sistema de arrefecimento:

- propiciar rápido aquecimento da câmara de combustão até a temperatura nominal de operação, durante partidas a frio;
- controlar a temperatura do sistema para otimizar a combustão;
- reduzir emissões.

O arrefecimento a água é a configuração padrão atualmente utilizada em carros de passeio e veículos pesados. Na verdade, o termo “arrefecimento a água” não é o mais adequado, uma vez que, em lugar da água pura, os sistemas de arrefecimento trabalham com uma mistura de água destilada, um anticongelante (geralmente etilenoglicol) e inibidores de corrosão específicos para uma dada aplicação. A adição de uma concentração de anticongelante de 30 a 50% (cf. Bosch, 2007) permite ainda elevar o ponto de ebulição da mistura e obter temperaturas operacionais de até 120° C em uma pressão de 1,4 bar em carros de passeio.

2.1. Componentes do Sistema

Os principais componentes do sistema de arrefecimento de veículos de passeio estão representados na Figura 2.2, e são descritos nos itens a seguir.

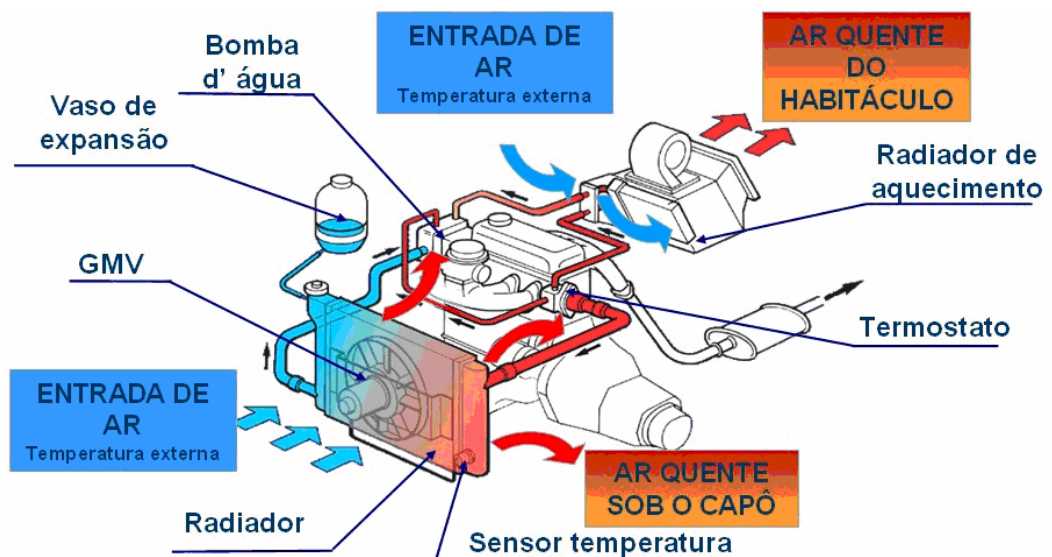


Figura 2.2. Componentes do sistema de arrefecimento de um veículo de passeio (Nomoto, 2006)

2.1.1. Grupo moto-ventilador (GMV)

Conjunto formado por um motor elétrico de corrente contínua, um defletor de ar e um ventilador (Figura 2.3). Tem a função de propiciar taxas adequadas de resfriamento do fluido de arrefecimento quando a pressão dinâmica é baixa ou o fluxo de ar insuficiente, condições estas encontradas em veículos em baixa velocidade ou parados. O conjunto gera um fluxo de ar forçado de ar através da colméia do trocador de calor (radiador), aumentando a eficiência de troca térmica devido à convecção forçada.

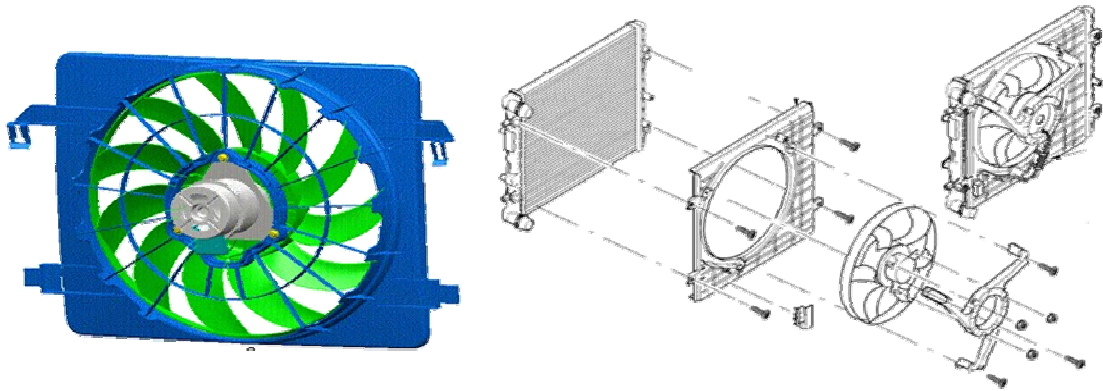


Figura 2.3. Grupo moto-ventilador: visão de conjunto e vista explodida

Os ventiladores utilizados no GMV de carros de passeio são normalmente de plástico, moldados por injeção em uma única peça, com potências de acionamento de até 30 kW, também utilizados em veículos comerciais.

Dependendo do veículo e das condições operacionais, o fluxo de ar não assistido (aquele devido à movimentação do veículo) fornece condições adequadas de arrefecimento por até 95% do tempo de operação do motor. Assim, um sistema de controle do ventilador é importante para economizar energia e assim contribuir diretamente para a eficiência energética do veículo.

O sistema de controle mais simples atualmente em uso é do tipo “liga/desliga”. Existem também sistemas de controle mais sofisticados (que podem ser do tipo multiestágio ou contínuo) que ajustam a velocidade do ventilador à necessidade de arrefecimento, permitindo um maior controle e um menor consumo de potência elétrica. Qualquer que seja o sistema, ele trabalha com o sinal de um sensor de temperatura colocado junto ao radiador do sistema de arrefecimento.

2.1.2. Líquido de arrefecimento

Fluido composto de água destilada, etilenoglicol e aditivos inibidores de corrosão. Este composto escoá pelas galerias do bloco do motor, prevenindo o

superaquecimento e mantendo a integridade mecânica do motor. Transferem o calor produzido pelo motor para o radiador, que o dissipa. O líquido deve apresentar alta capacidade térmica, baixa viscosidade, baixo custo e ser quimicamente inerte, não ocasionando corrosão ao sistema de arrefecimento.

2.1.3. Bomba d'água

Tem por função pressurizar o sistema e transferir ao líquido de arrefecimento a energia necessária para circulação pelo sistema. A Figura 2.4 mostra alguns tipos de bombas e um diagrama esquemático de uma bomba d'água padrão.

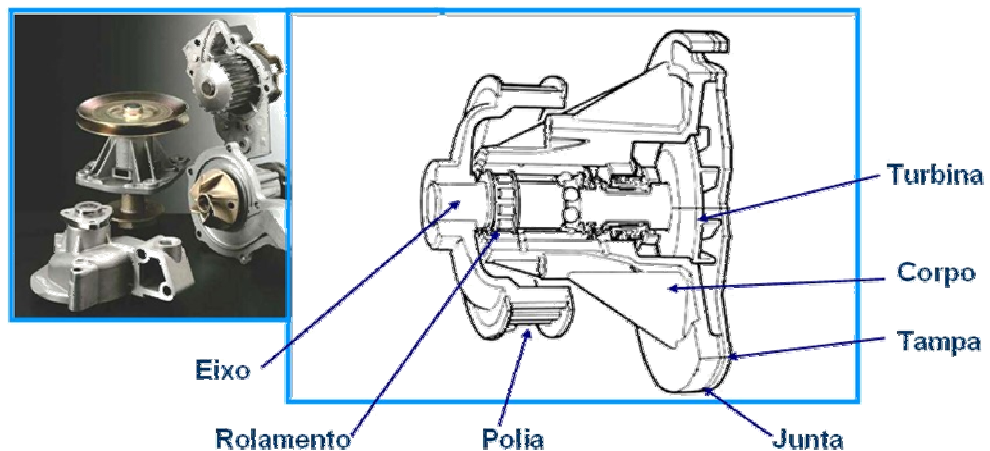


Figura 2.4. Bomba d'água: exemplos e vista em corte

2.1.4. Radiadores

Trocadores de calor ar-fluido de arrefecimento, compostos de tubos e aletas, geralmente confeccionados em alumínio para veículos de passeio (Figura 2.5). Têm por objetivo rejeitar para o meio externo o calor liberado no

motor, mantendo assim a temperatura do fluido de arrefecimento abaixo de um valor máximo permissível sob determinadas condições operacionais.

No caso de veículos com possibilidade de aquecimento do habitáculo, o sistema de arrefecimento conta com dois radiadores: um principal para resfriamento do motor, e um secundário para aquecimento do ar insuflado no habitáculo.



Figura 2.5. Radiador

2.1.5. Vaso de expansão

Reservatório termoinjetado ou soprado em polipropileno com tampa valvulada (Figura 2.6). Fornece um canal de escapamento para os gases pressurizados e para o eventual vapor gerado, evitando assim que ocorra cavitação na admissão da bomba d'água. Seu volume deve ser grande o suficiente para absorver a expansão térmica do líquido de arrefecimento, durante o aquecimento do motor do veículo e acúmulo de pressão, e evitar a ebulição do líquido de arrefecimento quando o motor quente é desligado. Sua posição deve corresponder ao ponto mais alto do sistema de arrefecimento, para assegurar que os gases e o vapor sejam removidos adequadamente.



Figura 2.6. Vaso de expansão

2.1.6. Termostato

Elemento de controle do sistema, com a finalidade de manter a temperatura dentro de uma faixa adequada (Figura 2.7). Em partidas a frio, permanece fechado, bloqueando a saída do radiador, de forma que o fluido de arrefecimento recircule pelo motor e se aqueça rapidamente. Quando a temperatura do fluido atinge a faixa entre 82°C e 91°C, o termostato começa a abrir, permitindo que o fluido escoe pelo radiador. Entre 93°C e 103°C, o termostato encontra-se totalmente aberto.

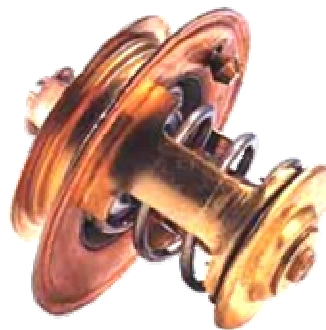


Figura 2.7. Termostato

2.2. Radiadores de Resfriamento de Tecnologia Mecânica

Como já destacado anteriormente, qualquer que seja a condição operacional do motor e a do meio externo, o radiador deve garantir a adequada rejeição do calor do motor para o meio externo. O tamanho e a capacidade de arrefecimento de um radiador para uma aplicação específica podem ser determinados a partir de equações de balanço e correlações de transferência de calor e perda de pressão.

Os núcleos dos radiadores nos veículos de passeio atuais são fabricados quase que exclusivamente em alumínio por questões de peso e custo, e esse material está cada vez mais sendo também utilizado em radiadores para uma grande variedade de veículos comerciais e caminhões no mundo todo. Existem duas configurações básicas (ou “tecnologias”) de montagem dos radiadores:

- radiadores unidos ou montados mecanicamente (“tecnologia mecânica”).
- radiadores soldados (ou brasados);

Quando o radiador é montado mecanicamente, a grade de arrefecimento é formada pelas aletas estampadas, montadas em torno de tubos redondos, ovais ou ovais chatos. As aletas, fixadas nos tubos por interferência mecânica, são corrugadas e/ou entalhadas nos ângulos retos na direção do fluxo de ar (Figura 2.8). Essa configuração apresenta um menor custo de fabricação e uma menor eficiência, sendo por isso geralmente utilizada para aplicações com motores menos potentes (1.000 cm^3 a 1.600 cm^3) ou quando há uma maior disponibilidade de espaço no compartimento do motor.

Nos radiadores brasados (Figura 2.9), os tubos, aletas e coletores em alumínio têm em sua superfície um elemento fusível denominado “*clad*”, uma liga de alumínio que se funde numa temperatura menor que a temperatura de fusão do alumínio do núcleo dos componentes. Os subconjuntos ou núcleos de aletas, tubos e coletores são mantidos organizados sobre um berço de brasagem, e colocados em fornos especiais para fusão do “*clad*”. Desta forma,

diferentemente dos radiadores de tecnologia mecânica, onde os tubos fixam-se às aletas por expansão mecânica, nos radiadores brasados a fixação é feita por meio da solda de “*clad*” entre as superfícies de contato, como mostrado no detalhe da Figura 2.9. O radiador brasado apresenta um desempenho térmico superior ao mecânico de mesma dimensão, sendo utilizado em veículos com motorização acima dos 1.600 cm³. O custo de fabricação de um radiador brasado é superior ao mecânico, sendo justificado em utilizações onde o espaço disponível no compartimento do motor é limitado.

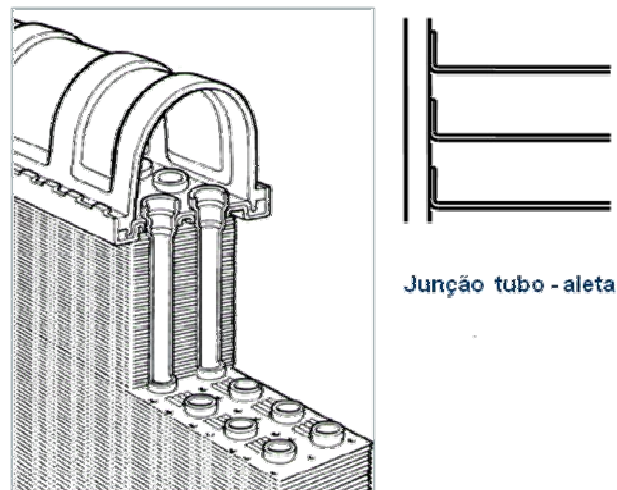


Figura 2.8. Radiador de tecnologia mecânica (Nomoto, 2006)

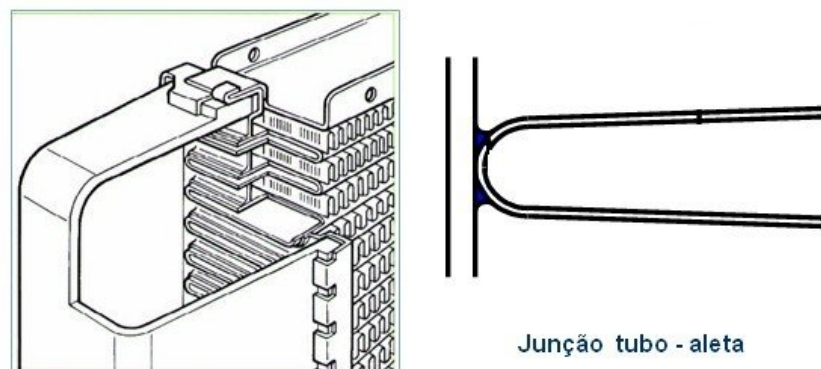


Figura 2.9. Radiador brasado (Nomoto, 2006)

2.2.1. Componentes do radiador

Os radiadores de resfriamento de tecnologia de montagem mecânica são constituídos por cinco elementos, mostrados na Figura 2.10: tubos, caixas, coletores, juntas e aletas. Os próximos itens apresentam as principais características de cada um desses elementos.

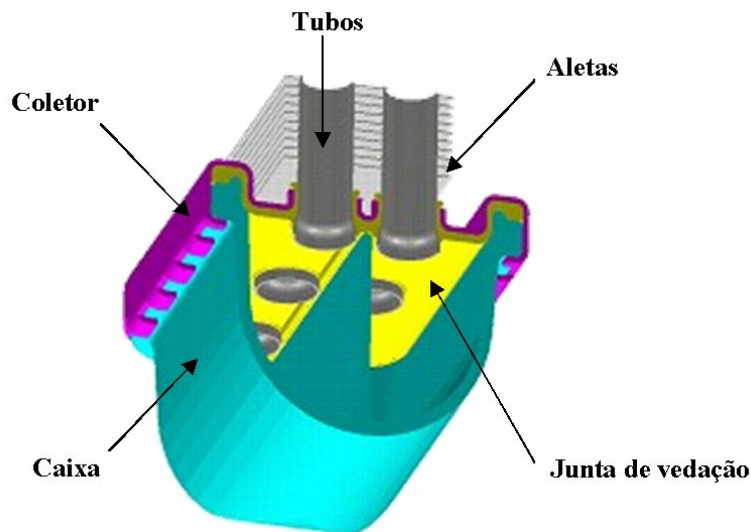


Figura 2.10. Componentes básicos de um radiador de tecnologia mecânica.

2.2.1.1. Tubos

Os tubos utilizados na montagem de radiadores de tecnologia mecânica são confeccionados em alumínio por extrusão ou trefilação, podendo ser cilíndricos ou ovais, dependendo do projeto do radiador. Devem resistir à corrosão “branca”, ocasionada pela oxidação do fluido de arrefecimento durante a vida útil do radiador, e suportar as variações de temperatura e pressão de operação. Durante o processo de montagem sofrem deformação de seu diâmetro interno com o intuito de fixá-los nas aletas, originando um subconjunto denominado núcleo do radiador ou “core”. Após a fixação por interferência nas aletas, devem suportar vibração e choques de partículas e

dejetos contidos no ar, quando o veículo se encontra em movimento, sem se romperem. A Figura 2.11 mostra alguns tubos utilizados na montagem de radiadores.

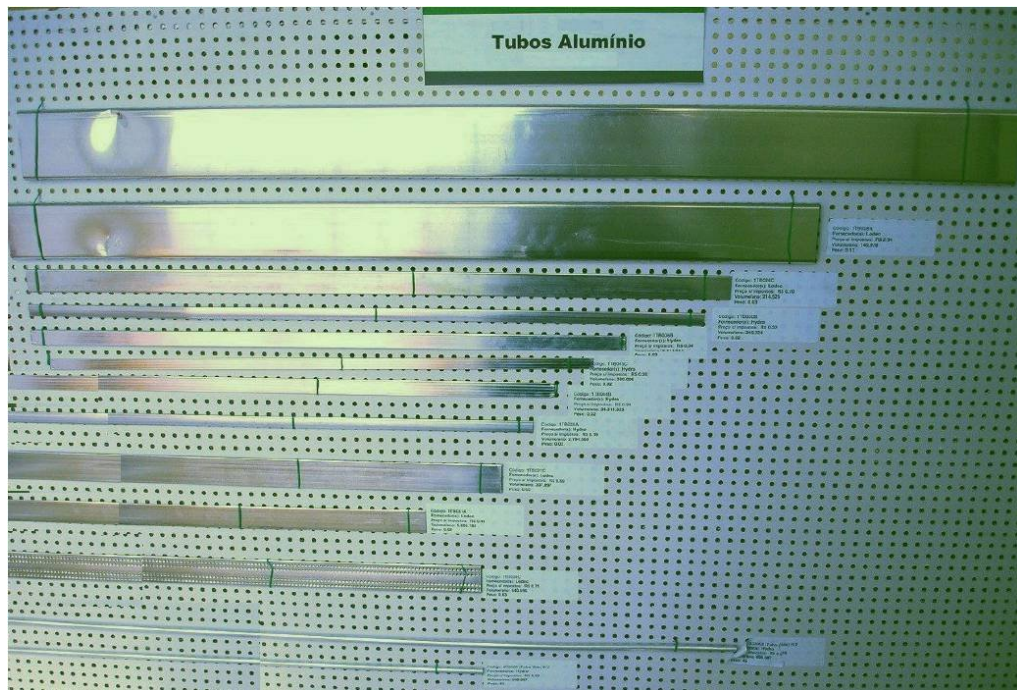


Figura 2.11. Tubos em alumínio utilizados em radiadores

2.2.1.2. Aletas

São confeccionadas por estampagem em alumínio. Como mostrado na Figura 2.12, contam com janelas e furos para intensificação da transferência de calor. A geometria dessas janelas e furos é um compromisso entre a minimização da perda de carga e a maximização da transferência de calor. A transferência de calor entre o tubo e a aleta ocorre por condução e entre a aleta e o ar por convecção (cf. Moran & Shapiro, 2007).

Os principais parâmetros a serem definidos para esse elemento, levando-se em conta a vazão de ar que deve passar pelo radiador, são: a largura e a espessura, o passo das aletas e o número de persianas.

Tipicamente, nas aplicações em radiadores mecânicos, a espessura da bobina de alumínio, anteriormente ao processo de estampagem, é da ordem de 0,065 a 0,075mm.



Figura 2.12. Detalhe de uma aleta em alumínio

2.2.1.3. Caixas

As caixas, mostradas na Figura 2.13, têm por função fazer o fechamento do percurso do líquido refrigerante nas entradas e saídas dos tubos. São produzidas, por injeção termoplástica, em poliamidas de engenharia reforçadas com fibras de vidro. Além da fibra, as resinas utilizadas na produção das caixas são termoestabilizadas para suportarem as variações de temperatura encontradas nas diversas condições climáticas e de utilização do veículo, e contém componentes anti-degradantes, ou resistentes à glicólise, com o intuito de resistir às reações químicas oriundas da oxidação do fluido de arrefecimento e da poliamida da caixa. A maior parte das caixas, além da função de fechamento, também são responsáveis por fixar o radiador ao veículo e fixar o condensador do sistema de climatização veicular (quando presente). Devem suportar, assim como os tubos, as vibrações advindas da operação do veículo.

