

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR HUMBERTO JESUINO  
BELLOTO E APROVADA  
PELA COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA EM 20/07/2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

Humberto Jesuino Belloto

**Análise de falhas em tubos sem costura de aço  
St52 utilizados em motores diesel**

Campinas, 2011.

Humberto Jesuino Belloto

# **Análise de falhas em tubos sem costura de aço St52 utilizados em motores diesel**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Materiais e Processos  
de Fabricação

Orientador: Professor Dr. Paulo Roberto Mei

Campinas  
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

B417a Humberto Jesuino Belloto  
Análise de falhas em tubos sem costura de aço St52  
utilizados em motores diesel: B417a / Humberto Jesuino  
Belloto. Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Paulo Roberto Mei.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Tubos. 2. Fadiga. 3. Laminação (Metalurgia). 4. Aço  
- Metalografia. 5. Motor Diesel. I. Mei, Paulo Roberto.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Failure analysis in seamless pipes of St 52 steel used in Diesel  
Engines.

Palavras-chave em Inglês: Seamless tube, diesel fuel injection, internal  
roughness, autofrettage and fatigue.

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia, Marcelo dos Santos  
Pereira

Data da defesa: 26/07/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

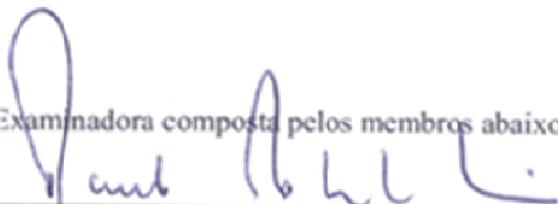
**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Análise de falhas em tubos sem costura de aço  
St52 utilizados em motores diesel**

Autor: Humberto Jesuino Belloto

Orientador: Professor Dr. Paulo Roberto Mei

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Paulo Roberto Mei**  
Universidade Estadual de Campinas



**Prof. Dra. Cecília Amélia de Carvalho Zavaglia**  
Universidade Estadual de Campinas



**Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira**  
Universidade Estadual Paulista

Campinas, 26 de julho de 2011.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho primeiramente a **Deus**, porque sem ele nada seria possível.

Aos meus pais **Jayme Belloto** (i m) e **Dalva Jorge Belloto** (i m), que me deram todas as condições para ser um grande homem.

À minha querida esposa **Lígia Regina Binoti** e ao meu filho **Enzo Belloto** que são a razão do meu viver.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador, Professor Dr. Paulo Roberto Mei, pelo apoio e confiança, mostrando-me os caminhos a serem seguidos.

Aos Professores: Sérgio Tonini Button, Cecília A. C. Zavaglia e Maria Clara Ierardi, pela paciência, dedicação e orientação na realização das matérias por eles ministradas.

Aos meus amigos do laboratório metalúrgico da MWM International, que sem eles eu não teria o sucesso dos resultados encontrados em alguns experimentos.

Ao Mateus de Oliveira Fonseca e Valter Kwast da empresa Cartec, pela colaboração com materiais e informações.

Aos Engenheiros: Dr. Antônio Sérgio Medeiros Fonseca e Msc. Ronaldo de Faria Antunes da empresa Vallourec & Mannesmann do Brasil, pela colaboração com informações extremamente relevantes para o sucesso deste trabalho.

A todos os professores e colegas do departamento de engenharia de especificações da MWM International, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

*“Um raciocínio lógico leva você de A a B. A imaginação  
leva você a qualquer lugar que você quiser”  
(Albert Einstein)*

## **Resumo**

O tubo de aço carbono com alto teor de manganês St52 (Norma DIN 1.0580) sem costura, com 8 mm de diâmetro externo e 3 mm de diâmetro interno, atualmente utilizado no sistema de injeção de combustível de motores eletrônicos a diesel com pressões de trabalho de até 1300 bar, apresentou problemas nos testes de durabilidade. O rompimento do tubo foi consequência das dobras e trincas internas originadas no processo de laminação, denominadas descontinuidades superficiais. O tubo de fabricação nacional, atualmente utilizado nos motores, foi comparado com um importado e os resultados dos testes encontrados determinaram qual deles teria maior vida à fadiga. São apresentados nesta dissertação o processo de fabricação do tubo com as suas principais vulnerabilidades, os testes de fadiga comparando as durabilidades dos tubos nacionais e importados, o efeito do processo de autofretagem e os ensaios metalográficos. Os resultados dos testes levaram a concluir que o tubo nacional não atende as solicitações de trabalho do motor e a solução imediata é a utilização do tubo importado. A recomendação para trabalhos futuros seria o estudo de melhoria no processo de laminação para diminuição do nível de descontinuidades internas dos tubos nacionais.

*Palavras-chave:* Tubo de aço sem costura, injeção de combustível diesel, descontinuidade interna, autofretagem e fadiga.

## **Abstract**

The carbon steel with high manganese in accordance with Din 1.0580 (St52) seamless tube, with 8 x 3 mm diameter has been used into fuel injection system of the electronic diesel engine working with pressure up to 1300 bar. This tube presented short life on durability tests due to inner cracks created during rolling process. The tube produced in Brazil and used nowadays in the engines was compared with an imported one using a fatigue test. It is shown on this work the manufacturing tube process, the fatigue test applied to the national and imported tubes and the autofrettage effects. The results showed that the national tube does not meet the necessary requirements and the immediate solution is to use the imported one. It is recommended further studies focused on the rolling process to reduce the internal roughness of the tubes produced in Brazil.

*Key Words:* Seamless tube, diesel fuel injection, internal roughness, autofrettage and fatigue.

## Lista de Ilustrações

1.1- Vazamento de óleo diesel em veículo após 28.000 km .....	3
1.2 - Tubos de alta pressão de combustível montados no motor da MWM International .....	4
2.1- Esquema do processo de Aciaria e Lingotamento .....	7
2.2 - Esquema do processo de laminação de tubos .....	8
2.3 - Forno de soleira rotativa .....	9
2.4 - Laminador Mannesmann .....	9
2.5 - Mandris de perfuração .....	10
2.6 - Ferramenta de laminação .....	11
2.7 - Equipamento de apontamento do tubo .....	13
2.8 - Processo de decapagem química do tubo .....	13
2.9 - Equipamento de trefilação com três matrizes .....	14
2.10 - Macrografia e micrografias mostrando as dobras com profundidade média de 0,15mm no diâmetro interno equidistantes 180° entre si, Ataque: Nital 3% .....	16
2.11 - Equipamento de polimento eletrolítico da V&M França .....	17
2.12 - Onda triangular com as respectivas tensões ( $\sigma_{max}$ ) e ( $\sigma_{min}$ ) .....	23
3.1 - Tubo que falhou no teste de durabilidade .....	26
3.2 - Região de vedação entre ogiva e bomba injetora .....	27
3.3 - Trinca longitudinal interna do tubo que falhou em serviço / aumento de 20x .....	28
3.4 - Corte do tubo para análise da secção transversal .....	28
3.5 - Superfície interna do tubo, região próxima à falha, Ataque: Nital 3% .....	29
3.6 - Micrografia mostrando uma dobra de conformação seguida por uma trinca na região do diâmetro interno do tubo, Aumento: 440 x / Ataque: Nital 3% .....	30

3.7 - Mapeamento por sinal de Raios-X emitidos pelo elemento fósforo, indicando a presença de resíduo lubrificante (fosfato de zinco) na região até 205 $\mu\text{m}$ .....	31
4.1 – Metodologia experimental adotada .....	33
4.2 - Secções transversais retiradas dos tubos para análises metalográficas .....	34
4.3 - Secção longitudinal do tubo St52 VM-NP .....	35
4.4 - Secção longitudinal do tubo St52 VM-P, realizado na França .....	36
4.5 - Secção longitudinal do tubo St52 P-P .....	37
4.6 - Equipamento Bosch de ensaio de fadiga .....	38
4.7 - Equipamento de medição de dureza EMCO da MWM International .....	41
5.1 - Análise de descontinuidades internas na secção transversal em tubos VM-NP .....	43
5.2 - Análise de descontinuidades internas na secção transversal em tubos VM-P .....	43
5.3 - Análise de descontinuidades internas na secção transversal em tubos P-P .....	44
5.4 - Estudo de pressão de autofretagem em função do diâmetro externo .....	45
5.5 - Estudo de pressão de autofretagem em função do diâmetro interno .....	45
5.6 - Avaliação do Limite de resistência e escoamento do tubo após autofretagem .....	46
5.7 - Avaliação do alongamento do tubo após autofretagem .....	46
5.8 - Perfil de dureza do tubo após autofretagem .....	47
5.9 - Análise de solicitação mecânica por elementos finitos .....	48
5.10 - Conjunto Motor MWM 4 cilindros .....	48
5.11 - Micrografia (Ferrita e Perlita) do aço St52 VM-NP / Ataque: Nital 3% .....	52
5.12 - Micrografia (Ferrita e Perlita) do aço St52 P-P / Ataque: Nital 3% .....	52
5.13 - Imagem das fases Ferrita (87,45%) e Perlita (12,55%) do aço St52 VM-NP .....	53
5.14 - Imagem das fases Ferrita (86,76%) e Perlita (13,23%) do aço St52 P-P.....	53

## Lista de Tabelas

1.1 - Composição química de aços usados em tubos sem costura segundo a norma DIN 2391-2:1994 .....	2
1.2 - Valores de pressão máxima de trabalho para tubos de motores diesel, calculados pela norma ISO 8535 .....	2
2.1 - Porcentagem de redução a cada passe de trefila, segundo a V&M Brasil .....	15
2.2 - Grau de descontinuidades internas conforme norma ISO 8535-1:2006 .....	18
2.3 - Classificação de propriedades mecânicas de tubos de aços em temperatura ambiente, segundo a norma DIN 2391-2 .....	19
3.1 - Análise estrutural e ensaios mecânicos no tubo que apresentou falha .....	31
4.1 - Comparação entre as composições químicas dos aços VM-NP e P-P .....	40
5.1 - Variáveis e resultados dos testes de fadiga .....	50
5.2 - Comparação entre as composições químicas dos aços VM-NP e P-P .....	51

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

<b>D</b> – Diâmetro Externo	[mm]
<b>d</b> – Diâmetro Interno	[mm]
$\epsilon$ – Alongamento	
<b>k</b> – Relação entre D / d	
<b>kPa</b> – Unidade de Pressão	[bar]
<b>mPa</b> – Unidade de Pressão	[bar]
<b>P trab</b> – Pressão de Trabalho	[bar]
<b>ReH</b> – Resistência ao escoamento	[MPa]
$\sigma_a$ – Metade do $\sigma_r$	[MPa]
$\sigma_e$ – Limite de Escoamento	[MPa]
$\sigma_m$ – Tensão Média	[MPa]
$\sigma_{max}$ – Tensão Máxima	[MPa]
$\sigma_{min}$ - Tensão Mínima	[MPa]
$\sigma_N$ – Tensão Nominal	[MPa]
$\sigma_r$ – Intervalo de Tensões	[MPa]
$N_f$ - Vida em Fadiga	[Ciclos]

### *Abreviações*

**BOF** - Basic Oxygen Furnace

**Br** - Brasil

**CAD** – Computer Aided Design

**CONAMA** – Conselho Nacional do Meio Ambiente

**DIN** – Deutsches Institut für Normung

**EPA** – Environmental Protection Agency

**ISO** – International Organization for Standardization

**LR** – Limite de Resistência

**LE** – Limite de Escoamento

**MEV** – Microscópio Eletrônico de Varredura

**NBK** – Laminado a frio e normalizado

**P&P** – Empresa Poppe & Potthoff

**P-P** – Tubo Poppe & Potthoff

**St** - Stahl

**V&M** – Empresa Vallourec & Mannesmann

**VM-NP** – Tubo Vallourec & Mannesmann **não polido**

**VM-P** - Tubo Vallourec & Mannesmann **polido**

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Objetivo .....	5
<b>2 – FABRICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS SEM COSTURA UTILIZADOS NESTE TRABALHO</b> .....	6
<b>2.1. Processo de fabricação dos tubos</b> .....	6
2.1.2. Processo de produção de tubos sem costura .....	6
2.1.3. Processo de laminação Mannesmann .....	8
2.1.3.1. Forno rotativo .....	8
2.1.3.2. Laminador redutor de lupas .....	10
2.1.3.3. Laminador contínuo .....	11
2.1.3.4. Laminador redutor-estirador .....	11
2.1.4. Trefilação .....	12
<b>2.2. Tratamento superficial interno</b> .....	15
2.2.1. Polimento eletrolítico .....	16
<b>2.3. Classes e propriedades mecânicas dos aços para tubos de alta pressão</b> .....	18
2.3.1. Classificação de acordo com a qualidade superficial .....	19
<b>2.4. Esforços atuantes na parede do tubo</b> .....	19
2.4.1. Cálculo da pressão de trabalho e esforços atuantes na parede do tubo .....	20
<b>2.5. Ensaio mecânicos usados na caracterização de aços para tubos sem costura</b> .....	21
2.5.1. Ensaio de fadiga .....	21
2.5.2. Tipos característicos de sollicitação .....	23
2.5.3. Curvas S-N .....	24
<b>2.6. Processo de autofretagem</b> .....	25
<b>3 - ESTUDO DE CASO</b> .....	26
<b>3.1. Discussões das ocorrências</b> .....	26

<b>4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b> .....	33
<b>4.1. Avaliação do nível de descontinuidades internas dos tubos</b> .....	34
<b>4.2. Polimento eletrolítico</b> .....	36
<b>4.3. Aço St52 importado da Poppe &amp; Potthoff (Alemanha)</b> .....	37
<b>4.4. Processo de autofretagem</b> .....	37
<b>4.5. Fadiga</b> .....	38
<b>4.6. Micrografias</b> .....	40
<b>4.7. Comparação das propriedades mecânicas dos aços VM-NP e P-P</b> .....	40
<b>4.8. Dureza</b> .....	41
<b>4.9. Análise de elementos finitos</b> .....	41
<b>5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	42
<b>5.1. Procedimento de análise das descontinuidades internas</b> .....	42
<b>5.2. Estudo da variação de diâmetro em relação à autofretagem</b> .....	44
<b>5.3. O efeito da autofretagem em relação às propriedades mecânicas do tubo</b> .....	45
<b>5.4. Determinação do tubo que é submetido à maior carregamento mecânico</b> .....	47
<b>5.5. Fadiga</b> .....	49
<b>5.6. Comparação entre as composições químicas dos aços VM-NP e P-P</b> .....	50
5.7.1. Microestrutura dos tubos fornecidos pela V&M-NP e P&P .....	51
<b>6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	55
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	57

## 1 - INTRODUÇÃO

De acordo com Cameron (2008), a quantidade de emissões de gases poluentes nos motores diesel, sempre foram maiores em relação aos motores ciclo Otto (gasolina e álcool). Porém, com o avanço da tecnologia, o motor diesel teve que se adaptar, pois com a constante preocupação dos órgãos governamentais e da população mundial ao combate a emissão de poluentes, não são mais admitidos altos índices de emissões de gases tóxicos como: óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e monóxido de carbono (CO) na atmosfera. Para regulamentar essas políticas, foram criadas rigorosas legislações de emissões, como a norma europeia EURO III (DIRECTIVE 88/77/EEC) e a brasileira (CONAMA 315 – Anexo A). Nessa direção, as empresas tiveram que buscar alternativas para desenvolverem motores a diesel menos poluentes, e isto, só foi possível, em virtude de altos investimentos em tecnologia e aperfeiçoamento dos técnicos e engenheiros automotivos. Como os países desenvolvidos possuem mais recursos financeiros que os países subdesenvolvidos, então os mesmos foram pioneiros no desenvolvimento de novas tecnologias ao atendimento as normas de emissões.

Segundo Ferrari (2007), como as empresas nacionais atuam também no mercado externo através da exportação de motores diesel, foi necessária a antecipação dos investimentos para atender as legislações internacionais, visto que a legislação no Brasil, embora existente, era menos exigente que a europeia. Basicamente, o que mudou nos motores diesel para o atendimento a norma EURO III, foi o aumento das pressões de combustão e, por consequência, o aumento da pressão do sistema de injeção de combustível, responsável pela condução do óleo diesel a alta pressão (1.300 bar) para dentro dos cilindros dos motores. Com essas novas pressões, a preocupação sempre foi com a bomba de alta pressão de combustível, sensores e atuadores, peças que envolvem altos investimentos financeiros.

Tabela 1.1 - Composição química de aços usados em tubos sem costura segundo a norma DIN 2391-2:1994.

AÇO		COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% DE MASSA)				
SÍMBOLO	NÚMERO	C max.	Si max.	Mn	P max.	S max.
St30	1,0212	0,10	0,05	≤0,55	0,025	0,025
St52	1,0508	0,22	0,55	≤1,60	0,025	0,025

Como nos motores eletrônicos a pressão aumentou para 1.300 bar, para atendimento da legislação EURO III, decidiu-se utilizar o tubo com material St52 o qual, segundo a norma ISO 8535:2006 (Tabela 1.2), poderia trabalhar com pressão de 1.756 bar.

Tabela 1.2 – Valores de pressão máxima de trabalho para tubos de motores diesel, calculados pela norma ISO 8535.

AÇO	ReH (MPa)	D (mm)	d (mm)	k	Ptrab (máxima) KPa	Ptrab (máxima) bar
St30	215	8	3	2,667	106.369	<u>1063</u>
St52	355	8	3	2,667	175.633	<u>1756</u>

$R_{eH}$  = Tensão Escoamento    D = diâmetro externo    d = diâmetro interno

k = Relação entre D / d     $P_{trab\ max}$  = Pressão máxima de trabalho

Porém verificaram-se falhas em motores em teste veiculares de durabilidade, onde os tubos fabricados com aço St52 apresentaram trincas (Figura 1.1), por onde ocorreram vazamentos de combustível, com a possibilidade de incêndio do veículo.



FIGURA 1.1 – Vazamento de óleo diesel em veículo após 28.000 km. Foto gentilmente cedida pela MWM International Motores.

Os tubos desenvolvidos para aplicação em motores a diesel são submetidos à pressão de injeção de combustível com carregamento cíclico e, necessariamente, não devem apresentar irregularidades e/ou falhas de construção. Os tubos são curvados em diversas direções, e conduzem o combustível da bomba de alta pressão para o tubo distribuidor e, finalmente, para os bicos injetores de combustível (Figura 1.2). Geralmente, para fabricação dos tubos de injeção de combustível, utiliza-se um tubo sem costura, pois para atender o roteiro de montagem dos tubos no motor, o projeto exige que o comprimento nominal do tubo deva ser o mesmo, a fim de se manter a mesma perda de carga. Tubos com costura possivelmente não suportariam esse excesso de curvatura em virtude do processo de soldagem.

Eventuais problemas de vazamento de óleo diesel pelo tubo comprometem o funcionamento do veículo, consumo de combustível e a segurança dos passageiros.

Atualmente já existe na Europa e EUA o processo de polimento eletrolítico (ASTM E 1558), no qual a região interna do tubo é submetida a um polimento eletrolítico para diminuição e/ou eliminação das descontinuidades internas.

No Brasil, a única empresa fornecedora de matéria-prima para tubos de alta pressão é a Vallourec & Mannesmann, situada na região de Belo Horizonte e a mesma ainda não possui equipamento de polimento eletrolítico em virtude do alto custo de aquisição (da ordem de 1 milhão de reais) e da baixa demanda de utilização de tubos com este pré-requisito.

A Metalúrgica Cartec, situada na região do Ipiranga, São Paulo, é responsável pela conformação final do tubo, com as respectivas curvaturas, tratamento superficial externo, conformação da ogiva e teste de autofretagem.

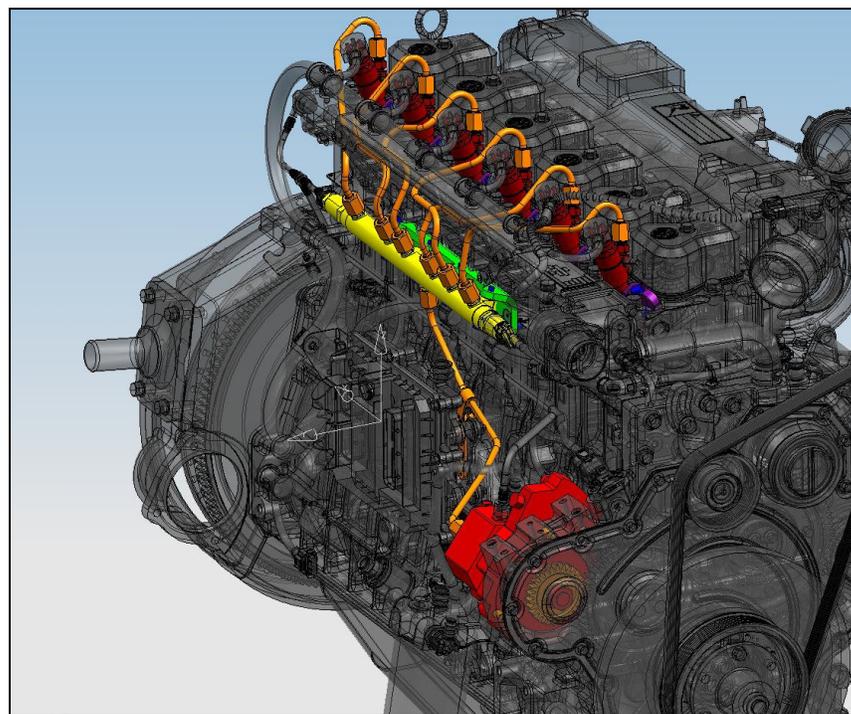


FIGURA 1.2 – Tubos de alta pressão de combustível montados no motor da MWM International.

## **1.1. Objetivo**

Os tubos de alta pressão de combustível que trabalham a uma pressão de 1300 bar, utilizados em motores diesel com aço St52, sem costura, apresentaram falhas durante os testes em veículos. Motivado a descobrir a resolução do problema e propor uma solução, esta pesquisa foi desenvolvida.

Vários aspectos no processo de fabricação dos tubos foram analisados para se descobrir a causa da falha, tais como: materiais, processo de laminação, trefilação, recozimento, fissuras internas, dobramento do tubo e processo de autofretagem.

Verificou-se que a utilização do processo de autofretagem é determinante para se aumentar a durabilidade dos tubos e a utilização do processo de fadiga são fundamentais para a integridade do bom funcionamento sistema de combustível, evitando assim qualquer tipo de falha e ou vazamentos.

## **2 - FABRICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS TUBOS SEM COSTURA UTILIZADOS NESTE TRABALHO.**

### **2.1. Processo de fabricação dos tubos**

Utilizam-se tubos de aços nas diversas áreas como construção civil, automotiva, óleo e gás, entre outros.

Destacam-se dois processos para a fabricação de tubos:

1. **Tubos com costura:** Fabricado a partir de chapas de aço, que são dobrados na forma desejada, redondos, quadrados, ovalizados, etc., sendo unidos por solda os extremos no sentido do comprimento, motivo pelo qual são chamados de tubos com costura (DIN 2393-2).
2. **Tubos sem costura:** Fabricado a partir de barras, que são laminadas e trefiladas até a sua forma final. Em toda a extensão do tubo, não é aplicado nenhum processo de união, por isso são chamados de sem costura (DIN 2391-2).

