

CARLOS EDUARDO TADEU SUZUKI

**ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS PARA O
DESENVOLVIMENTO, PROJETO E FABRICAÇÃO DE TANQUES DE
COMBUSTÍVEL PARA AUTOMÓVEIS DE PASSAGEIROS DENTRO
DA GENERAL MOTORS DO BRASIL**

**SÃO PAULO
2007**

CARLOS EDUARDO TADEU SUZUKI

**ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS PARA O
DESENVOLVIMENTO, PROJETO E FABRICAÇÃO DE TANQUES DE
COMBUSTÍVEL PARA AUTOMÓVEIS DE PASSAGEIROS DENTRO**

**Trabalho de Conclusão de curso
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Mestre Profissional
em Engenharia Automotiva**

**ESTUDO COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS PARA O
DESENVOLVIMENTO, PROJETO E FABRICAÇÃO DE TANQUES DE
COMBUSTÍVEL PARA AUTOMÓVEIS DE PASSAGEIROS DENTRO
DA GENERAL MOTORS DO BRASIL**

**Trabalho de conclusão de curso
apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Mestre Profissional
em Engenharia Automotiva**

**Área de concentração:
3149 – Engenharia Automotiva**

**Orientador:
Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**

**SÃO PAULO
2007**

Dedico este trabalho a Raul e Marinha, meus pais, que tem sido minha base, grande razão e incentivo para a realização deste trabalho e de todas as conquistas de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha, que compartilhou de seus conhecimentos e de sua precisa orientação no decorrer deste trabalho.

Aos companheiros Michel Pra, Leonardo Berger, André Ribeiro, Marcelo Valero, que dedicaram parte de seu tempo para a obtenção das amostras e execução de ensaios fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais pelo eterno apoio e amor em todos os momentos de minha vida.

Aos meus amigos da 4ª Turma de Mestrado em Engenharia Automotiva, pela paciência e amizade.

Finalmente agradeço ao time da GM, e também a todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho visa esclarecer a seguinte pergunta: "Qual material é o mais adequado para a utilização em projetos de tanque de combustível para veículos automotivos?". Atualmente existem duas alternativas básicas em matérias primas na construção dos tanques de combustível, sendo elas: chapas de ligas de aços carbono e plásticos de alta densidade. Para responder esta pergunta, o tema "Estudo comparativo de alternativas para o desenvolvimento, projeto e fabricação de tanques de combustível para automóveis de passageiros dentro da General Motors do Brasil" aborda as características de desempenho das duas alternativas (metal ou plástico) através da perspectiva das montadoras de veículos do mercado brasileiro, levando em consideração segmentos críticos de projeto, como processo de manufatura, forma, massa, segurança, corrosão e reciclagem. Estabelece um processo de análise comparativa entre a utilização de chapas de aço ou plásticos de alta densidade em projetos de tanque de combustível, possibilitando ao engenheiro de projetos tomar a decisão mais correta baseado nas características específicas de cada projeto. É feito um estudo de caso utilizando a matriz de decisão proposta e também um ensaio experimental em laboratório de simulação de impacto. Por fim, apresenta-se a conclusão que a pergunta elaborada inicialmente não pode ser respondida de forma generalizada e os critérios de desempenho podem variar consideravelmente sua influência na decisão de acordo com o escopo do projeto.

PALAVRAS CHAVE: Tanques de Combustível. Projeto. Permeabilidade. Corrosão. Matriz de Decisão.

ABSTRACT

This project aims to clarify the following question: "Which material is more appropriated for being applied in project of fuel tanks for automotive vehicles?". Nowadays there are two basic raw materials for construction of fuel tanks, being: sheet of carbon steel alloy a high density plastics. To answer the question, the theme "Comparative study of development, project and production alternative for passengers vehicles fuel tank inside of General Motors do Brasil " approaches the performance characteristics of the two alternatives (metal or plastic) through the automakers perspective of the Brazilian market at critical segments of project, like manufacturing, shape, mass, safety, corrosion and recycling. Establish a comparative analysis process within steel sheets or high density plastics applied for fuel tank projects, allowing the product engineer to make the right decision based on the specific characteristics of each project. A case of study is made using the decision matrix proposed and also a laboratory experimental test is performed to simulate the impacts in the fuel tank. Finally, shows the conclusion of the question can not be answered in general ways and the performance criteria may have different influence over the decision based on the project scope.