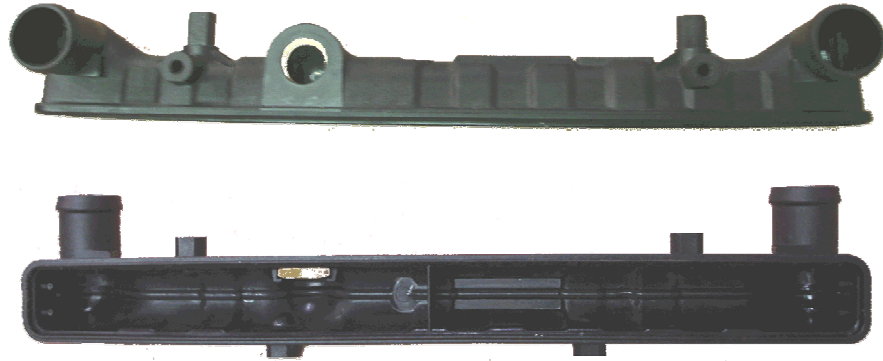


Figura 2.13. Caixa do radiador de tecnologia mecânica: vista lateral e inferior

2.2.1.4. Coletores

Elementos que atuam como grampo de união entre as caixas e o núcleo do radiador. São confeccionados em alumínio estampado e fixados por interferência aos tubos do núcleo do radiador. A seguir são colocadas as juntas de vedação em EPDM, e por meio de um processo de cravação os dentes do coletor são dobrados por sobre as caixas, pressionando-as contra as juntas, conferindo ao conjunto radiador integração dos componentes e estanqueidade. A Figura 2.14 apresenta alguns coletores, bem como os detalhes dos encaixes de um coletor para tubos cilíndricos e dos dentes para fixação da caixa.

2.2.1.5. Juntas de vedação

As juntas de vedação, mostradas na Figura 2.15, são manufaturadas em EPDM (etileno propileno dieno copolímero) e são responsáveis pela vedação entre caixas, tubos e coletores nos radiadores de tecnologia mecânica. Além dos radiadores de resfriamento, juntas em EPDM são utilizadas nos radiadores de aquecimento com a mesma função de vedação. Devem suportar temperaturas de operação entre -35°C e 150°C .

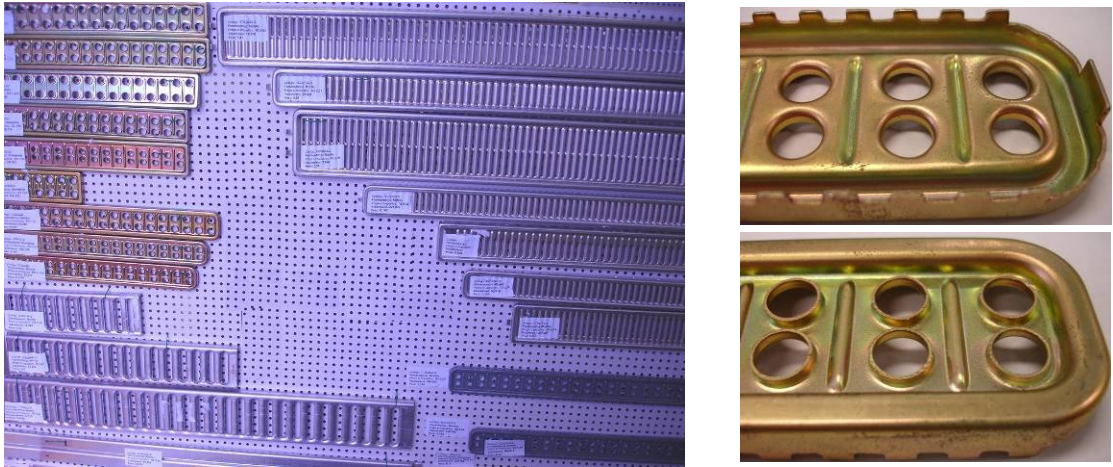


Figura 2.14. Exemplos de coletores (à esquerda) e detalhes de um coletor para tubos cilíndricos (vistas inferior e superior)

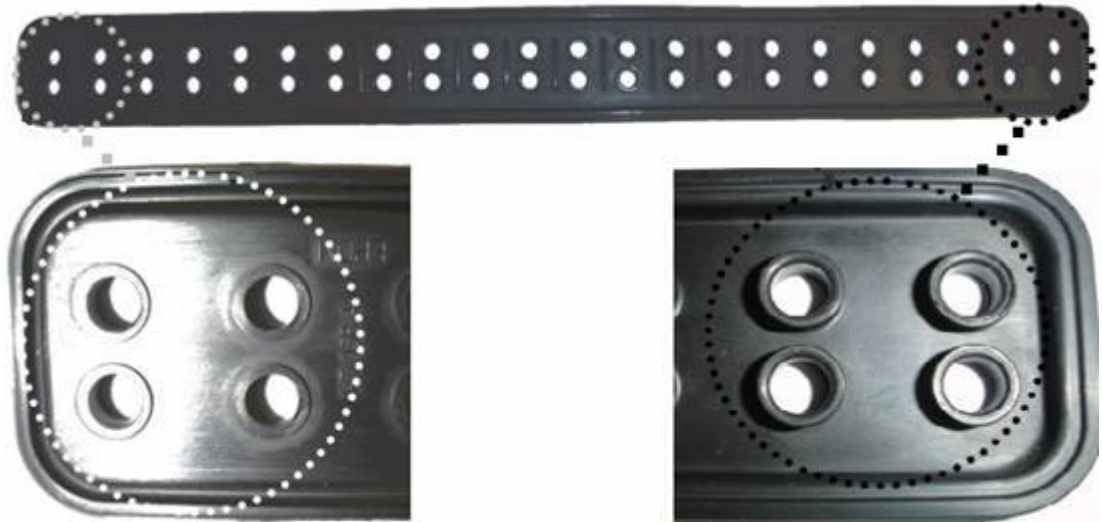


Figura 2.15. Exemplo de junta em EPDM; nos detalhes, vista inferior (esquerda) e superior (direita)

Assim como os demais componentes automotivos, o material da junta não deve conter nenhuma das substâncias restritas ou banidas contidas na lista BRDS (“Banned, Restricted and Declarable Substances”) do IMDS¹

¹ No IMDS, todos materiais utilizados pelos fabricantes de veículos automotores são mantidos e arquivados. Somente desta maneira é possível aos fabricantes de autopeças atenderem aos requisitos impostos pelas montadoras, padrões internacionais, leis e regulamentações.

("International Material Data System"). Podem ser injetadas ou conformadas a quente, e vulcanizadas por cura com peróxido. Para a aplicação em veículos devem estar completamente vulcanizadas e livres de imperfeições e falhas de material. Dentre suas propriedades mecânicas, as mais relevantes para esse tipo de aplicação são a dureza (verificada tanto no componente recém produzido quanto em condições de envelhecimento para análise de confiabilidade), a resistência ao alongamento, a mínima deformação permanente (DPC) e a resistência à corrosão.

Além das propriedades físico-químicas, as juntas de vedação utilizadas na produção de radiadores de resfriamento de tecnologia mecânica devem apresentar, no momento da montagem (inserção dos tubos e assentamento nos coletores), uma certa lubrificação de sua superfície para reduzir o atrito ocasionado entre as superfícies do EPDM e do alumínio. Esta propriedade de lubrificação é considerada satisfatória, do ponto de vista operacional, quando não se observam dificuldades na montagem entre as interfaces e problemas como juntas levantadas ou golas cortadas, que causam reprovações dos conjuntos durante testes de estanqueidade. Os tipos de falhas causados pela falta de lubrificação ou lubrificação insuficiente (junta "seca") serão detalhadas posteriormente nesse trabalho.

Atualmente, a lubrificação da junta em EPDM vulcanizado é obtida por meio de um processo de pós-lubrificação da junta, no qual ela é imersa em um banho de silicone e posteriormente centrifugada para remoção do excesso de lubrificante. O banho de silicone, depois de algum tempo de uso, deve ser descartado de forma adequada, sem causar impactos adversos no meio ambiente.

Apesar de relevante para o processo de montagem, os critérios de avaliação dessa condição de lubrificação da junta ainda são subjetivos, tanto em seu controle pelo fornecedor do componente quanto no processo de fabricação do radiador. Apenas determina-se, por meio de análise visual e tátil daqueles que possuem conhecimento empírico deste atributo, se o componente está conforme ou ruim.

Como destacado anteriormente, os objetivos desse trabalho são desenvolver e validar uma junta em que a lubrificação passe a ser adicionada à massa (composto) do produto em substituição à imersão, gerando ganhos em termos de custo, qualidade do produto e impacto no meio ambiente. Além disso, serão definidos parâmetros quantitativos para avaliação da condição de lubrificação da junta.

3. O PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE JUNTAS DE VEDAÇÃO DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA

3.1. Materiais Utilizados

As borrachas sintéticas mais utilizadas atualmente, tanto para aplicações especiais como uso em geral, são as borrachas de propileno-etileno e elastômeros (também denominados EPDM e EPM). As vendas alcançaram 1,2 milhões de toneladas em 2005, após sua introdução comercial no início de década de 60 (Karpeles & Grossi, 2006).

A tecnologia de polimerização e catalisação empregada desde o início da década de 1990 possibilita aos polímeros atender a requisitos específicos e a processos rigorosos, resultando em um material versátil e com ampla utilização em guarnições e vedações de veículos, paletas de vidros, radiadores, mangueiras de uso em geral, correias e isolação elétrica, entre outras aplicações.

Com exceção de aplicações específicas, como o revestimento de fios e cabos, as borrachas de EPDM (terpolímero de etileno propileno dieno, conforme designação ASTM) são o principal tipo de borracha sintética utilizada na indústria pois apresentam:

- boa resistência ao ozônio e às intempéries;
- boa resistência à degradação térmica;
- boa deformação permanente;
- flexibilidade a baixas temperaturas;
- boa resistência à degradação química;
- baixo peso específico;
- aceitação de altos níveis de cargas de preenchimento;
- rápido ciclo de mistura;
- boas características de extrusão;
- boas propriedades elétricas;
- baixa permeabilidade à água;
- baixo custo.

Além disso, as borrachas de EPDM oferecem alta resistência a ácidos, álcalis e soluções aquecidas de detergentes, e apresentam boa resistência aos solventes oxigenados, fluidos hidráulicos e gorduras animais. No entanto, têm resistência limitada a hidrocarbonetos como tolueno e gasolina.

A resiliência do EPDM é menor que a da borracha natural e equivale aproximadamente à do SBR (poliestireno butadieno) (Modulus, 2006). Contudo, o EPDM apresenta boa porcentagem de resiliência em baixa temperatura. O baixo peso específico do polímero e as propriedades físicas adequadas mesmo quando sujeito a altos níveis de carga de preenchimento (“*fillers*”), possibilita ao fabricante a obtenção de compostos altamente econômicos.

Todas estas propriedades, associadas aos baixos custos da matéria-prima e de fabricação, fazem com que o EPDM seja amplamente utilizado nos sistemas de arrefecimento veiculares, em anéis tipo “*o-ring*” e juntas de vedação de radiadores.

Determinadas propriedades do EPDM podem ser melhoradas por meio da agregação de aditivos à borracha durante o processo de fabricação. Por exemplo, uma maior resistência ao envelhecimento sob temperaturas de até

130°C pode ser obtida com a adição de um acelerador à base de enxofre, e para temperaturas de até 160°C por meio de cura à base de compostos de peróxido. A resistência à compressão (“*compression set*”) é melhorada, particularmente sob temperaturas elevadas, se enxofre ou peróxido são utilizados durante a cura. A junta em EPDM que é objeto deste trabalho sofre processo de cura por peróxido em função das exigências impostas pelas normas internas das montadoras para validação de vedações do sistema de arrefecimento. Esse tipo de acelerador é mais efetivo e apresenta estado de cura superior aos do enxofre ou óxido metálico também utilizados.

Os polímeros de EPDM respondem bem a cargas de preenchimento e plastificantes, o que torna esses compostos economicamente atrativos, uma vez que as cargas de preenchimento têm custo menor que o custo do EPDM. Podem apresentar elevadas tensões de ruptura e alongamento, excelente resistência à abrasão e ao óleo, assim como baixa inflamabilidade.

Na composição de uma borracha são normalmente encontrados:

- elastômero: matéria-prima base para fabricação do EPDM. No caso deste trabalho, o EPDM utilizado é do tipo não resistente a óleo;
- ativadores: têm a função de aumentar a velocidade de vulcanização do composto, reduzindo assim tempo de vulcanização necessário;
- plastificantes: têm por função catalisar a quebra das moléculas do elastômero, facilitando sua mastigação e a incorporação de cargas, reduzindo a geração de calor na mistura. Sua atuação deve ocorrer apenas na fase inicial da mistura, após a adição das cargas e do agente de cura. Uma atuação mais longa irá influir negativamente nas propriedades mecânicas do vulcanizado. É importante destacar que a incorporação dos aditivos ao elastômero é impraticável sem a plastificação. São normalmente utilizadas concentrações da ordem de 0,10 a 2,00 phr (“*parts per hundred resin*” ou porcentagem de resina em base mássica);
- retardantes: atuam no sentido de retardar o início da vulcanização, a fim de evitar problemas de pré-vulcanização em compostos muito

acelerados. Utilizam-se concentrações de 0,10 a 0,50 phr, conforme a necessidade do processo;

- antioxidantes/antiozonizantes: a reatividade dos grupos insaturados existentes nas moléculas da maioria dos elastômeros possibilita a vulcanização com o enxofre, porém os tornam sensíveis ao ataque por oxigênio, ozônio e outras substâncias oxidantes. Os antioxidantes/antiozonizantes atuam retardando a ação destes elementos oxidantes, prolongando a vida útil dos vulcanizados. O antidegradante, seja contra oxigênio ou ozônio, atua no sentido de interromper a formação de radicais livres. Utilizam-se concentrações de 0,3 a 3,0 phr;
- carga: componente utilizado para diversas finalidades como ajuste das propriedades físicas, redução de custos, melhoria no processamento, aumento da dureza, redução do inchamento em solventes e óleos. Diversas substâncias são utilizadas como carga, dentre as quais se pode citar o óxido de alumínio, os sulfatos de bário ou de cálcio, os carbonato de cálcio natural ou de magnésio, talco, cortiça, flocos de algodão, fibra de vidro, celulose, negro de fumo, as quais podem ser utilizadas nas mais variadas proporções;
- auxiliares de processo: ao contrário dos plastificantes, que atuam diretamente sobre a cadeia polimérica, os auxiliares de processo, normalmente derivados dos ácidos graxos, reduzem a viscosidade dos compostos que os contém, sem provocar ruptura da cadeia molecular;
- dissecante: tem por objetivo absorver a umidade proveniente principalmente de cargas minerais. A concentração típica no composto é de 10 phr, a 65° C;
- agente de vulcanização/reticulação: promove ligações cruzadas entre as macro moléculas dos elastômeros. Pode ser à base de enxofre (vulcanização) ou peróxido (reticulação), sendo que este último propicia uma maior estabilidade, resistência a altas

temperaturas e baixa deformação permanente por compressão (DPC). Assim, a utilização de peróxido é preconizada por todos os sistemistas e montadoras para a fabricação de juntas de vedação de radiadores de resfriamento;

- aceleradores de vulcanização: catalisam a ação do agente de vulcanização/reticulação, reduzindo o tempo de transformação das propriedades plásticas da borracha em propriedades elásticas. Propiciam uma cura mais rápida e alta eficiência de “*crosslinking*” ou ligações cruzadas. São solúveis no elastômero e eficientes sob diversas temperaturas de vulcanização, não interferindo em propriedades como o envelhecimento e adesão;
- agente de expansão: utilizados no composto para expansão volumétrica do produto final, que ocorre pela liberação de gases do agente de expansão e conseqüente formação de porosidades;
- odorante: confere ao vulcanizado um odor agradável ou mascara o seu cheiro. Geralmente são utilizados quando os elastômeros destinam-se à fabricação de componentes do habitáculo dos veículos.

3.2. Aditivação de elastômeros: agentes de deslizamento

Além da matéria-prima base e de todos os componentes listados anteriormente, na composição das massas de elastômero podem ainda ser utilizados aditivos para atuar como antibloqueadores, aditivos de solda e de deslizamento.

O termo deslizamento significa movimentar-se escorregando, e no contexto desse trabalho implica que o agente deslizante aplicado ao composto deve reduzir o coeficiente de atrito do material com o intuito de reduzir/eliminar falhas de montagem dos radiadores.

Os agentes de deslizamento podem ser utilizados tanto no processo de fabricação, durante a homogeneização da mistura, ou pode ser aplicado posteriormente ao produto acabado.

Esta propriedade de deslizamento é o fator principal desse trabalho. No atual processo de montagem dos radiadores mecânicos, a condição de deslizamento da junta em EPDM durante a montagem é essencial para que o produto final (radiador) apresente uma de suas principais propriedades: a estanqueidade. Uma condição de deslizamento inadequada da junta no processo de fabricação do radiador causa:

- elevados esforços manuais para o operador;
- um alto índice de rejeição apontado pelos testes de estanqueidade, tanto a baixa quanto a alta pressão;
- queda significativa na produtividade do posto de montagem.

Assim, como já mencionado, com esse trabalho pretende-se avaliar a incorporação dos aditivos de deslizamento na composição dos elastômeros para juntas de vedação, eliminando o processo atual de pós siliconização da junta já em seu estado curado, dando origem assim a um produto com propriedade auto-lubrificante. O acréscimo do aditivo de deslizamento à massa do composto permitirá:

- reduzir o número de operações do processo de fabricação da junta no fornecedor, eliminando o processo de pós-siliconização e o descarte do silicone utilizado nesse processo;
- fabricar uma junta que apresente estabilidade na sua condição de deslizamento (lubrificação superficial);
- reduzir o retrabalho da junta com solução a base de silicone durante épocas de baixa umidade relativa do ar e altas temperaturas;
- aumentar a confiabilidade do processo de montagem do radiador, reduzindo os índices de rejeição por vazamento causados por defeitos de montagem advindos da lubrificação inadequada da junta.

A natureza e morfologia do polímero utilizado, bem como a sua cristalinidade, são as variáveis mais relevantes para definição do tipo de aditivo a ser utilizado. O comportamento do deslizamento de produtos em plástico depende do tipo de polímero. As moléculas de deslizamento difundem-se principalmente através das regiões amorfas de uma poliolefina, e assim a migração é mais lenta quanto maior for a cristalinidade das resinas, como polietileno de alta densidade (PEAD) e polipropileno (PP).

Os agentes de deslizamento, para desempenhar adequadamente sua função, devem estar presentes na superfície do elastômero, e portanto devem migrar pelo material até atingir essa camada. Como pode ser visto na Figura 3.1, durante a mistura com o polímero fundido o agente de deslizamento é absorvido pelas regiões amorfas, onde permanece enquanto o composto permanecer fundido. Durante o resfriamento, o aditivo de deslizamento migra para a superfície do polímero numa taxa de migração que depende da diferença entre as energias polares, de superfície do polímero e do aditivo, bem como da estrutura química da matriz formada pelo elastômero e aditivo.

Ainda na Figura 3.1 pode-se observar primeiramente a formação de uma monocamada na superfície do polímero, seguida da deposição de camadas subseqüentes à medida que novas moléculas do agente de deslizamento alcançam a superfície do elastômero.

Deve-se destacar que o processo de migração começa com o início do resfriamento, e continua ocorrendo por algum tempo após a vulcanização do elastômero. Por exemplo, um estudo realizado por espectrofotometria tipo XPS (Focquet, 1995) mostrou que a concentração superficial de um aditivo à base de oleamida era crescente por 30 dias, após o que se tornava constante. Já para um outro aditivo à base de estereamida, a concentração na superfície após esse período era 3 vezes menor do que a de oleamida.

O arranjo das moléculas do agente de deslizamento na superfície não é caótico, mas possui uma estrutura que resulta da afinidade dos dois elementos estruturais contidos no agente de deslizamento: um grupo amida e cadeias de hidrocarbonetos. As cadeias de hidrocarbonetos possuem alta afinidade com o EPDM, pois possuem propriedades muito similares. Por isso, as cadeias de

hidrocarbonetos na primeira camada são dispostas sobre a superfície do polímero com os grupos de amida faceando o ar. À medida que novas moléculas cheguem até a superfície, a próxima camada será orientada de tal forma que grupos funcionais similares fiquem em contato. Assim, no caso da segunda camada o grupo de amida ficará em contato com aquele da primeira camada, e assim ocorrerá sucessivamente para as novas camadas formadas.