#### **2.1.2 Processo de produção de tubos sem costura**

Segundo Reis Júnior (2005), a produção nacional de tubos sem costura é feita em usina integrada Vallourec & Mannesmann do Brasil, localizada em Belo Horizonte, que produz desde o gusa às barras, as quais serão posteriormente laminadas em tubos sem costura (Figura 2.1). A usina possui dois altos fornos a 100 % de carvão vegetal para a produção do gusa. Do alto forno o gusa é vazado para o carro torpedo previamente aquecido que, por sua vez, abastece a panela de gusa, que segue para o BOF com capacidade de 80 toneladas, onde será feito o refino primário com a descarburização por sopro de oxigênio por 18 minutos. Em seguida, é encaminhado ao forno panela a arco elétrico para o refino secundário, onde a composição química é analisada e corrigida com a adição de arames de Al, Mn, Ti e B, de acordo com a especificação final do produto. Após a adição desses elementos de liga, a corrida de fundição poderá passar pelos

processos de degaseificação a vácuo e homogeneização com argônio, dependendo do tipo de aço. O carregamento do BOF é feito também com 20% de sucata, oriundos da rejeição dos processos de laminação e trefilação. No lingotamento, o distribuidor mantém uma reserva de 18 toneladas de aço líquido e a velocidade de lingotamento é de 1,5 m/minuto. Aplica-se na parede do molde um pó fluxante para auxiliar na desmoldagem e na formação da casca de solidificação, além da oscilação do molde para auxiliar o aço a fluir.

O material é lingotado em barras de 180 e 230 mm de diâmetro e o comprimento do corte é definido de acordo com a necessidade de comprimento final do produto laminado.

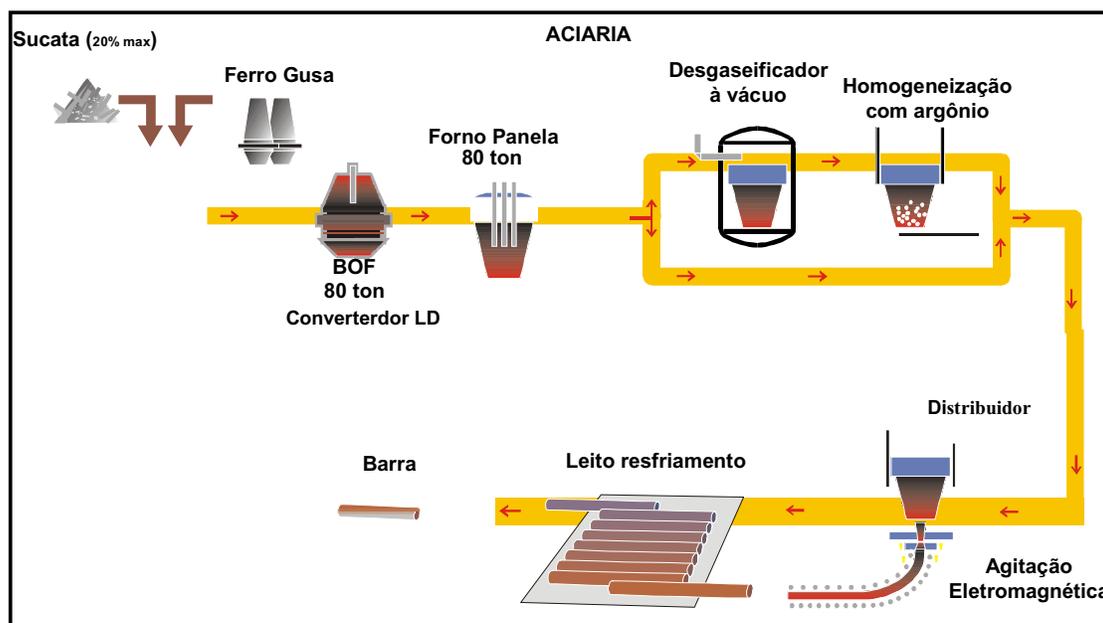


FIGURA 2.1 – Esquema do processo de Aciaria e Lingotamento (Adaptado de: V&M Brasil, 2001).

As barras, ao saírem do lingotador, são cortadas a quente nas dimensões necessárias. A seguir, um dos extremos é puncionado para facilitar a centragem da ponta do mandril e assegurar a perfuração exata. Após o resfriamento, as barras são torneadas numa descascadeira e examinadas quanto a defeitos, que causariam a rejeição do tubo acabado.

### 2.1.3. Processo de laminação Mannesmann

O processo de fabricação dos tubos sem costura é basicamente um processo constituído pela perfuração da barra e sua posterior laminação (DIETER, 1998, a).

A Figura 2.2 mostra, de forma esquemática, o processo completo de laminação do tubo.

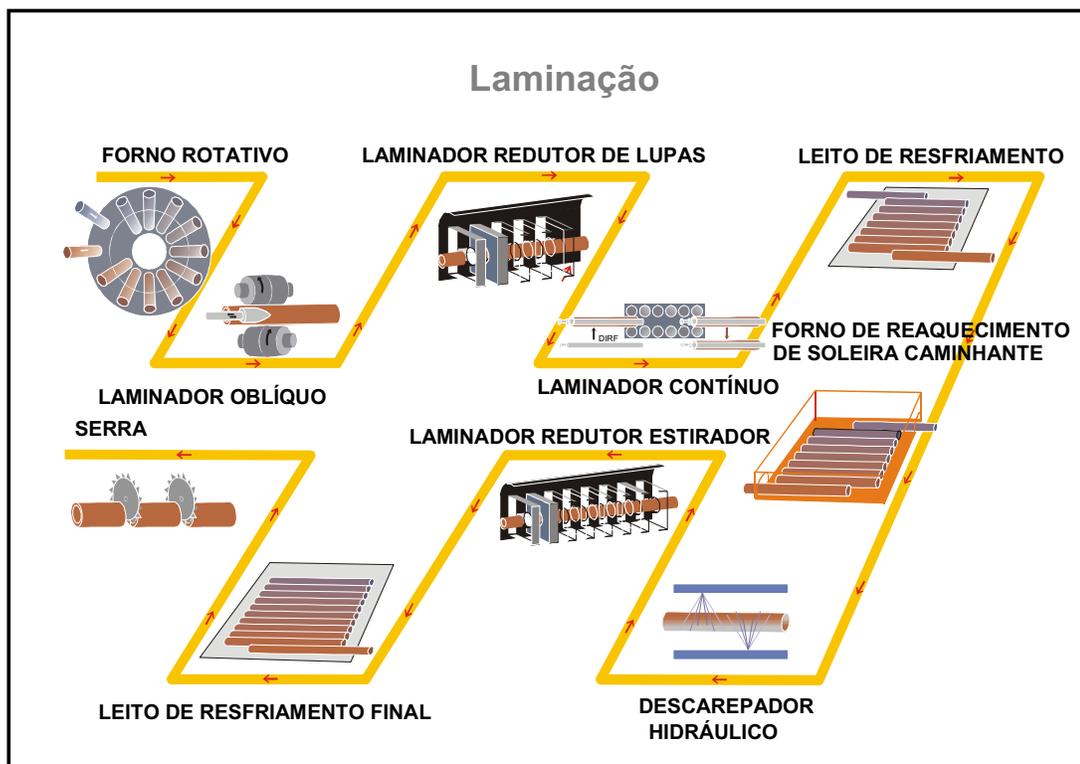


FIGURA 2.2 - Esquema do processo de laminação de tubos (Adaptado de: Almeida Júnior, 2009).

#### 2.1.3.1. Forno rotativo

Após a aprovação das barras na aciaria, as mesmas são encaminhadas ao forno circular de soleira rotativa (Figura. 2.3). A barra é carregada ao forno e aquecida através de 8 zonas de temperatura, podendo-se utilizar velocidade de aquecimento de 1 minuto por milímetro de

espessura do material. A temperatura varia de 1.050 a 1.270 °C. A barra permanece por 86 minutos no forno e é desenformada uma barra a cada 26 segundos.



FIGURA 2.3 – Forno de soleira rotativa. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

Após as barras estarem na temperatura de laminação, as mesmas são depositadas numa mesa com roletes inclinados, que as fazem girar sobre si mesmas para soltar a carepa.

A produção de tubos sem costura data de 1885 (DREISTEIN , CARDOSO e MELO, 1994), quando os irmãos Max e Reinhard Mannesmann, observaram que a redução de diâmetro de uma barra redonda maciça, pela laminação entre dois cilindros inclinados, gera um vazio ao longo do eixo longitudinal da peça (Figura. 2.4).

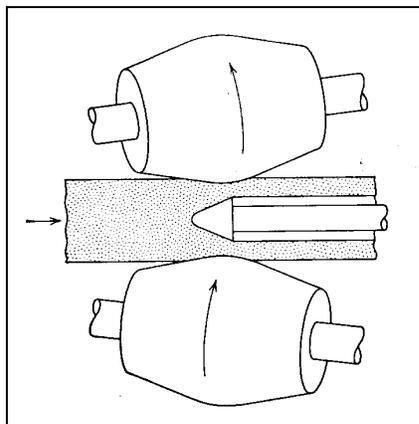


FIGURA 2.4 – Laminador Mannesmann (DIETER, 1998, a).

Com a inclusão de mandril neste ponto (Figura 2.5), a barra forma uma camisa cilíndrica, denominada lupa. Neste processo de perfuração o mandril provoca descontinuidades na superfície interna da barra perfurada. Na V&M Brasil, os dois rolos laminadores têm o formato de um cone duplo e são inclinados em relação ao eixo da barra, de um ângulo de 6 a 12°, enquanto os seus eixos estão em planos horizontais paralelos. A velocidade varia de 50 a 150 rpm e o diâmetro dos rolos de 500 a 1.100 mm, obtendo-se, em geral, velocidades periféricas de 240 a 330 m/min.



FIGURA 2.5 – Mandris de perfuração. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

#### 2.1.3.2. Laminador redutor de lupas

Após a perfuração, a lupa passa por seis cadeiras de laminação que são colocadas umas após as outras, numa linha reta, de modo que a lupa a ser laminada avança continuamente, sendo trabalhada sucessivamente nos vários passes. Durante o processo ocorre sopro de ar para retirar a carepa interna. Devido a este passe de laminação intermediário, toda a faixa de dimensões de tubos pode ser produzida (REIS JÚNIOR, 2005).

### 2.1.3.3. Laminador contínuo

O laminador contínuo consiste em um laminador com oito cadeiras, onde 2 rolos são alternados de cada lado e laminados consecutivamente (Figura 2.6). Antes da entrada da lupa no laminador, um longo mandril lubrificado com fosfato de zinco é inserido, ao qual serve como lubrificante no processo de conformação interna das paredes dos tubos, além de ser utilizado para determinação das paredes internas e diminuição do empenamento. Após este processo a lupa permanece no leito de resfriamento até o seu resfriamento total (ALMEIDA JÚNIOR, 2009).

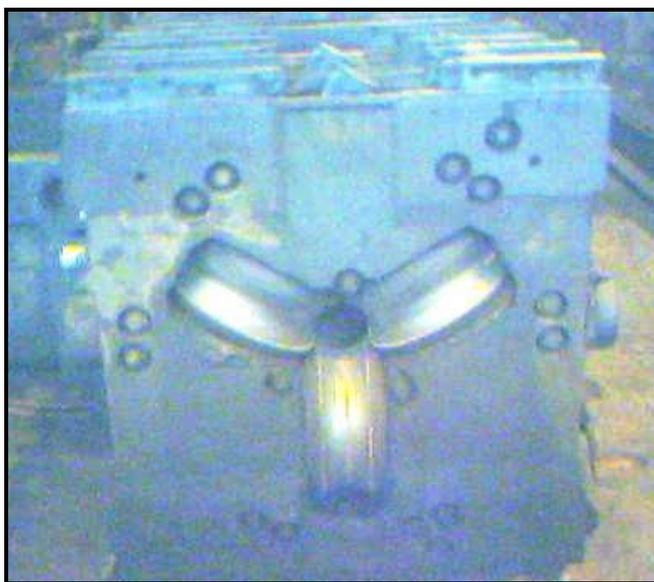


FIGURA 2.6 – Ferramenta de Laminação. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

### 2.1.3.4. Laminador redutor-estirador

Segundo Carvalho (2007), após o processo de resfriamento, a lupa é reauecida. Nesse instante a lupa passa por um processo de retirada de carepas, as quais se não forem retiradas podem prejudicar todo processo de laminação seguinte. Após a retirada da carepa, a lupa passa pelo laminador redutor-estirador, que pode conter até 24 cadeiras de laminação, as quais combinam em um único passe de redução a diminuição do diâmetro externo e da espessura da parede para as dimensões solicitadas pelo cliente.

O diâmetro da lupa diminui com o decréscimo do diâmetro de cada cadeira de laminação, enquanto a velocidade tangencial dos rolos aumenta, podendo atingir 10 m/s. Este processo tem capacidade de produzir tubos de até 95 m de comprimento e o menor diâmetro externo até 33,4 mm. O tubo é continuamente estirado à medida que seu diâmetro externo é reduzido. Para produzir diâmetros maiores, o número de cadeiras é reduzido apropriadamente.

O leito de resfriamento final tem 100 metros de comprimento, onde os tubos são agrupados antes de serem levados a serra para o corte. Numa segunda estação, é descartada a ponta grossa e efetuado o corte no comprimento final.

A inspeção final dos tubos laminados é feita pelo processo de ensaio não destrutivo de correntes parasitas, com o objetivo de detectar as discontinuidades superficiais internas e externas. Uma corrente parasita “*eddy current*” é uma corrente originada numa massa metálica por indução eletromagnética, o fluxo variável provoca uma força eletromagnética induzida no tubo, que por sua vez provoca o movimento dos elétrons livres no material, produzindo espirais de correntes. Conforme a lei de Lenz a direção desses espirais deve se opor a variação que as provoca, gerando pólos magnéticos efetivos, assim forças repulsivas ao movimento do metal dentro do campo magnético (DIN EN 10246:2000 PART 3).

#### 2.1.4. Trefilação

Os tubos com diâmetro externo abaixo de 33,4 mm necessariamente passam pelo processo de trefilação, com o objetivo de reduzir o diâmetro e calibrar a espessura da parede para atingir as especificações solicitadas (DIETER, 1998, b).

A ponta do tubo é amassada (Figura. 2.7), por um processo chamado de apontamento, que pode ser a quente ou a frio, dependendo do diâmetro. O apontamento “amassamento” é feito por martelos hidráulicos e garantirá a fixação nos mordentes da trefiladora.



FIGURA 2.7 – Equipamento de apontamento do tubo. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

Outro processo, que antecede a trefilação, é a decapagem química e fosfatização do tubo (Figura. 2.8), garantindo a isenção de carepas e demais impurezas que possam interferir na uniformidade do processo. Os tubos passam por tanques contendo, respectivamente, ácido sulfúrico, água, fosfato de zinco e água com sabão (ASM HANDBOOK, 2007, a).



FIGURA 2.8 – Processo de decapagem química do tubo. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

Independente da aplicação, todos os tubos sofrem o mesmo processo, mas para os de alta pressão de combustível, alguns cuidados adicionais são efetuados.

Após o primeiro passe de trefilação, é feita inspeção por ultra-som para detectar discontinuidades internas mínimas de 300  $\mu\text{m}$ , defeitos superiores a estes valores, rejeitam o tubo.

No segundo passe de trefilação (Figura. 2.9), utiliza-se um dispositivo triplo de trefilação simultâneo com mandril flutuante. Ao contrário da barra fixa, o mandril flutuante é uma esfera livre, inserida no interior do tubo antes de ser puxado pela trefila, para calibrar o diâmetro interno e a parede do tubo. O diâmetro externo é determinado pela matriz de trefilação que é um dispositivo de metal duro.



FIGURA 2.9 – Equipamento de trefilação com três matrizes. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

Após a realização do último passe de trefilação, o tubo é desempenado e inspecionado por ensaio de correntes parasitas com o objetivo de se detectar as discontinuidades superficiais internas e externas.

A trefilação do tubo de 8 mm diâmetro externo por 3 mm interno, estudado nesta pesquisa (Tabela 2.1), requer 5 passes de trefilação, sendo o primeiro guiado com mandril fixo, dois com mandris flutuantes e nos passes restantes utiliza-se apenas a matriz calibradora.

Tabela 2.1 – Porcentagem de redução a cada passe de trefila, segundo a V&M Brasil.

N <sup>o</sup> Passes	Diâmetro Externo Inicial X Parede ( mm )	Diâmetro Externo Final X Parede ( mm )	Taxa Redução ( % )	Processo de Trefilação	Tratamento Térmico (Após Passe de trefilação)
1 <sup>o</sup>	33,4 X 4,05	29,4 X 3,2	12	Matriz Calibradora + Mandril Fixo	Sem Tratamento
2 <sup>o</sup>	29,4 X 3,2	20,8 X 2,9	7	Matriz Calibradora + Mandril Flutuante	Normalizado
3 <sup>o</sup>	20,8 X 2,9	14,3 X 2,85	31	Matriz Calibradora + Mandril Flutuante	Normalizado
4 <sup>o</sup>	14,3 X 2,85	11,0 X 2,7	23	Matriz Calibradora	Sem Tratamento
5 <sup>o</sup>	11,0 X 2,7	8,0 X 2,5	27	Matriz Calibradora	Normalizado

Nota: Tubo normalizado entre 880 e 920 °C, taxa de 1 min/mm com resfriamento ao ar.

## 2.2. Tratamento superficial interno

Durante o processo de perfuração da barra na laminação (DIETER, 1998, a), são gerados defeitos superficiais internos (Figura 2.10) conhecidos como descontinuidades internas ou dobras, que permanecem na barra perfurada até as etapas finais de trefilação. Embora os tubos sejam inspecionados por ensaio de correntes parasitas e ultra-som, no processo de fabricação na V&M do Brasil, estes processos não são capazes de detectar imperfeições internas nas barras com 100% de eficiência com valores abaixo de 300 µm.

A profundidade e quantidade destas descontinuidades influenciam diretamente na durabilidade final do tubo.

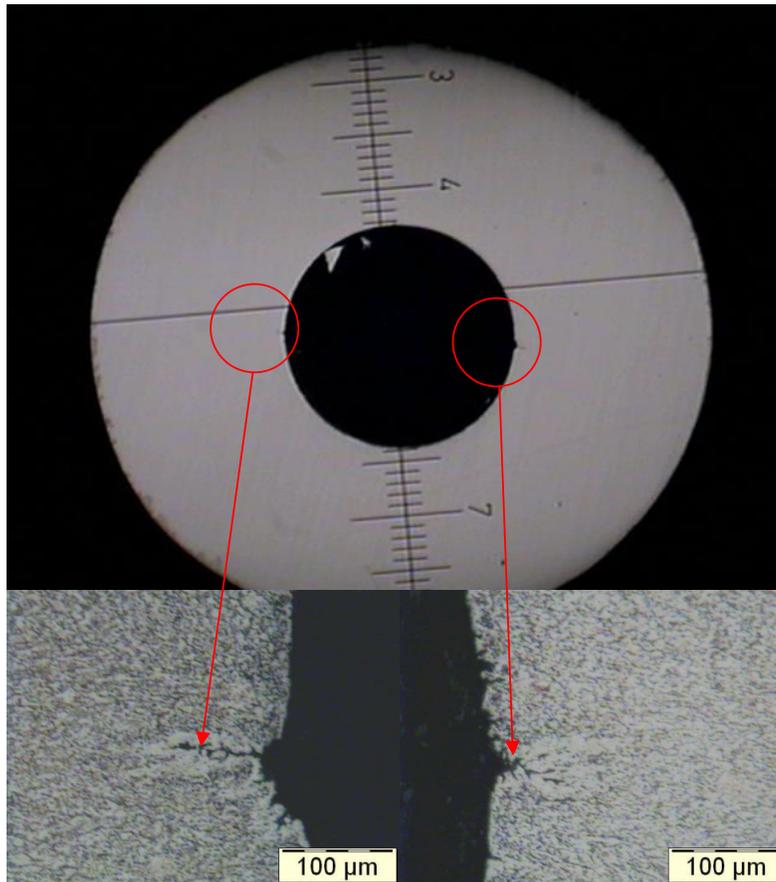


FIGURA 2.10 – Macrografia e micrografias mostrando as dobras com profundidade média de 0,15 mm no diâmetro interno eqüidistantes 180° entre si, Ataque: Nital 3%.

Fonte: MWM International.

### 2.2.1. Polimento eletrolítico

Existe na Vallourec & Mannesmann da França um processo chamado de polimento eletrolítico (Figura 2.11), onde o tubo é submetido a um processo no qual é removido material internamente, ou seja, eliminando parte dos defeitos superficiais internos, inerentes ao processo de fabricação. Para que o tubo passe por este processo, é necessário que a sua dimensão interna seja menor em relação à sua especificação final. Como neste trabalho serão apresentados tubos com e sem polimento, a partir desde parágrafo, utilizaremos a seguinte nomenclatura: **VM-NP**

para tubos fornecidos pela empresa Vallourec & Mannesmann não polidos e **VM-P** para os polidos.



FIGURA 2.11 – Equipamento de polimento eletrolítico da V&M França. Foto gentilmente cedida pela V&M Brasil.

No processo de polimento eletrolítico, as barras a serem polidas são ligadas ao anodo e imersas num eletrólito adaptado ao material. Os pontos salientes entram em solução, devido à maior densidade de corrente nestes pontos, enquanto as cavidades se mantêm passivas. A remoção do material é, portanto, um processo eletroquímico. Os banhos trabalham com agitação do eletrólito e temperatura controlada. O tempo de exposição é de apenas alguns minutos. O metal base permanece isento de tensões favorecendo a aderência de revestimentos galvânicos (ASTM E 1558).

No Brasil, por não haver demanda, não existe equipamento apropriado para remoção das descontinuidades internas, pelo processo de polimento eletrolítico.

Para classificação da qualidade superficial interna dos tubos, existe a norma ISO 8535, onde os níveis permissíveis de descontinuidades internas variam de 10 a 130  $\mu\text{m}$ . Os tubos produzidos pela V&M Brasil e fornecidos para metalúrgica Cartec, responsável pelo

processamento final do tubo, não atende o requisito máximo de descontinuidades internas de 130 µm, conforme classe “S” da norma ISO 8535 (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Grau de descontinuidades internas conforme norma ISO 8535:2006.

<b>Código</b>	<b>Imperfeições permitidas</b>
<b>S</b>	Máximo 5 imperfeições (fissuras, dobras etc) entre 0,08 (inclusive) e 0,13 mm de profundidade
<b>R</b>	Máximo 5 imperfeições (fissuras, dobras etc) entre 0,05 (inclusive) e 0,08 mm de profundidade
<b>Q</b>	Máximo 5 imperfeições (fissuras, dobras etc) entre 0,02 (inclusive) e 0,05 mm de profundidade
<b>P</b>	Máximo 5 imperfeições (fissuras, dobras etc) entre 0,01 (inclusive) e 0,02 mm de profundidade
<b>O</b>	Todas as imperfeições menores do que 0,01 mm de profundidade

### **2.3. Classes e propriedades mecânicas dos aços para tubos de alta pressão**

Os motores a diesel (Euro II) com sistema de injeção de combustível mecânico trabalham com pressões de injeção de 800 bar. Para esses níveis de pressão a MWM International utilizava a norma DIN 2391-2, com aço St30. Já os motores eletrônicos (Euro III), com pressão de injeção de 1300 bar, utiliza o aço St52. Ambos os aços podem ser classificados em relação as suas propriedades químicas e mecânicas conforme as tabelas 1.1 e 2.3

Tabela 2.3 - Classificação de propriedades mecânicas de tubos de aços em temperatura ambiente, segundo a norma DIN 2391-2.