KEY WORDS: Fuel Tank. Project. Permeability. Corrosion. Decision Matrix.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – Cenário de fábricas de automóveis em 1996 no Mercosul.....	01
FIGURA 02 – Cenário de fábricas de automóveis em 2005 no Mercosul.....	02
FIGURA 03 – 1º tanque de combustível plástico em produção (adaptado da apresentação de Kautex [5].....	04
FIGURA 04 – Evolução dos tanques plásticos de combustível.....	05
FIGURA 05 – Evolução dos tanques metálicos de combustível	06
FIGURA 06 – Participação no mercado mundial de tanques plásticos de combustível.....	07
FIGURA 07 – Estimativa de crescimento de participação de mercado de tanques plásticos de combustível	08
FIGURA 08 – Processo esquemático de destilação fracionada do petróleo.....	13
FIGURA 09 – Componentes principais de um sistema de combustível	22
FIGURA 10 – Componentes básicos de um tanque de combustível	23
FIGURA 11 – Principais funções do sistema de combustível.....	23
FIGURA 12 – Abastecimento de combustível através do gargalo.....	24
FIGURA 13 – Exemplos de gargalos do sistema de combustível utilizados em veículos brasileiros	24
FIGURA 14 – Posicionamento do medidor de nível de combustível dentro do tanque.....	25
FIGURA 15 – Esquema de uma válvula de respiro em corte.....	26
FIGURA 16 – Módulo de alimentação de combustível	27
FIGURA 17 – Esquema de uma linha de revestimento contínua por imersão a quente.....	32
FIGURA 18 – Esquema de uma linha contínua de produção de chapas com revestimento.....	36
FIGURA 19 – Esquema de uma molécula de etileno.....	40
FIGURA 20 – Representação esquemática da estrutura de um tanque de plástico multicamadas	43
FIGURA 21 – Estrutura hierárquica para a escolha do material aplicado em um projeto de tanque de combustível.....	46
FIGURA 22 – Prensa hidráulica para operações de repuxo.....	48

FIGURA 23 – Exemplo da operação de repuxo em tanques metálicos de combustível.....	48
FIGURA 24 – Operação de estampagem, corte e furos do tanque metálico de combustível após	49
FIGURA 25 – Operação de solda por rolos (Costura) dos tanques metálicos de combustível.....	50
FIGURA 26 – Operação de solda dos componentes dos tanques metálicos de combustível.....	50
FIGURA 27 – Operação de pintura manual de tanques metálicos de combustível...51	
FIGURA 28 – Montagem final dos componentes dos tanques metálicos de combustível	52
FIGURA 29 – Teste de verificação de vazamento em tanques metálicos de combustível	52
FIGURA 30 – Operação de Extrusão Sopro de tanques plásticos de combustível...53	
FIGURA 31 – Operação de saída do tanque plástico do molde de sopro.....54	
FIGURA 32 – Processo de resfriamento do tanque plástico de combustível	54
FIGURA 33 – Processo de montagem dos componentes do tanque plástico de combustível.....	55
FIGURA 34 – Exemplos de tanques plásticos de combustível de forma complexa.....	56
FIGURA 35 – Gráfico de massa/cm ² de chapas de plásticos e chapas de aço.....58	
FIGURA 36 – Exemplos de veículos de passageiros submetidos aos testes de impactos frontais segundo norma FMVSS 301	59
FIGURA 37 – Exemplos de veículos de passageiros submetidos aos testes de impactos laterais e traseiros conforme norma FMVSS 301.....	60
FIGURA 38 – Dispositivo de teste do trenó executado em tanques de combustível.....	61
FIGURA 39 – Procedimento de teste conforme norma ECE R34 Anexo 5.....	63
FIGURA 40 – Testes de exposição ao fogo para tanques plásticos conforme ECE R34 anexo 5.....	64
FIGURA 41 – Exemplos de tanques de combustível após teste de exposição ao fogo.....	64
FIGURA 42 - Representação esquemática de uma célula eletroquímica.....	66
FIGURA 43 - Estágio inicial da reação anódica.....	67