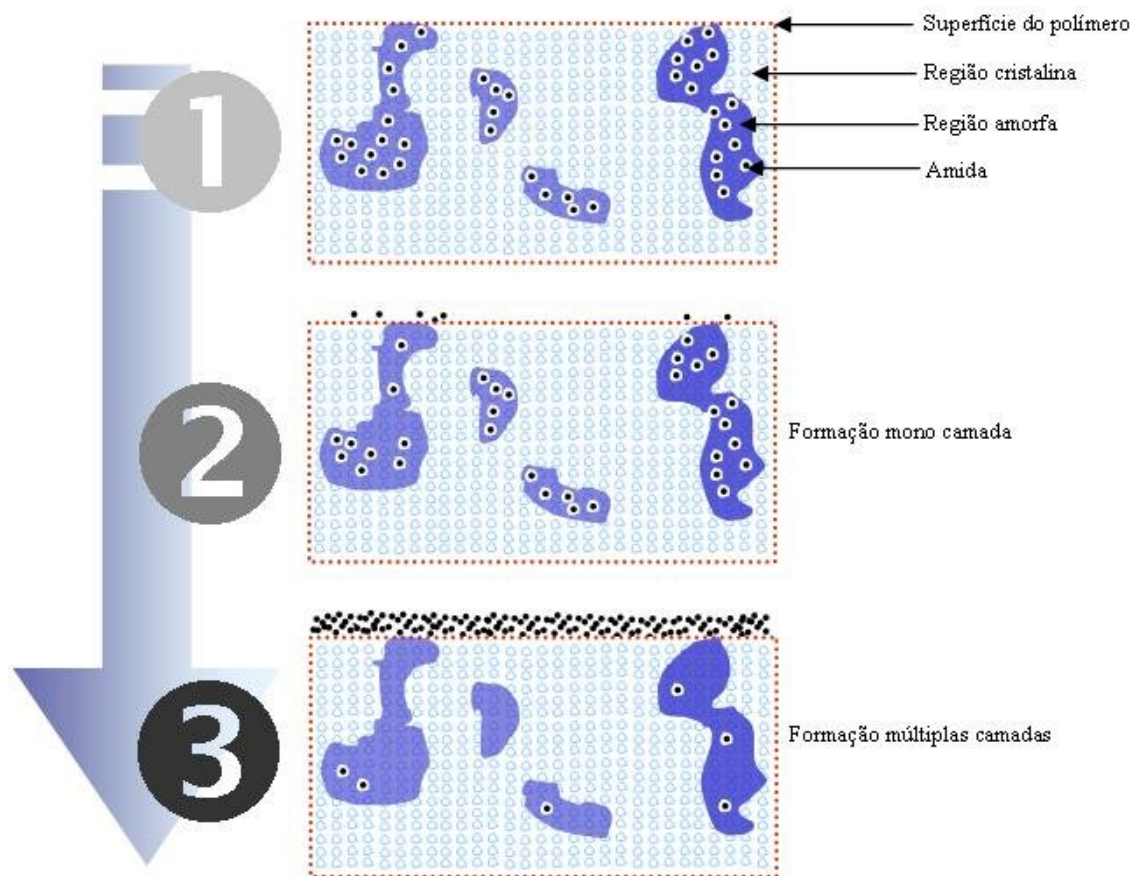


Figura 3.1. Distribuição de agente de deslizamento no produto fundido (acima) e migração para superfície no produto formado (Wypych, 2005)

Um estudo de Janokar *et al.* (2004) mostra que o coeficiente de atrito não é reduzido até que uma camada dupla se forme na superfície, pois na primeira camada a energia necessária para a quebra de ligações é relativamente baixa, e por isso é fácil romper a camada lubrificante. Com a

formação da segunda camada, em função do arranjo das moléculas, esta desliza por sobre a primeira (amida com amida), dificultando o rompimento da camada lubrificante e produzindo assim as propriedades de deslizamento esperadas.

Amidas de diferentes pesos moleculares podem ser utilizadas como agentes de deslizamento. A oleamida foi o primeiro agente de deslizamento empregado, e permanece sendo utilizada com PEBD (polietileno de baixa densidade) (Plastemart, 2007), . Contudo, por ser mais volátil, a oleamida vem sendo lentamente substituída pela erucamida que, por ser termicamente mais estável, apresenta um melhor desempenho a altas temperaturas (Mori *et al.*, 2003).

Em função desses aspectos, nesse trabalho foi utilizado um aditivo de deslizamento a base de erucamida, por apresentar melhor estabilidade de concentração na superfície do EPDM à temperatura ambiente, o que reduz as perdas por evaporação, que é a principal causa de juntas “secas”, problema observado durante a produção de radiadores, principalmente em dias de baixa umidade relativa e altas temperaturas.

3.3. Lubrificação para processo de montagem (critério subjetivo)

Como comentado anteriormente, as juntas de vedação em radiadores de tecnologia mecânica devem apresentar característica de deslizamento para atender à montagem de seus componentes em regiões de interface. Esta característica lubrificante é necessária apenas durante a montagem do conjunto radiador, sendo irrelevante durante a vida útil do produto.

A falta ou excesso de lubrificante ocasiona diversos problemas, entre eles alto índice de rejeito nos testes de estanqueidade. Embora possa parecer uma falha na definição pela engenharia, a condição de lubrificação atualmente é somente sugerida no desenho, e validada com o fabricante em testes

empíricos na linha de montagem do radiador. Não há especificação objetiva, quantificada através de uma unidade de medida, que estabeleça valores nominais e tolerância para controle do fornecedor.

Devido ao alto índice de problemas de qualidade ocasionados pela lubrificação insuficiente do componente, os fornecedores passaram a trabalhar com uma porcentagem maior de silicone em solução para aumentar a confiabilidade do componente em caso de evaporação do lubrificante para atmosfera durante o período de estocagem, principalmente em dias quentes e secos. Contudo, também aqui nenhum critério objetivo foi aplicado.

Na linha de montagem, a falta de lubrificação das juntas é constatada no momento das montagens manuais das mesmas às suas interfaces, a partir do maior esforço físico despendido pelos operadores na realização dessa operação. Quando isso ocorre, há um retrabalho da junta (nova imersão em silicone) para continuidade da produção, e o fornecedor acionado para uma ação de contenção.

Assim, além da proposta de modificação no processo de fabricação das juntas, outro objetivo do trabalho é a construção de um dispositivo a ser montado numa máquina de teste de compressão. Esse dispositivo será utilizado para estabelecer critérios objetivos para a característica de deslizamento das juntas e para controle desse parâmetro no processo de recebimento do componente. O projeto, montagem e validação desse dispositivo será tratado posteriormente no presente trabalho.

3.4 Fluxo de fabricação das juntas de vedação

3.4.1. Fluxo atual: fabricação com lubrificação por pós-siliconização

A seqüência atual do processo de fabricação da junta em EPDM, com pós-lubrificação por solução aquosa de silicone a 10% em volume está representado no diagrama de fluxo de processo da Figura 3.2, onde está

indicado, em destaque (*), os processos que serão melhorados e/ou eliminados com a inclusão do agente de deslizamento ao composto, em substituição à pós-lubrificação.

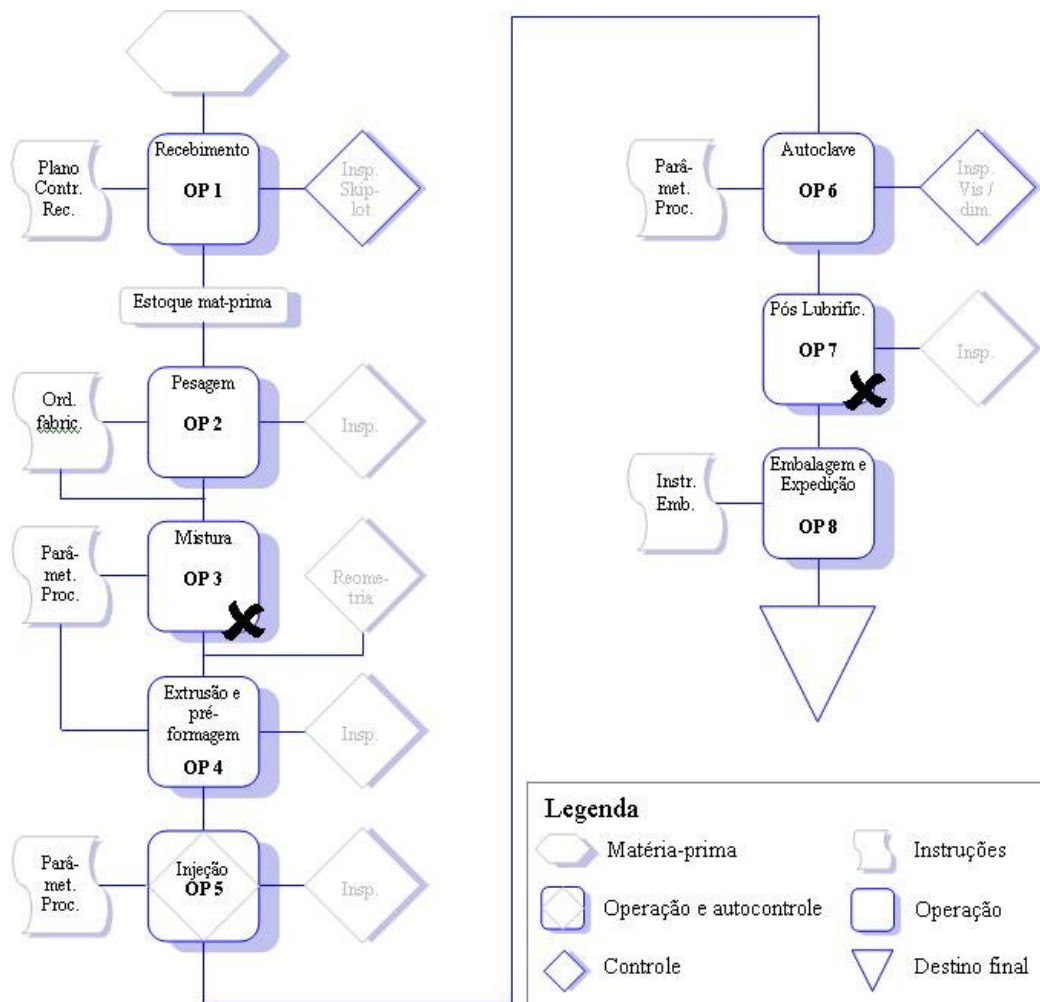


Figura 3.2. Processo atual de fabricação da junta em EPDM

As diversas etapas do processo mostradas na Figura 3.2 são:

1. Recebimento (OP 1): as matérias-primas (EPDM e demais componentes da junta) são recebidas, inspecionadas e mantidas em local apropriado, seco e ventilado, e com iluminação adequada. Os lotes liberados para produção são identificados para garantir fluxo PEPS (primeiro que entra, primeiro que sai), e assim evitar

estocagem prolongada e vencimento da validade dos compostos. O material liberado é estocado o mais próximo o possível da pesagem, para evitar transporte desnecessário.

2. Ordem de fabricação: nessa etapa informa-se à equipe de produção qual o composto a ser produzido, a quantidade e formulação, bem como o lote de cada matéria-prima a ser utilizada para efeito de rastreabilidade. Para cada ordem de fabricação, existe um número específico, que será transferido e mantido até a expedição do produto acabado, também para rastreabilidade.
3. Pesagem (OP 2): com a ordem de fabricação em mãos e a formulação indicada, inicia-se a quantificação das matérias-primas utilizadas no composto. Na pesagem “fina”, de maior precisão, separa-se a quantidade de ativadores, antioxidantes, aceleradores, vulcanizantes, retardadores e aditivos. Na pesagem “grosseira”, as cargas e os plastificantes. Este processo é crítico, pois qualquer variação ou erro operacional implicará no refugo do lote ou influenciará nas propriedades físico-químicas da junta, com conseqüente redução da vida útil do radiador.
4. Mistura (OP 3): nessa etapa de fabricação, todos os componentes do composto serão misturados, para homogeneização, durante cerca de 3 a 4 minutos, numa temperatura de 120 a 140° C. Esta mistura usualmente ocorre em um misturador do tipo “Banbury”, mostrado na Figura 3.3. O “Banbury” apresenta saída inferior para liberação do composto homogêneo para a extrusão e pré-formagem a próxima operação do processo;
5. Extrusão e pré-formagem (OP 4): o composto misturado deixa o “Banbury” e segue para a extrusora, que produzirá mantas do EPDM não vulcanizado de cerca de 5 milímetros de espessura (Figura 3.4). As mantas são posteriormente fatiadas em tiras com largura aproximada de 50 milímetros (pré-formagem), as quais serão acondicionadas em contentores plásticos limpos, identificados e

datados, para posterior inspeção e utilização nas máquinas injetoras (Figura 3.5);

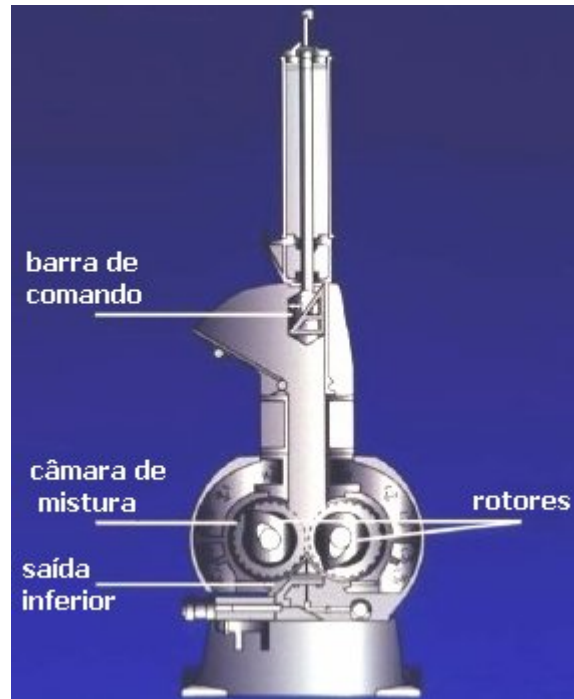


Figura 3.3. Misturador "Banbury"



Figura 3.4. Extrusora de mantas em EPDM



Figura 3.5. Máquina e molde de injeção da junta, durante a extração por robô

6. Inspeção do composto final: nessa etapa é feita uma avaliação da plasticidade, reometria e pegajosidade (propriedade de adesão do composto contra si próprio e em outros materiais) a fim de assegurar que o composto apresenta-se homogêneo e processável dentro dos parâmetros pré-estabelecidos para a injeção. A reometria é um método utilizado para determinar as características de processamento e vulcanização (tempo de pré-vulcanização e tempo ótimo de vulcanização) de um composto à base de elastômero. O equipamento utilizado (reômetro) consiste essencialmente de 2 pratos aquecidos a uma temperatura de 200°C. Estes discos oscilam com movimento senoidal e contêm entre si uma amostra do elastômero de 30 mm de diâmetro por 12,5 mm de espessura, fornecendo um registro do torque em função do tempo. O número de plasticidade está relacionado com as propriedades de escoamento e componente elásticos, útil para prever as características de processabilidade, tais como facilidade de moldagem e variação dimensional após extrusão ou injeção. A plasticidade qualifica o material indicando seu grau de degradação. Este parâmetro é avaliado através da espessura em [mm], multiplicada por 100, de uma amostra

cilíndrica de 2 cm³ e aproximadamente 1 cm de altura, após ter sido submetida a uma força de compressão de 49 [N], a tempo e temperaturas determinados. Quanto maior a espessura, menor a plasticidade do material, e maior a dificuldade na processabilidade do composto. Os métodos mais utilizados na verificação da plasticidade são o plastômetro Willians de placas paralelas e o viscosímetro Mooney (este último determina a viscosidade do polímero, puro e da composição não vulcanizada, em função da resistência oferecida ao cisalhamento. Quanto menor a viscosidade, maior a plasticidade da composição. A reometria fornece o tempo ótimo de vulcanização (conhecido como T90) e indica a segurança do processo. Este método consiste essencialmente de dois pratos, que são aquecidos a temperatura de até 200° C, e um registro de torque x tempo. Um disco biônico executa um movimento de oscilação senoidal, com freqüência de 10 ou 100 com. A amplitude de oscilação do disco é de 1, 3 e 5 graus, medindo a resistência da composição à deformação. A amostra avaliada deve ter 30 [mm] de diâmetro e 12,5 [mm] de espessura e isenta de bolhas de ar. O gráfico reométrico fornece o tempo de pré-vulcanização (Scorch) T2, que é o tempo necessário para se aumentar o torque mínimo de 2 [lb.in], quando se usa o arco $\pm 3^\circ$. Esse tempo indica a segurança do processamento. O tempo ótimo de vulcanização T90 é o tempo necessário para se atingir 90% do torque máximo.

7. Injeção (OP 5): o material preparado em tiras e aprovado na inspeção é transportado para a máquina injetora, que contém o molde de injeção correspondente à junta da ordem de fabricação. Os moldes de injeção possuem geralmente oito cavidades. Nesse processo, em função da elevação da temperatura do composto para fusão das tiras de material plástico, inicia-se o processo de vulcanização do EPDM, numa temperatura média de injeção de 187°C. No processo de injeção, a extração da junta do molde é feita por robô, ficando o operador responsável pela retirada dos galhos de injeção, inspeção visual e

dimensional, rebarbação (se aplicável), e acondicionamento adequado da junta.

8. Autoclave (OP 6): as juntas, em seu estado de vulcanização intermediário, são transportadas para autoclaves (estufas pressurizadas) para conclusão do processo de vulcanização, permanecendo no interior destes equipamentos de 5 a 8 minutos, numa condição de 8,0 bar de pressão e 180°C de temperatura (Figura 3.6). Após o processo de autoclave, as juntas apresentam-se na condição dimensional final, e suas propriedades físico-químicas estão definidas. Antes de seguirem para a operação de lubrificação, as juntas passam por uma inspeção dimensional e visual;



Figura 3.6. Autoclave

9. Lubrificação (OP 7): nesta etapa, as juntas completamente vulcanizadas são imersas em solução aquosa com 10% de óleo de silicone em volume para lubrificação superficial, necessária para propiciar uma condição adequada de deslizamento para a montagem do radiador, mencionada no capítulo 2 deste trabalho. Após a imersão são transportadas manualmente para uma grelha, que eliminará o excesso da solução nas peças (Figura 3.7);

10. Embalagem e expedição (OP 8): com a ordem de fabricação atendida e produto acabado de acordo com especificações do cliente, as juntas são embaladas e expedidas para o cliente.



Figura 3.7. Lubrificação: (a) tambor de aplicação da solução de silicone e (b) componentes sobre a grelha para remoção de excesso

A etapa de pós-lubrificação atualmente em uso gera um custo adicional na operação em função dos seguintes aspectos:

- utilização de água e óleo de silicone;
- utilização de mão-de-obra;
- transporte intermediário da junta em processo;
- descarte da solução contaminada por empresas especializadas;
- necessidade de limpeza freqüente das embalagens de transporte devido ao acúmulo de silicone e poeira.

Outro problema verificado no processo atual é que as variações climáticas (umidade e temperatura) fazem com que parte do silicone evapore ao longo do tempo. Quando da aplicação da junta na montagem do radiador, caso a quantidade de silicone na superfície da junta atinja níveis insuficientes, torna-se necessário um retrabalho, com nova aplicação de silicone sobre as juntas, num processo manual e com controle somente visual, o que acaba por representar um custo adicional ao processo de montagem do radiador.

Além disso, o excesso deste silicone após o retrabalho também gera custos adicionais a esse processo de montagem pelo aumento na frequência de parada de máquinas para limpeza, principalmente no teste de baixa pressão, onde o vácuo arrasta para dentro do equipamento de teste o excesso de lubrificante.

A evaporação do silicone, em maior ou menor grau durante as estações do ano, leva ainda os fornecedores da junta a utilizarem, permanentemente, uma grande quantidade de silicone em solução durante todo o ano, como forma de garantir a qualidade do produto. Esta situação é observada desde 1998, quando definiu-se a necessidade de aplicação superficial de solução de óleo de silicone a 5% em todas as juntas.

Devido a reincidências de condição de lubrificação insuficiente na superfície da junta, particularmente em períodos específicos do ano onde observa-se baixo teor de umidade (inferiores a 45%) e altas temperaturas (acima de 25° C), elevou-se a concentração da solução para 10% em volume, com conseqüente aumento de custo de fabricação do componente.

Esta esta ação reduziu os problemas da junta “seca”, porém gerou novos modos de falha apareceram ao processo, como excesso de silicone e embalagens contaminadas, dentre outros, e houve o já comentado aumento na frequência de manutenção de equipamentos.

3.4.2 Fluxo proposto: fabricação com aditivação

Aliando-se a necessidade de redução de custo de fabricação da junta com os efeitos de retrabalho e variação na condição de lubrificação, observa-se que a agregação de erucamida como aditivo de deslizamento ao EPDM na operação de mistura dos componentes pode se tornar uma forma efetiva de se obter redução de custos e melhoria na qualidade do componente, bem como uma maior confiabilidade no processo de montagem dos radiadores.

A Figura 3.8 apresenta o diagrama modificado do processo de fabricação da junta. A operação OP 7 (lubrificação) é eliminada, e o aditivo de deslizamento (a erucamida) é adicionado ao composto durante a mistura (OP 3).

Com a modificação proposta, pretende-se obter as seguintes melhorias no processo:

- redução no custo de fabricação do componente;
- eliminação da operação de lubrificação, com conseqüente eliminação do uso do óleo de silicone e do posterior descarte adequado da solução contaminada;
- redução na freqüência de limpeza das embalagens de produto final.