CLASSE AÇO	TRATAMENTO TÉRMICO		
SÍMBOLO	NBK		
	LR (MPa)	LE (MPa)	$\epsilon$ (%)
St30	290 - 420	215	30
St52	490 - 630	355	22

NBK – Laminado a frio e normalizado    LR – Limite de Resistência

LE – Limite de Escoamento     $\epsilon$  – Alongamento

### 2.3.1. Classificações de acordo com a qualidade superficial

Como a norma DIN 2391-2 não especifica o grau de imperfeição interna que o tubo poderá apresentar, desta forma se utiliza a norma ISO 8535-1 para este fim (Tabela 2.2).

Não existe nenhum método não destrutivo para avaliação dos níveis reais de descontinuidades internas nos tubos. Embora a V&M Brasil utilize os métodos de ultra-som e correntes parasitas no processo de fabricação, quando ocorre a necessidade de se verificar os níveis reais de descontinuidades nos tubos, é preciso cortar a secção transversal do tubo e efetuar a análise metalográfica.

### 2.4. Esforços atuantes na parede do tubo

Os tubos de alta pressão de combustível, quando em funcionamento, sofrem esforços cíclicos em virtude do carregamento hidráulico, ocasionados pela pressão de circulação do óleo diesel, que a bomba de alta pressão realiza em todo o período que o motor estiver ligado.

#### 2.4.1. Cálculo da pressão de trabalho e esforços atuantes na parede do tubo

Durante a fase de projeto de um tubo de combustível observam-se algumas características específicas de aplicação do sistema de injeção: pressões de trabalho, funcionamento e colapso. As condições de pressão baseiam-se na dinâmica de combustão de cada motor, variando de acordo com as legislações ambientais.

A norma ISO 8535 indica o critério de **Richard von Mises** para o cálculo de pressão máxima de trabalho. Após a obtenção deste valor, cada fabricante especifica o coeficiente de segurança para cada aplicação. Estes critérios variam de empresa para empresa, pois quanto menor o coeficiente de segurança, maiores serão os riscos de falha na aplicação.

O cálculo da pressão máxima de trabalho no tubo ( $P_{\max}$ ) é descrito na equação (2.1) segundo a norma ISO 8535.

$$P_{\max} [kPa] = \frac{K^2 - 1}{\sqrt{1 + 3K^4}} \times R_{eH} [MPa] \times 10^3 \quad (\text{equação. 2.1})$$

onde

$$K = \frac{D[mm]}{d[mm]}$$

**$P_{\max}$  = Pressão máxima de trabalho  $R_{eH}$  = Tensão Escoamento**

**$D$  = diâmetro externo  $d$  = diâmetro interno**

Para os tubos VM-NP fabricados com os aços St30 e St52 de acordo com as tabelas 1.1 e 2.3, os valores de pressão máxima de trabalho calculada conforme tabela 1.2, segundo as dimensões da norma ISO 8535, seria 1.063 e 1.756 bar, sem considerar nenhum coeficiente de segurança.

Embora o cálculo de aplicação de pressão máxima de trabalho, de acordo com von Mises, seja muito importante para o desenvolvimento inicial do projeto, ele não deve ser o único critério a ser usado, pois não considera o efeito de carregamento cíclico ao qual o tubo será submetido.

Portanto, recomenda-se também que a realização do ensaio de fadiga e o processo de autofretagem, que serão abordados nos próximos capítulos.

## **2.5. Ensaio usado na caracterização de aços para tubos sem costura**

### 2.5.1. Ensaio de fadiga

A fadiga é conhecida desde 1830, quando os primeiros metais foram submetidos a tensões cíclicas com aplicação de carga. As falhas ocorrem sob condições dinâmicas por um determinado período. O fenômeno de fadiga pode ser observado através de microscópio e geralmente ocorre na direção normal à tensão aplicada e muitas vezes não apresentam sinais que irá ocorrer (DIETER, 1998, c).

Segundo Ferreira (2006, p. 43) “[...] a fadiga é um processo de “alteração estrutural” permanente, localizada e progressiva, que ocorre em um material solicitado com tensões e deformações cíclicas em um ou mais pontos do material e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número de ciclos suficientemente grande”.

Ainda segundo Ferreira (2006, p. 46), o fenômeno da fadiga envolve três estágios: nucleação de uma trinca, crescimento da trinca até um determinado comprimento e fratura final. Para ocorrência deste fenômeno é necessário que haja: tensões cíclicas, deformações plásticas (macro ou microscópica) e tensões normais de tração. As propriedades de fadiga de um dado componente mecânico dependem de vários fatores geométricos, externos aos materiais e metalúrgicos.

Como fatores geométricos do componente mecânico têm-se:

- Presença de concentradores de tensão;
- Acabamento superficial;
- Dimensões.

Os fatores externos ao material do componente mecânico que influenciam as propriedades de fadiga são:

- Temperatura;
- Frequência, que na ausência de meio ambiente agressivo exerce pouca influência;
- Estado de tensão, principalmente na superfície do componente que, por sua vez, depende dos fatores geométricos.

Já os fatores metalúrgicos são inerentes à estrutura do material, como:

- Tamanho de grão;
- Presença de inclusões;
- Presença de fases fragilizantes ao longo dos contornos dos grãos.

A existência de descontinuidades superficiais nos componentes estruturais como furos, rasgos, dobras internas e entalhes leva à concentração de tensão nas vizinhanças da descontinuidade. Essa concentração de tensão é um dos maiores problemas associados com a fadiga.

O fenômeno da fadiga pode ser dividido em: fadiga em baixo ciclo, propagação de trinca por fadiga e fadiga em alto ciclo.

Segundo Ferreira (2006, p. 44) “[...] a fadiga, em alto ciclo "high cycle fatigue" ou fadiga controlada por tensões cíclicas tem como principais características em componentes mecânicos, quando solicitados ciclicamente:

$$\begin{aligned}\sigma_N &< \sigma_e \\ N_f &> 10^3 \text{ ou } 10^4 \text{ ciclos}\end{aligned}$$

Nas quais  $\sigma_N$  é a tensão nominal (tensão aplicada no componente mecânico ou espécime),  $\sigma_e$  é o limite de escoamento do material do componente mecânico ou espécime e  $N_f$  é a vida em fadiga (número de ciclos até a fratura).

Outro autor Magnabosco, (2006), apresenta uma abordagem diferenciada em relação ao número de ciclos até a fratura:  $N_f > 10^3$  ou  $10^4$  ciclos. Onde diferentes materiais devem apresentar diferentes números de ciclos até a fratura, pois a amplitude total de deformação imposta num ensaio de fadiga pode ser escrita como a somatória das parcelas de deformação elástica e plástica, onde predominantemente as deformações plásticas ocorrem em baixo ciclo e as deformações elásticas ocorrem em alto ciclo.

É importante observar que a fadiga de alto ciclo envolve o estágio de nucleação (também designado "iniciação" da trinca) e de propagação da trinca. O estudo de fadiga em alto ciclo teve origem com Wöhler (ASM HANDBOOK, 2007, b) que realizou várias experiências, entre 1852 e 1869. Em homenagem à Wöhler, as curvas S-N são também chamadas de curvas de Wöhler.

#### 2.5.2. Tipos característicos de sollicitação

A Figura 2.12 mostra um tipo de sollicitação que se pode encontrar na prática. Nessa Figura tem-se a sollicitação cíclica e, conseqüentemente, há possibilidade de ocorrência do fenômeno da fadiga, dependendo do nível das tensões.

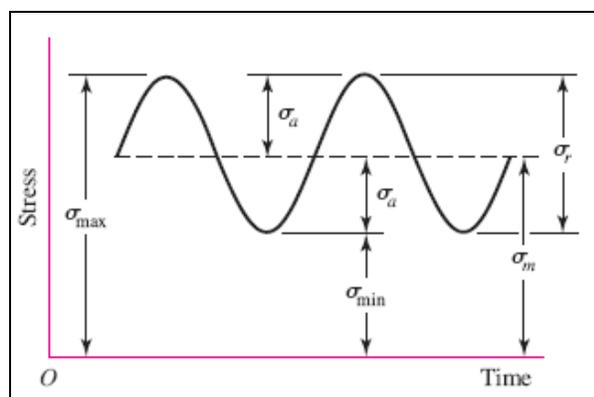


FIGURA 2.12 - Onda triangular com as respectivas tensões ( $\sigma_{max}$ ) e ( $\sigma_{min}$ ) (SHIGLEY, 2006).

O intervalo de tensões  $\sigma_r$ , é a diferença entre  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ ;

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (\text{equação 2.2})$$

A amplitude de tensão,  $\sigma_a$  é a metade de  $\sigma_r$ ;

$$\sigma_a = \sigma_r / 2 \quad (\text{equação 2.3})$$

A tensão média,  $\sigma_m$  é a média aritmética entre  $\sigma_{\max}$  e  $\sigma_{\min}$ ;

$$\sigma_m = (\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) / 2 \quad (\text{equação 2.4})$$

É usual apresentar os dados de fadiga em termos da razão de tensão, R.

$$R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (\text{equação 2.5})$$

### 2.5.3. Curvas S-N

Segundo Ferreira (2006, p. 48) “[...] os estudos de fadiga em alto ciclo ou fadiga controlada por tensões cíclicas normalmente têm por base a curva S-N que relaciona a tensão ( $\sigma$ ) com o número de ciclos até a fratura (N) ou (Nf). O número de ciclos até a fratura é também chamado de vida em fadiga. Essas curvas podem ser representadas de várias formas, variando as escalas nos eixos cartesianos: S-N; S - log N; log S - log N. A escala logarítmica facilita a comparação de dados, pois fornece curvas de diversos materiais com a mesma forma, além de diminuir a escala de N. Os ensaios de fadiga podem ser realizados em máquinas de flexão rotativa, onde a sollicitação é alternada simétrica (razão de carga  $R = -1$ ), ou em outros tipos de máquinas com outros tipos de sollicitação. As curvas S-N são normalmente representadas para a razão de carga  $R = -1$  que, nesse caso, normalmente, não é indicado na curva. Caso contrário, ou seja, para razões de carga, R, diferentes de -1 deve-se, obrigatoriamente, citar a razão de carga, pois esta influencia de maneira significativa a posição dessas curvas S-N”.

Muitas ligas metálicas não ferrosas como alumínio, magnésio e cobre, apresentam um declínio da curva à medida que se aumenta o número de ciclos. Estes materiais não têm um limite de fadiga determinado porque a curva nunca se estabiliza na horizontal (DIETER, 1998, c).

O procedimento usual para determinação da curva S-N é ensaiar as amostras em alta pressão, onde a falha é esperada em um nível baixo de ciclos, isto significa algo em torno de 2/3 da tensão de ruptura do material. À medida que se diminui a pressão, se aumenta o número de amostras sem quebrar, até que se alcance  $10^7$  ciclos (DIETER, 1998, c).

## **2.6. Processo de autofretagem**

O processo de autofretagem (BUENO, 2002) é obtido através de uma pressão hidráulica ou pela expansão causada por um mandril com diâmetro externo maior do que o diâmetro interno do cilindro. Um campo de tensões residuais compressivas é introduzido na parede do cilindro. E essas tensões favorecem ao aumento da vida à fadiga, reduzindo os esforços atuantes, bem como reduzem a iniciação de trincas e a taxa de crescimento das mesmas. Uma avaliação confiável das tensões residuais após a autofretagem é de suma importância para a predição da vida de componentes submetidos tanto a carregamentos estáticos como dinâmicos.

Nos aços St52 utilizados para tubos de alta pressão de combustível, é utilizado o processo através de pressão hidráulica, a empresa Cartec submete 100% dos tubos de alta pressão fornecidos a MWM a este processo, que além de induzir tensões residuais, também realiza um teste hidrostático, evitando assim que o tubo possa ser fornecido com qualquer tipo de vazamento na região da porca e/ou ogiva.

O processo de autofretagem (R. Bihanta , et al.) é realizado pela compressão interna do tubo e pode ser feito através de um mandril, onde o mesmo deverá ter o diâmetro maior que o tubo para que ocorra a deformação elástica e por consequência a criação de um campo de tensões compressivas que ajudarão evitar a propagação de trincas existentes no tubo. Muitos pesquisadores vêm estudando o processo de autofretagem (Iremonge, et al.) tem estudado a tensão residual produzida por dois passes diferentes, sendo um de cada vez, para se verificar o efeito de cada passe em aços de alta resistência mecânica. Em um processo similar (Bernard, et al.) tem estudado o efeito do trabalho a frio na vida a fadiga destes tubos.

### 3 - ESTUDO DE CASO

Após os vários testes realizados em bancadas (dinamômetro), sem a ocorrência de falhas na aplicação do motor, iniciou-se a validação veicular do mesmo. A durabilidade de veículos é especificada por cada tipo de cliente, onde os mesmos possuem normas próprias, com ciclos de testes geralmente determinados pelas matrizes localizadas fora do Brasil.

Os motores previamente testados na MWM International e com a aplicação finalizada, foram montados em 25 caminhões com capacidade de 15 toneladas.

#### 3.1. Discussões das ocorrências

Após 28.000 km quilômetros rodados, alguns veículos começaram a apresentar aumento no consumo de combustível e vazamentos de óleo diesel pelo sistema de injeção de combustível. Foram recebidas as primeiras amostras de tubos VM-NP que falharam. Iniciou-se então um trabalho apurado de identificação das causas raízes do problema, onde foram envolvidos na solução do problema a engenharia da MWM, o fornecedor de tubos Cartec e a produtora da matéria-prima V&M Brasil.

A primeira peça com falha recebida (Figura 3.1) foi um tubo VM-NP de aço St52 que apresentou vazamento em um veículo com 28.000 km rodados.



FIGURA 3.1 – Tubo que falhou no teste de durabilidade. Foto gentilmente cedida pela MWM International.

Foi possível identificar que a falha no tubo ocorreu no trecho reto próxima à região de vedação localizada entre o tubo e a bomba injetora (Figura 3.2).

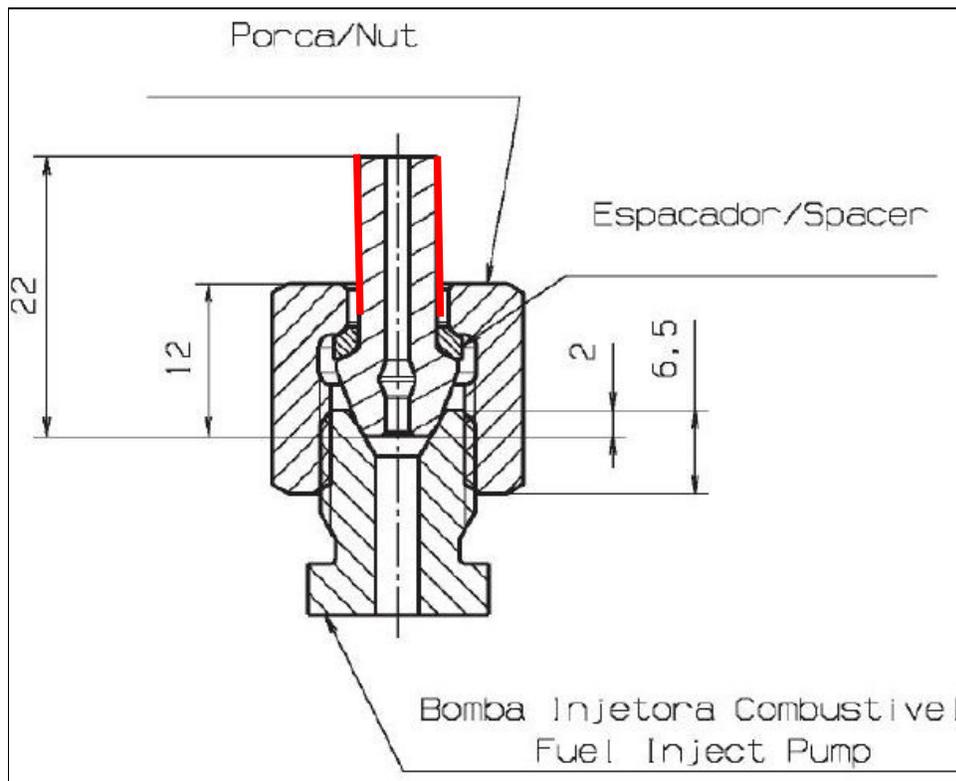


FIGURA 3.2 – Região de vedação entre a ogiva e a bomba injetora (Adaptado do desenho MWM International, 2006).

O laboratório metalúrgico da MWM International cortou o tubo na região da fissura, onde se verificou descontinuidades longitudinais na superfície interna (Figura 3.3).

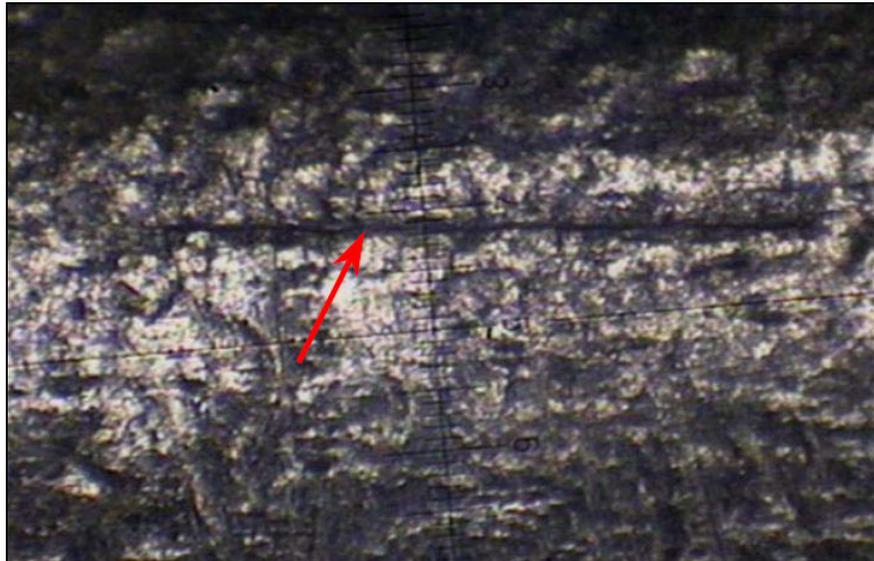


FIGURA 3.3 – Trinca longitudinal interna do tubo que falhou em serviço / aumento de 20x.

Após análise da região com falha, foram realizados outros cortes (Figura 3.4) no tubo, para se descobrir se existiam outros pontos com trinca.

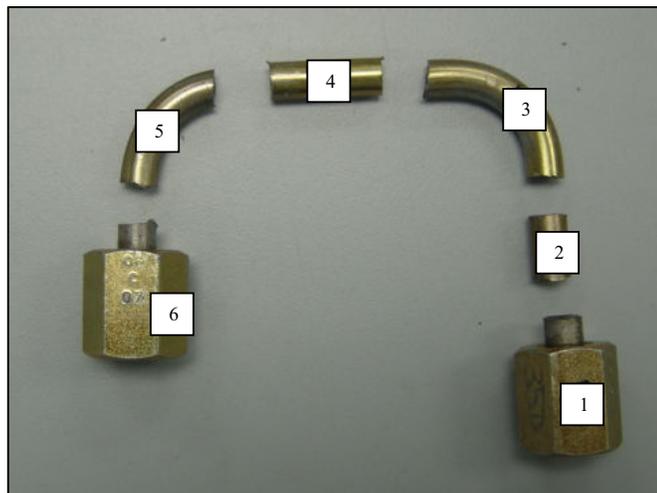


FIGURA 3.4 – Corte do tubo para análise da secção transversal.

Após a análise de todos os pontos (Figura 3.4) verificou-se que existiam várias trincas na parte interna do tubo. Embora estivessem claro que os tubos não poderiam conter estas fissuras, os fornecedores alegaram que não existiam especificações no desenho da MWM International que limitassem o tamanho e a quantidade das mesmas.

Na região com o maior quantidade de trincas, foi realizada uma análise de microscopia óptica, onde foram retiradas amostras de secções em corte transversal dos diâmetros dos tubos. O resultado da análise (Figura 3.5) mostrou dobras nas regiões internas dos tubos equidistantes 180° entre si, próximas à região da falha.

Como o tubo é submetido a tensões cíclicas de pressão de injeção de combustível, foi possível afirmar que o combustível vazou pelas trincas formadas a partir das discontinuidades existentes no tubo através do fenômeno de fadiga.

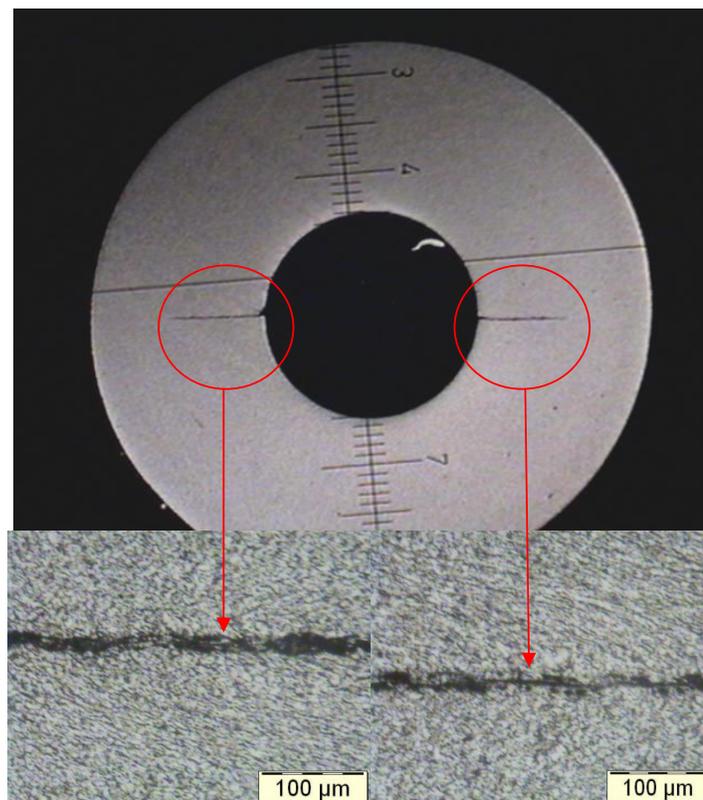


FIGURA 3.5 – Superfície interna do tubo, região próxima à falha, Ataque: Nital 3%.

A figura 3.6 mostra claramente a diferença entre a região proveniente de dobra de conformação e a região da trinca propagada pelo fenômeno de fadiga. Foi encontrada na região da falha, uma trinca com comprimento total de 1,04 mm, sendo que 0,20 mm era do processo de conformação mecânica (Laminação).

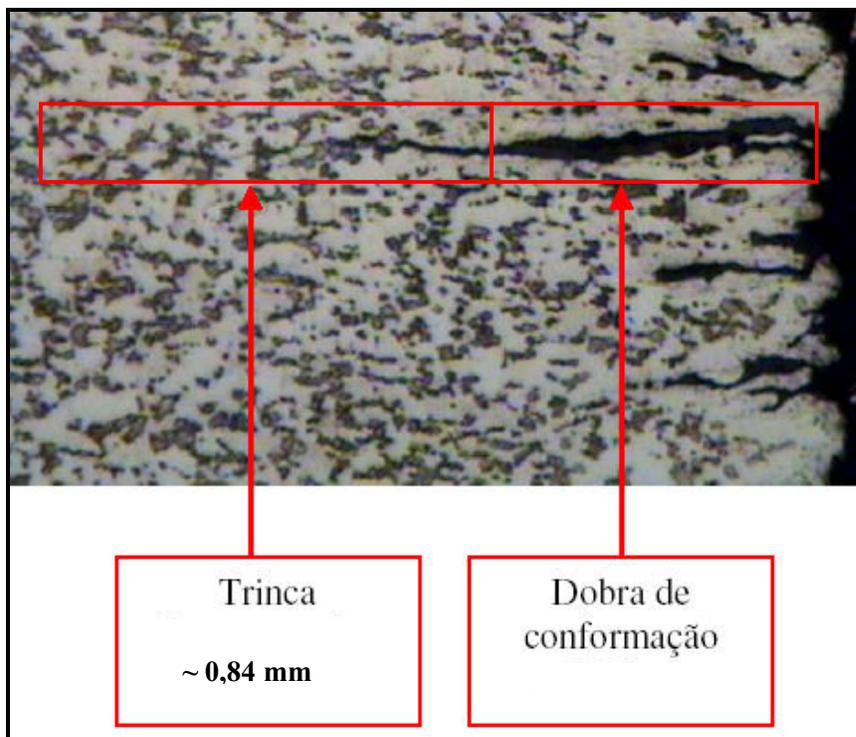


FIGURA 3.6 - Micrografia mostrando uma dobra de conformação seguida por uma trinca na região do diâmetro interno do tubo. Aumento: 440 x / Ataque: Nital 3%.