FIGURA 44 - Condições de equilíbrio metal/eletrólito.....	68
FIGURA 45 - Esquemática das formas de corrosão.....	72
FIGURA 46 - Mecanismo de corrosão por frestas.....	77
FIGURA 47 - Variações nas formas das seções transversais de pites.....	78
FIGURA 48 - Diagrama esquemático para determinação do fator de pite.....	79
FIGURA 49 - Corrosão intergranular na região da borda do grão causada pela deficiência de cromo.....	81
FIGURA 50 - Representação esquemática dos defeitos causados por corrosão- erosão na parede de um tubo.....	84
FIGURA 51 - Efeito do meio corrosivo na curva tensão-elongação.....	85
FIGURA 52 - Evolução normas de emissões evaporativas até 2004 conforme agências – USA (EPA/CARB).....	88
FIGURA 53 - Micrografia de uma seção transversal da parede de um tanque na área da junção do molde	89
FIGURA 54 – Peças desenvolvidas a partir de material reciclado de tanques plásticos de combustível	93
FIGURA 55 - Localização do tanque de combustível - veículo S10 Cabine Dupla....	95
FIGURA 56 - Esquemática das definições de volumes internos de um tanque de combustível.....	96
FIGURA 57 - Ilustração da proposta de tanque metálico (alternativa 01).....	97
FIGURA 58 - Ilustração da proposta de tanque plástico (alternativa 02).....	98
FIGURA 59 - Estrutura hierárquica para a escolha do material metálico ou plástico aplicado em um projeto de tanque de combustível.....	99
FIGURA 60 – Dimensões básicas da amostra 01.....	104
FIGURA 61 – Dimensões básicas da amostra 03.....	105
FIGURA 62 - Dispositivo de teste para simulação de impacto (Sled Test).....	105
FIGURA 63 – Características do dispositivo de teste de impacto.....	106
FIGURA 64 - Amostras 02 e 03 condicionadas a temperatura de -40°C por 24 horas.....	107
FIGURA 65 - Posicionamento do tanque de combustível para o ensaio.....	107
FIGURA 66 - Fotos das amostras após a execução do ensaio experimental.....	109

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Classificação dos hidrocarbonetos.....	14
TABELA 02 - Especificações do álcool anidro e do álcool hidratado carburantes (Resolução ANP n° 36/2005, 2005).....	19
TABELA 03 - Classificação das chapas finas quanto a conformação segundo especificação da General Motors do Brasil.....	28
TABELA 04 - Composição química das chapas de aço segundo especificação da General Motors do Brasil.....	29
TABELA 05 - Propriedades mecânicas das chapas de aço segundo especificação interna da General Motors do Brasil	30
TABELA 06 - Valores mínimos de altura de embutimento em mm conforme grau de estampagem.....	30
TABELA 07 - Especificações típicas de revestimento de chapas galvanizadas por imersão a quente.....	33
TABELA 08 - Especificações típicas de revestimento Ferro/Zinco de chapas por imersão a quente.....	34
TABELA 09 - Especificação e tolerâncias de revestimentos de zinco por eletrodeposição.....	37
TABELA 10 - Especificação e tolerâncias de revestimentos de ligas zinco por eletrodeposição.....	38
TABELA 11 - Propriedades mecânicas do polietileno conforme ASM International Handbook	42
TABELA 12 - Propriedades térmicas do polietileno conforme ASM International Handbook	42
TABELA 13 - Potenciais padrão de redução (25 °C, Volts vs Eletrodo de hidrogênio padrão).....	69
TABELA 14 - Série galvânica de metais em água do mar.....	75
TABELA 15 - Pesos atribuídos para cada critério de desempenho.....	100
TABELA 16 - Matriz de decisão das alternativas de tanque de combustível.....	101