Em contrapartida, a adição da erucamida implica em um aumento de custo na matéria-prima e numa uma operação adicional de controle de recebimento e pesagem da erucamida no processo de recebimento e composição. Além disso, haverá uma redução na contração do produto final, o que fará com que os valores dimensionais tendam às tolerâncias máximas, o que pode tornar necessária uma revisão dos parâmetros de injeção (temperatura de injeção e tempo de resfriamento), bem como num reprojeto do molde de injeção.

Por fim, será necessário que se realizem novos processos de validação do composto (conforme normas do cliente), validação da junta para aplicação seriada, e por fim um novo processo de validação do radiador com a nova junta, de acordo com requisitos específicos de cada montadora.

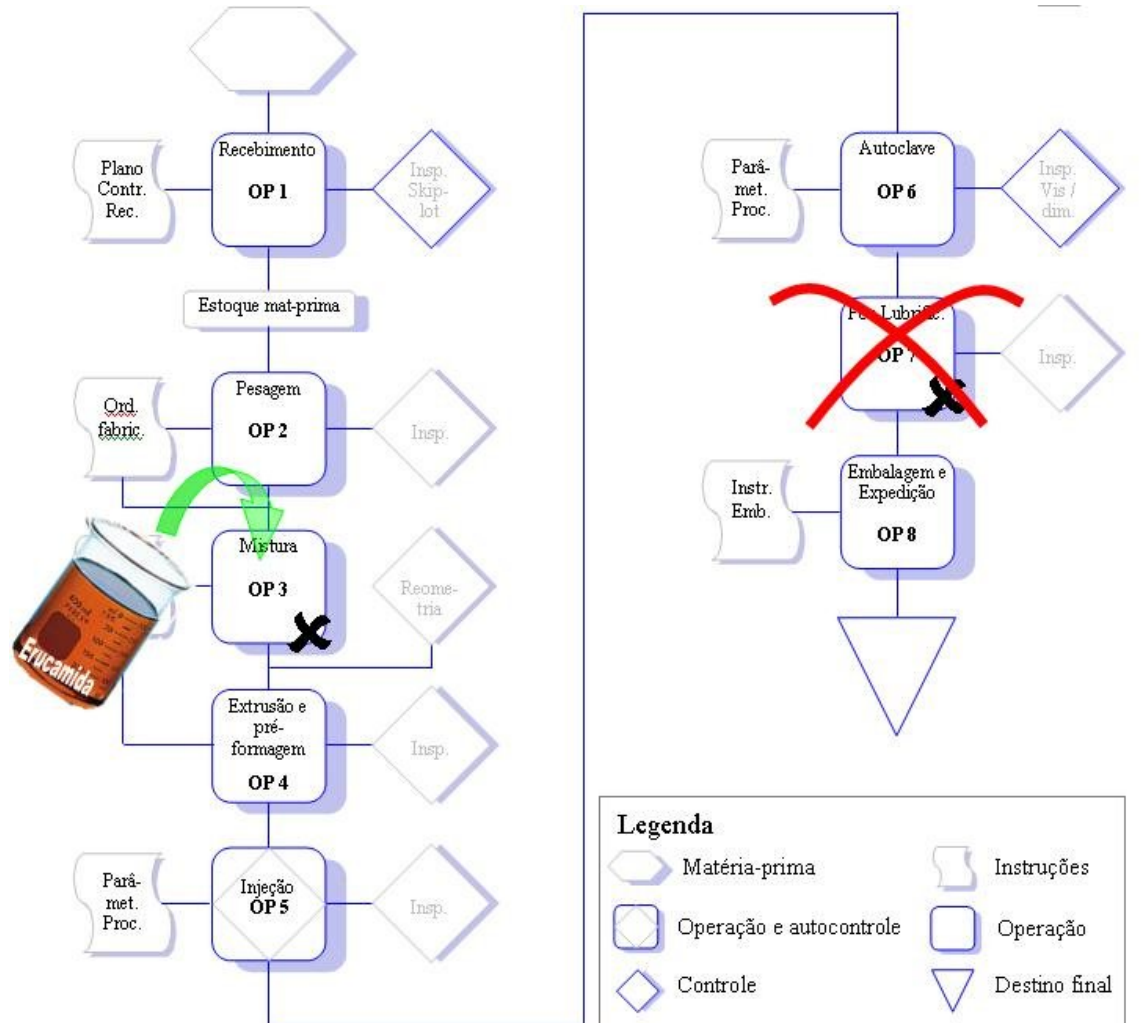


Figura 3.8. Processo proposto de fabricação da junta em EPDM com aditivo de deslizamento agregado ao composto

4 O PROCESSO DE MONTAGEM DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA

4.1. Linha de montagem

Os radiadores de tecnologia mecânica, como sua própria descrição indica, são fabricados a partir da interferência mecânica entre aletas e tubos, os quais são expandidos durante a transferência do coletor e junta à colméia, pela ação de varetas inseridas no interior dos tubos.

Cada uma das oito células de montagem desse tipo de radiador da empresa fabricante de radiadores onde esse estudo foi desenvolvido é disposta em “U”, com dois operadores podendo atuar simultaneamente em uma mesma célula (Figura 4.1). A configuração em “U” está atrelada ao conceito de manufatura enxuta (*lean manufacturing*), evitando desperdícios com movimentação desnecessária durante o processo produtivo. Além disso:

- o formato em “U” propicia um fluxo de produção de uma peça por vez (*one-piece flow*), já que cada operador atua em uma única

peça por vez, evitando-se assim gargalos e auxiliando na organização dos postos;

- cada operador executa a montagem de um radiador do início ao fim, conhecendo assim todas as etapas do processo e modos de falha associados;
- os operadores movimentam-se durante toda a jornada do trabalho, evitando-se fadiga por permanência prolongada numa mesma posição;
- propicia uma maior autonomia dos operadores na resolução de problemas de montagem e de qualidade, capacitando-os à proposição de melhorias, já que conhecem o processo completo de montagem do radiador.



Figura 4.1. Célula de montagem em “U” de radiadores de tecnologia mecânica

4.2. O processo de montagem

A Figura 4.2 apresenta esquematicamente as seis operações do processo de montagem de um radiador de tecnologia mecânica:

1. montagem manual da junta no coletor;

2. transferência dos conjuntos junta-coletor à colméia e expansão dos tubos;
3. teste de estanqueidade de baixa pressão (vácuo);
4. cravação das caixas laterais;
5. teste de estanqueidade de alta pressão;
6. embalagem do produto acabado

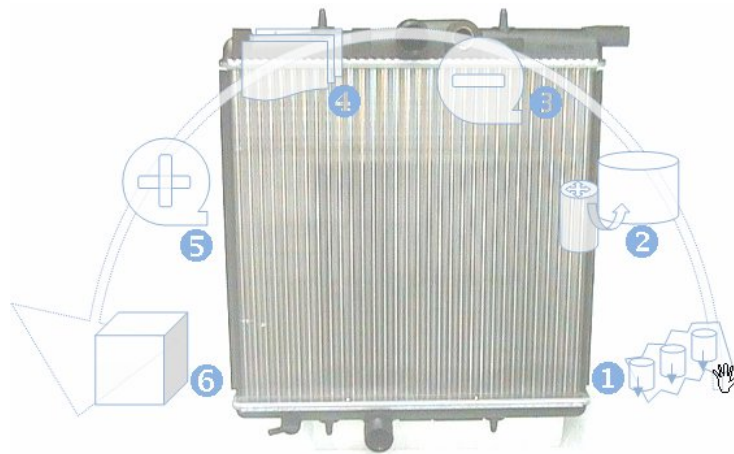


Figura 4.2. Processo de montagem do radiador de tecnologia mecânica

4.2.1. Montagem manual da junta no coletor

Esta é a primeira operação na célula de montagem. Consiste em encaixar manualmente todas as golas das juntas nos furos do coletor, resultando em um conjunto que será utilizado na operação seguinte de transferência à colméia e expansão dos tubos (Figura 4.3).

Nesta operação, o operador retira uma junta e um coletor das embalagens dispostas à sua frente e alinha manualmente as golas da junta aos furos do coletor. A seguir o operador posiciona as duas peças sobre um berço de aço e pressiona uma contra a outra, de forma que as golas fiquem encaixadas e a superfície da junta fique em contato com a superfície do coletor.

A lubrificação das juntas tem um efeito direto no encaixe das golas nos furos dos coletores. Quanto menor a lubrificação, maior será o esforço do operador, o que acarreta em aumento do tempo de ciclo produtivo, retrabalho e fadiga do operador. Além da lubrificação, a dureza das juntas é outro fator que influencia essa operação, sendo esta dureza controlada em todas as etapas de fabricação da junta e no processo de recebimento no fabricante do radiador.

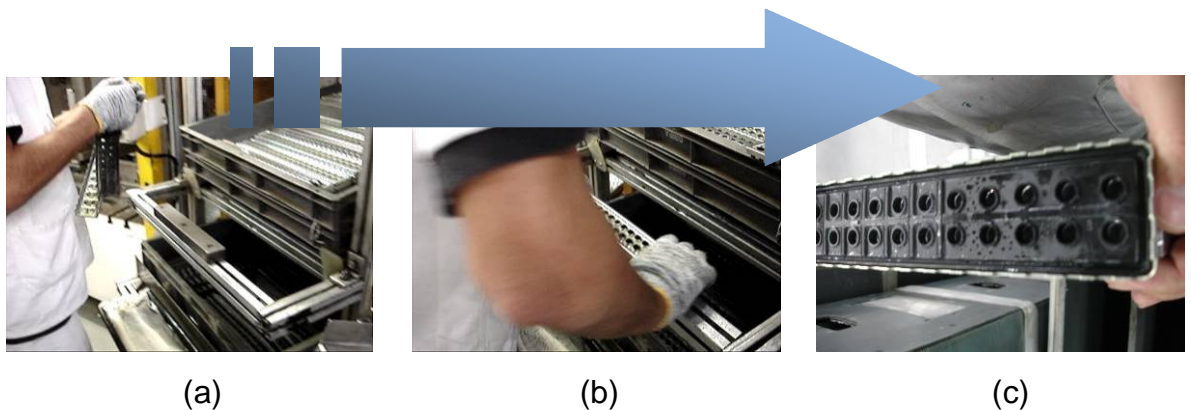


Figura 4.3. Operação de montagem manual da junta no coletor:

- (a) alinhamento entre os componentes; (b) pressão manual para encaixe das golas nos furos do coletor; (c) vista do conjunto montado

4.2.2. Transferência dos conjuntos junta-coletor à colméia e expansão dos tubos

Nesta etapa duas unidades do subconjunto da operação anterior são posicionados manualmente nos berços superior e inferior da prensa de transferência, permanecendo nos locais por interferência entre a extremidade dos pinos de expansão e a borracha da junta. Uma colméia é posicionada no centro da prensa, de forma que os tubos encontram-se separados porém concêntricos às golas das juntas, como mostrado na Figura 4.4.

A prensa de transferência é acionada e um conjunto de hastes localizadas na parte superior da prensa avança pelo interior dos tubos, expandindo-os e fixando-os por interferência nas aletas, coletores e juntas, formando assim um novo conjunto mostrado na Figura 4.5.

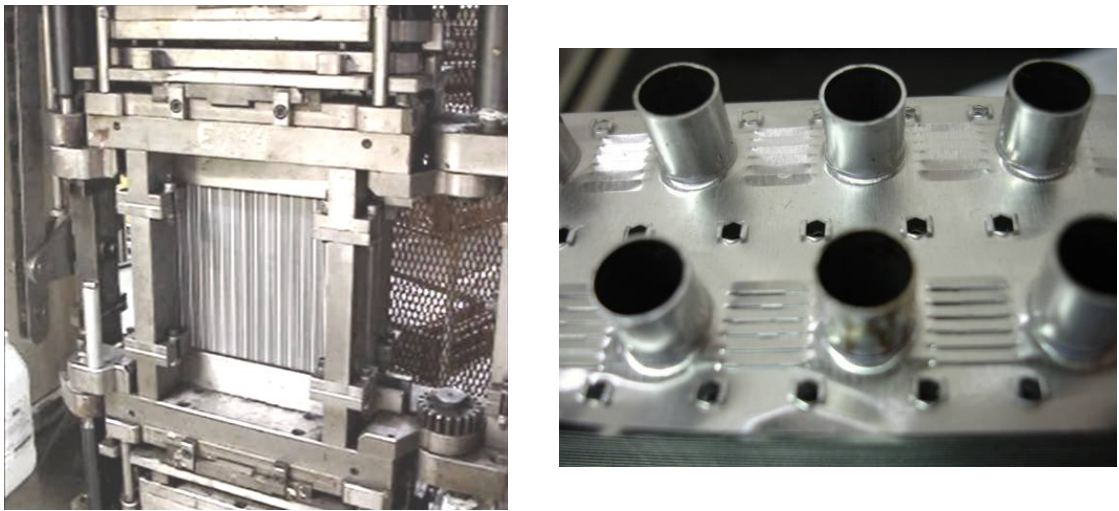


Figura 4.4. Prensa de transferência do subconjunto junta-coletor à colméia e expansão dos tubos (no detalhe, colméia com os tubos ainda não expandidos)



Figura 4.5. Conjunto junta-coletor-colméia após a operação de transferência, com os tubos expandidos e as extremidades rebordeadas

A Figura 4.6 mostra o operador inserindo o conjunto junta-coletor no berço superior da prensa de transferência. Nesta operação de alimentação da prensa o operador deve garantir que, após inseridas nos berços, as peças permaneçam fixas e paralelas. Pode-se observar que existem dois problemas ergonômicos nessa etapa: abdução dos braços e esforço sobre-ombros (cf. Marchese & Piancastelli, 2002) na colocação do coletor e junta no berço superior da prensa, o qual também apresenta relação direta com a dureza e lubrificação da junta, sendo o principal responsável por afastamentos por distúrbios ósteomusculares relacionados ao trabalho (DORT) e por lesões de esforço repetitivo (LER) nas linhas de produção do radiador mecânico.



Figura 4.6. Operador inserindo o conjunto junta-coletor ao berço superior

4.2.3. Teste de estanqueidade a baixa pressão (vácuo)

Após a transferência das juntas-coletores às extremidades da colméia e expansão dos tubos, é realizado um teste de estanqueidade a baixa pressão, que tem por objetivo detectar irregularidades nas interfaces entre tubos, golas das juntas e coletores causadas pela operação de transferência e expansão. O dispositivo de teste fecha as extremidades do radiador semi-acabado por meio

do avanço de bocais retangulares em aço (Figura 4.7a), pressionados contra a superfície da junta para garantir estanqueidade durante a operação (Figura 4.7b).

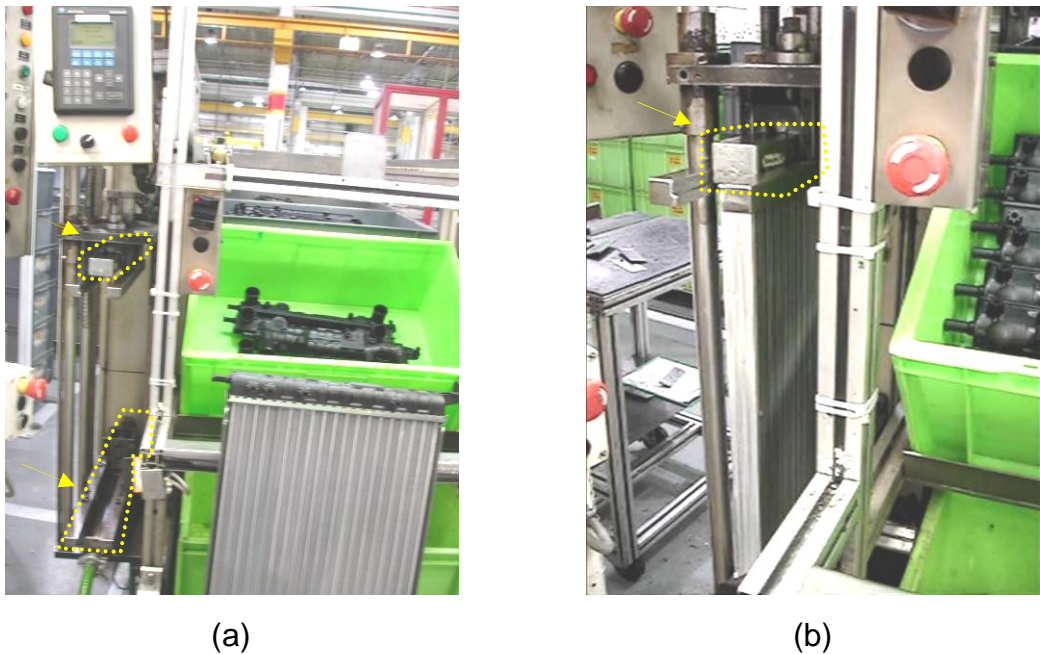


Figura 4.7. Dispositivo de teste de baixa pressão:

(a) dispositivo livre; (b) radiador em teste

A falta da estanqueidade do radiador pode ocorrer tanto em condições de alta quanto de baixa pressão, sendo portanto necessária a realização desse teste para revelar falhas que ocorram somente nesta condição no veículo. Os testes de estanqueidade a baixa e alta pressão equivalem respectivamente à condição operacional de despressurização e pressurização do sistema de arrefecimento. Na despressurização, as interfaces sofrem pressão externa, devendo o conjunto resistir à entrada de ar no sistema, enquanto que na pressurização o conjunto deve evitar vazamento de fluido. Na maioria dos veículos de passeio, a tampa valvulada do bocal de alimentação de água do sistema fechado atua nas duas condições, equalizando a pressão.

A operação de transferência e expansão é a mais crítica da montagem, e por isso o teste de baixa pressão detecta mais peças não-conformes na linha que o teste de alta pressão. As não-conformidades que levam às rejeições nos testes de baixa e alta são apresentadas posteriormente nesse capítulo.

4.2.4. Cravação das caixas laterais

Após o teste de baixa pressão do radiador semi-acabado, as peças aprovadas seguem para outra prensa, que fará a cravação do par de caixas plásticas de fechamento do radiador ao conjunto juntas-coletores-colméia.

A prensa (Figura 4.8) atua sobre o conjunto e cunhas dobram os dentes dos coletores em 90° sobre as caixas, que ficam permanentemente pressionadas contra as juntas de borracha, fornecendo assim estanqueidade ao conjunto final. Variações na altura dos dentes dos coletores, variação no avanço das cunhas e da altura das juntas são os principais fatores para peças não-conformes detectadas no teste de alta pressão (Figura 4.9).

4.2.5. Teste de estanqueidade a alta pressão

Após a cravação das caixas, o radiador passa pelo teste de estanqueidade a alta pressão para verificar se o processo de cravação foi feito de forma correta. O dispositivo de teste (Figura 4.10b) veda o bocal de saída e pressuriza gradualmente o radiador pelo bocal de entrada, seguindo uma curva de enchimento pré-definida no controlador lógico programável do dispositivo (Figura 4.10a) até uma pressão de 3,0 bar. O radiador é considerado aprovado no teste se a perda de pressão for inferior a 0,02 bar após 30 segundos de teste. Como comentado anteriormente, a quantidade de peças rejeitadas nesse teste é normalmente menor que no teste de baixa pressão.