Foi realizada análise com o Microscópio Eletrônico de Varredura pela empresa V&M Brasil, para se avaliar existência da presença de fosfato de zinco remanescente na estrutura do tubo, pois o zinco é utilizado no processo perfuração das lupas como agente lubrificante. A partir do resultado (Figura 3.7), observa-se que existia a presença de fosfato na região das dobras de laminação, com valores na ordem de 205  $\mu\text{m}$ . Portanto pode-se afirmar que o defeito inicial do tubo era inerente ao processo de fabricação.

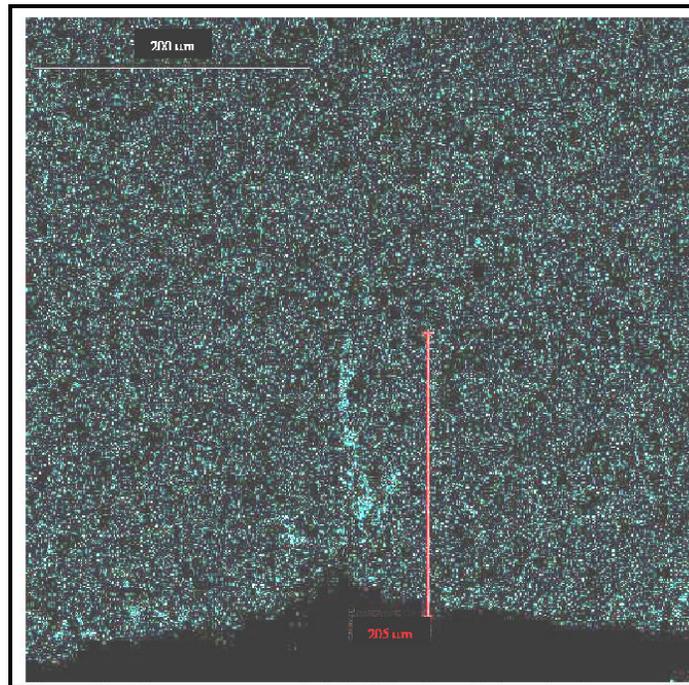


FIGURA 3.7 - Mapeamento por sinal de Raios-X emitidos pelo elemento fósforo, indicando a presença de resíduo lubrificante (fosfato de zinco) na região até 205 µm. Fonte: V&M Brasil.

Além das análises na região da falha, também foi realizada análises metalográficas das propriedades mecânicas do tubo que falhou (Tabela 3.1), onde os valores obtidos encontravam-se dentro do especificado em projeto.

Tabela 3.1 - Análise estrutural e ensaios mecânicos no tubo que apresentou falha.

<b>ANÁLISE METALOGRÁFICA</b>	
<b>Especificado</b>	<b>Encontrado</b>
Tubo: Aço St52	Aço St52
Estrutura da matriz: Ferrita e Perlita	Ferrita e Perlita
Tamanho de grão: 8 a 12 (ASTM E 112)	10
<b>ENSAIO FÍSICO</b>	
<b>Especificado</b>	<b>Encontrado</b>
Dureza mínima: 150 HV1	185 HV1
Resistência à tração mínima: 490 N/mm <sup>2</sup>	528 N/mm <sup>2</sup>
Limite de escoamento mínimo: 355 N/mm <sup>2</sup>	360 N/mm <sup>2</sup>
Alongamento mínimo: 22%	30%

Finalizadas as análises da peça com falha, pode-se afirmar que o problema principal estava relacionado em eventuais falhas por vazamento de combustível, ocasionados por trincas existentes nos tubos de alta pressão de combustível que se propagaram a partir de dobras internas existentes nos tubos. Embora as especificações contidas no projeto do tubo estivessem aprovadas, não existia uma especificação dos limites aceitáveis de descontinuidades internas, portanto o desenho da peça deveria ser alterado.

Recomendou-se a criação de uma nova sistemática de validação dos tubos antes de eles serem montados nos veículos, visto que a ocorrência de falhas em veículos é muito onerosa ao planejamento financeiro do projeto, ao prazo de validação e por consequência o tempo de lançamento do veículo.

Diante dos resultados das análises, foi decidido pelo cliente, que todos os testes veiculares ficariam suspensos até que se fosse criada uma maneira de validação dos tubos, antes de os mesmos serem montados.

Serão abordadas nos próximos capítulos, todas as ações que foram necessárias para resolução do problema e definição das lições aprendidas no desenvolvimento do projeto.

#### 4 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A metodologia experimental utilizada para se descobrir à causa das falhas é mostrada na figura 4.1. Os seguintes ensaios foram executados no aço St52 a fim de obter informações necessárias para a resolução do problema: Avaliação do nível de descontinuidades internas dos tubos VM-NP, VM-P e PP realizado pela MWM e V&M, estudo da pressão de autofretagem realizado pela empresa Cartec, ensaio de pulsação para determinar a vida à fadiga realizada pela Bosch, análise laboratorial e de elementos finitos realizados pela MWM e V&M. O aço St52 empregado nos testes foram fornecidos pela V&M Brasil e Poppe & Potthoff Alemanha.

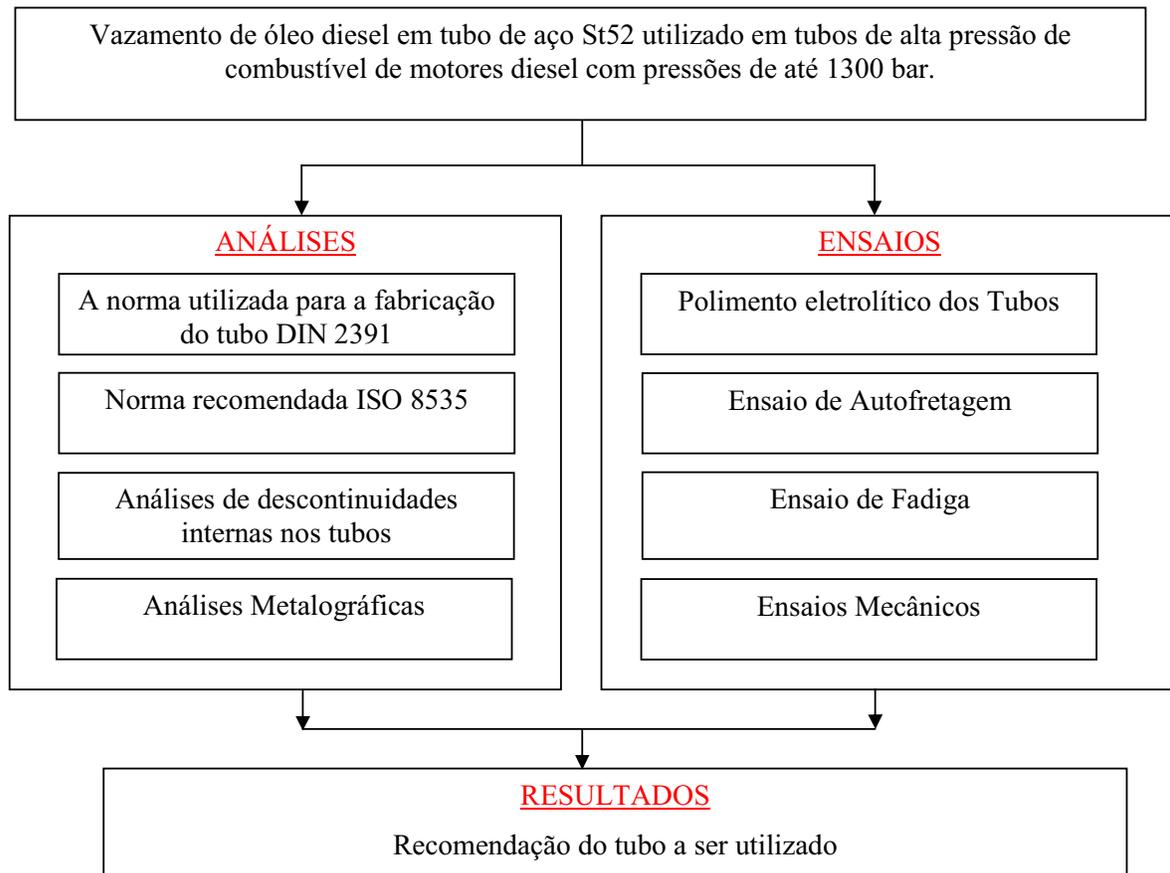


FIGURA 4.1 – Metodologia experimental adotada.

#### 4.1. Avaliação do nível de descontinuidades internas dos tubos

O método utilizado para o levantamento dos valores de descontinuidades internas dos tubos foram os seguintes:

- Separação das barras acabadas;
- Descarte dos trechos iniciais e finais de 0,2 m de comprimento de cada barra, evitando analisar possíveis irregularidades nas pontas dos tubos;
- Retirada de duas secções transversais (diâmetro) de cada lado da barra (Figura 4.2) para embutimento e análise no microscópio óptico;
- Levantamento dos valores encontrados (Figura 5.3).

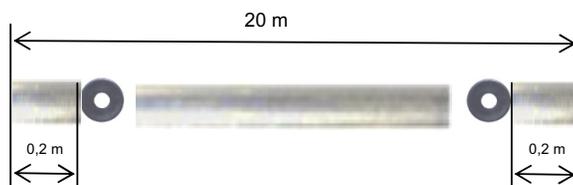


FIGURA 4.2 – Secções transversais retiradas dos tubos para análises metalográficas.

O projeto inicial dos tubos de alta pressão de combustível utilizava para a construção da peça, a norma DIN 2391:1994, esta é uma norma para tubos de aço sem costura, determinando a especificação de vários níveis de materiais e tratamento térmico, sem determinar níveis de imperfeições internas dos tubos. Esta norma não é específica para tubos de alta pressão de combustível para motores diesel, ela também é utilizada em grande escala em projetos de construção mecânica para indústria petrolífera.

A DIN 2391 foi substituída pela norma DIN EN 10305-1:2003, embora a nova versão da norma tenha adicionado valores permissíveis de descontinuidades internas, a produção nacional de matéria-prima continua utilizando a norma antiga.

Em uma pesquisa realizada pela engenharia da MWM, foi encontrada a norma ISO 8535:2006, que é uma norma específica para tubos de combustível para motores diesel, que além de especificar vários tipos de aço, determina os cálculos de pressão máxima de trabalho, também determina os graus de aceitação de acabamento interno (Tabela 2.2), onde o maior valor permissível é de 130  $\mu\text{m}$ . A fim de se descobrir qual era o nível de acabamento interno que a empresa V&M do Brasil estava fornecendo o tubo de aço ST52, foi necessário à realização de um estudo, conforme mostrado abaixo, para determinação do tamanho das discontinuidades presentes nas regiões internas dos tubos produzidos.

O estudo para determinação do tamanho das discontinuidades presentes nas regiões internas dos tubos, a figura 4.3 apresenta a secção longitudinal cortada do tubo VM-NP, que estava pronto para ser utilizado em um motor.

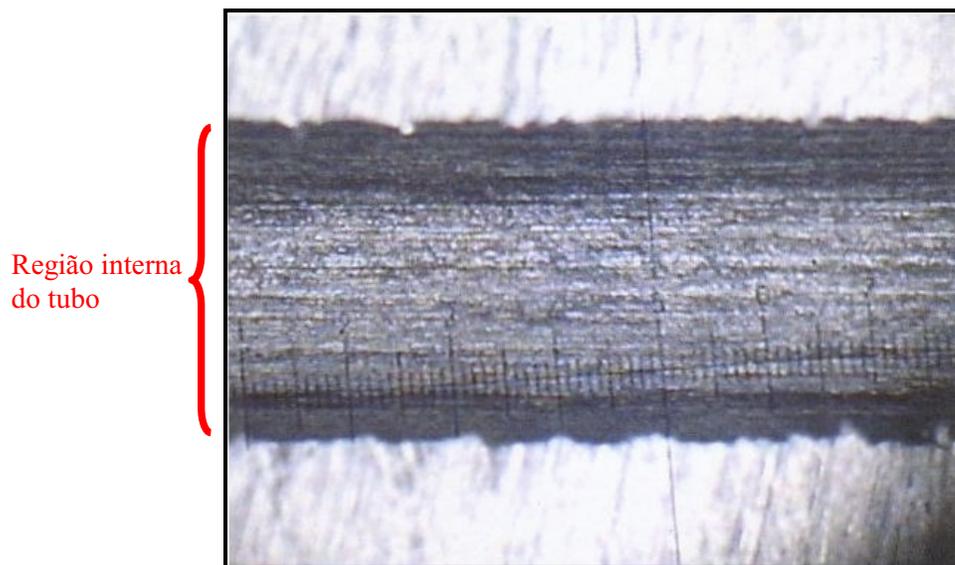


FIGURA 4.3 – Secção longitudinal do tubo St52 VM-NP.

A V&M Brasil avaliou 62 barras acabadas VM-NP, com 8 mm de diâmetro externo, 3 mm interno e com 20 metros de comprimento, prontas para envio ao fornecedor Cartec, empresa responsável pela manufatura final do tubo.

#### 4.2. Polimento eletrolítico

Existe um processo de polimento interno de tubos trefilados, chamados de polimento eletrolítico, que consiste na remoção química das irregularidades internas do tubo. O Brasil ainda não tem este equipamento em virtude da baixa demanda de utilização de tubos de alta pressão de combustível, utilizados em pressões superiores a 1.300 bar.

A V&M Brasil enviou 74 barras VM-NP produzidas no Brasil, para a unidade da França, onde os mesmos possuem o equipamento para realização do polimento eletrolítico. O principal objetivo da realização deste envio foi analisar qual seria a melhoria da qualidade superficial interna dos tubos, sem a variação da matéria-prima, visto que o aço que a V&M França utiliza é diferente ao produzido no Brasil. A figura 4.4 mostra a parte interna do tubo após o polimento eletrolítico.

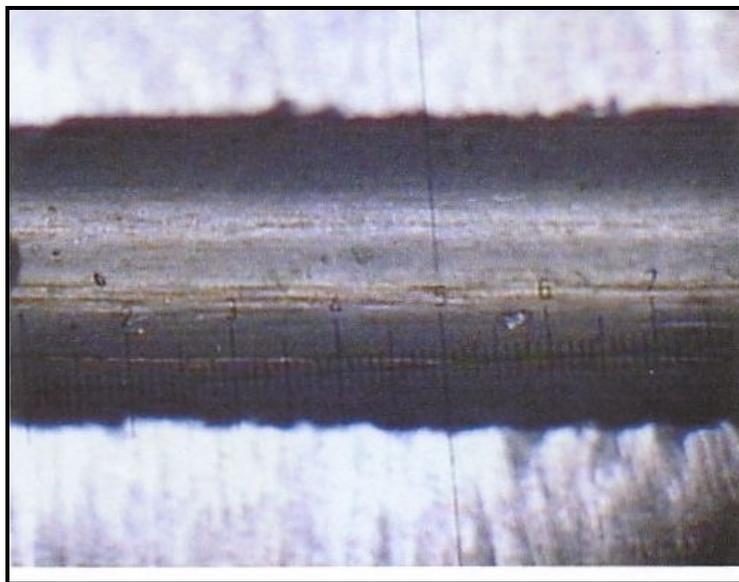


FIGURA 4.4 – Secção longitudinal do tubo St52 VM-P, realizado na França.

### 4.3. Aço St52 importado da Poppe & Potthoff (Alemanha)

Como na Europa é comum os automóveis utilizarem motores a diesel com pressões de trabalho de até 2.500 bar, descobriu-se que existia uma empresa Alemã, P&P - Poppe & Potthoff, fornecedora de matéria-prima para fabricação dos tubos para estes automóveis. A P&P tinha em seu portfólio o aço St52, com descontinuidades internas segundo a classe “Q” (20 a 50  $\mu\text{m}$ ), conforme norma ISO 8535. Através da (Figura 4.5) pode-se observar o grau de acabamento interno dos tubos.

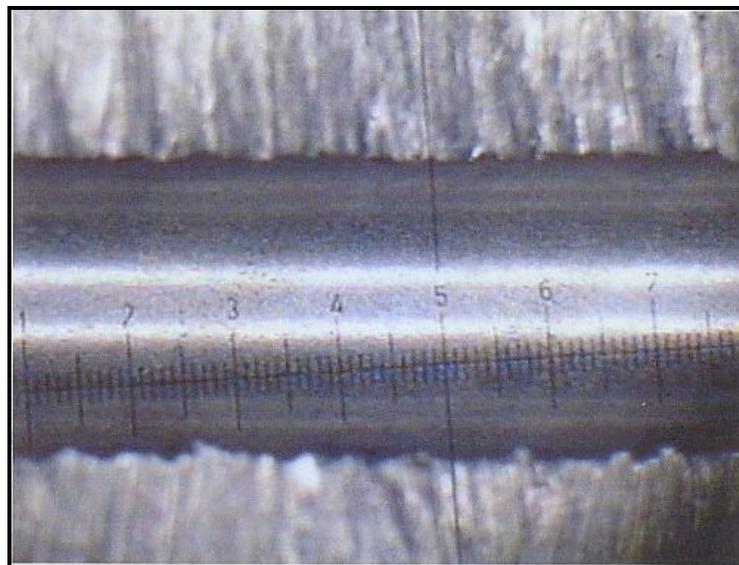


FIGURA 4.5 – Seção longitudinal do tubo St52 P-P.

Realizou-se uma visita à empresa P&P na Alemanha, porém o fornecedor se recusou a mostrar o processo de fabricação das barras e também não confirmou a utilização do processo de polimento eletrolítico nos tubos. É importante ressaltar que a empresa supracitada não é o fabricante final de tubos de alta pressão, ela é apenas fornecedora de matéria-prima acabada.

### 4.4. Processo de autofretagem

O equipamento utilizado para realização do teste de autofretagem é o MAXIMATOR<sup>®</sup> que funciona de 200 a 6.000 bar de pressão. Antes do equipamento pressurizar o óleo hidráulico

nos tubos, o mesmo realiza um procedimento de retirada do ar interno para permitir que o óleo hidráulico consiga percorrer toda a área interna do tubo sem qualquer represamento de ar. O fornecedor do equipamento especifica que a pressão de autofretagem exercida no tubo seja por 10 segundos.

O mesmo equipamento foi utilizado para verificação com qual pressão o tubo St52 teria sua dimensão alterada, à medida que se aumentavam os valores de autofretagem e também, qual seriam os valores máximos admitidos pelo material antes de sua ruptura. Os valores de pressão de autofretagem são especificados de acordo com cada fornecedor, pois cada montadora utiliza um coeficiente de segurança.

#### **4.5. Fadiga**

Embora o motor seja testado durante muitas horas em dinamômetro e em veículos, o presente trabalho mostra que só estes testes não são suficientes para garantir a integridade do conjunto sistema de combustível.

Para se conhecer o comportamento à fadiga do aço St52, foram realizados 5 diferentes ensaios de pulsação em equipamento apropriado na empresa Bosch em Curitiba (Figura 4.6).

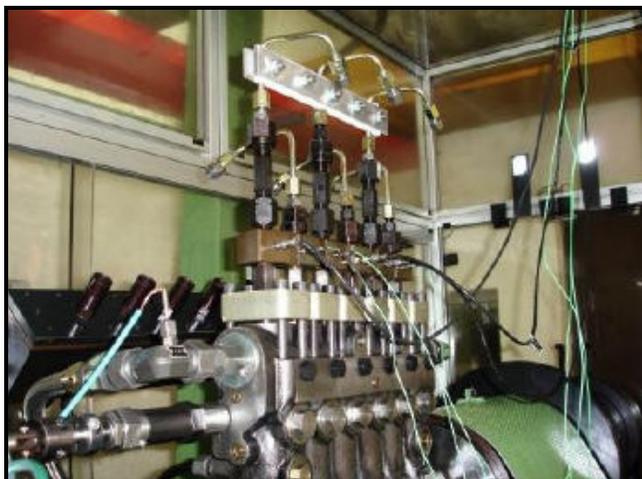


FIGURA 4.6 – Equipamento de ensaio de fadiga. Foto gentilmente cedida pela Bosch Brasil.

Para realização de cada ensaio foram necessários:

- Separação de 30 jogos de tubos;
- Separação dos tubos por tipo de fornecedor;
- Avaliar o nível de descontinuidade interna de cada tubo;
- Realizar o ensaio de autofretagem;
- Monitoramento em relação a vazamentos e/ou quebras;
- Análise microscópica das falhas.

O principal objetivo destes ensaios foi avaliar o processo de autofretagem, o efeito de se utilizar o mandril interno na trefilação e a influência das descontinuidades internas na durabilidade dos tubos.

As premissas para a aprovação destes ensaios de fadiga são que os tubos devem suportar a pressão de 1.800 bar durante  $10^7$  ciclos (recomendação Bosch), sem a ocorrência de nenhum vazamento de óleo diesel e sem ocorrer ruptura do tubo. Este valor de pressão representa um coeficiente de segurança de 1.4 em relação à pressão normal de trabalho do motor que é de 1.300 bar.

O equipamento funciona com 6 tubos para cada nível de pressão simultaneamente a uma frequência de 15 hertz. Uma das extremidades do tubo é fixada no equipamento e a outra extremidade em um bujão vedador. Iniciava-se o ensaio por uma pressão de 40 a 50% acima da pressão de trabalho (1300 bar) e efetua-se a pulsação, se o tubo resistir sem quebrar durante 10 milhões de ciclos, abaixa-se a pressão e continuam-se os testes e se o tubo se romper, aumentasse a pressão para reinicialização dos testes.

Sensores de detecção de vazamento de óleo diesel foram instalados no equipamento Bosch no intuito de se obter o momento exato da quebra do tubo, evitando assim possíveis erros de leitura do operador.

#### 4.6. Micrografias

Foram realizadas análises metalográficas de microscopia óptica nos laboratórios da MWM International. Os corpos-de-prova utilizados nas análises foram cortados na secção transversal dos tubos, embutidos em baquelite, polidos e atacados com Nital 3%.

A utilização do MEV foi realizada pela empresa V&M Brasil, para análise de mapeamento por sinal de Raios-X, emitidos pelo elemento fósforo, indicando a presença de resíduo lubrificante (fosfato de zinco) na região interna dos tubos com falhas e pela MWM International, para analisar as microestruturas dos materiais fornecidos pela V&M Brasil e P&P Alemanha.

#### 4.7. Comparação das propriedades mecânicas dos aços VM-NP e P-P

Foram realizadas análises de composição química (Tabela 4.1) e microestruturas a fim de se descobrir as diferenças nos aços fornecidos pela V&M Brasil (Anexo B) e P&P Alemanha (Anexo C).