ABREVIATURAS E SIGLAS

GM:	General Motors
GMB:	General Motors do Brasil
ANP:	Agência Nacional de Petróleo
SAE:	Society of Automotive Engineers
Plasfuelsys:	Associação de Fabricantes de Plásticos para Sistemas de Combustível
PE:	Polietileno.
PEBD:	Polietileno de Baixa Densidade.
PEBDL:	Polietileno de Baixa Densidade Linear.
PEAD:	Polietileno de Alta Densidade
LEV:	Low Emission Vehicle
HC:	Hidrocarboneto
PZEV:	Partial Zero Emission Vehicle
IAD:	Índice Antidetonante
MON:	Motor Octane Number
ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EVOH:	Etileno Vinil Álcool
EPA:	Environmental Protection Agency
CARB:	California Air Resources Board
QAV:	Querosene para Aviação
AEAC:	Álcool Etílico Anidro Combustível
AEHC:	Álcool Etílico Hidratado Combustível
GN:	Gás Natural
GNL:	Gás Natural Liquefeito
HDG:	Hot Dip Galvanized
GA:	Galvaneal (Revestimento de liga Ferro e Zinco)
EZ:	Revestimento Zinco Puro
DFSS:	Design For Six Sigma
NHSTA:	National Highway Traffic Safety Administration
FMVSS:	Federal Motor Vehicle Safety
CONTRAN:	Conselho Nacional de Trânsito
AISI:	American Iron and Steel Institute
ECE:	Economic Commission for Europe

ECC: Economic Commission for Europe
NACE: International Corrosion Society
SCC: Stress Corrosion Cracking
SHED: Sealed Housing for Evaporative Determinations
RCRA: Resource Conservation and Recovery Act
QAS: Quality Audit Survey
GP: Grau de Polimerização do Polímero
ASM: American Society of Metals

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	01
1.2. HISTÓRICO DO COMPONENTE TANQUE DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO	04
1.3. CENÁRIO MUNDIAL DA PARTICIPAÇÃO DE TANQUES PLÁSTICOS DE COMBUSTÍVEL VERSUS TANQUES METÁLICOS	07
1.4. JUSTIFICATIVA	09
1.5. OBJETIVO.....	10
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	11
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	12
2.1. PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS	12
2.1.1. COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS.....	12
2.1.2. COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS.....	12
2.1.2.1. HIDROCARBONETOS.....	13
2.1.2.2. ÓLEO DIESEL	15
2.1.2.3. QUEROSENE	15
2.1.2.4. GASOLINA.....	16
2.1.2.5. ÁLCOOL.....	18
2.1.2.6. COMBUSTÍVEIS ESPECIAIS PARA CORRIDAS.....	19
2.1.2.7. BIO-DIESEL.....	20
2.1.3. COMBUSTÍVEIS GASOSOS	21
2.2. COMPONENTES DE UM SISTEMA DE COMBUSTÍVEL.....	22
2.3. MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO DE TANQUES DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVOS	27
2.3.1. CHAPAS METÁLICAS DE AÇO CARBONO	27
2.3.1.1. PROPRIEDADES DAS CHAPAS DE AÇO CARBONO	28
2.3.1.2. REVESTIMENTOS DE CHAPAS DE AÇO	31
2.3.1.2.1. REVESTIMENTOS DE CHAPAS DE AÇO POR PROCESSO DE IMERSÃO A QUENTE – (<i>HOT DIP</i>).....	31
2.3.1.2.2. REVESTIMENTOS DE CHAPAS DE AÇO POR PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO – (<i>ELECTROPLATED</i>)	35

2.3.2. PLÁSTICOS DE ALTA DENSIDADE (PEAD).....	38
2.3.2.1. INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS	38
2.3.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS.....	39
2.3.2.3. POLIETILENO (PE).....	40
2.3.2.4. PROPRIEDADES TÍPICAS DO POLIETILENO	41
2.3.2.5. POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE APLICADO EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVOS	42
3. MODELOS DE DECISÃO	44
3.1. ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA.....	45
4. PARAMETROS DE DESEMPENHO DOS TANQUES METÁLICOS DE COMBUSTIVEL VERSUS TANQUES PLÁSTICOS	47
4.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TANQUES DE COMBUSTÍVEL.....	47
4.1.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TANQUES METÁLICOS DE COMBUSTÍVEL	47
4.1.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TANQUES PLÁSTICOS DE COMBUSTIVEL	53
4.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE TANQUES METÁLICOS VERSUS PLÁSTICOS	55
4.2. FORMA E DESENHO INDUSTRIAL	56
4.3. MASSA.....	57
4.4. SEGURANÇA.....	59
4.4.1. TESTES DE IMPACTO.....	59
4.4.2. PROTEÇÃO CONTRA FOGO	62
4.5. PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO.....	65
4.5.1. PRINCÍPIOS DA CORROSÃO	65
4.5.2. FATORES QUE AFETAM A CORROSÃO.....	70
4.5.3. FORMAS DE CORROSÃO.....	73
4.6. PERMEABILIDADE DE HIDROCARBONETOS E EMISSÕES EVAPORATIVAS.....	87
4.7. RECICLAGEM.....	90
5. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	94
5.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	94
5.2. MATRIZ DE DECISÃO ENTRE MATERIAL METÁLICO OU PLÁSTICO PARA A APLICAÇÃO EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL.....	94