Figura 4.8. Prensa de cravação das caixas do radiador

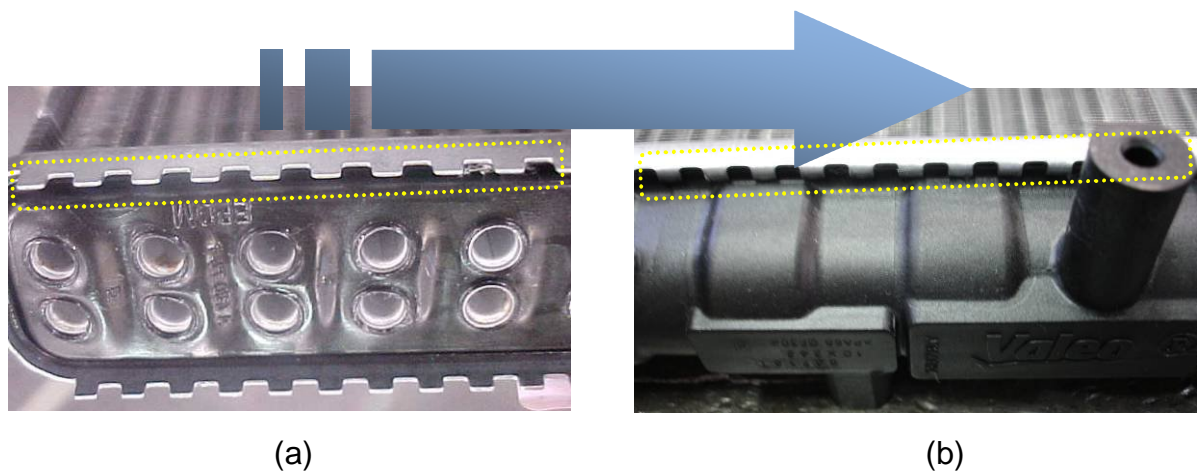


Figura 4.9. Operação de cravação: (a) radiador semi-acabado, sem cravação das caixas laterais (dentes do coletor perpendiculares à junta); (b) radiador com a caixa cravada (dentes dobrados a 90° sobre a caixa)

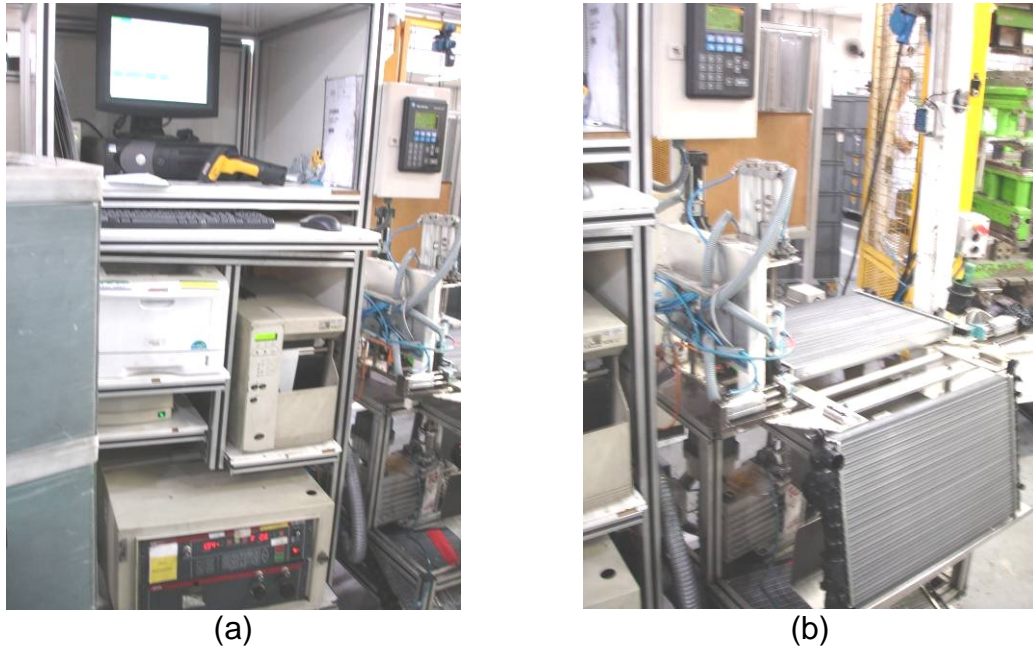


Figura 4.10. Teste de estanqueidade a alta pressão

4.2.6. Embalagem do produto acabado

O radiador acabado, testado e aprovado recebe uma etiqueta com código de barras com as informações básicas do produto (número de referência, cliente, rastreabilidade). Os radiadores podem ser enviados para o cliente final, ou ainda para uma outra linha de montagem, que incorporará o radiador a um módulo de arrefecimento composto por um eletro-ventilador, defletor de ar, reservatório de expansão, condensador (para veículos com ar-condicionado), comutador de velocidades e chicote elétrico.

O cliente final pode ser tanto a montadora, que utilizará o radiador (ou o módulo) em sua linha de fabricação ou os exportará em conjuntos CKD (*“completely knocked down”*), ou ainda a divisão do fabricante de radiadores responsável pelo mercado de reposição, que fará a distribuição às concessionárias e ao varejo.

Quando seguem para clientes, os produtos são acondicionados em embalagens retornáveis do tipo aramado metálico. Já para o mercado de reposição, as embalagens são de papelão do tipo “one-way”.

Apesar de não ser objeto desse trabalho, é importante destacar que o estudo adequado das embalagens para transporte é fundamental para que o produto chegue de forma adequada seu destino final, sem deformações ou danos que comprometam seu desempenho e confiabilidade. Por exemplo, Veiga (2005) discute o projeto e avaliação do desempenho das embalagens no transporte marítimo de conjuntos CKD.

4.3. Modos de falha na montagem de radiadores de tecnologia mecânica

Os principais modos de falha que ocorrem na montagem de radiadores de tecnologia mecânica, caracterizados por uma rejeição em um dos testes de estanqueidade (alta pressão e vácuo) são listados a seguir, classificados em função da causa a qual eles podem ser associados:

- falhas associadas a dimensões ou propriedades do material;
 - variações dimensionais dos componentes de interface, tais como diâmetro das golas das juntas, diâmetro dos tubos, diâmetro interno dos furos e altura dos dentes do coletor;
 - variação dimensional no comprimento dos tubos;
 - variação na dureza dos tubos e rompimento durante a expansão das extremidades;
 - juntas com falha de injeção;
- falhas associadas ao processo de transferência e expansão;
 - rebarbas nas extremidades dos tubos;
 - variações no processo de expansão dos tubos, durante a transferência do coletor mais junta na colméia;
 - juntas com golas cortadas;

- contaminação por cavacos de alumínio e agentes externos;
- falhas associadas à condição de lubrificação da junta
 - juntas levantadas;
 - juntas ensacadas.

A seguir alguns dos modos de falha listados são apresentados em detalhe, particularmente os associados à condição de lubrificação da junta.

4.3.1. Junta cortada

O modo de falha por junta cortada é caracterizado por um corte, geralmente na região da gola, tendo como efeito a falta de estanqueidade do conjunto, tanto nos testes a baixa como a alta pressão (Figura 4.11). A ocorrência deste defeito na junta deve-se, principalmente, ao seu processo de fabricação, quando da utilização da fustela (dispositivo de corte para remoção de rebarbas no interior da junta). Quando a junta não é devidamente posicionada na matriz de corte, as golas ficam fora de posição e sofrem corte indevido pelo punção.



Figura 4.11. Junta cortada

Outra causa para essa falha é a presença de rebarba nas extremidades dos tubos, originadas de um corte de baixa qualidade após a trefilação. As rebarbas riscam ou cortam as golas quando o tubo é inserido através delas, também acarretando na perda de estanqueidade.

4.3.2. Variação dimensional / geométrica dos tubos

Quando os tubos de alumínio apresentam variações dimensionais e geométricas além das tolerâncias especificadas ocorre uma grande incidência de defeitos no processo de montagem do radiador, como mostrado na Figura 4.12. São exemplos comuns destas variações: comprimento total do tubo maior ou menor que o especificado, diâmetro interno incorreto, ovalização das extremidades (nas regiões de corte).

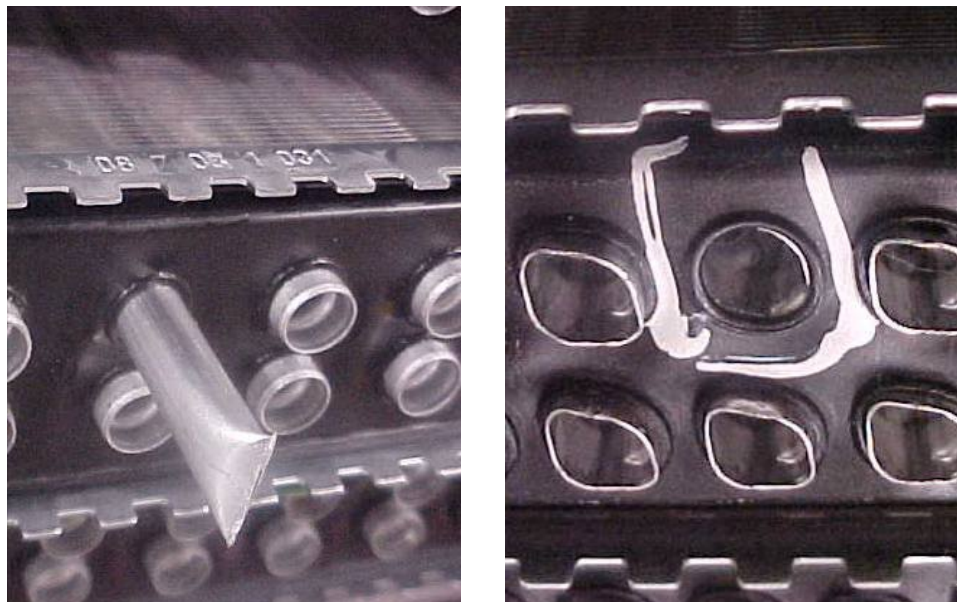


Figura 4.12. Falhas no processo de montagem do radiador: à esquerda, tubo maior; à direita, tubo menor.

4.3.3. Junta levantada

A lubrificação insuficiente das juntas aumenta a força de atrito em todas as interfaces, notadamente na passagem dos tubos durante a etapa de transferência e expansão. Esse aumento do atrito tende a desencostar a junta do coletor, e quanto menor a lubrificação maior será este efeito.

Em situações extremas, parte da junta é completamente desencostada do coletor, ficando a base da gola na região de rebordeamento, o que acarreta em perda de estanqueidade do produto e rejeição, sem possibilidade de retrabalho.

Esse modo de falha é denominado “junta levantada”, e é caracterizado por ondulações percebidas visualmente na junta após a transferência, e quando a base das golas permanecem sobre a região de rebordeamento, como mostrado na Figura 4.13. Esse modo de falha, associado à condição de lubrificação da junta, é o principal responsável pelos rejeitos de linha.

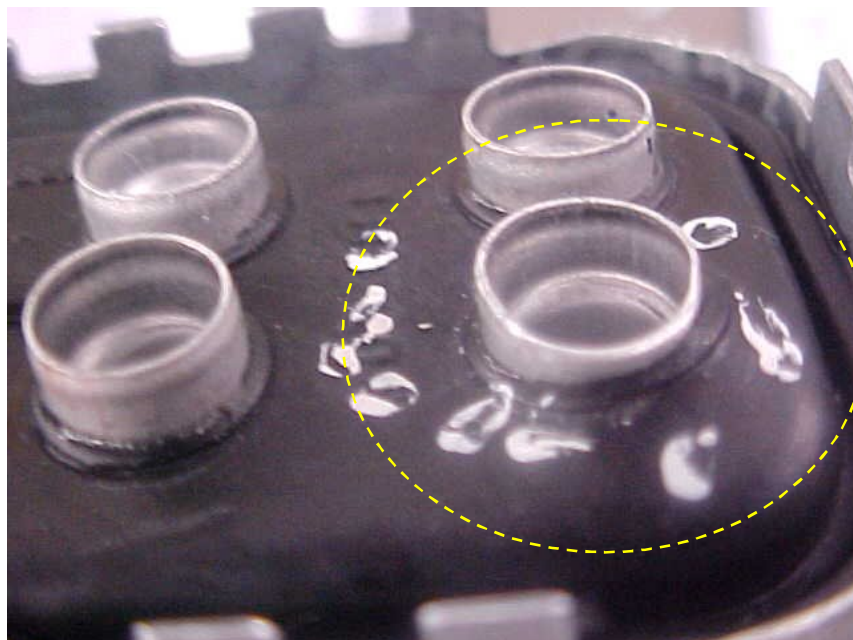


Figura 4.13. Junta levantada

4.3.4. Junta ensacada

Nesse modo de falha, a falta de lubrificação faz com que o atrito na transferência seja tal que a gola acabe dobrando sobre si própria, e dessa forma o material da gola não envolve todo o perímetro do tubo e do coletor onde faz contato, como mostrado na Figura 4.14. Essa falha é detectada imediatamente no teste de estanqueidade em baixa pressão.

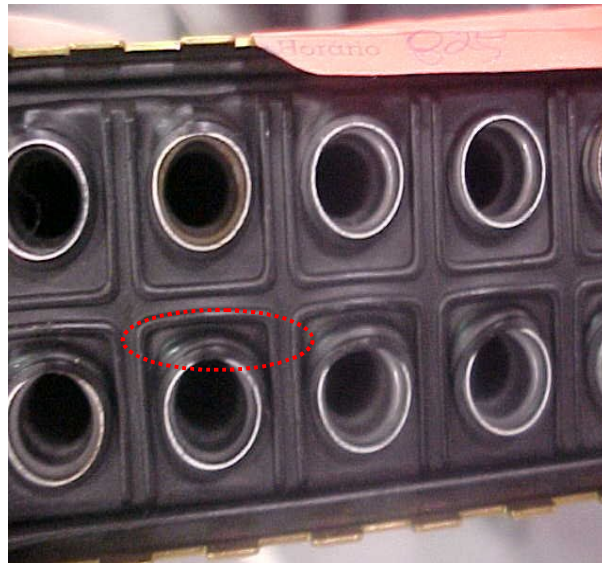


Figura 4.14. Junta ensacada

4.3.5. Retrabalho das juntas

O retrabalho na lubrificação das juntas, notadamente observado nos meses de maio a julho devido à baixa umidade relativa do ar, ocorre quando é observado pelo operador do posto de montagem do radiador dificuldade na transferência manual da junta ao coletor e deste subconjunto aos berços da

prensa de transferência e expansão. Durante essa operação manual, o operador verifica que é necessário um esforço maior para que todas as golas sejam inseridas nos furos dos coletores. Da mesma forma, o operador sente um aumento dos esforços na abdução dos braços e sobre-ombros durante o posicionamento da junta/coletor na prensa de transferência, principalmente no berço superior.

Além desse critério subjetivo, quando são observadas mais de 3 reprovações consecutivas nos testes de estanqueidade, procede-se imediatamente a uma análise das peças não-conformes. Caso seja verificada a ocorrência de modos de falha por junta levantada ou ensacada, é disparado um processo de retrabalho (lubrificação manual) das juntas, realizado numa estação de trabalho mostrada na Figura 4.15. Além disso, o departamento da qualidade de fornecedores é acionado para tratativas junto ao fornecedor para substituição do lote não-conforme.

É importante ressaltar que, apesar do aspecto quantitativo associado ao número de ocorrências, a detecção da falta ou insuficiência de lubrificação é feita primordialmente de maneira subjetiva, a partir do conhecimento empírico dos operadores mais antigos, sem a utilização de um fator quantificável e lógico para controle e verificação da efetiva condição de lubrificação.



Figura 4.15. Célula para retrabalho de juntas com lubrificação insuficiente.

4.4 Histórico de qualidade e índices de rejeito da junta pós-lubrificada

A Figura 4.16 apresenta os históricos de produção dos radiadores de tecnologia mecânica nos anos de 2006 e 2007, enquanto que a Figura 4.17 e a Figura 4.18 apresentam respectivamente os índices de reprovação (em partes por milhão) e os custos associados a essas reprovações para os mesmos períodos.

A partir desses dados, levantados para radiadores produzidos com as juntas fabricadas pelo fluxo atual descrito no capítulo 3 (com eventual retrabalho de lubrificação quando necessário), verifica-se que em média 0,4% dos radiadores produzidos são reprovados nos testes de estanqueidade (alta pressão e vácuo). As peças reprovadas no teste de estanqueidade são enviadas para área de retrabalho/análise, para localização do ponto com problema de vazamento.

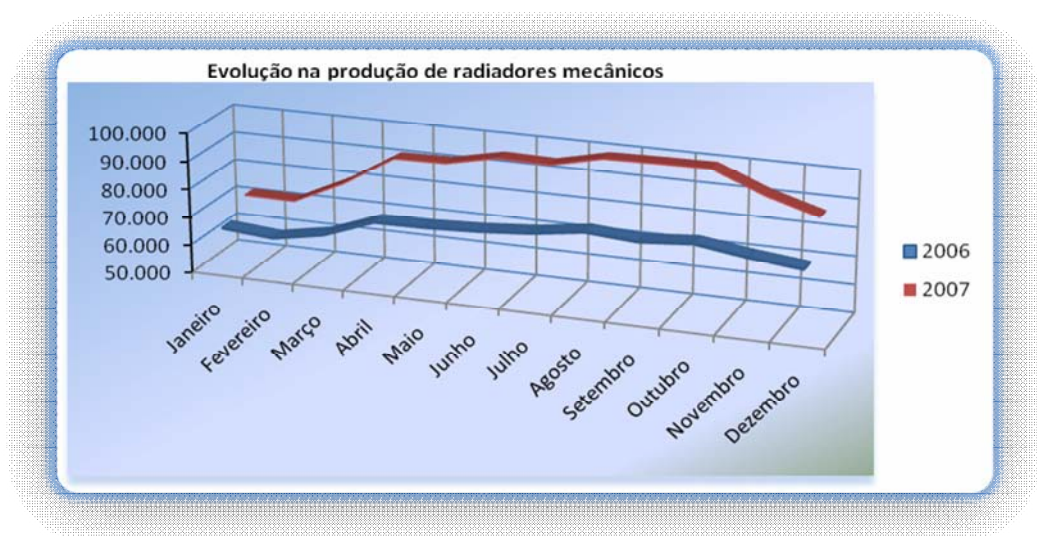


Figura 4.16. Produção mensal de radiadores de tecnologia mecânica

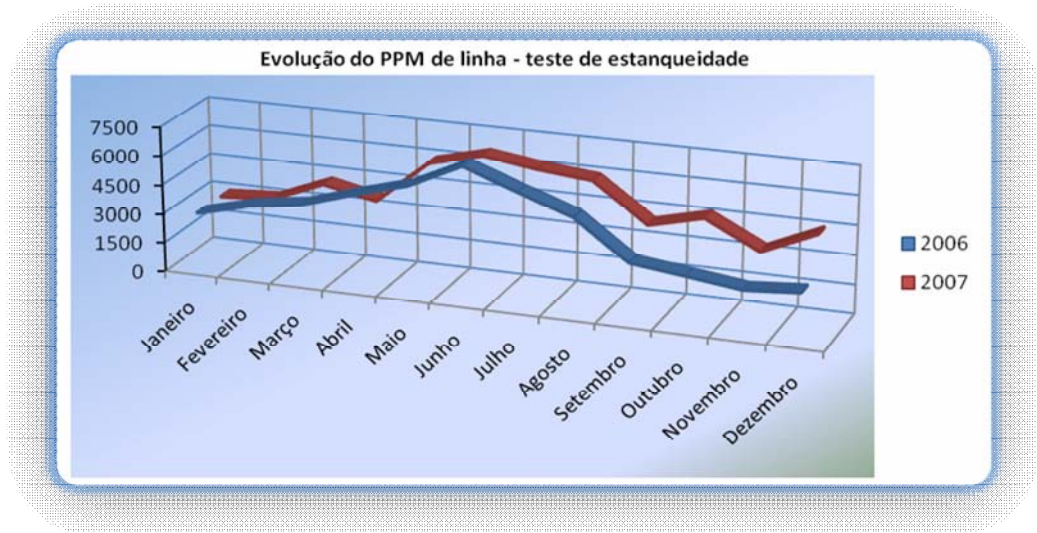


Figura 4.17. Índice de mensal de ocorrência de falhas nas linhas de montagem de radiadores de tecnologia mecânica

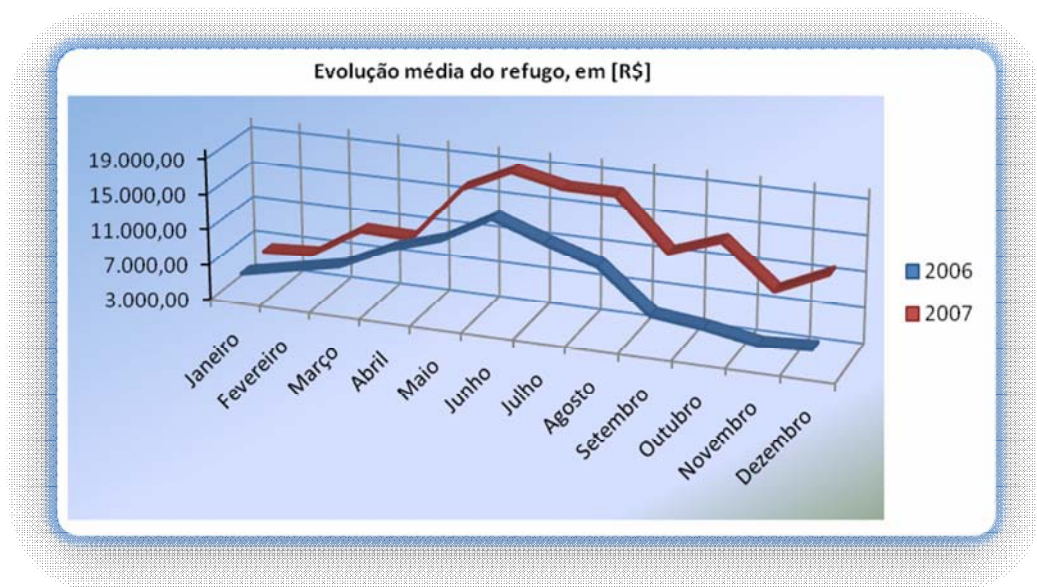


Figura 4.18. Custos mensais médios associados às falhas ocorridas

Os históricos de reprovações anteriores a 2008 não apontam qual das causas citadas anteriormente foi responsável pela falha. Assim, do estudo dos dados de produção e ocorrência de falhas das 8 células de montagem de radiadores de tecnologia mecânica no período considerado, não foi possível avaliar objetivamente a quantidade de não-conformidades associadas a juntas com lubrificação insuficiente.

Contudo, é possível verificar na Figura 4.17 que entre os meses de maio a julho ocorreu um aumento em 0,2 ponto percentual na quantidade média de rejeitos dos radiadores produzidos nas mesmas linhas de produção, com a média mensal de ocorrências subindo para 0,6%. O período do ano em questão é aquele que apresenta baixos índices de umidade relativa do ar (entre 20 e 48% em média para a região de Itatiba-SP, conforme dados do INPE), e é o período de maior incidência de reclamações sobre lubrificação insuficiente dos componentes junto aos fornecedores de juntas. Além disso, a Figura 4.17 mostra que os menores índices de falhas ocorrem nos meses mais úmidos do ano (outubro a fevereiro).