Tabela 4.1 – Comparação entre as composições químicas dos aços VM-NP e P-P.

COMP. QUÍMICA (%) FORNECEDOR	C	Si	Mn	P	S	N	Ti	V
VM-NP	0,192	0,123	1,49	0,018	0,0047	0,001	0,0005	0,001
P-P	0,198	0,221	1,49	0,013	0,0011	0,001	0,0017	0,001

Como se pode observar as matérias-primas dos fornecedores V&M Br e P&P Alemanha estão dentro do especificado e não apresentam qualquer diferença na composição química das mesmas.

#### 4.8. Dureza

Foi necessária a realização de ensaios de dureza no equipamento EMCO modelo M5C G3 (Figura 4.7) para se avaliar o efeito da autofretagem na dureza dos materiais.



FIGURA 4.7 – Equipamento de medição de dureza EMCO da MWM International.

#### 4.9. Análise de elementos finitos

Como os tubos têm geometria diferente em virtude do posicionamento dos bicos injetores e bomba de alta pressão, foi realizado um estudo através do programa Ideas® para se determinar se existiria algum tubo de alta pressão que seria submetido a uma carga maior que os outros. Existindo um tubo com um carregamento maior, este deveria ser utilizado no ensaio de fadiga, para que o tubo fosse testado na condição mais crítica de funcionamento, assim, aumentando a robustez do projeto.

## **5 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

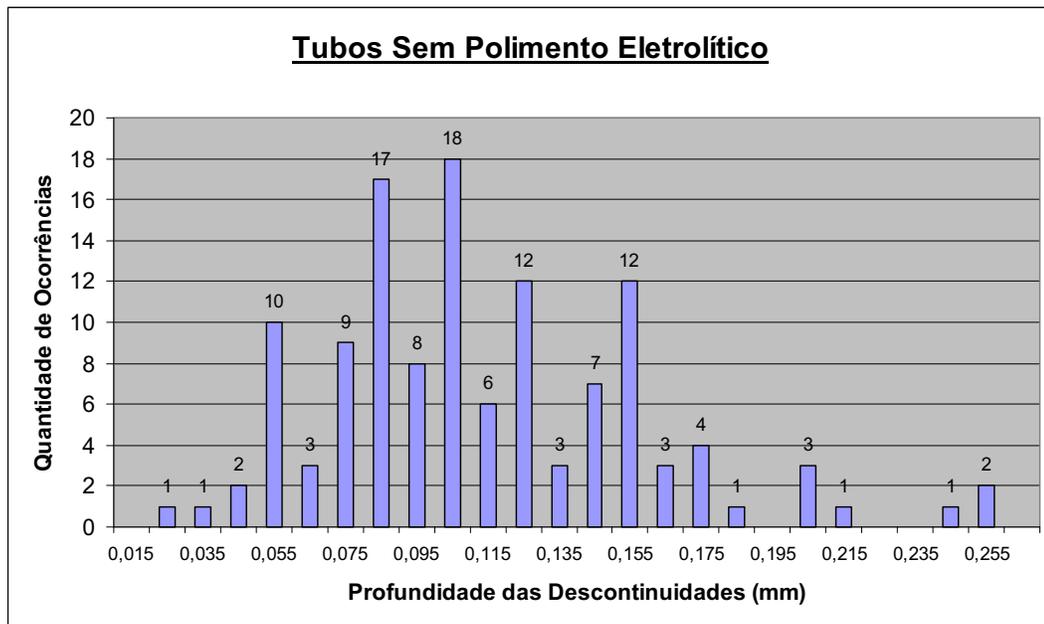
### **5.1. Procedimento de análise das descontinuidades internas**

Os tubos de aço St52 **VM-NP**, passaram pela análise das 124 secções transversais (Figura 5.1), observaram-se níveis de descontinuidades de até 255  $\mu\text{m}$ , sendo que 30% dos tubos inspecionados ficaram acima de 130  $\mu\text{m}$ , valor máximo permitido pela norma ISO 8535.

Os tubos de aço St52 **VM-P**, passaram pela análise das 148 secções transversais (Figura 5.2), observaram níveis de descontinuidades de até 175  $\mu\text{m}$ . Apesar da melhoria, 4% dos tubos inspecionados ficaram acima de 130  $\mu\text{m}$ .

Os tubos de aço St52 **P-P**, passaram pela análise das 40 secções transversais (Figura 5.3), observaram níveis de descontinuidades de até 30  $\mu\text{m}$ , ou seja, valores que atendem com folga os níveis de descontinuidades da norma ISO 8535.

A comparação dos resultados das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 indicaram que, realmente, o polimento eletrolítico, diminuiu a quantidade de defeitos superficiais internos, entretanto os níveis encontrados nos tubos P&P superam com folga as especificações mínimas necessárias ao atendimento da norma ISO 8535.



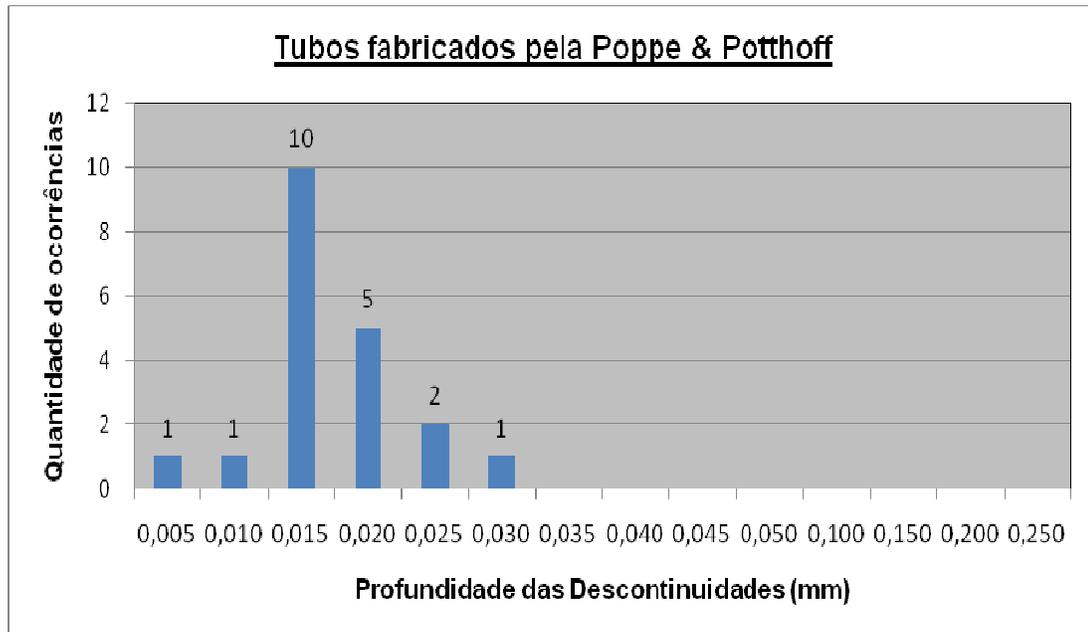


Figura 5.3 – Análise de descontinuidades internas na secção transversal em tubos P-P.

## 5.2. Estudo da variação de diâmetro em relação à autofretagem

Para se avaliar na prática, qual seria o valor máximo de pressão de autofretagem no tubo de aço St52 VM-NP, sem ocorrência de deformação permanente, foi realizada uma avaliação em 11 níveis de pressão, de 2.800 a 4.800 bar (Figuras 5.4 e 5.5).

O ensaio foi realizado na empresa Cartec, no equipamento MAXIMATOR<sup>®</sup>, com trechos de tubos retos e submetidos às pressões, onde o máximo valor que o tubo suportou sem deformação permanente foi de 3.600 bar, após este, iniciou-se uma deformação progressiva do tubo até a sua total ruptura a 4.800 bar.

As medições foram realizadas nos diâmetros externos e internos dos tubos, não havendo qualquer diferença entre os valores nas medições.

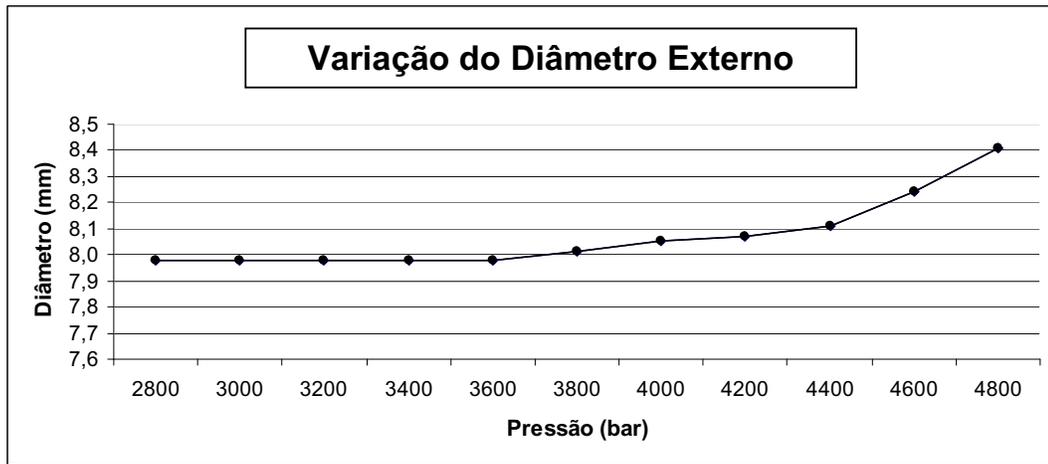


FIGURA 5.4 - Estudo de pressão de autofretagem em função do diâmetro externo.

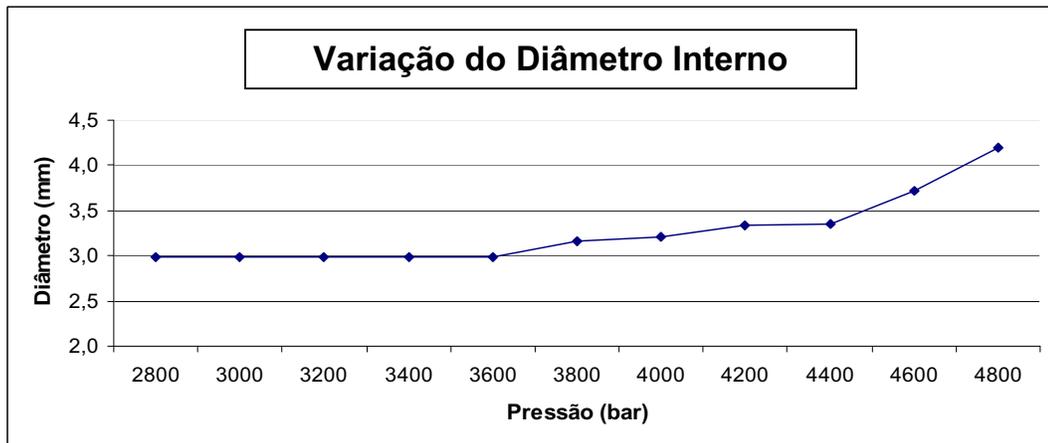


FIGURA 5.5 - Estudo de pressão de autofretagem em função do diâmetro interno.

### 5.3. O efeito da autofretagem em relação às propriedades mecânicas do tubo

As pressões de autofretagem podem variar de acordo com o tipo de aço utilizado, foi avaliado no aço St52 VM-NP quanto este processo poderia afetar nas propriedades mecânicas dos tubos. Amostras de tubos foram submetidas às pressões de 2.800 / 3.000 / 3.200 / 3.400 e 3.600 bar de autofretagem, as figuras 5.6 e 5.7 mostram as propriedades mecânicas encontradas.

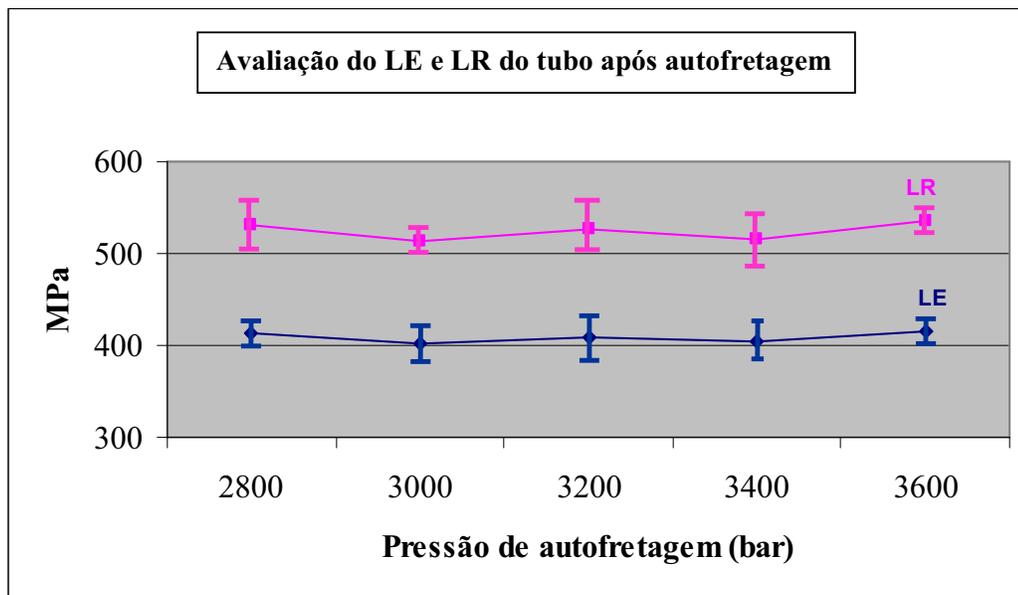


FIGURA 5.6 - Avaliação do Limite de resistência e escoamento do tubo após autofretagem.

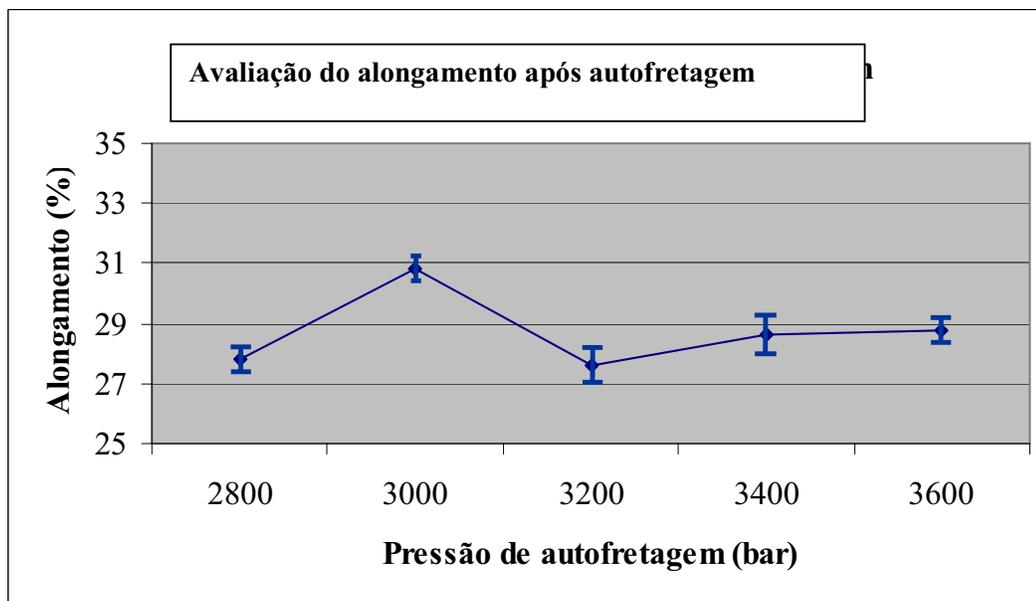


FIGURA 5.7 - Avaliação do alongamento do tubo após autofretagem.

Conforme pode ser observado, não houve alterações nos limites de escoamento, resistência e alongamento dos tubos.

Outro fator relevante para esta pesquisa foi descobrir se era possível mensurar através do processo de dureza, quanto à autofretagem poderia encruar o tubo St52 VM-NP. Para isto foi levantado o perfil de dureza dos tubos: sem autofretagem, com 2.800 e 3.600 bar, mapeando-se a dureza do diâmetro interno para o externo.

A avaliação dos resultados apresentados (Figura 5.8) mostra que não houve variação significativa na dureza. Baseando-se nestes resultados, podemos afirmar que a medição de dureza não seria adequada para se visualizar um micro-encruamento interno e por consequência o aumento da dureza interna dos tubos.

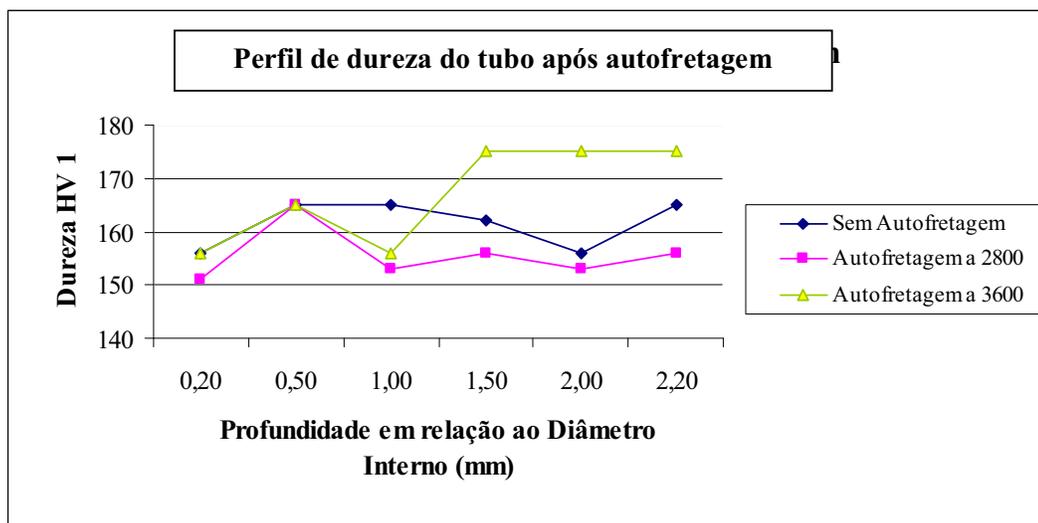


FIGURA 5.8 - Perfil de dureza do tubo após autofretagem.

#### 5.4. Determinação do tubo que é submetido à maior carregamento mecânico

Em virtude do posicionamento dos bicos injetores no cabeçote do motor e do distribuidor de combustível, não é possível ter a mesma geometria dos tubos de alta pressão. Como o comprimento relativo dos tubos deve ser o mesmo, a fim de se manter a mesma perda de carga, foi necessária a realização de uma análise de elementos finitos para se descobrir se existia algum tubo recebendo um maior esforço mecânico.

A simulação numérica realizada no programa Ideas® (Figura 5.9), aplicando-se uma pressão interna teórica de 1.600 bar, que é a pressão de pico do sistema de injeção, mostrou que a máxima tensão de escoamento que o aço seria submetido é de 240 MPa, logo uma tensão menor que a tensão de escoamento do aço St52, que é de 355 MPa.

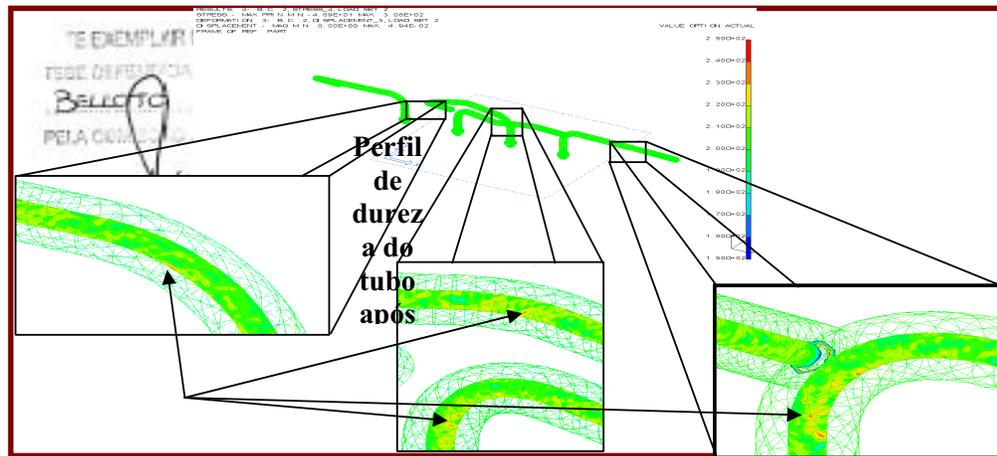


FIGURA 5.9 – Análise de solicitação mecânica por elementos finitos.

Observou-se então que **não existia** um tubo mais solicitado mecanicamente, portanto os ensaios de fadiga foram padronizados no tubo 4 (Figura 5.10), escolhido aleatoriamente.

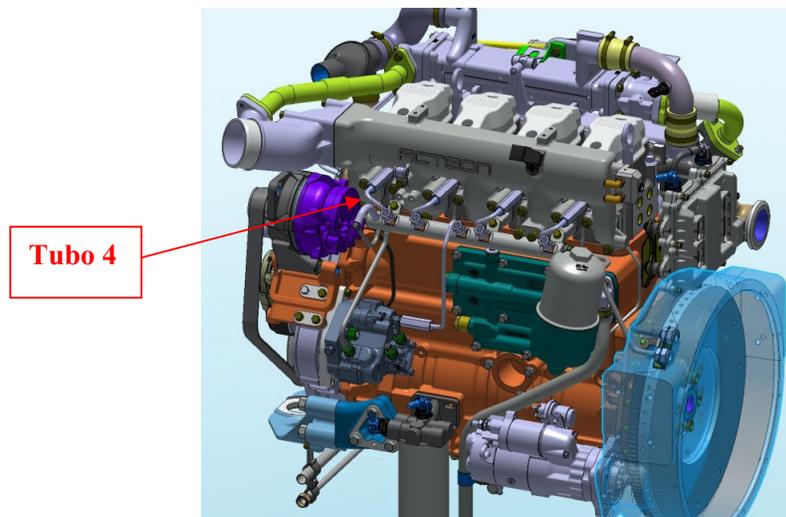


FIGURA 5.10 – Conjunto Motor MWM 4 cilindros.

## 5.5. Fadiga

O ensaio para levantamento da curva S-N foi realizado na empresa Bosch em Curitiba, a única empresa no Brasil que possui equipamento apropriado para este ensaio. As amostras de tubos foram realizadas com 5 diferentes condições apresentados na (Tabela 5.1), de acordo com os anexos D,E,F,G e H. No primeiro ensaio (Anexo D), o tubo utilizado foi o VM-NP com descontinuidades de 130 - 300 $\mu$ m, guiado com mandril interno em 3 passes, autofretado a 2800 bar, o tubo resistiu a 1500 bar sem quebra. Já no segundo ensaio (Anexo E), o tubo tinha a mesma condição do primeiro ensaio, alterando-se somente a pressão de autofretagem para 3100 bar, o tubo resistiu a 1700 bar sem quebras. Já no terceiro ensaio (Anexo F), aumentou-se para 5 a quantidade de passes, o tubo resistiu aos mesmos 1700 bar, ou seja, guiar com o mandril nos 5 passes não interfere no aumento de vida. No quarto ensaio (Anexo G), utilizou-se o tubo VM-P polido na França, com descontinuidades de 80 -200 $\mu$ m, guiado com mandril por 3 passes, o tubo resistiu a 1800 bar, vindo a ocorrer uma quebra prematura com  $171 \times 10^3$  ciclos. Embora o tubo VM-P tenha obtido um valor maior, não justificaria financeiramente comprar o equipamento de polimentos eletrolítico. Finalmente, o último ensaio (Anexo H), tubo P-P, descontinuidades de 30-50 $\mu$ m, autogretagem a 3100 bar, neste caso não foi possível indicar se o tubo teria polimento e quantos passes guiados, pois o fornecedor P&P não divulgou esta informação, o resultado apresentado foi de 2400 bar. Não houve qualquer quebra de tubo neste nível de pressão, e também, não foi possível ensaiar os tubos em um nível maior, pois o equipamento da Bosch tem a maior pressão de 2500 bar.