5.2.1. APRESENTAÇÃO DO PROJETO	94
5.2.1.1. DADOS INICIAIS.....	94
5.2.1.2. MOTIVO	95
5.2.1.2.1. DEFINIÇÃO DE CAPACIDADE DE VOLUME EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL	96
5.2.2. APRESENTAÇÃO DAS ALTERNATIVAS	97
5.2.3. ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA	99
5.2.3.1. PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DESEMPENHO	100
5.2.4. MATRIZ DE DECISÃO (RESULTADOS).....	100
5.3. ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO	101
6. ENSAIO EXPERIMENTAL.....	103
6.1. AMOSTRAS DE TESTE	103
6.2. EQUIPAMENTO DE TESTE.....	105
6.3. PROCEDIMENTO DE TESTE.....	106
6.4. RESULTADOS	108
6.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	110
7. CONCLUSÕES.....	111
8. TRABALHOS FUTUROS	112
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

ANEXOS

ANEXO I – CRITÉRIOS DE DESEMPENHO	117
ANEXO II – FOTOS ADICIONAIS DOS RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL – AMOSTRA 01.....	118
ANEXO III – FOTOS ADICIONAIS DOS RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL – AMOSTRA 02	119
ANEXO IV – FOTOS ADICIONAIS DOS RESULTADOS DO ENSAIO EXPERIMENTAL – AMOSTRA 03	120

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A indústria automobilística brasileira vive hoje uma situação impar no cenário mundial, pois até 1990 havia apenas os quatro fabricantes tradicionais (Volkswagen, General Motors, Fiat e Ford) disputando o primeiro lugar em participação no mercado brasileiro. Em 1996, foram instaladas 26 novas fábricas de montagem de automóveis associadas a 12 fabricantes conforme mostra a Figura 1.