Assim, para efeito de análise considera-se que esse aumento de 0,2% na quantidade de rejeitos está associado à questão de lubrificação da junta, e esse valor será utilizado para uma comparação quantitativa da melhoria obtida com a modificação proposta no processo de fabricação das juntas de vedação. Para tanto, os testes com as juntas auto-lubrificadas foram realizados e concluídos durante o mês de maio de 2008, para que as condições de contorno fossem equivalentes (época do ano e meios de produção, entre outros).

5. INTRODUÇÃO DE JUNTA AUTO-LUBRIFICADA NA PRODUÇÃO DE RADIADORES DE TECNOLOGIA MECÂNICA

Conforme destacado anteriormente, os objetivos do presente trabalho são o desenvolvimento de uma junta auto-lubrificada, sua introdução no processo produtivo de um fabricante nacional de radiadores de tecnologia mecânica, e a definição de um parâmetro quantitativo para avaliação da condição de lubrificação da junta. O presente capítulo apresenta os principais resultados desse processo.

5.1. Fluxograma de desenvolvimento

O fluxograma da Figura 5.1 apresenta as atividades de desenvolvimento da junta auto-lubrificada, desde a validação do composto até a aprovação final pelos clientes do fabricante de radiadores. Serão apresentados neste trabalho os resultados das seguintes etapas (destacadas na Figura 5.1), que são consideradas críticas para o desenvolvimento da aplicação proposta:

1. validação do composto pela matriz do fabricante do radiador;
4. validação dimensional;
5. validação do processo de fabricação do radiador com a junta proposta;
11. estudo do comportamento migratório do aditivo de deslizamento na junta.

As demais etapas do fluxograma são procedimentos padronizados do fabricante de radiadores para o lançamento de novos produtos.

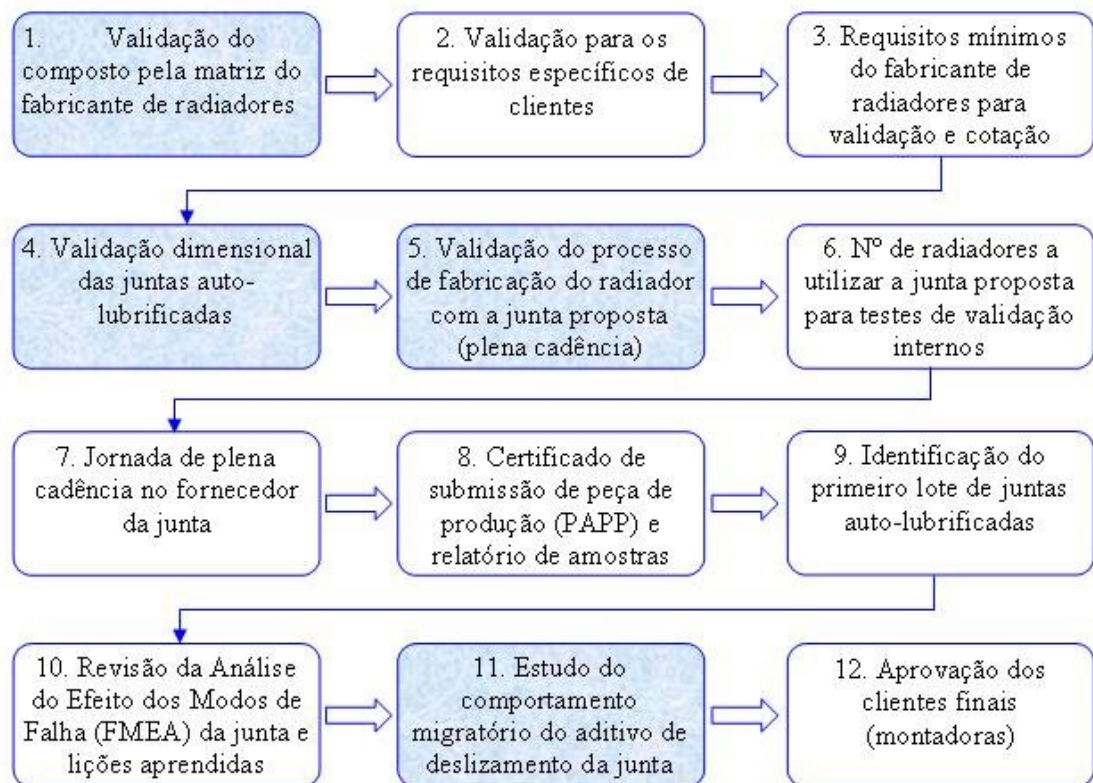


Figura 5.1. Fluxograma do processo de introdução da junta auto-lubrificada na produção de radiadores de tecnologia mecânica.

5.2. Validação do composto da junta

Após o trabalho de acompanhamentos do desenvolvedores/fabricantes da junta durante o processo de formulação do novo composto e avaliação dos

dados preliminares da migração do aditivo de deslizamento, o processo de desenvolvimento iniciou-se com a validação desse novo composto para utilização na fabricação de juntas de radiadores de tecnologia mecânica. Para tanto, corpos de prova foram produzidos com a nova matéria-prima para testes preliminares internos pelos desenvolvedores e pelo cliente (fabricante dos radiadores no Brasil).

A seguir o material foi enviado para testes de validação na matriz do fabricante de radiadores, localizada na França, responsável pela pré-validação de todas as matérias-primas e compostos utilizados pelas diversas unidades da divisão no mundo. Como o composto utilizado nesse desenvolvimento é inovador e afeta a 100% dos clientes da divisão do Brasil, a aprovação pelo laboratório físico-químico da matriz é requisito para a continuidade do projeto.

A pré-validação (assim chamada por que os resultados dizem respeito somente ao composto) ocorre em corpos de prova produzidos pelo fabricante da junta, enviados à matriz juntamente com resultados dos testes preliminares realizados no Brasil e em laboratório acreditado dos desenvolvedores (também localizado na França). De posse de todos estes dados, a matriz repete os ensaios e realiza um estudo comparativo entre os dados do fornecedor, do laboratório acreditado e de seus próprios testes.

Estando esses três relatórios conformes com as preconizações da norma do fabricante de radiador, e não existindo discrepâncias significativas entre os resultados dos três laboratórios, a pré-validação é considerada positiva e a etapa encerrada.

Essa etapa do desenvolvimento foi realizada para três diferentes desenvolvedores. Dois desses desenvolvedores não obtiveram sucesso na pré-validação do composto, sendo reprovados em testes após envelhecimento, feitos na matriz do fabricante de radiadores. Como nenhum dos dois reapresentou amostras melhoradas para teste, eles foram eliminados do processo, permanecendo apenas um fornecedor no desenvolvimento do item.

A Tabela 5.1 apresenta os requisitos a serem atendidos pelo composto, segundo norma específica do fabricante de radiador. Os requisitos de resistividade transversal e densidade de corrente entre o alumínio e a borracha

não foram verificados pois foram incluídos numa revisão da norma realizada posteriormente ao envio das amostras para os testes na França, e por isso foram derogados de comum acordo. Além disso, na pré-validação não se avaliou o comportamento migratório do aditivo de deslizamento.

A Tabela 5.1 apresenta os seguintes resultados dos testes físico-químicos:

- composto auto-lubrificado testado pelo fornecedor da junta no Brasil (coluna “Auto-lub. Brasil”);
- material pós-lubrificado (uso corrente) testado pelo fornecedor da junta no Brasil (coluna “Pós-lub. Brasil”);
- composto auto-lubrificado testado pela matriz do fabricante do radiador na França (coluna “Auto-lub. Verrière”);
- composto auto-lubrificado testado pelo fabricante da junta na França (coluna “Auto-lub. Gamaches”).

Os valores da Tabela 5.1, referentes ao composto auto-lubrificado apresentado pelo terceiro desenvolvedor indicaram a conformidade em todos os requisitos prescritos pela norma do fabricante de radiador. Além disso, em alguns aspectos o desempenho do composto auto-lubrificado foi superior ao do composto atual pós-siliconado, demonstrando que o conceito do composto foi desenvolvido com sucesso e o processo poderia seguir para a próxima etapa: validação dimensional da junta com o composto proposto.

Tabela 5.1. Resultados dos testes físico-químicos de pré-validação do composto.

Cliente	Confidencial				Relat. N°	06032008			
Norma	NVD 30015 Rev. B				Fonte:	autolub composto HBA Brasil			
Característica	Unid.	Método	Data	N	Especif.	Auto-lub. Brasil	Pós-lub. Brasil	Auto-lub. La Verrière	Auto-lub. Gamaches
TGA									
* Substância pirólise	%	Balanço térmico	Mar-08	1	64,5 ± 1,5	64,5	65	64,5	64,5
* Substância não pirólise	%	Balanço térmico		1	32,5 ± 1,5	32	32,5	32,9	32
* Cinzas	%	Balanço térmico		1	3 ± 1	3,5	3,5	3,5	3,5
Densidade específica	g/cm³	ISO 2781 A	Jan-08	3	1,08 ± 0,01	1,09	1,13	1,11	1,09
Originalis									
* Dureza Shore A	Pontos	ISO 868		5	45 - 65	61	61	60	61
* Microdureza IRHD	Pontos	ISO 48 M		5	47 - 67	63	63	62	63
* Força de tração na ruptura	MPa	ISO 37-2		5	> 10	13,1	13,4	13,2	13,1
* Alongamento na ruptura	%	ISO 37-2		5	> 300	416	430	414	416
* Módulo da tração em 100%	MPa	ISO 37-2		5	>1,2 e <5	2,3	2	2,2	2,3
* Resistência ao rasgamento	kN/m	ISO 34-1 A/b		5	>4	5,5	6,5	5,7	5,5
Compressão (25%) sobre pinos		ISO 815/B							
* 22h à 150°C	%		Jan-08	1	< 35	17	15	17	17
* 504h à 150°C em sol. de glicol	%		Fev-08	1	< 70	45	43	46	45
* Densid. corrente AL / EPDM	µA/cm²	ASTM G71			<0,1	não test.	não test.	não test.	não test.
* Resistividade transversal	Ohm.cm	CEI 60093			10 ⁷	não test.	não test.	não test.	não test.
Resistência a baixas temperaturas	°C	DSC ou ISO 812	Mar-08		> -40	-52	-53	-54	-50
Após envelhec.a quente(96h at 150°C)			Jan-08						
* Mudança de microdureza IRHD	Pontos	ISO 48 M		5	0 to 10	+4	+6	+5	+4
* Força de tração na ruptura	MPa	ISO 37-2		5	> 10	14,1	13,5	14	14,1
* Alongamento na ruptura	%	ISO 37-2		5	> 270	373	395	377	373
* Módulo da tração em 100%	MPa	ISO 37-2		5	> 1,2	2,8	1,7	2,9	2,8
* Resistência ao rasgamento	kN/m	ISO 34-1 A/b		5	> 4	5,8	6,9	6	5,2
Após envelhec.a quente(336h at 150°C)			Jan-08						
* Mudança de microdureza IRHD	Pontos	ISO 48 M		5	0 a +10	+7	+8	+7	+7
* Força de tração na ruptura	MPa	ISO 37-2		5	> 8	13,3	13	13,4	13,5
* Alongamento na ruptura	%	ISO 37-2		5	> 220	322	333	329	322
* Módulo da tração em 100%	MPa	ISO 37-2		5	> 1	3,2	2,3	3,2	3,3
* Resistência ao rasgamento	kN/m	ISO 34-1 A/b		5	> 3	3,5	4	3,6	3,5
Após mist. sol. glicol(50/50-96h a 150°C)			Jan-08						
* Mudança de microdureza IRHD	Pontos	ISO 48 M		5	-5 a +6	-1	-2	-1	-1
* Força de tração na ruptura	MPa	ISO 37-2		5	> 10	13,5	12,6	13,6	13,5
* Alongamento na ruptura	%	ISO 37-2		5	> 300	405	332	399	405
* Módulo da tração em 100%	MPa	ISO 37-2		5	> 1	2,2	2,2	2,2	2,2
* Resistência ao rasgamento	kN/m	ISO 34-1 A/b		5	> 4	5,2	6,7	5,3	5,2
* Mudança na massa após mist. sol. glicol (50/50) (504h at 150°C)	%	ISO 2781 A		3	0 a +6	+3	+2,9	+3	+3
* Mudança de microdureza IRHD	Pontos	ISO 48 M	Fev-08	5	-5 a +6	+1	+2	+1	+1
* Força de tração na ruptura	MPa	ISO 37-2		5	> 9	13,8	13,1	13,9	13,8
* Alongamento na ruptura	%	ISO 37-2		5	> 250	436	399	444	436
* Módulo da tração em 100%	MPa	ISO 37-2		5	> 1	2,6	1,9	2,5	2,6
* Resistência ao rasgamento	kN/m	ISO 34-1 A/b		5	> 4	6,6	7,1	6,4	6,6
* Mudança na massa	%	ISO 2781 A		3	0 a +8	+5	+4,5	+5	+5
Após IRM 902 (24h at 100°)			Jan-08						
* Mudança no volume	%	ISO 2781 A		3	< 130	+83	+75	+80	+83
Matéria-prima restrita	%				livre	livre	livre	livre	livre

5.3 Validação dimensional das juntas

A próxima etapa do processo de introdução das juntas auto-lubrificadas no processo produtivo analisada nesse trabalho foi a validação dimensional das juntas produzidas a partir do composto de EPDM com o aditivo de deslizamento aprovado. Para a viabilização comercial deste projeto deverão ser substituídos 06 modelos de juntas utilizadas na fabricação de radiadores de tecnologia mecânica, representando 80% do volume total de juntas compradas pela divisão no Brasil, e que por isso serão considerados para o cálculo da redução de custo.

Para realização da validação dimensional foi inicialmente selecionado um desses modelos (referenciado por junta "A") em função da criticidade de sua montagem, uma vez que, por ser a junta de maior comprimento e número de golas, era a que apresentava o maior número de não-conformidades associadas à condição de lubrificação inadequada. Além disso, essa é também a junta de maior utilização, com uma previsão de consumo de 544.000 unidades em 2008.

Os resultados da validação dimensional indicaram que a introdução do aditivo de deslizamento reduziu a contração dessa junta após a injeção. Para a referência "A" observou-se que o respectivo molde de injeção apresentava o comprimento total das cavidades na máxima tolerância de projeto. Este fator combinado com o efeito da redução na contração da peça pelo acréscimo do aditivo resultou em juntas com uma variação (aumento) no comprimento total de mais de 2,0 mm, acima do valor máximo especificado.

Segundo o fornecedor, foram feitas tentativas de ajustar os parâmetros de processo de injeção para compensar este efeito, que contudo mostraram-se infrutíferas, o que acabou por inviabilizar a realização das etapas posteriores, particularmente os testes de montagem, com a junta "A". Contudo, as informações acerca do comportamento do novo composto durante a injeção ficaram registrados pelo fornecedor, e serão orientativos para construção de novos moldes no futuro.

Assim, como alternativa para continuidade do processo, foram realizados estudos de validação dimensional para a junta “B”, a de segundo maior volume de utilização (consumo previsto de 361.000 unidades para 2008), porém de comprimento e número de golas menor (40 furos e comprimento total de 367,7 mm contra 44 furos e comprimento total de 404,7 mm da junta “A”).

O relatório de validação dimensional da junta auto-lubrificada de referência “B”, realizado em uma peça por cavidade do molde de injeção, mostra conformidade com as cotas do desenho. Além disso, essas dimensões foram comparadas aos resultados dimensionais da junta pós-lubrificada de uso corrente, sem discrepâncias relevantes.

Assim, o composto e a junta auto-lubrificada de referência “B” foram considerados validados, tanto pelo fornecedor da junta quanto pelo fabricante do radiador, em termos físico-químicos e dimensionais. Além disso, foi mantido inalterado o tempo de ciclo de produção da junta em todos os processos do fluxo de fabricação (exceto a pós-lubrificação, eliminada com a melhoria), o que permitiu a manutenção do custo dos processos iniciais, não havendo necessidade de revisão de preços devido a compensações com aumento de ciclos.

5.4 Validação do processo de fabricação do radiador

Uma vez efetuada a validação dimensional, o fornecedor da junta produziu um lote inicial de trezentos e quinze pares de juntas da referência “B” (produzidos a partir de um molde de injeção com 8 cavidades), que foram utilizados para as duas etapas seguintes do processo (teste de montagem de radiadores e levantamento das forças de inserção). Como o desempenho (lubrificação) das juntas melhora com o tempo pela migração do lubrificante na superfície (como evidenciado em estudos preliminares realizados pelo fornecedor da junta), o lote utilizado para o teste de montagem foi produzido no dia anterior ao da montagem, para que o aditivo estivesse em seu estágio

inicial de migração e a característica de lubrificação da junta fosse a menor possível (e conseqüentemente mais crítica para ocorrência de falhas associadas a essa característica).

Assim, para essa etapa do processo um aspecto importante foi a coordenação da logística do fabricante do radiador com a do fornecedor de junta, pois uma vez que a condição da junta recém-produzida era requisito para a validação não poderia haver atrasos de entrega e de início de produção dos radiadores. Além disso, as seguintes condições de contorno foram estabelecidas e cumpridas para garantir o comparativo entre juntas auto e pós-lubrificadas:

- as juntas auto e pós-lubrificadas utilizadas para a produção total da ordem de fabricação (OF) deveriam ser obrigatoriamente do mesmo fornecedor, lote e molde de injeção pois, devido ao “*split*” do fornecimento de juntas contemplado no sistema de MRP da empresa, a junta de referência “B” pós-lubrificada poderia ser fornecida por três fornecedores distintos;
- os lotes dos demais componentes utilizados na fabricação do radiador não poderiam ser substituídos até o término da OF, para evitar variações dimensionais nesses outros componentes;
- a variação de dureza “*shore*” A entre lotes de juntas auto e pós-lubrificadas não poderia ser superior a 5%, mesmo que os valores estivessem dentro da especificação de projeto, pois variações acima desse limite poderiam facilitar ou dificultar algumas das operações manuais da linha de montagem;
- os operadores da célula de montagem deveriam apresentar um tempo de experiência superior a 2 anos na montagem;
- no mínimo 90% da ordem de fabricação (OF) deveriam ser concluídos pelo turno inicial, contemplando ambos os tipos de juntas;

- no caso da ocorrência de eventos não previstos ou rupturas, o processo de validação de montagem deveria ser abortado e reprogramado.

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros da Jornada de Plena Cadência (JPC) de validação de montagem em série do radiador, sendo que do total de 680 radiadores produzidos, 300 utilizaram juntas auto-lubrificadas.

Tabela 5.2. Parâmetros do teste de montagem com a junta auto-lubrificada.

Jornada de Plena Cadência - JPC - 1JT038B auto-lubrif.	
Supervisor:	Sidnei Santos
Linha:	03
Referência Prod. Final	3TA142A
Aplicação	Motores Fiat 1.0 / 1.3 / 1.5 / 1.6 s/ A/C
Lote:	1238-1007
Operadores:	Leandro Gaia / Francisco Hercolin
Tempo exp. na linha 03:	2,5 anos e 8 anos, respectivamente
Qtde. JPC c/ auto-lub.	300 radiadores (300 pares de juntas)
Qtde. OF lote [unid]	680
Data:	2 de Maio de 2008
Junta utilizada JPC	1JT038B auto-lubrificada fornec. HBA
Lote junta auto-lubrif.:	01 de Maio de 2008
Junta utilizada após JPC	1JT038B pós-lubrificada fornec. HBA
Aplicação:	Diversos
Demais componentes:	mesmo lote para JPC e conclusão OF

As principais observações realizadas durante o teste de montagem foram:

- Operação de transferência manual da junta ao coletor (OP 01)
 - Os dois operadores afirmaram que a utilização da junta auto-lubrificada facilitou a transferência ao coletor. Para confirmar essa percepção de ambos, durante a validação de montagem algumas juntas pós-lubrificadas foram reinseridas ao processo, sem conhecimento deles, para efeito de teste. Essas juntas

foram imediatamente identificadas, durante a operação, como estando mais difíceis para inserção. Imediatamente após a constatação, as juntas pós-lubrificadas "cobaias" eram descartadas. Ao total, 10 unidades pós-lubrificadas foram inseridas à montagem, sendo todas identificadas pelos operadores.

- A dureza das juntas auto e pós-lubrificadas foi verificada para eliminar este fator como sendo responsável pela maior facilidade da inserção da junta no coletor. Foram verificadas três amostras de cada tipo, e para todas encontrou-se um valor de dureza de 62 shore A.
- Operação de transferência e expansão da colméia ao subconjunto junta/coletor (OP 02)
 - Nesta operação os operadores sentiram uma maior dificuldade no posicionamento da junta/coletor aos berços da prensa de transferência, principalmente no berço superior, para os subconjuntos montados com a junta auto-lubrificada (Figura 5.2). Essa dificuldade estava associada ao incremento do esforço manual no posicionamento, principalmente pelo esforço sobre ombros. Apesar do maior esforço, contudo, nenhuma não-conformidade foi observada durante a montagem.