Os resultados apresentados na tabela 5.1 mostra que à medida que se aumenta a pressão de autofretagem, ocorre uma melhora nas tensões residuais internas, aumentando a vida à fadiga. Entretanto o mesmo não ocorre quando se adicionam novos passes de trefila guiados com mandril interno. Antes destes ensaios, acreditava-se que a utilização do mandril poderia melhorar a vida à fadiga. Neste caso específico, não melhorou.

O tubo que recebeu polimento eletrolítico apresentou pouca melhora (100 bar) na vida à fadiga se comparado com o mesmo tubo sem polimento, porém o polimento pode ser considerado uma boa alternativa se novos estudos forem realizados.

As descontinuidades internas influenciam diretamente nos resultados de tensão para vida em fadiga, pois conforme observado na matéria prima da empresa P&P, a única que o nível de descontinuidades atende a classe “Q” da norma ISO 8535, não houve quebras mesmo a 2.400 bar.

Todos os tubos que falharam por fadiga apresentaram trincas longitudinais em trechos retos, que se propagaram da região interna para externa. Fraturas transversais geralmente são caracterizadas por excesso de vibração ou por montagem do tubo pré-tensionado.

Tabela 5.1 – Variáveis e resultados dos testes de fadiga.

ANEXOS	ORIGEM	DESCONTINUIDADES (µm)	POLIMENTO INTERNO	Nº PASSES DE TREFILA	TUBO GUIADO COM MANDRIL INTERNO (passes)	AUTO FRETAGEM (bar)	ENSAIO DE FADIGA (10 <sup>7</sup> ciclos) sem quebra
D	VM-NP	130 - 300	NÃO	5	3	2800	1500 bar
E	VM-NP	130 - 300	NÃO	5	3	3100	1700 bar
F	VM-NP	130 - 300	NÃO	5	5	3100	1700 bar
G	VM-P	80 - 200	SIM	5	3	3100	1800 <sup>(1)</sup> bar
H	P-P	30 - 50	NI	NI	NI	3100	2400 <sup>(2)</sup> bar

<sup>(1)</sup> Houve uma quebra prematura com 171 x 10<sup>3</sup> ciclos.

<sup>(2)</sup> O ensaio foi interrompido em virtude da capacidade do equipamento em operar até a pressão de 2600bar.

NI = Não informado

## 5.6. Comparação entre as composições químicas dos aços VM-NP e P-P

Foram realizadas análises de composição química (Tabela 5.2) e análise das microestruturas a fim de se comparar as diferenças nos aços VM-NP e P-P.

Tabela 5.2 – Comparação entre as composições químicas dos aços VM-NP e P-P.

FORNECEDOR \ COMP. QUÍMICA (%)	C	Si	Mn	P	S	N	Ti	V
VM-NP	0,192	0,123	1,49	0,018	0,0047	0,001	0,0005	0,001
P-P	0,198	0,221	1,49	0,013	0,0011	0,001	0,0017	0,001

Como se pode observar (Tabela 5.2), as matérias-primas dos fornecedores V&M Br e P&P Alemanha estão dentro do especificado (Tabela 1.1) e não apresentam qualquer diferença na composição química das mesmas.

#### 5.7.1. Microestrutura dos tubos fornecidos pela V&M-NP e P-P

Foram realizadas análises micrográficas para se comparar as estruturas dos materiais. As Figuras 5.11 e 5.12 mostram micrografias realizadas em MEV no laboratório da MWM International da secção transversal do aço St52 VM-NP e St52 P-P respectivamente.

Embora as imagens mostrem que as microestruturas sejam muito parecidas, foi realizado uma análise de imagem (Figuras 5.13 e 5.14) dos percentuais de cada fase (Ferrita e Perlita), através do software AnalySIS docu 5.1.

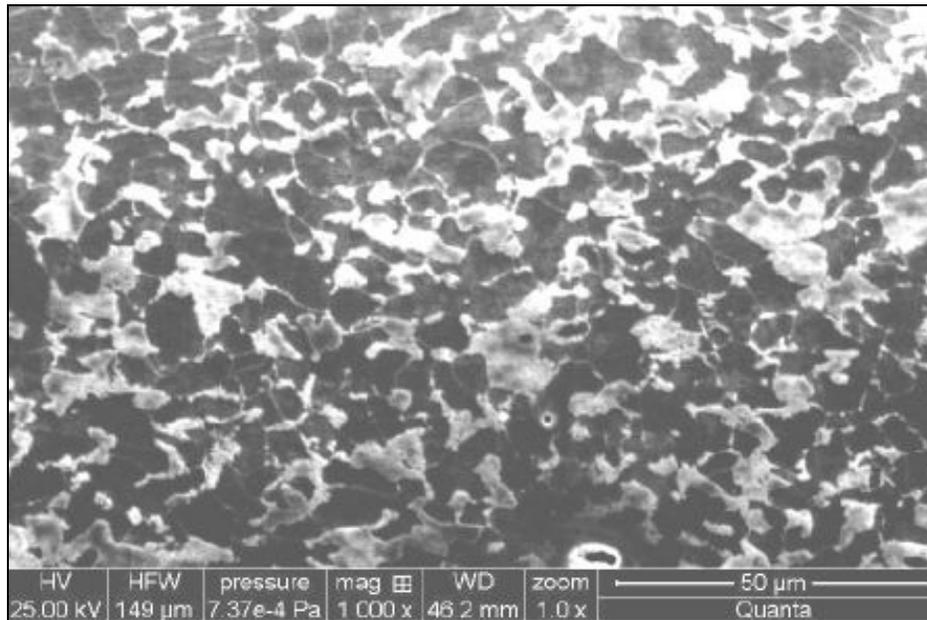


FIGURA 5.11 - Micrografia (Ferrita e Perlita) do aço St52 VM-NP / Ataque: Nital 3%.

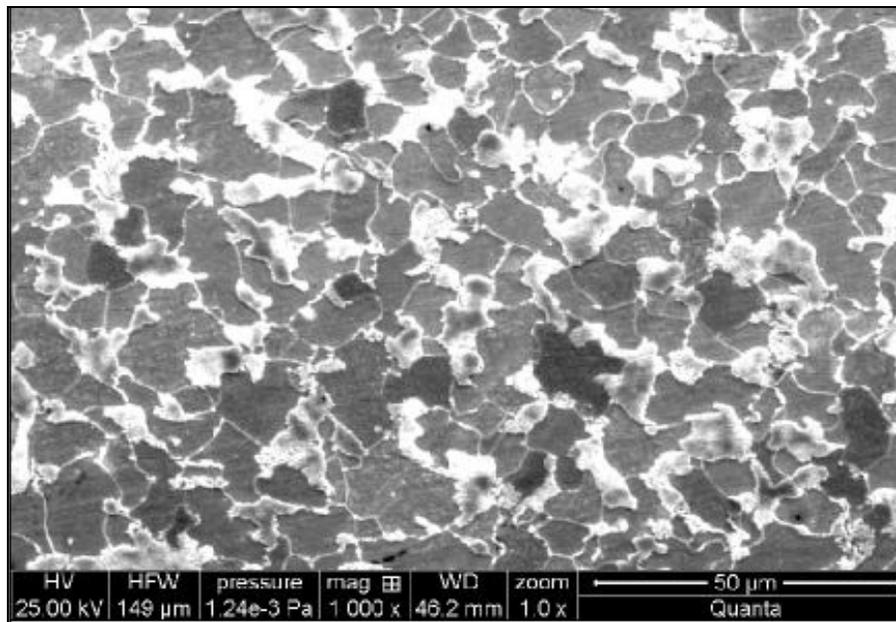


FIGURA 5.12 - Micrografia (Ferrita e Perlita) do aço St52 P-P / Ataque: Nital 3%.

As figuras 5.13 e 5.14 mostram os resultados encontrados no software supracitado.



FIGURA 5.13 – Imagem das fases Ferrita (87,45%) e Perlita (12,55%) do aço St52 VM-NP.

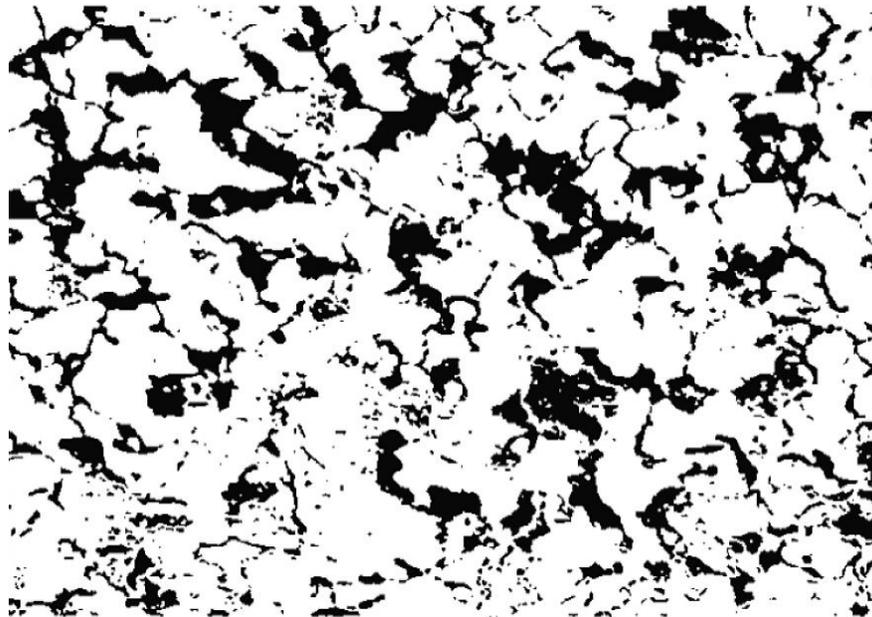


FIGURA 5.14 – Imagem das fases Ferrita (86,76%) e Perlita (13,23%) do aço St52 P-P.

De acordo com os resultados obtidos no software AnalySIS docu 5.1 mostrado acima, do mesmo modo que a composição química, as microestruturas apresentaram as mesmas características, para os aços fornecidos pela V&M e P&P.

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que para se projetar tubos de alta pressão de combustível que serão utilizados em motores diesel com pressões de injeção de combustível superiores a 1.300 bar e que necessariamente **não deverão** apresentar qualquer tipo de falha durante sua vida útil, serão necessários alguns cuidados e recomendações:

- A pressão de autofretagem é determinante para o aumento de vida à fadiga das tubulações de combustível, à medida que se aumenta a pressão de 2800 para 3100 bar, melhora-se a durabilidade do tubo;
- As trincas por fadiga nos tubos são longitudinais e se propagam da região interna em virtude do carregamento cíclico que o material é submetido e descontinuidades internas inerentes à fabricação do tubo sem costura. Além disso, sempre aconteceram na região de trecho reto do tubo;
- O polimento eletrolítico realizado na matéria-prima nacional, embora tenha melhorado a durabilidade do tubo no ensaio de fadiga, ainda não é a resolução do problema, visto que o aumento de 100 bar a mais na vida à fadiga em relação a um tubo sem polimento é pequeno em relação ao investimento necessário para aquisição do equipamento;
- Diferentes graus de acabamento interno nos tubos influenciam na vida em fadiga dos tubos, visto que o tubo importado P-P apresentou uma vida à fadiga 41% maior em relação ao tubo nacional VM-NP.

Diante dos diversos aspectos abordados nesta pesquisa, fica evidenciado que o tubo de fabricação V&M Brasil VM-NP, não atende as exigências para aplicação em tubulações de combustível.

Recomenda-se a utilização dos tubos P-P Alemanha por apresentarem melhor nível de descontinuidades internas e vida à fadiga superior a 2.400 bar.

A recomendação para trabalhos futuros seria o estudo de melhoria no processo de laminação para diminuição do nível de descontinuidades internas dos tubos nacionais, visto que os mesmos não atendem as especificações mínimas de descontinuidades internas exigidos pela norma ISO 8535, realização de novos ensaios de fadiga com outros níveis de pressão de autofretagem e verificar as demandas futuras de produção de tubos para talvez viabilizar a compra do equipamento de polimento eletrolítico.

Como nesta pesquisa o enfoque foi abordar motores que atendem a legislação EURO III, ou seja, pressão de injeção de combustível de até 1.300 bar fica evidenciado que para o atendimento às novas legislações de emissões EURO IV, V e VI, será necessário o estudo de aplicação de novos aços, pois para as novas legislações as pressões aumentam para 1.800, 2.000 e até 2.500 bar de pressão de injeção de combustível, onde o aço ST52 não suportaria estes níveis de pressão.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA JÚNIOR, Aguiar Ribeiro de. **Gerenciamento de restrições no planejamento da produção em uma indústria siderúrgica**. 2009. P. 76, Dissertação de Mestrado – UNIVERSIDADE FUMEC – FACE – Belo Horizonte.

**ASM Handbook, a** - Batch Process Hot Dip Galvanizing - Corrosion, Vol 13, (formerly 9th ed. Metals Handbook), ASM International, 1989, p 794-802.

**ASM Handbook, b** - Fatigue and Fracture Mechanics – Mechanical Testing and Evaluation, Vol 8, (formerly 9th ed. *Metals Handbook*), ASM International, 2007, p 681-685.

**ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS - E 112:** Standard test methods for determining average grain size. Philadelphia, 1996.

**ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS - E 1558:** Standard guide for electrolytic polishing of metallographic specimens. Philadelphia, 2009.

AUFINGER, H.P.; CICHOCKI, R. *Challenges to meet heavy duty diesel engines Euro II and US 1998 Emissions Regulations In: Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia e Mobilidade*, 1993, São Paulo. *SAE Technical Paper Series...* São Paulo: *Society Automotive Engineering*, 1993. **SAE Paper 931637E**. 12 p.

BERNARD M, BUI-QUOC T, BURALT M.; Effect of re-coldworking on fatigue life enhancement of a fastener hole. *Fatigue Fract Eng Master Struct* 1995;18(7/8):1:47-53.

BIHAMTA R.; MOVAHHEDY, M. R.; MASHREGHI, A. R. A numerical study of swage autofrettage of thick-walled tubes. **Materials & Design**, v. 28, n. 3, p. 804-815, 2007.

[6] BOSCH DO BRASIL. Laboratório de Ensaaios. **Relatório 06/070**. Curitiba, 2006.

[7] BOSCH DO BRASIL. Laboratório de Ensaaios. **Relatório 06/074**. Curitiba, 2006.

[8] BOSCH DO BRASIL. Laboratório de Ensaaios. **Relatório 06/089**. Curitiba, 2006.

[9] BOSCH DO BRASIL. Laboratório de Ensaaios. **Relatório 06/112**. Curitiba, 2006.

[10] BOSCH DO BRASIL. Laboratório de Ensaaios. **Relatório 06/129**. Curitiba, 2006.

BUENO, Antônio Fernando Burkert. 6º Conferência sobre tecnologia de equipamentos, COTEC 2002, Salvador. **Avaliação da Autofretagem de tubos de hiper alta pressão**. Disponível em: <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE057.PDF> Acesso em: 03 abr. 2011.

CAMERON, I. **Engine Manufactures Ponder Euro 6 Emissions Challenges**. Diesel Progress International, Waukesha, Março, 2008.

CARVALHO, R. N. **Aspectos da Precipitação e da Recristalização na Laminação Contínua de Tubos sem Costura**. 2007. 231p. Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

**CONAMA 315 - BRASIL, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE**, Resolução nº 315. 29 de outubro, 2002. Brasília, Diário Oficial da União, 2002. 8 p.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. Mc-Graw – Hill Book Company, SI Metric, Edition 1988, chapter 19, p 631 - 634 - a.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. Mc-Graw – Hill Book Company, SI Metric, Edition 1988, chapter 19, p 635 – 650 b.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. Mc-Graw – Hill Book Company, SI Metric, Edition 1988, chapter 19, p 375-431 - c.

**DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG - 2391-2**: Seamless Precision Steel tubes Technical delivery conditions. Berlim, 1994.

**DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG - 2393-2**: Welded Precision Steel Tubes Technical Delivery Conditions. Berlim, 1994.

**DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – EN 10246 – Non-Destructive Testing of Steel Tubes – Part 3**: Automatic Eddy Current Testing of Seamless and Welded (Except Submerged Arc – Welded). Steel Tubes for the Detection of Imperfections. Berlim, 2000.

**DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – EN 10305 – Steel Tubes for precision applications - Technical Delivery Conditions – Part 1**: Seamless cold drawn tubes. Berlim, 2003.

**DIRECTIVE 88/77/EEC. EUROPEAN COMMISSION COUNCIL DIRECTIVE 88/77/EEC of 3 December 1987. On the approximation of the laws of the Member States relating to the measures to be taken against the emission of gaseous pollutants from diesel engines for use in vehicles**. Official Journal L 036, 09/02/1988. p.0033-0061.

DREISTEIN, W.; CARDOSO, J. A.; MELO, F. S. Laminador contínuo de tubos sem costura, na Mannesmann. In: **SIMPÓSIO SOBRE CONFORMAÇÃO MECÂNICA (LAMINAÇÃO, LINGOTAMENTO CONTÍNUO, METALURGIA DO PÓ, ETC.) – CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS/ABM, 1994**, São Paulo. Anais... São Paulo, 9-14 de Outubro. Contribuição Técnica nº 2470. p. 1036-1040.

FERRARI, Vladimir. **Achieving EURO III and EURO IV with ultra-low precious metal loadings**. In: Congresso e Exposição Internacionais da Tecnologia e Mobilidade, XVI., 2007, São

Paulo. SAE Technical Paper Series... São Paulo: Society Automotive Engineering, 2007. SAE Paper 2007-01-2565 E. 9 p.

FERREIRA, I. **IM 234 - Fadiga dos Materiais**. Unicamp, 2006. cap. 4.(APOSTILA DEMA).

HAGEDORN, M; LECHTENFELD , U.; ZAREMBA, A. Precision tubes for high-pressure diesel injection lines. **MTZ: Motortechnische Zeitschrift**. Stuttgart, v. 69, n. 3, p.10-14, 2008.

**ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - 8535-1 2006: DIESEL ENGINES- Steel Tubes for High-Pressure fuel injector pipes. Part 1 – Requirements for seamless cold-drawn single-wall tubes.**Switzerland,2006.

JAHED, H.; FARSHI, B.; HOSSEINI, M. The actual unloading behavior effect on thermo-mechanical stress intensity factor and life of autofrettage tubes. **International Journal of Fatigue**, v. 29, n. 2, p. 360-369, February 2007.

KANG, Sang-Guk. et al. Thermo elastic analysis of a type 3 cryogenic tank considering curing temperature and autofrettage pressure. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Los Angeles, v. 27, n. 5, 2008.

KORSUNSKY, A. M. Residual elastic strains in autofrettaged tubes: elastic-ideally plastic model analysis. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v. 129, p. 77-81, January 2007.

MAGNABOSCO, R. **Microestrutura, Processamento e Propriedades de Aços de Construção Mecânica, Aços para Ferramentas e Ferros Fundidos**. São Paulo, 2006. p80.

MAJZOBI, G. H. et al. Experimental and finite element prediction of bursting pressure in compound cylinders. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 81, n. 12, p. 889-896, December 2004.

MICHAEL J. IREMONGE, GURDIP S. KALSI. In A numerical study of autofrettage, gun tube conference, Kelbe College Oxford, pp. 1-6, 2002.

OTEGUI, J.L. et al. Intergranular susceptibility in failures of high pressure tubes **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 86, n. 2-3, p. 211-220, February/March 2009.

REIS JÚNIOR, Geraldo Souza. **Modelagem térmica de um processo de laminação de tubos usando redes neurais Fuzzy-Cmac**. 2005. p. 22-23, Dissertação de Mestrado – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

SHIGLEY, J.E.; MISCHKE, C.R.; BUDYNAS, R. **Mechanical engineering design**, 8th. Edition, McGraw-Hill, 2006.

VALLOUREC & MANNESMANN DO BRASIL. Laboratório Metalúrgico. **Relatório 003/2006**. Belo Horizonte, 2006.

VALLOUREC & MANNESMANN DO BRASIL. Laboratório Metalúrgico. **Relatório 057/2006**. Belo Horizonte, 2006.

VALLOUREC & MANNESMANN DO BRASIL. **Catálogo Técnico da Gerência de Relações Corporativas**, 2001.

## **ANEXOS**

**ANEXO A – Conselho Nacional do Meio Ambiente – Resolução 315**



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE  
CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA

**RESOLUÇÃO Nº 315, DE 29 DE OUTUBRO DE 2002.**

(PUBLICADA NO DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO EM 20 DE NOVEMBRO DE 2002)

*Dispõe sobre a nova etapa do Programa de  
Controle de Emissões Veiculares-  
PROCONVE.*

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA, de conformidade com as competências que lhe foram conferidas pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto nº 99.274, de 6 de julho de 1990, e em razão no disposto no seu regimento interno, anexo à Portaria nº 326, de 15 de dezembro de 1994; e

Considerando que a emissão de poluentes por veículos automotores contribui significativamente para a deterioração da qualidade ambiental, especialmente nos centros urbanos;

Considerando que os veículos automotores do ciclo Otto são fontes relevantes de emissão evaporativa de combustível;

Considerando que a utilização de tecnologias automotivas adequadas, de eficácia comprovada, permite atender as necessidades de controle da poluição, economia de combustível e competitividade de mercado;

Considerando a necessidade e os prazos para promover a qualidade dos combustíveis automotivos nacionais para viabilizar a introdução de modernas tecnologias de alimentação de combustíveis e de controle de poluição;

Considerando as necessidades de prazo para a adequação tecnológica de motores veiculares e de veículos automotores às novas exigências de controle da poluição; e

Considerando a necessidade de estabelecer novos padrões de emissão para os motores veiculares e veículos automotores nacionais e importados, leves e pesados, visando manter a redução da poluição do ar nos centros urbanos do país e a economia de combustível, resolve que:

Art. 1º Ficam instituídas novas etapas para o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, em caráter nacional, para serem atendidas nas homologações dos veículos automotores novos, nacionais e importados, leves e pesados, destinados exclusivamente ao mercado interno brasileiro, com os seguintes objetivos:

I - reduzir os níveis de emissão de poluentes pelo escapamento e por evaporação, visando o atendimento aos padrões nacionais de qualidade ambiental vigentes;

II - promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia de projeto e fabricação, como também em métodos e equipamentos para o controle de emissão de poluentes;

III - promover a adequação dos combustíveis automotivos comercializados, para que resultem em produtos menos agressivos ao meio ambiente e à saúde pública e que permitam a adoção de tecnologias automotivas necessárias ao atendimento do exigido por esta Resolução.

Art. 2º Fica estabelecido, a partir de cento e oitenta dias da data de publicação desta Resolução, para as novas homologações, o limite de dois gramas de hidrocarbonetos totais por ensaio para a emissão evaporativa de todos os veículos automotores leves que utilizam motores do ciclo Otto, exceto os que utilizam unicamente o gás natural (PROCONVE L-4).