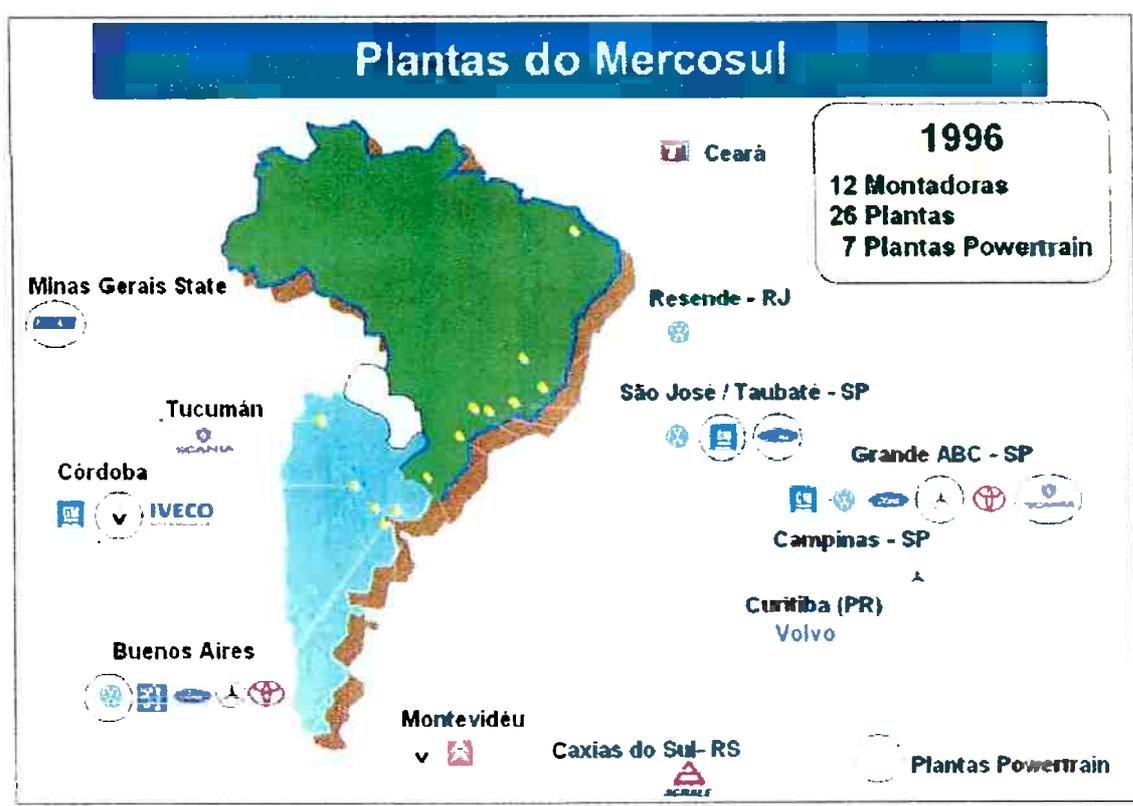


Figura 01 – Cenário de fábricas de automóveis em 1996 no Mercosul. (Relatório Interno General Motors do Brasil – R. Bibó, 2005)

Em 2005 este cenário transformou-se drasticamente e o mercado brasileiro passou a abrigar mais 7 montadoras e mais 15 plantas de montagem, conforme mostra a Figura 2. Assim o mercado automobilístico no Brasil tornou-se mais competitivo com os 10 maiores fabricantes de automóveis do mundo. Neste cenário, cada montadora elabora sua estratégia a partir do modo como a empresa compreende o mercado e traduz isto em objetivos e em formas de alcançá-los.

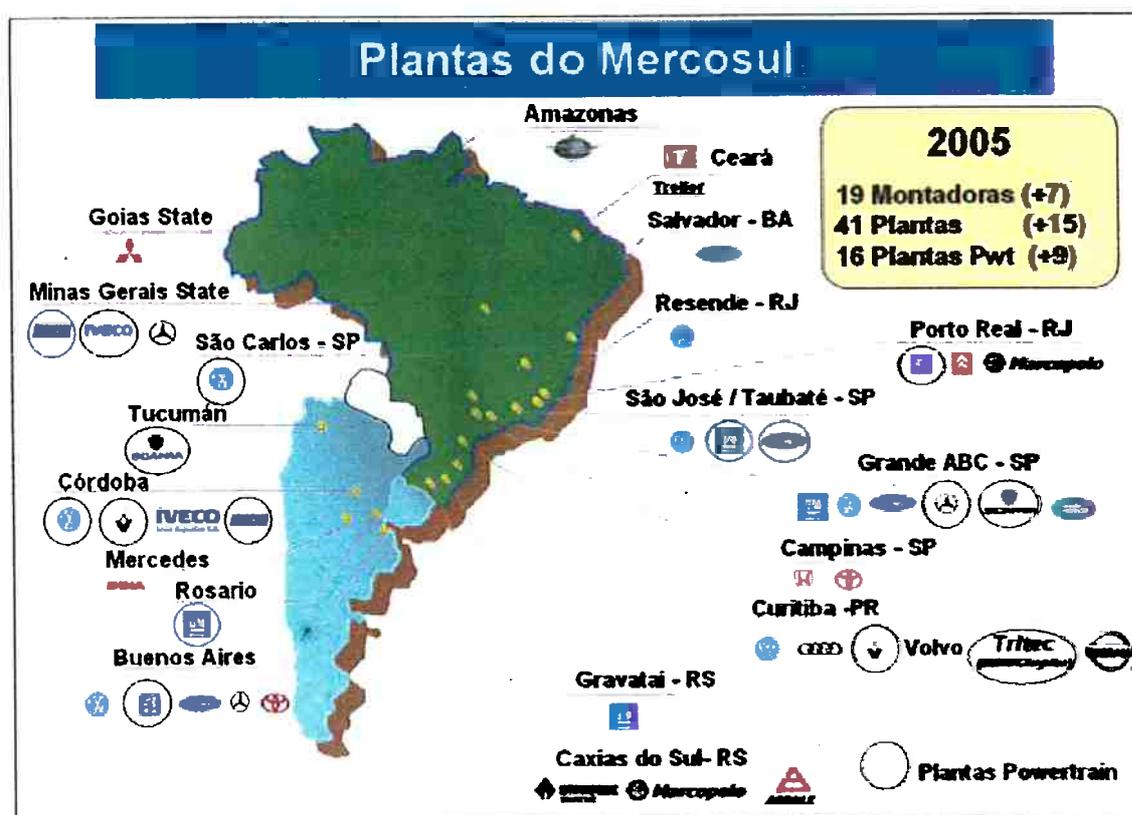


Figura 02 – Cenário de fábricas de automóveis em 2005 no Mercosul. (Relatório Interno General Motors do Brasil – R. Bibo, 2005)