Figura 5.2. Posicionamento do subconjunto junta/coletor na prensa de transferência

- A fim de minimizar o problema ergonômico, foi proposto ao supervisor de linha a confecção de 2 jogos de varões (o jogo de varões superior é indicado pelas setas da figura 5.3, que realizam a expansão até a metade do comprimento dos tubos através do diâmetro secundário, assim como o jogo de varões inferior, que complementa a expansão da metade inferior), com as extremidades das pontas com alívio de massa (diâmetro primário), para reduzir a força de atrito, apresentado na figura 5.4. Como estas pontas têm por função somente a retenção do conjunto junta/coletor durante a transferência, não sendo o responsável pela expansão dos tubos, o alívio de massa não teria qualquer consequência na expansão dos tubos. A figura 5.4, além de apresentar os varões em detalhe, evidencia na montagem do radiador um problema de qualidade devido a um tubo maior (circulado na figura), originado da falha de posicionamento durante o corte após a operação de trefilação.

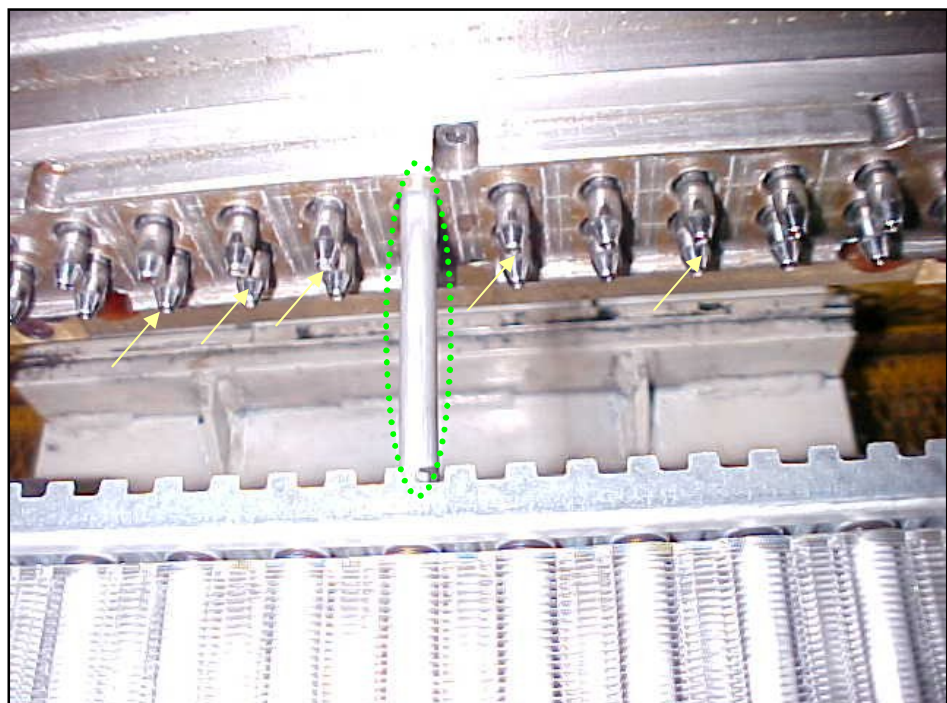


Figura 5.3. Detalhe do varão superior de encaixe do subconjunto junta/coletor na prensa de transferência

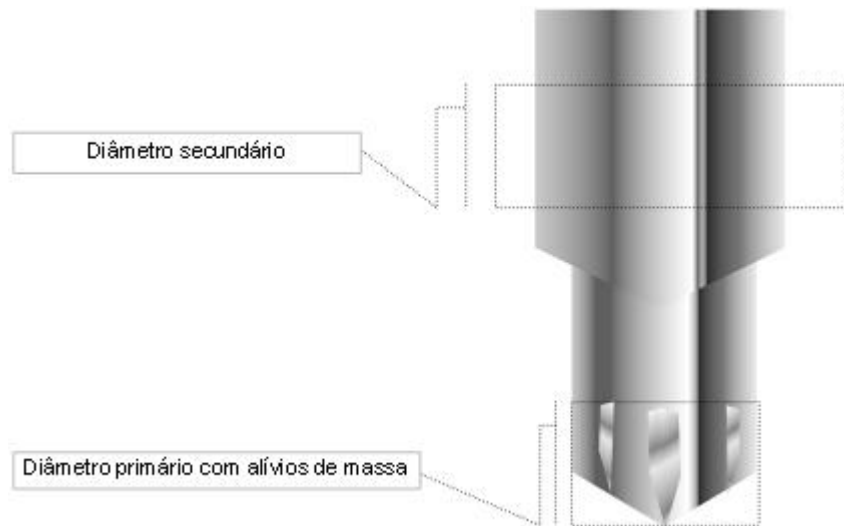


Figura 5.4. Proposta do varão com alívio de massa

- Teste de estanqueidade em baixa pressão (OP 03)
 - Não foram observadas anomalias com as peças durante a validação com a junta auto-lubrificada. Nenhuma peça foi reprovada nesse teste e nenhuma junta apresentou indícios de levantamento ou ensacamento na inspeção visual realizada pelos operadores nos dois lados dos radiadores montados.
- Cravação dos coletores (OP 04)
 - nesta operação não ocorreu nenhuma reprovação de peças para as juntas auto-lubrificadas.
- Teste de estanqueidade em alta pressão (OP 05)
 - nenhum dos 300 radiadores montados no processo de validação foi reprovado no teste final de estanqueidade.

Após a conclusão da montagem dos trezentos radiadores com juntas auto-lubrificadas, a célula de montagem continuou produzindo radiadores. Do radiador 301 ao 680 daquela OF, o lote de juntas auto-lubrificadas foi substituído por um lote de juntas pós-lubrificadas. Todos os lotes dos demais componentes (colméias, coletores, caixas) permaneceram os mesmos, para isolar-se quaisquer variações de material e dimensional oriunda da troca de lote. Todos os postos de trabalho tiveram as superfícies de contato com o lubrificante limpas com um pano embebido em álcool isopropílico. Todos os parâmetros de processo e cadência foram mantidos iguais aos utilizados na validação. Os dois operadores do turno analisado montaram 600 peças no total, sendo 300 com junta auto-lubrificada e 300 com pós-lubrificada. O turno seguinte, que encerrou a produção da OF de 680 unidades, não foi acompanhado diretamente.

A Tabela 5. apresenta a comparação dos resultados dos testes de estanqueidade para as diferentes juntas. Como mencionado anteriormente, nenhum radiador montado com junta auto-lubrificada foi rejeitado nos testes de estanqueidade. Já para as juntas pós-lubrificadas ocorreram quatro reprovações. As peças reprovadas foram, na ordem da primeira à 680^a, as peças de no. 388, 395, 471 e 635. Esse acompanhamento foi realizado com o intuito de caracterizar que as peças falhadas foram independentes do turno e dos operadores, não estando também relacionadas com a troca de lote da junta.

Conclui-se assim que as falhas, ao ocorrerem no processo de fabricação sob controle somente para o lote de juntas pós-lubrificadas, estão relacionadas com a condição de lubrificação da junta, e que a auto-lubrificação da junta melhora o processo de montagem do radiador.

Tabela 5.3. Resultados dos testes de estanqueidade durante a validação do processo de fabricação do radiador

Tipo de junta	Auto-lubrificada (lote 1JT038B)	Pós-lubrificada (lote 1JT038B)
Quantidade de radiadores produzidos	300	380
Quantidade reprovada no teste de baixa pressão	0	3
Quantidade reprovada no teste de alta pressão	0	1
Total de reprovações	0	4
Falhas (PPM)	0	5882

5.5. Estudo do comportamento migratório do aditivo de deslizamento da junta

A última etapa do processo de introdução de juntas auto-lubrificadas na produção de radiadores de tecnologia mecânica, antes da aprovação final pelos clientes (montadoras), foi o estudo quantitativo do comportamento migratório do aditivo de deslizamento da junta. A importância dessa quantificação na validação final da junta reside no fato de que esses componentes possuem um tempo de produção, transporte e estoque. Na situação atual de aquecimento do setor automotivo brasileiro e constante crescimento no volume de produção de toda a cadeia, este espaço de tempo tende a não superar 7 dias úteis no caso de itens para o mercado interno.

Como pode ser verificado no item anterior, a validação da utilização da junta auto-lubrificada do processo de fabricação do radiador apresentou

resultados satisfatórios. Porém, baseando-se nos históricos de não-conformidades da junta pós-lubrificada, seria um equívoco assumir-se o processo de introdução encerrado a partir dos resultados obtidos com juntas produzidas há apenas dois dias.

No caso da junta pós-lubrificada, quanto mais próxima a sua utilização da data de produção, menor é a volatilização da solução de silicone superficial e a conseqüente redução na condição de lubrificação. A orientação geral para o prazo de utilização destas juntas é de até 15 dias a partir de sua produção, pois após este período uma nova aplicação de lubrificação à superfície será necessária antes do uso, principalmente nas épocas mais secas do ano. Já para a junta auto-lubrificada, espera-se que ela apresente um comportamento inverso, com a condição de lubrificação melhorando com o passar do tempo.

Assim, o objetivo principal do estudo de migração foi o de quantificar a condição lubrificação da junta. Uma vez estabelecida uma curva de comportamento da condição de lubrificação de junta em função do tempo de fabricação, os valores obtidos poderão ser sugeridos à engenharia de produto para preconização na especificação de lubrificação do componente, estabelecendo-se assim um parâmetro de controle objetivo para avaliação da qualidade do componente, tanto por parte do fabricante da junta, quanto na inspeção de recebimento do fabricante de radiadores.

5.5.1. Metodologia adotada

Uma forma de avaliar a migração do aditivo erucamida no EPDM, conforme sugerido por Wypych (2005), é a utilização de micro-espectroscopia “*synchrotron*” baseada em FTIR (“*Fourier transform infrared*”), que fornece a concentração do aditivo na superfície do substrato com o passar do tempo. Wypych (2005) indica que, para uma concentração de 0,2% de erucamida no EPDM mantido a 30° C, são necessários cerca de 30 dias para que o aditivo ocupe 100% da superfície do substrato.

Uma forma alternativa para avaliação da migração mais simples e barata, e portanto com maior efeito prático para este trabalho, é a quantificação da força de inserção de um punção no interior de uma a gola da junta. Além disso, considerando-se a composição exata do composto desenvolvido pelo fabricante da junta é segredo industrial, e que é possível com o tempo que ocorra troca de fornecedores em função de critérios comerciais e/ou técnicos, uma análise que seja desvinculada de informações sobre a porcentagem do aditivo é importante para o fabricante dos radiadores, e o método de quantificação da força de inserção atende a esse requisito, pois analisa objetivamente uma característica da junta efetivamente fabricada, na forma a ser utilizada na montagem dos radiadores.

Em função desses aspectos optou-se pelo desenvolvimento de um dispositivo mecânico para medição da força de inserção de um punção na gola da junta, a ser acoplado a uma máquina de compressão equipada com dinamômetro eletrônico e sistema de gravação de pico, mostrada na Figura 5.. Para o presente estudo, em função das intensidades das forças envolvidas, foi utilizada uma célula de carga do tipo “strain gage” com fundo de escala de 1,0 [kN] e resolução de 0,01 [N].



Figura 5.5. Máquina de compressão e célula de carga

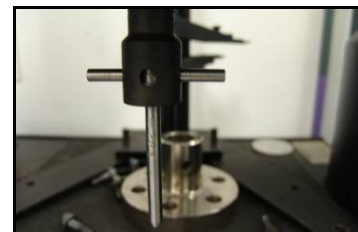
A Figura 5. apresenta o dispositivo mecânico, composto de punção, porta matriz e matriz confeccionados em aço carbono temperado. O diâmetro do punção foi fixado em 7,03 mm, que corresponde ao diâmetro externo máximo de especificação do tubo de alumínio no momento da inserção. A matriz apresenta uma geometria idêntica à da gola da junta, mostrada na Figura 5., para que o alojamento seja adequado, não permitindo folgas ou interferência no diâmetro interno das golas.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6. Dispositivo mecânico para quantificação da força de inserção: (a) conjunto montado; (b) porta-matriz e matriz; (c) porta-punção e punção.

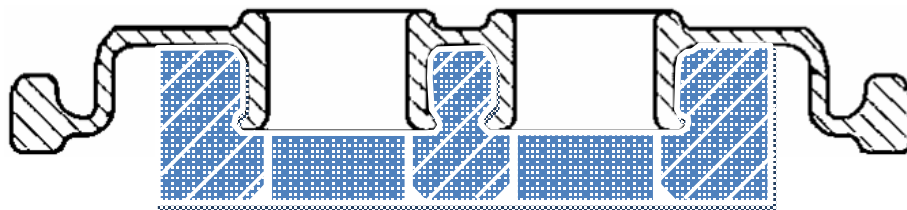


Figura 5.7. Corte da junta (em preto) alojada à matriz (em azul), mostrando o ajuste das geometrias.

5.5.2 Resultados obtidos

Para o levantamento dos dados experimentais, foram utilizadas 30 juntas do mesmo lote utilizado para a validação do processo de montagem. Essas juntas foram selecionadas de forma a que correspondesse sempre à mesma cavidade do molde de injeção, a fim de eliminar variações decorrentes de diferenças dimensionais relacionadas às cavidades do molde.

As juntas selecionadas foram identificadas de 01 a 30 e foram testadas seqüencialmente, uma por dia, a partir do segundo dia após a fabricação da junta. Assim, cada junta testada possuía um dia de fabricação a mais que a amostra anterior. Desta forma, a primeira junta testada tinha 2 dias de fabricação, a segunda junta 3 dias, e assim sucessivamente até a 30ª junta, com 32 dias de fabricação. A primeira junta testada, particularmente, apresentava uma maior relevância para o estudo, pois o resultado obtido para ela indicava a condição das juntas utilizadas na validação de montagem.

Dessa forma, considerando que a validação da montagem foi satisfatória, uma vez que não ocorreram falhas nos testes de estanqueidade, foi possível concluir que o composto da junta, na formulação proposta pelo fabricante, atende aos requisitos de lubrificação e montabilidade da linha de produção mesmo na pior condição de lubrificação superficial, e que o valor obtido para a força de inserção dessa junta pode ser adotado como valor preliminar máximo de especificação de desse parâmetro.

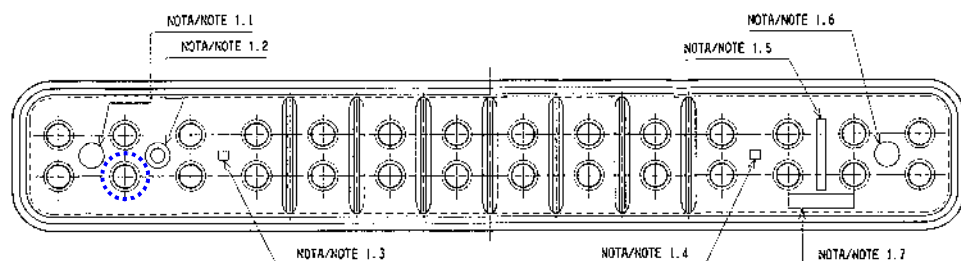


Figura 5.8. Desenho da junta de referência “B”, indicando a gola utilizada para as medições da força de inserção em cada uma das amostras.

Realizou-se uma única medição da força de inserção por amostra, sempre para a mesma gola, indicada na Figura 5., utilizando-se uma velocidade de avanço do punção de 300 mm/min. A medição foi realizada sempre no mesmo horário (14:00h), com tolerância de até 30 minutos, inclusive nos finais de semana. Após cada medida, os componentes do dispositivo eram limpos com pano seco e álcool etílico para remoção do lubrificante residual.

A Tabela 5.. apresenta os resultados obtidos nos testes realizados para as juntas auto-lubrificadas, bem como os resultados de testes comparativos obtidos para um lote de trinta juntas pós-lubrificadas, também do mesmo lote utilizado na validação do processo de montagem dos radiadores. Já a Figura 5. apresenta a evolução da força de inserção ao longo dos trinta dias de realização dos testes.

Como podem ser verificado, os resultados dos testes confirmaram as tendências de aumento da força de inserção para as juntas pós-lubrificadas e de redução dessa força para as juntas auto-lubrificadas à medida que ocorre o envelhecimento do lote de juntas.

Os valores obtidos para as três primeiras amostras da junta auto-lubrificada, próximos entre si, e a repentina queda a partir da amostra 4 (da ordem de 19% em relação à amostra 3) indicam que ocorreu a formação do filme de múltiplas camadas do aditivo de deslizamento na superfície do substrato, conforme apresentado por Wypych (2005), o que o que reduz a força de atrito pois as moléculas de erucamida passam a mover-se entre si e não mais com a superfície do EPDM.

Dessa forma, para as juntas auto-lubrificadas produzidas com o composto utilizado no presente desenvolvimento, os 3 primeiros dias são necessários para formação do filme multicamadas, e seria recomendável aguardar esse período antes de utilizar-se essas juntas no processo produtivo. Esse prazo é coincidente com o período mínimo para entrega de juntas pelo fornecedor no fabricante de radiador após solicitação, representando a condição logística mais crítica.

Tabela 5.4. Força de inserção para as juntas auto e pós-lubrificadas testadas

Tipo de Junta	Auto-lubrificada (lote 1JT038B)		Pós-lubrificada (lote 1JT038B)	
	Dia	Amostra	Força (N)	Amostra
01	A01	8,3	A01	4,0
02	A02	8,2	A02	4,1
03	A03	8,2	A03	4,1
04	A04	6,7	A04	3,9
05	A05	6,6	A05	4,2
06	A06	6,6	A06	4,6
07	A07	6,5	A07	4,8
08	A08	6,3	A08	5,4
09	A09	6,1	A09	5,7
10	A10	5,9	A10	6,3
11	A11	5,7	A11	6,9
12	A12	5,6	A12	7,3
13	A13	5,1	A13	7,8
14	A14	5,1	A14	8,5
15	A15	5,1	A15	8,7
16	A16	5,0	A16	9,6
17	A17	5,0	A17	10,7
18	A18	5,0	A18	10,9
19	A19	4,9	A19	11,1
20	A20	4,9	A20	11,5
21	A21	4,8	A21	11,3
22	A22	4,6	A22	12,0
23	A23	4,6	A23	11,7
24	A24	4,6	A24	11,8
25	A25	4,5	A25	12,0
26	A26	4,3	A26	11,9
27	A27	4,1	A27	12,6
28	A28	4,0	A28	12,9
29	A29	4,0	A29	13,1
30	A30	3,9	A30	13,6

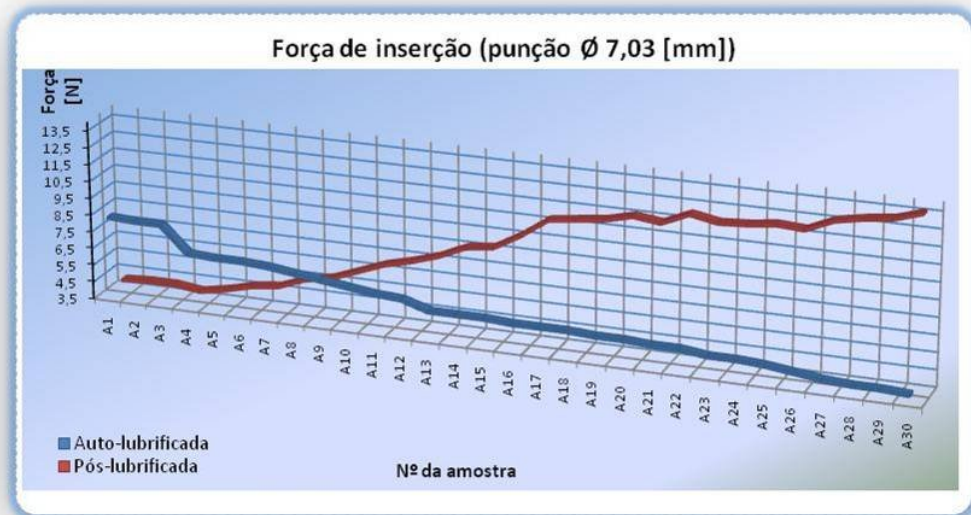


Figura 5.9. Evolução da força de inserção para as juntas auto e pós-lubrificada ao longo do período de testes.

Ainda em relação à tendência de evolução da força de inserção para as juntas auto e pós-lubrificadas, verifica-se que a partir da quarta amostra a redução da força de inserção para a junta auto-lubrificada apresenta um comportamento linear, enquanto que a junta pós-lubrificada apresenta uma tendência de aumento linear até o décimo quinto dia, e a partir dessa data as variações passam a serem aleatórias, provavelmente ligadas à condição climática no dia do teste. As curvas de evolução da força de inserção se cruzam por volta do nono dia de envelhecimento, situação em que as juntas pós e auto-lubrificadas apresentam valores similares de força de inserção.

Os valores de força de inserção medidos para as amostras 27 a 30 das juntas auto-lubrificadas podem indicar uma saturação da superfície do material pelo aditivo lubrificante. Para essas amostras foi verificada uma redução de apenas 5% (0,2 N) na força de inserção nos últimos quatro dias de teste.