Art. 3º Ficam estabelecidos, a partir de 01 de janeiro de 2007, os seguintes limites máximos de emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos leves de passageiros (PROCONVE L-4):

- a) monóxido de carbono (CO): 2,0 g/km;
- b) hidrocarbonetos totais (THC), somente para veículos a gás natural: 0,30 g/km;
- c) hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,16 g/km;

- d) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores do ciclo Otto: 0,25 g/km;
- e) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores do ciclo Diesel: 0,60 g/km;
- f) aldeídos (HCO), somente para motores do ciclo Otto (exceto gás natural): 0,03 g/km;
- g) material particulado (MP), somente para motores ciclo Diesel: 0,05 g/km;
- h) teor de monóxido de carbono em marcha lenta, somente para motores do ciclo Otto:

0,50% vol.

Art. 4º Ficam estabelecidos, a partir de 01 de janeiro de 2009, os seguintes limites máximos de emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos leves de passageiros (PROCONVE L-5):

- a) monóxido de carbono (CO): 2,0 g/km;
- b) hidrocarbonetos totais (THC), somente para veículos a gás natural: 0,30 g/km;
- c) hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,05 g/km;
- d) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores do ciclo Otto: 0,12 g/km;
- e) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores do ciclo Diesel: 0,25 g/km;
- f) aldeídos (HCO), somente para motores ciclo Otto (exceto gás natural): 0,02 g/km;
- g) material particulado (MP), somente para motores ciclo Diesel: 0,05 g /km;
- h) teor de monóxido de carbono em marcha lenta, somente para motores do ciclo Otto:

0,50% vol.

Art. 5º Ficam estabelecidos, a partir de 01 de janeiro de 2007, os seguintes limites máximos de emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos leves comerciais, com massa do veículo para ensaio menor ou igual a um mil e setecentos kg (PROCONVE L-4):

- a) monóxido de carbono (CO): 2,0 g/km;
- b) hidrocarbonetos totais (THC), somente para veículos a gás natural: 0,30 g/km;
- c) hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,16 g/km;
- d) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Otto: 0,25 g/km;
- e) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Diesel: 0,60 g/km;
- f) aldeídos (HCO), somente para motores ciclo Otto (exceto gás natural): 0,03 g/km;
- g) material particulado (MP), somente para motores ciclo Diesel: 0,08 g /km;
- h) teor de monóxido de carbono em marcha lenta, somente para motores do ciclo Otto:

0,50% vol.

Art. 6º Ficam estabelecidos, a partir de 01 de janeiro de 2009, os seguintes limites máximos de emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos leves comerciais, com massa do veículo para ensaio menor ou igual a um mil e setecentos kg (PROCONVE L-5):

- a) monóxido de carbono (CO): 2,0 g/km;
- b) hidrocarbonetos totais (THC), somente para veículos a gás natural: 0,30 g/km;
- c) hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,05 g/km;
- d) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Otto: 0,12 g/km;
- e) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Diesel: 0,25 g/km;
- f) aldeídos (HCO), somente para motores ciclo Otto (exceto gás natural): 0,02 g/km;
- g) material particulado (MP), somente para motores ciclo Diesel: 0,05 g /km;
- h) teor de monóxido de carbono em marcha lenta, somente para motores do ciclo Otto:

0,50% vol.

Art. 7º Ficam estabelecidos, a partir de 01 de janeiro de 2007, os seguintes limites máximos de emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos leves comerciais, com massa do veículo para ensaio maior que um mil e setecentos kg (PROCONVE L-4):

- a) monóxido de carbono (CO): 2,7 g/km;
- b) hidrocarbonetos totais (THC), somente para veículos a gás natural: 0,50 g/km;
- c) hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,20 g/km;
- d) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Otto: 0,43 g/km;
- e) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Diesel: 1,00 g/km;
- f) aldeídos (HCO), somente para motores ciclo Otto (exceto gás natural): 0,06 g/km;

g) material particulado (MP), somente para motores ciclo Diesel: 0,10 g/km;  
h) teor de monóxido de carbono em marcha lenta, somente para motores do ciclo Otto:  
0,50 % vol.

Art. 8º Ficam estabelecidos, a partir de 01 de janeiro de 2009, os seguintes limites máximos de emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos leves comerciais, com massa do veículo para ensaio maior que um mil e setecentos kg (PROCONVE L-5):

a) monóxido de carbono (CO): 2,7 g/km;  
b) hidrocarbonetos totais (THC), somente para veículos a gás natural: 0,50 g/km;  
c) hidrocarbonetos não metano (NMHC): 0,06 g/km;  
d) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Otto: 0,25 g/km;  
e) óxidos de nitrogênio (NOx) para motores ciclo Diesel: 0,43 g/km;  
f) aldeídos (HCO), somente para motores ciclo Otto (exceto gás natural): 0,04 g/km;  
g) material particulado (MP), somente para motores ciclo Diesel: 0,06 g /km;  
h) teor de monóxido de carbono em marcha lenta, somente para motores do ciclo Otto:  
0,50% vol.

Art. 9º Os veículos automotores pesados, com motor do ciclo Otto, com massa total máxima autorizada entre 3856 kg e 4536 kg, poderão ser testados, alternativamente, como veículo leve comercial com massa de referência para ensaio maior que 1700 kg, aplicando-se o disposto nos artigos 7º e 8º desta Resolução.

Parágrafo único. Para os casos tratados no caput deste artigo, a massa do veículo para ensaio será a média aritmética entre a massa do veículo em ordem de marcha e a massa total máxima autorizada.

Art. 10 Fica estabelecido o porte de dispositivos/sistemas para auto diagnose (OBD), das funções de gerenciamento do motor que exerçam influência sobre as emissões de poluentes do ar, para todos os veículos leves de passageiros e veículos leves comerciais.

Parágrafo único. O IBAMA deverá propor ao CONAMA especificação de datas de implantação, as características tecnológicas e o alcance desejado para dispositivos e sistemas citados no caput deste artigo.

Art. 11 Os fabricantes ou importadores de veículos automotores leves de passageiros e leves comerciais deverão aplicar os fatores de deterioração, por oitenta mil quilômetros ou cinco anos de uso, conforme estabelecido nesta Resolução, na Resolução CONAMA nº 14, de 13 de dezembro de 1995, e normas complementares, de modo a comprovar o respectivo atendimento aos limites máximos de emissão de poluentes, estabelecidos nos artigos 2º ao 8º desta Resolução.

Art. 12 Os fabricantes ou importadores, deverão atender aos limites máximos de emissão de poluentes do ar estabelecidos nos artigos 3º, 5º e 7º, bem como à aplicação do fator de deterioração determinado pelo Artigo 11, todos desta Resolução, conforme cronograma de fases definidos nos parágrafos 1º, 2º e 3º, a seguir:

§ 1º No mínimo, quarenta por cento do total anual de veículos automotores leves de passageiros somados aos veículos leves comerciais, produzidos a partir de dois anos antes das datas estabelecidas nos referidos artigos;

§ 2º No mínimo, setenta por cento do total anual de veículos automotores leves de passageiros somados aos veículos leves comerciais, produzidos a partir de um ano antes das datas estabelecidas nos referidos artigos;

§ 3º Cem por cento do total anual de veículos automotores leves de passageiros somados aos veículos leves comerciais, produzidos a partir das datas estabelecidas nos referidos artigos.

Art. 13 O IBAMA poderá propor ao CONAMA a alteração do limite de NMHC igual a 0,05 g/km para os veículos leves movidos a etanol, gasolina adicionada com etanol ou gás natural, desde que seja comprovada a impossibilidade técnica para o seu atendimento.

Art. 14 As novas configurações de veículos leves produzidas e lançadas a partir 1º de janeiro de 2006, deverão atender, com 100% da produção, os limites constantes nos artigos 3º, 5º e 7º, bem como à aplicação do fator de deterioração determinado pelo Artigo 11 desta Resolução.

Art. 15 Ficam estabelecidos os limites máximos de emissão de poluentes e respectivas datas de implantação, conforme Tabela 1 e Tabela 2, a seguir, para os motores destinados a veículos automotores pesados, nacionais e importados, segundo os ciclos padrão de ensaio ESC, ELR e ETC, definidos no Anexo I da presente Resolução.

§ 1º Os motores e veículos para aplicações especiais que não possam ser utilizados para o transporte urbano e rodoviário poderão ser dispensados parcial ou totalmente das exigências desta Resolução, mediante decisão motivada do IBAMA.

§ 2º Não são abrangidos por esta Resolução os motores marítimos, ferroviários e industriais, bem como aqueles destinados a máquinas de terraplenagem e agrícolas, definidas conforme as Normas Brasileiras NBR 6142 e TB - 66, respectivamente.

§ 3º Os motores convencionais do ciclo Diesel e aqueles munidos de equipamentos de injeção eletrônica de combustível, recirculação de gases de escapamento (EGR) e/ou catalisadores de oxidação deverão atender aos limites de emissão expressos na Linha 1 da Tabela 1, sendo ensaiados segundo os ciclos ESC e ELR, e para o atendimento aos limites da Linha 2 da Tabela 1 o motor deverá atender, adicionalmente, aos limites da Linha 2, da Tabela 2, segundo o ciclo ETC.

§ 4º Os motores do ciclo Diesel equipados com sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento, como catalisadores de NOx e/ou filtros de partículas, além de atender aos limites expressos na Linha 1, da Tabela 1, deverão atender adicionalmente aos limites de emissões estabelecidos para o ciclo de ensaio ETC, de acordo com a Linha 1, da Tabela 2.

§ 5º Os motores a gás natural deverão atender aos limites de emissão estabelecidos na Tabela 2, segundo o ciclo de ensaio ETC.

§ 6º O IBAMA deverá confirmar os limites de emissão para os motores a gás natural, estabelecidos no parágrafo 5º deste artigo.

§ 7º Até 31 de dezembro de 2004, os motores a gás natural poderão ser dispensados parcialmente das exigências desta Resolução, mediante decisão motivada do IBAMA.

§ 8º Para os ônibus urbanos a data de implantação dos limites de emissão estabelecidos na Linha 1, da Tabela 1, será 1º de janeiro de 2004, observado o parágrafo 4º deste artigo.

§ 9º Para os micro-ônibus a data de implantação dos limites de emissão estabelecidos na Linha 1, da Tabela 1, será 1º de janeiro de 2005, observado o parágrafo 4º deste artigo.

§ 10 Para os veículos pesados, exceto ônibus urbano e micro-ônibus, para 40% da produção anual, por fabricante ou importador, a data de implantação dos limites de emissão estabelecidos na Linha 1, da Tabela 1, será 1º de janeiro de 2005, observado o parágrafo 4º deste artigo.

§ 11 Alternativamente ao disposto no parágrafo 8º deste artigo, o fabricante ou importador poderá atender os limites de emissão com um mínimo de 60% da produção anual de ônibus urbano, a ser complementado obrigatoriamente até 1º de janeiro de 2005, e, neste caso, ficará obrigado ao atendimento do estabelecido no parágrafo 10 com o mínimo de 60% da produção anual dos demais veículos pesados.

§ 12 Para os veículos pesados, para 100% da produção anual, por fabricante ou importador, a data de implantação dos limites de emissão estabelecidos na Linha 2, das Tabelas 1 e 2, será 1º de janeiro de 2009.

Tabela 1: Valores limites ensaios ESC e ELR

Data de Atendimento	Monóxido de Carbono CO - (g/kWh)	Hidrocarbonetos Totais THC - (g/kWh)	Óxidos de Nitrogênio NOx (g/kWh)	Material Particulado MP (g/kWh)	Opacidade (ELR) m <sup>1</sup>
Linha 1- A partir de 01/jan/2006 (PROCONVE P-5)	2,1	0,66	5,0	0,10 ou 0,13 <sup>(1)</sup>	0,8
Linha 2 - A partir de 01/jan/2009 (PROCONVE P-6)	1,5	0,46	3,5	0,02	0,5

(1) Para motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> e rotação à potência nominal superior a 3000 min<sup>-1</sup>.

Tabela 2: Valores limites – ensaios ETC<sup>(1)</sup>

Data de Atendimento	Monóxido de Carbono CO - (g/kWh)	Hidrocarbonetos não metano NMHC - (g/kWh)	Metano CH <sub>4</sub> <sup>(2)</sup> - (g/kWh)	Óxidos de Nitrogênio NOx - (g/kWh)	Material Particulado MP <sup>(3)</sup> - (g/kWh)
Linha 1 - A partir de 01/jan/2006 (PROCONVE P-5)	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16 ou 0,21 <sup>(4)</sup>
Linha 2 - A partir de 01/jan/2009 (PROCONVE P-6)	4,0	0,55	1,1	3,5	0,03

(1) Para motores a gás natural, as condições de ensaio, segundo o ciclo ETC, e os valores limites estabelecidos deverão ser confirmados pelo IBAMA até 31 de dezembro de 2004;

(2) Apenas para motores a gás natural;

(3) Não é aplicável a motores alimentados a gás natural;

(4) Para motores de cilindrada unitária inferior a 0,75 dm<sup>3</sup> e rotação à potência nominal superior a 3.000 min<sup>-1</sup>.

Art. 16 Para efeitos de homologação, na comprovação de atendimento aos limites de emissão de escapamento dos motores do ciclo Diesel dos veículos pesados, não serão aplicados os Fatores de Deterioração da Emissão, contudo, o fabricante se obriga a manter as respectivas emissões dentro dos limites do PROCONVE por 160.000 km rodados do veículo ou o prazo de cinco anos, o que se suceder primeiro.

Art. 17 O Ministério do Meio Ambiente deverá apresentar ao CONAMA estudos e propostas para se instituir incentivos aos fabricantes e importadores de veículos automotores e de combustíveis automotivos, por meio da redução de tributos incidentes, para que antecipem voluntariamente as datas estabelecidas de comercialização no mercado nacional de produtos que atendam aos limites prescritos por esta Resolução, exceto para os que atendam aos percentuais obrigatórios estabelecidos nos artigos 12, 14 e 15 desta Resolução.

Art. 18 Os combustíveis necessários para atendimento ao disposto nesta Resolução deverão estar disponíveis conforme estabelecido no artigo 7º, da Lei nº 8.723, de 29 de outubro de 1993.

§ 1º Para fins de desenvolvimento de produtos, testes de certificação e homologação, os combustíveis de referência deverão estar disponíveis, conforme a Lei citada no caput deste artigo.

§ 2º Os combustíveis comerciais deverão possuir características adequadas e compatíveis com as tecnologias a serem adotadas e estarem disponíveis nas datas previstas nesta Resolução.

Art. 19 Para a medição da emissão de poluentes provenientes do escapamento dos veículos automotores leves de passageiros e leves comerciais, os quais são ensaiados segundo o procedimento da Norma Brasileira NBR 6601, permanecem os critérios estabelecidos na Resolução CONAMA nº18, de 06 de maio de 1986.

§ 1º Os veículos automotores leves do ciclo Diesel deverão ser ensaiados conforme a metodologia citada no Código de Regulações Federal (*Code of Federal Regulations*) dos Estados Unidos da América, volume 40, parte 86, até publicação de norma brasileira equivalente.

§ 2º A medição de metano no gás de escapamento de veículos automotores leves, deverá ser feita conforme a metodologia citada no Código de Regulações Federal (*Code of Federal Regulations*) dos Estados Unidos da América, volume 40, parte 86, até publicação de norma brasileira equivalente.

Art. 20 O ensaio e a medição de aldeídos no gás de escapamento de veículos automotores leves de passageiros e leves comerciais do ciclo Otto deverão ser efetuados conforme as prescrições da Norma Brasileira NBR 12026.

Art. 21 O ensaio e a medição da emissão evaporativa dos veículos automotores leves de passageiros e leves comerciais do ciclo Otto deverão ser efetuados conforme as prescrições da Norma Brasileira NBR 11481.

Art. 22 Os ensaios de medição de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e material particulado no gás de escapamento de motores destinados a veículos automotores

pesados do ciclo Diesel deverão ser efetuados, conforme os métodos e procedimentos estabelecidos para os ciclos ESC, ELR e ETC da Diretiva 1999/96 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de dezembro de 1999, suas sucedâneas e complementos, até a publicação de Norma Brasileira equivalente.

Art. 23 Os veículos leves comerciais do ciclo diesel com massa total máxima autorizada maior que dois mil kg, podem atender, opcionalmente, às exigências estabelecidas para veículos pesados, desde que as características do motor permitam o ensaio, devendo ser atendidos os requisitos de complementação da documentação a serem estabelecidos por Instrução Normativa do IBAMA.

Art. 24 O IBAMA deverá coordenar os estudos e trabalhos relativos a qualquer revisão necessária aos limites máximos de emissão e prazos previstos nesta Resolução, convocando, a qualquer tempo, os órgãos afetos ao tema e deverá apresentar ao CONAMA o relatório final com a proposta para apreciação.

Art. 25 Os veículos para uso específico, uso militar, de competição e de lançamentos especiais, assim considerados mediante decisão motivada e exclusiva do IBAMA, podem ser dispensados das exigências desta Resolução.

Art. 26 Os veículos dotados de sistemas de propulsão alternativos ou que utilizem combustíveis não previstos nesta Resolução poderão ser dispensados parcialmente das exigências determinadas neste regulamento, mediante decisão motivada e exclusiva do IBAMA, por um período máximo de vinte e quatro meses.

Art. 27 Todos os combustíveis utilizados nos ensaios serão do tipo padrão para ensaio de emissão e deverão estar de acordo com as regulamentações da Agência Nacional do Petróleo, sendo que a mistura gasolina com álcool é preparada a partir dos respectivos combustíveis padrão de ensaio, contendo  $22,0\% \pm 1,0\%$  em volume de álcool etílico anidro carburante.

Art. 28 O fabricante ou importador deverá permitir a entrada de agente credenciado pelo IBAMA em suas instalações, sempre que este considere necessário para o cumprimento do disposto nesta Resolução.

Parágrafo único. A negativa da permissão de acesso às suas instalações, sujeitará o fabricante ou importador às penalidades da legislação em vigor.

Art. 29 O artigo 2º da Resolução CONAMA nº 14, de 13 de dezembro de 1995, passa a ser acrescido dos seguintes parágrafos:

“Art. 2º .....

§ 1º Para os veículos que não tenham os fatores determinados, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que sejam declarados num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente, contados a partir da data de emissão do CAC/LCVM.

§ 2º Durante este período, serão aplicados os fatores estabelecidos no artigo 4º, parágrafo 4º, desta, para a emissão do CAC/LCVM.

§ 3º Para os agrupamentos de motores que apresentarem um aumento na previsão do volume de vendas, no momento da revalidação do CAC/LCVM para o ano seguinte, superando o limite de 15.000 unidades por ano, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que estes sejam declarados num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente, contado a partir da data de emissão da revalidação do CAC/LCVM.”

Art. 30 O artigo 4º da Resolução CONAMA Nº 14, de 13 de dezembro de 1995, passa a ser acrescido do seguinte parágrafo:

“Art. 4º .....

§ 5º Os agrupamentos de motores que apresentarem um aumento na previsão do volume de vendas, no momento da revalidação da CAC/LCVM para o ano seguinte, superando o limite de 15.000 unidades por ano, deverão respeitar o prazo estabelecido no artigo 2º da Resolução CONAMA Nº 14/95, para a obtenção dos fatores de deterioração conforme a norma NBR 14008.”

Art. 31 O artigo 7º da Resolução CONAMA nº 14, de 1995, passa a ser acrescido dos seguintes parágrafos:

“Art. 7º .....

§ 1º Para os veículos que não tenham os fatores determinados, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que estes sejam declarados num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente, contado a partir da data de emissão do CAC/LCVM.

§ 2º Durante este período, serão aplicados os fatores estabelecidos no artigo 4º, parágrafo 4º, desta, para a emissão do CAC/LCVM.

§ 3º Para os agrupamentos de motores que apresentarem um aumento na previsão do volume de vendas, no momento da revalidação do CAC/LCVM para o ano seguinte, superando o limite de 15.000 unidades por ano, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que estes sejam declarados num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente, contado a partir da data de emissão da revalidação do CAC/LCVM.”

Art. 32 O artigo 9º da Resolução CONAMA nº 14, de 1995, passa a ser acrescido dos seguintes parágrafos:

“Art. 9º .....

§ 2º Para os veículos que não tenham os fatores determinados, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que estes sejam declarados, num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente contado a partir da data de emissão da LCVM.

§ 3º Durante este período, serão aplicados os fatores estabelecidos no artigo 4º, parágrafo 4º, desta, para a emissão da LCVM.

§ 4º Para os agrupamentos de motores que apresentarem um aumento na previsão do volume de vendas, no momento da revalidação da LCVM para o ano seguinte, superando o limite de 15.000 unidades por ano, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que estes sejam declarados num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente, contado a partir da data de emissão da revalidação da LCVM.”

Art. 33 Os fabricantes ou importadores de veículos automotores comerciais leves, equipados com motor do Ciclo Otto, que não tiverem obtido os fatores de deterioração conforme a Norma NBR 14008 deverão aplicar os fatores de deterioração do artigo 4º, parágrafo 4º, da Resolução nº 14/95 às emissões dos veículos, cujo agrupamento dos motores, classificados conforme esta mesma Norma, tenham previsão de vendas anuais menores do que 15.000 unidades.

Parágrafo único. Para os agrupamentos de motores que apresentarem um aumento na previsão do volume de vendas, no momento da revalidação do CAC/LCVM para o ano seguinte, superando o limite de 15.000 unidades por ano, admitir-se-á, em razão da duração dos ensaios para determinação dos fatores de deterioração, que estes sejam declarados num prazo máximo de trezentos e sessenta e cinco dias, fora o ano corrente, contado a partir da data de emissão da revalidação do CAC/LCVM.

Art. 34 O IBAMA, mediante decisão motivada e exclusiva, poderá conceder ao fabricante ou importador dispensa temporária de atendimento ao estabelecido nesta Resolução.

Art. 35 As definições necessárias ao cumprimento desta Resolução estão descritas no Anexo I.

Art. 36 O não cumprimento das disposições desta Resolução sujeitará os infratores às sanções previstas na Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e no Decreto nº 3.179, de 21 de setembro de 1999, sem prejuízo das demais sanções previstas na legislação específica.

Art. 37 Fica revogado o item 1.9 do inciso VI, da Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio 1986.

Art. 38 Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

MÔNICA MARIA LIBÓRIO

(PUBLICADA NO DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO Nº 224 - SEÇÃO 1, QUARTA-FEIRA, 20 DE NOVEMBRO DE 2002)

7

**ANEXO I**

**Definições**

1. Ciclo E.L.R. - denominado Ciclo Europeu de Resposta em Carga - ciclo de ensaio que consiste numa seqüência de quatro patamares a rotações constantes e cargas crescentes de 10% a 100%, para determinação da opacidade da emissão de escapamento;
2. Ciclo E. S. C - denominado Ciclo Europeu em Regime Constante - consiste de um ciclo de ensaio com 13 modos de operação em regime constante;
3. Ciclo E.T.C. - denominado Ciclo Europeu em Regime Transiente - ciclo de ensaio que consiste de 1800 modos transientes, segundo a segundo, simulando condições reais de uso;
4. Dispositivos e/ou sistemas da autodiagnose (OBD) - dispositivos ou sistemas instalados a bordo do veículo e conectados ao módulo eletrônico de controle, visando identificar deterioração ou mau funcionamento dos componentes do sistema de controle de emissões, alertar ao usuário do veículo para proceder à manutenção ou reparo do sistema de controle de emissões, armazenar e prover acesso às ocorrências de defeitos e ou desregulagens nos sistemas de controle e disponibilizar informações para interessados sobre estado de manutenção e reparo nos sistemas de controle de emissões;
5. Hidrocarbonetos Totais - total de substâncias orgânicas, incluindo frações de combustível não queimado e subprodutos resultantes da combustão, presentes no gás de escapamento e que são detectados pelo detector de ionização de chama.
6. Hidrocarbonetos Não Metano - parcela dos hidrocarbonetos totais, descontada a fração de metano;
7. Novas Homologações - são aquelas que abrangerem as novas configurações de veículos ainda não em produção ou as configurações já existentes com alterações no sistema de controle de emissão, excetuando-se, contudo as reválidas de homologações já existentes.
8. Veículos automotores - veículos automotores de uso rodoviário.
9. Novas configurações - modelos de veículos leves lançados no mercado, que não sejam derivados de veículos em produção.
10. Ônibus urbano - conforme definição de ônibus dada pela Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, Anexo I, de uso predominantemente urbano.
11. Micro-Ônibus - conforme definição de micro-ônibus dada pela Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, Anexo I.