Devido ao planejamento do projeto, que não se estendeu além dos 30 dias sugeridos, não foi possível confirmar essa tendência, ficando assim a sugestão de estender esse período em desenvolvimentos futuros.

Por fim, os resultados quantitativos obtidos para a junta pós-lubrificada são consistentes com valores empíricos adotados pelo fabricante dos

radiadores. Por exemplo, o prazo sugerido para utilização de um lote de juntas pós-lubrificadas era de até 15 dias após sua data de fabricação. Analisando-se as curvas de evolução, verifica-se que a força de inserção para as juntas pós-lubrificadas nessa condição (8,7 N), aproxima-se dos valores máximos (condição crítica) encontrados para as primeiras amostras da junta auto-lubrificada (8,2 a 8,3 N). Isso ainda reforça a consideração de um valor de força nessa faixa como parâmetro quantitativo para aceitação das juntas no processo de fabricação do fornecedor e/ou no recebimento pelo fabricante de radiadores.

5.6. Avaliação do impacto econômico da introdução da junta auto-lubrificada

A introdução da junta auto-lubrificada no processo de fabricação de radiadores de tecnologia mecânica proporciona redução de diversos custos do processo, além de uma potencial redução dos números de rejeitos de linha como demonstrado anteriormente. A primeira redução é direta, pois está associada à redução do preço do componente (junta) comprado, conforme discutido no Capítulo 3. Além disso, é ainda esperada uma redução dos retornos de radiadores em garantia por perda de estanqueidade do conjunto, cuja evolução só poderá ser observada após 12 meses do início da utilização da junta auto-lubrificada em linha.

Um outro aspecto importante é a redução dos impactos ambientais de toda a cadeia de suprimento, a saber:

- redução nos descartes de solução de silicone utilizada pelo fabricante da junta;
- redução de descarte de material contaminado e embalagens de retrabalho no fabricante do radiador.

Concluindo a análise desenvolvida no presente trabalho, procedeu-se a uma avaliação preliminar do potencial de redução dos custos diretos de

fabricação e custos por rejeição das peças em linha. Esse potencial foi avaliado em base anualizada, considerando o volume de compras dos diversos modelos de junta (seis referências de juntas, que representam 80% do volume total de compras), bem como que a redução dos custos de não-qualidade será avaliada com base na eliminação do aumento de 0,2% na quantidade de rejeitos nos meses mais secos do ano, o qual foi associado à questão de lubrificação da junta, conforme discutido no item 4.4.

Em função dos problemas verificados durante etapa de validação dimensional da junta, considerou-se como custo de implementação do novo processo a confecção de novos ferramentais (seis novos moldes, um para cada modelo de junta utilizada; esses moldes tipicamente apresentam uma vida útil de 5 anos, com intervenções inferiores a 15% do valor de uma nova ferramenta no período para manutenção).

Não foram considerados os custos associados a variações no custo de matéria-prima, ferramental, custos de depreciação de equipamentos e de variações nos volumes de produção, pois são similares àqueles que ocorreriam para o processo convencional atualmente em uso. Além disso, em um primeiro momento essa análise não considerou os custos de desenvolvimento de aplicação para cada referência de junta, dos testes de validação e do processo de homologação das novas juntas junto aos clientes, pois são variáveis e calculados de acordo com requisitos específicos de cada cliente, estimados em até 1% do valor da redução encontrada para cada referência de radiador envolvida. Nem todos os clientes possuem preconizações para o sistema de arrefecimento, permanecendo, nestes casos, os parâmetros do fabricante do radiador como referência.

A Tabela 5.3 apresenta os principais resultados da avaliação realizada. Para cada uma das referências de junta consideradas (A a F) é apresentado o volume percentual de compra (dentro do pacote de 80% do volume total de compras) de cada referência de junta para o ano de 2008, juntamente com o “*split*” de fornecimento de cada um dos três fornecedores. O custo atual da junta pós-lubrificada e o custo previsto para a nova junta auto-lubrificada são

apresentados em termos relativos devido à confidencialidade comercial imposta pelo fabricante do radiador.

São também apresentados os potenciais de redução dos custos diretos e os investimentos em ferramental necessários para implementação da nova junta. É importante frisar que nesse último aspecto a análise é conservativa, pois infere, a partir dos problemas verificados na validação dimensional da junta “A”, que todos os seis moldes atualmente em uso deverão ser substituídos. Este investimento poderá ser reduzido se a validação das juntas “C” a “F” indicar que os respectivos moldes atuais podem produzir juntas com o composto auto-lubrificado mantendo as condições dimensionais e geométricas da peça após injeção, como ocorreu inicialmente para a junta “B”.

A Figura 5. apresenta o potencial de redução dos custos diretos em termos percentuais para cada uma das referências de junta consideradas, e a Figura 5. apresenta o fluxo de caixa do processo de introdução do uso da junta auto-lubrificada, considerando o período de vida útil de 05 anos para cada ferramenta e os volumes de utilização previstos para 2008.

A partir dos valores apresentados, verifica-se que a previsão de redução anual é da ordem de R\$ 538.000,00, com um investimento inicial de R\$ 434.000,00 em ferramental no primeiro ano (06 moldes de injeção, um para cada uma das seis referências de junta). Dessa forma, considerando “payback” simples, o prazo de retorno de investimento é da ordem de 10 meses. É importante destacar também que a maior parte da redução prevista é devida à redução nos custos da junta propriamente dita. A redução do índice de rejeito de linha da montagem do radiador representa financeiramente 6,4% da redução de custo total.

Esses resultados econômicos, aliados aos demais aspectos técnicos expostos ao longo do trabalho, reforçam a viabilidade da introdução da junta auto-lubrificada no processo de produção de radiadores de tecnologia mecânica do fabricante de radiadores.

Tabela 5.3. Tabela comparativa das principais juntas e redução de gastos

Referência de Junta	Volume de utilização para 2008 (%)	Custo atual	Custo previsto	Potencial de Redução (mil R\$)	Investimento em ferramental (mil R\$)
A	23,90	1,0000	0,8780	70	35,00
B	22,72	1,0000	0,6429	192	127,00
C	21,47	1,0000	0,9524	41	35,00
D	18,79	1,0000	0,8288	96	55,00
E	10,41	1,0000	0,6792	108	127,00
F	2,72	1,0000	0,7447	31	55,00
Totais	100	1,0000	0,8071	538	434

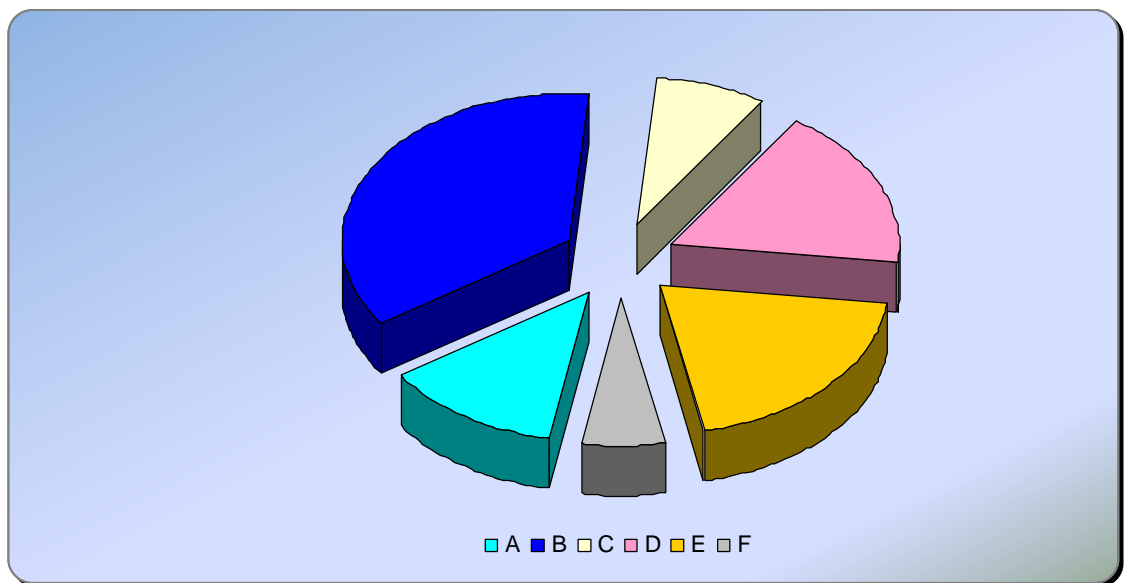
**Figura 5.10.** Potencial de redução por referência de junta com a utilização do composto auto-lubrificado



Figura 5.11. Fluxo de caixa com o uso da junta auto-lubrificada, para vida útil de 05 anos para cada ferramenta, conforme volume previsto para 2008

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou o processo de desenvolvimento, validação e introdução de juntas em EPDM auto-lubrificadas na fabricação de radiadores de tecnologia mecânica para veículos de passeio. O composto da junta recebeu em sua formulação um aditivo de deslizamento à base de erucamida, capaz de migrar através do EPDM até a superfície da junta e criar uma camada lubrificante, de maneira a proporcionar a lubrificação adequada e necessária durante a introdução dos tubos de alumínio na montagem do radiador.

A lubrificação adequada da junta é, essencial para redução da força de atrito na passagem dos tubos no interior de suas golas. Uma lubrificação insuficiente pode ocasionar deformações permanentes durante a montagem dos radiadores de tecnologia mecânica que levam à perda de estanqueidade, com refugos de linha e potenciais retornos de peças de campo.

As juntas pós-lubrificadas atualmente em uso pelo fabricante de radiadores apresentam um comportamento lubrificante decrescente com o passar do tempo por conta da evaporação da solução de silicone aplicada em sua superfície no processo de fabricação. Quanto menor a umidade do ar e maior a temperatura, este efeito é mais sentido pela linha de fabricação do radiador. Nessas condições climáticas os operadores observam dificuldades no processo de montagem, levando-os a retrabalhar a junta com silicone para recuperar parte da sua característica de lubrificação.

Além disso, foi verificado que nos meses de abril a agosto, quando a umidade relativa do ar apresenta os menores níveis durante o ano, que o índice de rejeito das linhas de radiadores mecânicos por vazamento é maior, sendo a maior parte desses rejeitos causados por não-conformidades associadas à lubrificação insuficiente da junta e dificuldade de montagem na linha. Esses aspectos, conforme apontado no Capítulo 1 do presente trabalho, motivaram o desenvolvimento de uma junta auto-lubrificada como forma de reduzir os problemas apontados

O capítulo 2 apresentou aspectos do funcionamento de um sistema de arrefecimento fechado, convencional, utilizando amplamente em veículos de passeio com propulsores até 1.600 cc. Dentre os diversos componentes do sistema de arrefecimento, destacou-se o radiador de tecnologia mecânica, foco do trabalho, e se detalhou o seu conceito de montagem e partes principais. Este capítulo forneceu ao leitor uma base teórica para entendimento das interfaces de montagem e função da junta, visando facilitar o entendimento dos ganhos obtidos com a introdução de uma tecnologia auto-lubrificante na fabricação da junta.

Esse componente do radiador, e os aspectos relevantes da sua tecnologia de fabricação, particularmente a aditivação com amida e seu efeito migratório na superfície foram apresentados no capítulo 3. Esse capítulo destaca os aspectos teóricos do fenômeno migratório do aditivo de deslizamento através do EPDM em direção da superfície, conforme relatado por Wypych (2005).

O capítulo 3 apresenta também o processo corrente de fabricação da junta pós-lubrificada e as alterações propostas visando a fabricação de uma junta auto-lubrificada, demonstrando os ganhos a serem obtidos nas etapas da produção da junta. Ao final do capítulo comenta-se sobre o critério subjetivo atualmente utilizado para detectar não-conformidades na lubrificação das juntas, e as dificuldades de controle associadas à falta de um padrão quantitativo para essa avaliação.

O capítulo 4 descreve as diversas operações que compõem o processo de montagem do radiador de tecnologia mecânica, indicando em quais delas a

lubrificação da junta é relevante e os efeitos sentidos na linha pela ausência ou insuficiência da mesma. O histórico dos rejeitos de linha quantifica a relevância desta característica da junta, detalhando-se os principais mecanismos de falha, causas-raiz associadas e seus efeitos para o produto. Retrabalhos de lubrificação da junta são possíveis, porém oneram o fabricante do radiador com um processo adicional e perda de cadência de produção.

O capítulo 5 descreve as etapas do desenvolvimento e aplicação da junta em produção seriada, desde o processo de desenvolvimento do composto em parceria com o fornecedor da junta até a validação na linha de montagem de radiadores.

Nesse desenvolvimento, uma etapa importante foi a realização de uma jornada de plena cadência para validação do uso da junta com a nova tecnologia na linha de produção seriada do radiador, comparando-se resultados de desempenho da nova junta com a junta pós-lubrificada atualmente em uso. Produziu-se um lote de 680 radiadores, dos quais trezentos com as novas juntas e os restantes com a junta atual. Nenhum dos radiadores produzidos com a junta auto-lubrificada apresentaram problemas de vazamento, enquanto que houve 4 reprovações nos testes de estanqueidade em unidades produzidas junta pós-lubrificada. É importante destacar que os 680 radiadores foram produzidos seqüencialmente, sem troca de lote dos demais componentes utilizados. Foram tomados cuidados adicionais durante a montagem para isolar causas especiais do processo.

O capítulo 5 apresenta ainda os resultados do estudo realizado para quantificar a lubrificação superficial das juntas por meio da força de inserção de um punção no interior das golas, simulando-se assim a interface real de montagem. Esta avaliação ocorreu durante um período de 30 dias. A cada dia uma amostra de um lote de juntas auto e pós-lubrificadas era testada, sempre no mesmo ponto da junta. Essas juntas foram todas produzidas em um mesmo dia, de forma que a cada teste as amostras testadas eram um dia mais velhas.

Os valores para força de inserção da junta caíram de 8,3 para 3,9 N no decorrer de 30 dias, comprovando o efeito migratório do aditivo de deslizamento no EPDM sugerido por Wypych (2005). Nos 3 primeiros dias,

observou-se estagnação dos valores de força de inserção, devido à formação das múltiplas camadas do aditivo na superfície da junta, levando à uma queda dos valores a partir do momento que o lubrificante passasse a deslizar entre si e não entre si e o EPDM.

Já para a junta pós-lubrificada, observa-se que os valores força de inserção sobem de 4 para 13,6 N. A partir do 14º dia de fabricação da junta, o qual considerado a partir da experiência acumulada como limite máximo para utilização das juntas em estoque sem retrabalho de lubrificação, verifica-se que a força de atrito permanece aumentando, impossibilitando sua utilização no processo de fabricação sem o retrabalho.

Um resultado importante a ser destacado é que, na comparação com os valores da força de inserção para a junta pós-lubrificada, verificou-se que o valor dessa força para a auto-lubrificada no primeiro dia (pior condição de lubrificação para essa junta) equivale àquele do 14º dia da junta pós-lubrificada. É importante destacar também que mesmo na condição de maior valor de força de inserção (1º dia após a fabricação), a montagem do lote de radiadores ocorreu sem rejeitos de linha, e assim essa força de inserção pode ser preconizada como limite máximo de especificação para controle na liberação do lote no início da montagem dos radiadores.

Com a utilização da junta de EPDM com composto auto-lubrificado em substituição ao pós-lubrificado, estimou-se uma redução de custos anual da ordem de R\$ 538.000,00, suficientes para amortizar os investimentos em novos ferramentais da ordem de R\$ 434.000,00 que poderão ser necessários, particularmente para as juntas de maior volume de produção. Em termos de qualidade do produto, espera-se manter o índice de rejeitos dos testes de estanqueidade de linha estáveis no decorrer do ano, eliminando-se os aumentos de nos níveis de rejeição observados nos meses mais secos do ano. Além disso, o MTBF da linha de montagem deverá ser reduzido pelo fato das juntas trabalharem sem o excesso de lubrificante superficial, e espera-se que ocorra uma redução nos retornos em garantia de radiadores por perda de estanqueidade.

Desta forma, é possível verificar a junta auto-lubrificada proposta neste trabalho apresenta-se conforme para utilização em série, com perecibilidade (perda da lubrificação) aceitável durante os 30 dias de fabricação avaliados neste estudo. Além da avaliação da redução do custo na fabricação do radiador e melhoria do processo, o trabalho fornece dados para preconização objetiva de valores para controle da lubrificação da junta. Esses valores podem ser incorporados ao desenho de produto, ao plano de controle de produção da junta e de recebimento do fabricante do radiador, bem como no controle para liberação do lote de juntas pouco antes da utilização da produção, eliminando-se o critério subjetivo atualmente em uso.

A experiência adquirida ao longo do desenvolvimento do presente trabalho permite indicar como recomendações para futuros trabalhos de pesquisa e desenvolvimento:

- um estudo mais aprofundado da migração do aditivo de deslizamento até a superfície do EPDM em temperaturas mais altas, uma vez que a presente avaliação foi realizada em ambiente com temperatura e umidade controladas;
- uma extensão do período de observação da força de inserção da junta, para constatação do prazo de saturação do lubrificante na superfície e de eventual perda futura da lubrificação, visando a determinação do tempo máximo de estocagem (perecibilidade) da junta auto-lubrificada;
- a realização de um estudo de MSA (*“measurement system analysis”*), para o dispositivo de verificação de força de inserção proposto, para quantificar as variações do sistema de medição (linearidade, tendência, repetitividade, reprodutibilidade);
- a reavaliação do MTBF da linha de montagem, particularmente dos equipamentos de teste de estanqueidade da linha, em função da eliminação do excesso de lubrificante na superfície da junta;
- o estudo do efeito do diâmetro das golas na força de inserção;

- realização de medições da força de inserção em mais de uma gola da junta para avaliação da dispersão dos valores encontrados entre golas da mesma junta e as mesmas golas de juntas distintas;
- o acompanhamento dos retornos de garantia de campo, de radiadores com a junta auto-lubrificada, estabelecendo-se assim uma nova correlação de confiabilidade do radiador.

7. REFERÊNCIAS

ACKER, W.V. **The early bird catches the worm: low cost cars emerging globally**. São Paulo, Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE BRASIL), 23 abr. 2007. Palestra proferida por ocasião do Simpósio “Novas Tecnologias Automotivas”, São Paulo, 2007.

BAILY, M.N. et al. (2005); *Competition and labor productivity: lessons from the US automotive industry*. Disponível em: http://www.frbsf.org/economics/conferences/0511/4_IncreasingGlobalCompetition.pdf. Último acesso em 06 fev. 2008.

BOSCH. **Manual de Tecnologia Automotiva**. Tradução da 25ª Edição Alemã. São Paulo: Edgard Blücher, 2007, 1232 p.

CHRISTOPHER, M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégias para a redução de custos e melhoria dos serviços**. São Paulo: Thomson Pioneira, 2007. 308 p.

JANOKAR, A. V.; HIRT, D.E.; WOOSTER, J.J. Effect of erucamide and silica loadings on COF behavior of POP multilayer films in repetitive testing. **Polymer Engineering and Science**, v. 44, n. 1, 2004. p. 34-44.

KARPELES, R.; GROSSI, A.V. EPDM rubber technology. In: Bhowmick, A.K.; Stephens, H.L. (Editores). **Handbook of elastomers**. 4th ed., New York: Marcel Decker, 2006, p. 845-876

MERLI, G. **Comakership: a nova estratégia para os suprimentos**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1994. 264 p.

MORI, K. *et al.* Development of polymer-molding-releasing metal mold surfaces with perfluorinated-group-containing polymer plating. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 90, n. 9, p. 2549-56, 2003.

MODULUS. **Iniciação à Tecnologia da Borracha**. São Paulo: Modulus Assessoria Técnica em Borracha, 2005. Apostila de treinamento, 199p.

NOMOTO, E. A. **Powertrain efficiency domain**. Itatiba, Valeo Térmico Motor Ltda. Apresentação comercial, Itatiba, 2006.

WYPYCH, G. **Handbook of antiblocking, release, and slip additives**. Toronto: Chemtec Publishing, 2005. 327 p.

FOCQUET, K. In: Addcon '95 - Worldwide Additives & Polymer Modifiers Conference, 1995, Basell, **Book of Papers**. Basell: 1995. Paper 19, p. 1-5.

MARCHESE, L.M.; PIANCASTELLI, C.A. (2002); Avaliação biomecânica da atividade de montagem de condicionadores de ar na indústria de auto-peças. Disponível em: http://www.ergonet.com.br/download/avaliacao-biomecanica-carlos_o_d_piancastelli.pdf. Último acesso em 25 ago. 2008.

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 6th ed., New York: John Wiley & Sons, 2007. 944 p.

VEIGA. B.B. **Projeto e Avaliação de Desempenho de Embalagem CKD no Transporte Marítimo de Peças de Veículos Automotivos**. 108 p. Monografia. Mestrado em Engenharia Automotiva (Profissionalizante). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

(2006) França. Valeo Automotive Systems. *EDPM specification for cooling radiator gasket. Standard PDT NVD 30 015 Rev B – Mar/2006 – pg. 1-14*

(2007) *Comercial information on plastic industry – new slip agents. 2007*
Disponível em:
http://www.plastemart.com/upload/Literature/New_slip_agents.asp. Último
acesso em 12/11/2008.