**ANEXO B – Relatório de recebimento de matéria-prima VM-NP.**

<b>valourec précision</b> estéage 77		<b>MMH Test Report</b> EN 10204 Norm/3.1 Pattern		Printed On: 03.11.2005 16:10:54.57 Date : 10.10.2005 Customer: V&M DO BRASIL S.A. Packing List #: 393036 Ref. : 11863 Page 11 / 2						
V&M DO BRASIL S.A. AV OLINTO MEIRELES 65		5:303 VITRY LE FRANCOIS Cedex		Purchase Order / Date : 3243425 / 24.08.2005						
30640-010 BARREIRO-BELO HORIZONTE.MG To the attention of Quality/Logistics/Purchasing services										
<b>Product</b>										
Our / Your reference : 11863 / 2193196										
Type : SS EAF										
Final Status : Série										
Grade : NBK Normalisé										
Specification : ST 52										
Drawing : ISO 8635/1 - DIN 2391										
: NEANT /										
<b>Shipped quantities</b>										
Batches Qty	Dimensions	Dx D x E x P	Unit	Length	Quantity	Total Length	Weight	Heat	PE1 /	PE2 /
3	3.000 mm	6.000 mm	1.500 mm	6.000 mm	4.124	24.744.000 m	4.108 T	ZT348977	606542	
						81181.102 FT	81.191 LBS			
<b>Cast Analysis</b>										
Min. Spmn	Heat	C	Min	Si	P	S				
Max. Spmn	220		1600	560	25	26				
Brill	Millime		Millime	Millime	Millime	Millime				
Results	ZT348977	180	1350	250	15	3				
<b>Mechanical Properties</b>										
Min. Spmn	Test Prod. Batch	Heat	TS	Elongation	Rp 0,2					
Max. Spmn	606542	ZT348977	190	20,60	380					
Unit			MPa	%	MPa					
Results	1	606542	ZT348977	195,80	380					
<b>Hardness</b>										
Min. Spmn	Test Prod. Batch	Heat	HV							
Max. Spmn	606542	ZT348977	197							
Unit			HV							
Results			151							

Date : 19.10.2005  
 Customer: VM DO BRASIL S.A.  
 Packing List # : 393426  
 Ref. : 11862

**Mill Test Report**  
 EN 10204 Norm/3.1 Pattern

VPE PRODUITS AUTOMOBILES  
 Z.I. MAROLLES  
 77  
 51305 VITRY II FRANCOIS Cedex

valourec précision  
 étirage

**Micrography**

Test	Prod. Batch	Heat	Inter defects
Min. Spec. Unit	606542	ZT348977	20 $\mu$ M
Max. Spec. Unit			OK

**Roughness**

Test	Prod. Batch	Heat	Ins $\phi$ Rt
Min. Spec. Unit	606542	ZT348977	5 $\mu$ M
Max. Spec. Unit			OK

**Non Destructive Tests**

Test	Prod. Batch	Heat	Eddy C test	Visual inspect.
Results	606542	ZT348977	100% BATCH	100% BATCH

Quality department approved agent	Inspection date	Name
	10.10.2005	Marcel JACQUEMIN

All tubes were produced in accordance to the norm and requirements of the order regarding grade, quality and heat treatment throughout their whole length

**ANEXO C - Relatório de recebimento de matéria-prima P&P.**



Metalúrgica Cartec LTDA  
 Av Presidente Wilson, 2825  
 03107- 002 Ipiranga - Sao Paulo  
 BRASILIEN

Zeugnis - Nummer : 39189  
 Certificate No. / Certificat No.

**A b n a h m e p r ü f z e u g n i s**  
 Inspection certificate / Certificat de reception  
 DIN EN 10 204 - 3.1

Ihre Bestellung Your Order / Votre Commande	Kommissions-Nr. Confirmation / Confirmation Item	Pos. Poste	Lieferschein Del. Note / B. livraison
27.03.06 PP01/March/06 Valter Kwast	155832	0010	90376

Erzeugnis / Product / Produit : Nahtlose P+P-Hochdruck-Stahlrohre  
 Abmessung / Size / Dimension mm : AD: 8,00 ID: 3,000 Wand: 2,500  
 Werkstoff / Material / Materiel : St 52  
 Chargen-Nr. / Batch no. / Lot no. : 100892  
 Anforderung / Requirements / Exigence: DIN ISO 8535-1 10/95 - Level Q  
 Toleranzen / Tolerances / Tolerances : OD +/- 0,10 mm ID +/- 0,05 mm  
 Ausführung / Finishing / Type : NBK  
 Mengen / Quantities / Quantites : 178 STK 1.079,05 M 362,00 KG

Schmelzen-Analyse / Heat analysis / Analyse sur coulee %

Schmelze Heat / Coulee	C	Si	Mn	P	S
361951	0,190	0,250	1,420	0,022	0,001

Werther, den 26.06.06

*A. Inceband*



Zeugnis-Nummer: 39189  
Certificate No.

Blatt: 2  
Page

Prüfergebnisse  
Test results

Probe-Nr. Sample No.	Zugversuche: Tensile tests			Härteprüfung: Hardness tests
	Streck-/Dehngrenze Upper yield-/Proof stress $R_{eH}$ (N/mm <sup>2</sup> ) $R_{p0,2}$	Zugfestigkeit Tensile strength $R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	Dehnung Elongation A (%)	Härte Hardness HV 10
Anforderungen Requirements	≥ 355	≥ 490	≥ 22	≤ 194
1	376	534	25,4	162/162
2	381	536	24,8	162/163
3	372	530	25,6	160/162

(1 N/mm<sup>2</sup> = 1 MPa)

Besichtigung und Maßprüfung:  
Visual inspection and control of dimensions

ohne Beanstandung  
without objection

Materialverwechslungsprüfung:  
Material identification testing

ohne Beanstandung  
without objection

Wirbelstromprüfung gemäß PRP 02-74:  
Eddy current testing

ohne Beanstandung  
without objection

Technologische Prüfungen / Biegeversuch:  
Mechanical tests / Bending test

ohne Beanstandung  
without objection

Technologische Prüfungen / Stauchversuch:  
Mechanical tests / Upsetting test

ohne Beanstandung  
without objection

Rauhtiefe:  
Depth of roughness

ID-Ra: 0,34-1,03 µm  
ID-Rz: 3,09-5,42 µm

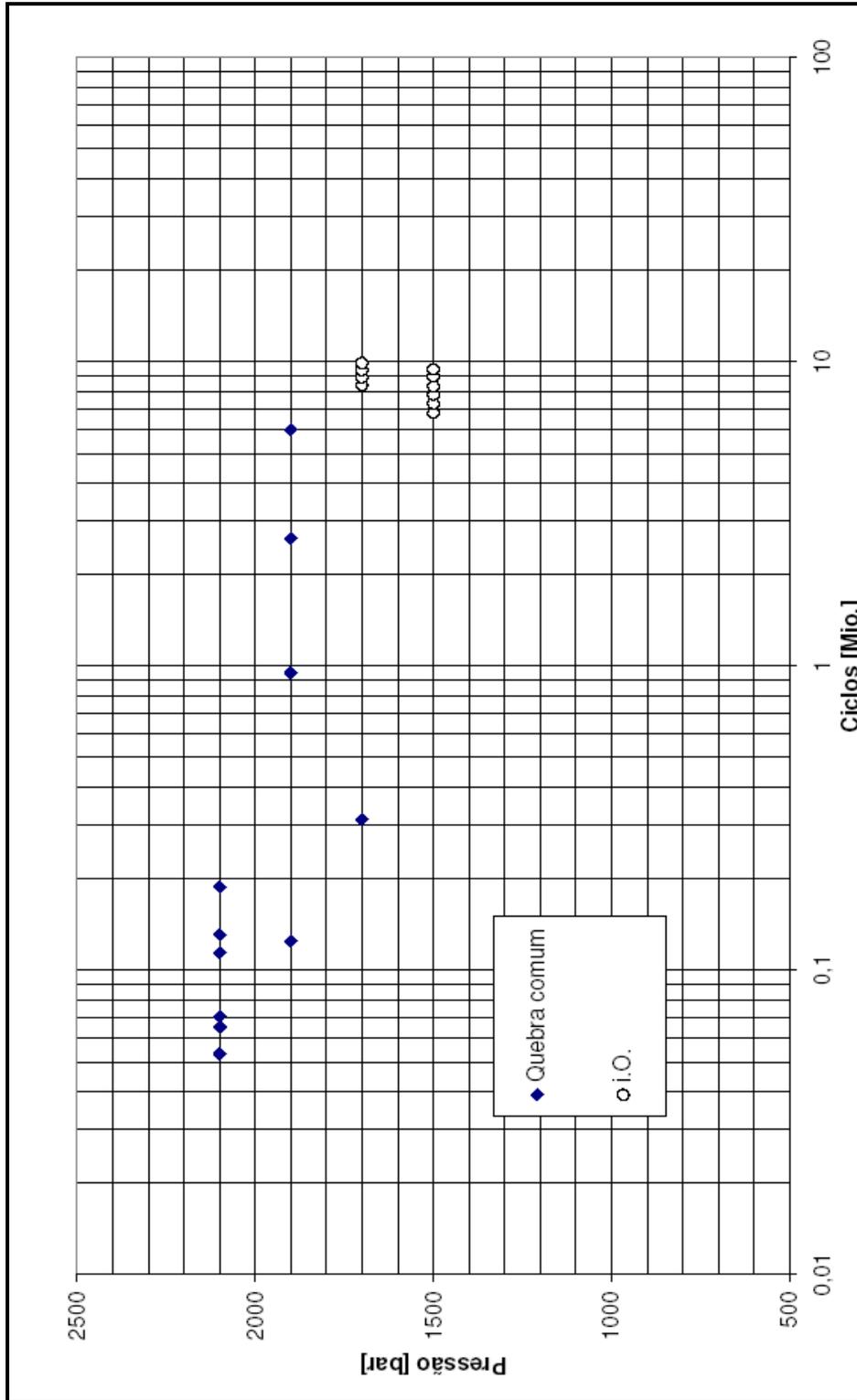
Fehlertiefe ID ≤ 0,05 mm, max. 5 Fehler > 0,02 mm:  
Depth of ID-defects

7,2 - 20,1 µm  
without objection

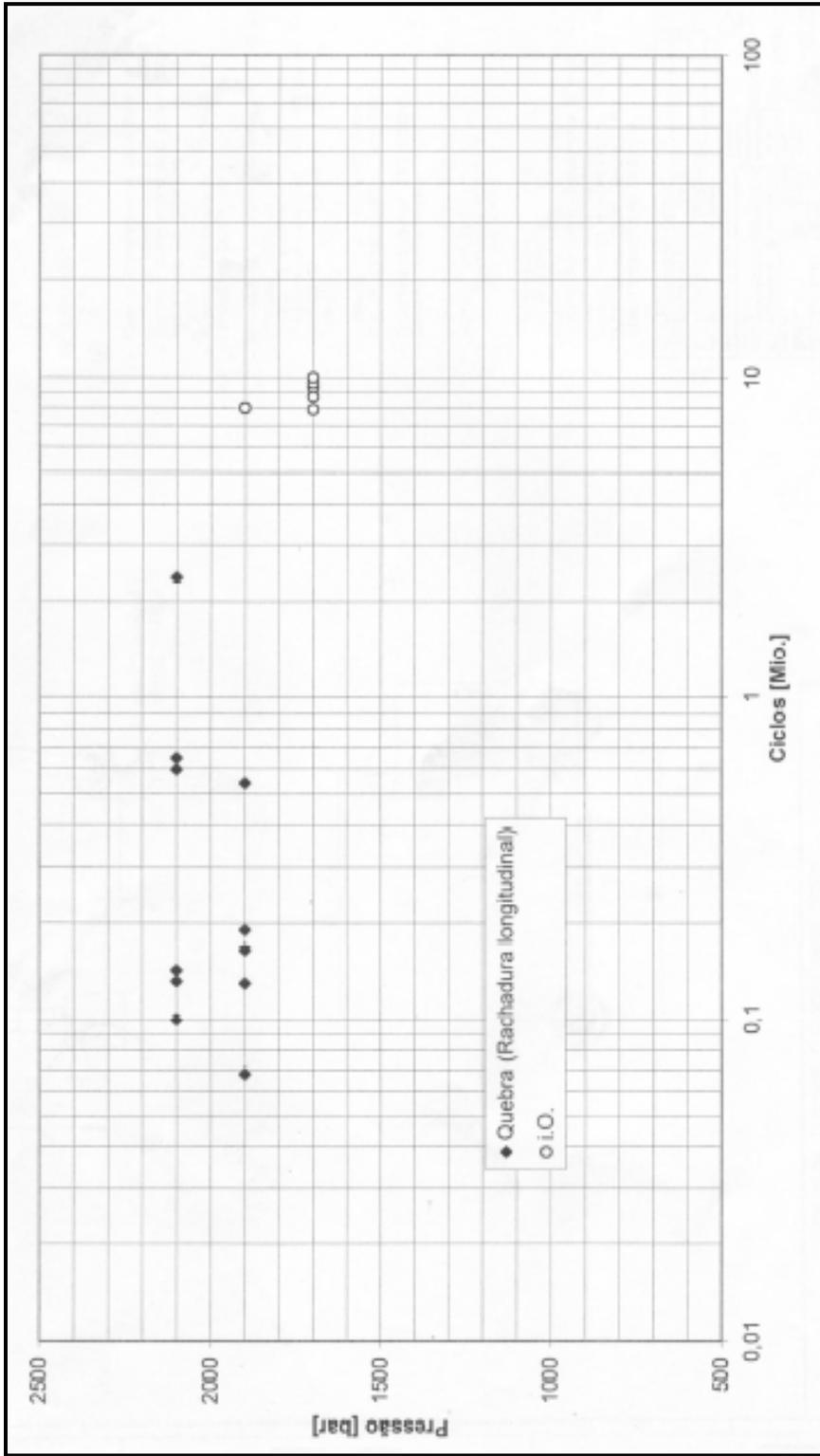
Werther, den 26.06.2006

Der Abnahmebeauftragte

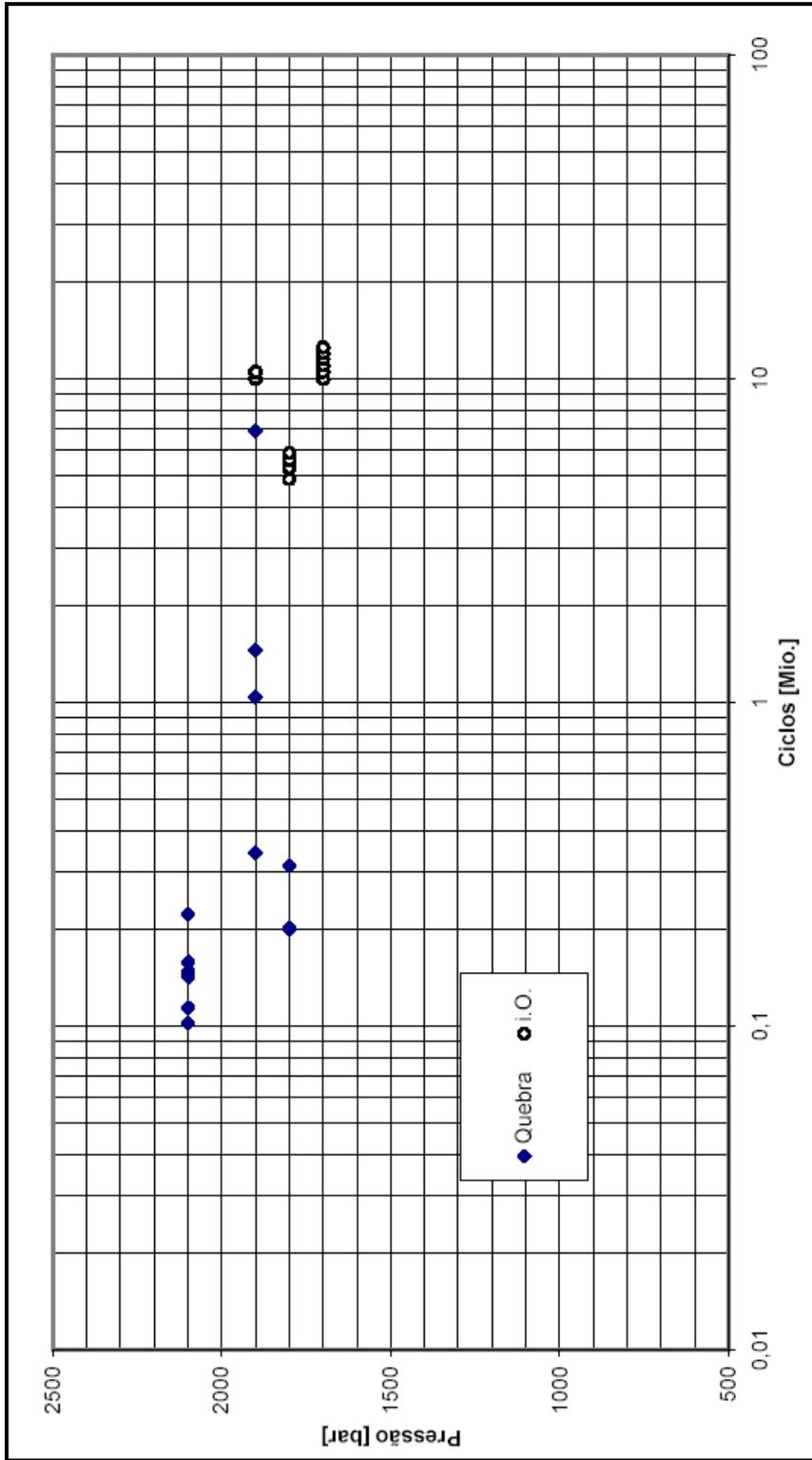
**ANEXO D** – Resultado do ensaio de fadiga, onde os tubos autofretados a 2800 bar resistiram a  $10^7$  ciclos, sem quebra quando submetidos à pressão de 1500 bar (**Relatório 06/112**).



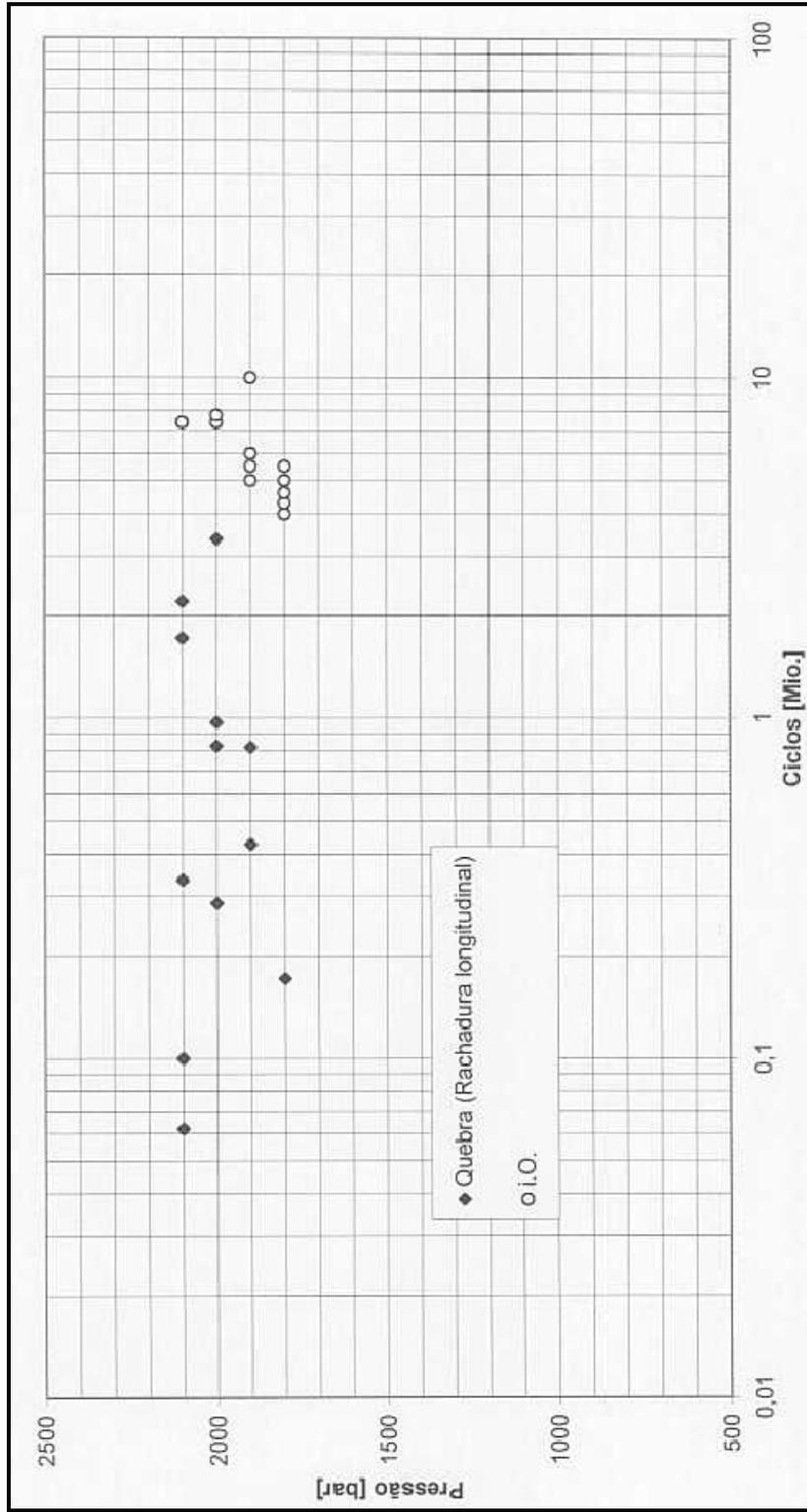
**ANEXO E** - Resultado do ensaio de fadiga, onde os tubos autofretados a 3100 bar resistiram a  $10^7$  ciclos, sem quebra quando submetidos à pressão de 1700 bar (**Relatório 06/070**).



**ANEXO F** - Resultado do ensaio de fadiga, onde os tubos autofretados a 3100 bar resistiram a  $10^7$  ciclos, sem quebra quando submetidos à pressão de 1700 bar (**Relatório 06/129**).



**ANEXO G** - Resultados do ensaio de fadiga, onde os tubos autofretados a 3100 bar resistiram a  $10^7$  ciclos, sem quebra quando submetidos à pressão de 1800 bar (**Relatório 06/074**).



**ANEXO H** - Resultados do ensaio de fadiga com os tubos P&P. Os tubos autofretados a 3100 bar resistiram a  $10^7$  ciclos, sem quebra quando submetidos à pressão de 2400bar (**Relatório 06/089**).