Portanto o fato de a indústria automobilística estar direcionando grandes investimentos em atividades voltadas ao desenvolvimento e adaptação de produtos, na linha do que demonstrou CHANARON [1], encontra explicação quando se analisa o contexto de competitividade que se tem estabelecido neste setor. Se, em passado pouco distante, o preço e a qualidade dos veículos eram elementos determinantes da sua competitividade, atualmente a habilidade em fornecer respostas rápidas às

demandas do mercado, a partir do desenvolvimento e introdução de novos produtos, tem sido considerada como fator estratégico entre as empresas automobilísticas.

De acordo com CLARK e FUJIMOTO [2], três movimentos têm ajudado a explicar essa mudança:

a) Crescente competição internacional entre as empresas, o que tem contribuído para que a escala dos produtos se torne cada vez mais global.

b) Crescente fragmentação do mercado, o que tem explicado a maior intensidade no lançamento de novos produtos, com redução de vendas no mercado por volume de modelo.

c) Diversidade, maior complexidade e ampliação da tecnologia incorporada nos veículos.

E segundo PUGH [3], acrescenta-se ainda um quarto elemento que é a redução do ciclo de vida dos produtos, o que ajuda a explicar a iniciativa das empresas em ampliar o número de modelos derivados de uma mesma plataforma, de modo a otimizar os investimentos relacionados ao desenvolvimento de um produto totalmente novo. Afinal quanto maior a complexidade envolvida em um novo projeto, maior será o tempo dos ciclos de desenvolvimentos necessários para o lançamento do veículo no mercado.

O desenvolvimento de um sistema de combustível para veículos automotivos não poderia ter uma estratégia diferente, o desafio está em oferecer um sistema de combustível de qualidade, que atenda todas as especificações de engenharia a um preço competitivo. Para isso as montadoras buscam em seus fornecedores de componentes, a co-responsabilidade pelo desenvolvimento, tornando o processo de desenvolvimento mais baratos e eficientes do que executar todo o desenvolvimento somente dentro da montadora.

1.2. HISTÓRICO DO COMPONENTE TANQUE DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVO

Segundo GARRET, T.K. [4], o primeiro tanque de combustível fabricado em material plástico (polietileno) aplicado em automóveis ocorreu em 1967 pela Porsche, no modelo Rally Monte-Carlo. Mas somente em 1976 a Volkswagen foi a pioneira e introduziu um tanque plástico, produzido através do processo de sopro moldado em escala de produção, em uma série limitada do "VW-Passat", na época a redução de peso foi na ordem de 30% a 40% em comparação ao tanque metálico. Na Figura 3 [5] temos o primeiro tanque de combustível de produção em série.



Figura 3 – 1º tanque plástico de combustível em produção (adaptado da apresentação de Kautex [5])

Desde então a substituição da utilização de tanques metálicos de combustível pelos tanques plásticos ocorreu gradativamente nas montadoras, tendo seu auge nos anos 90 com a implementação de soluções mais eficientes na conformação de plásticos para a aplicação em tanques de combustível.

O aumento da complexidade dos projetos de automóveis e as leis de emissões de hidrocarbonetos no ambiente foram os principais fatores que contribuíram para as inovações dos tanques de material plástico.

Em 1994 teve o surgimento do primeiro tanque plástico em multicamadas de combustível conhecido comercialmente por "COEX", para atender uma das primeiras normas de emissões criadas nos Estados Unidos "Low Emission Vehicle" - (LEV) com o objetivo de reduzir a poluição do ar através do controle de emissões de Hidrocarbonetos (HC). A figura 4 [5] mostra a evolução do tanque plástico de combustível ao longo do tempo.

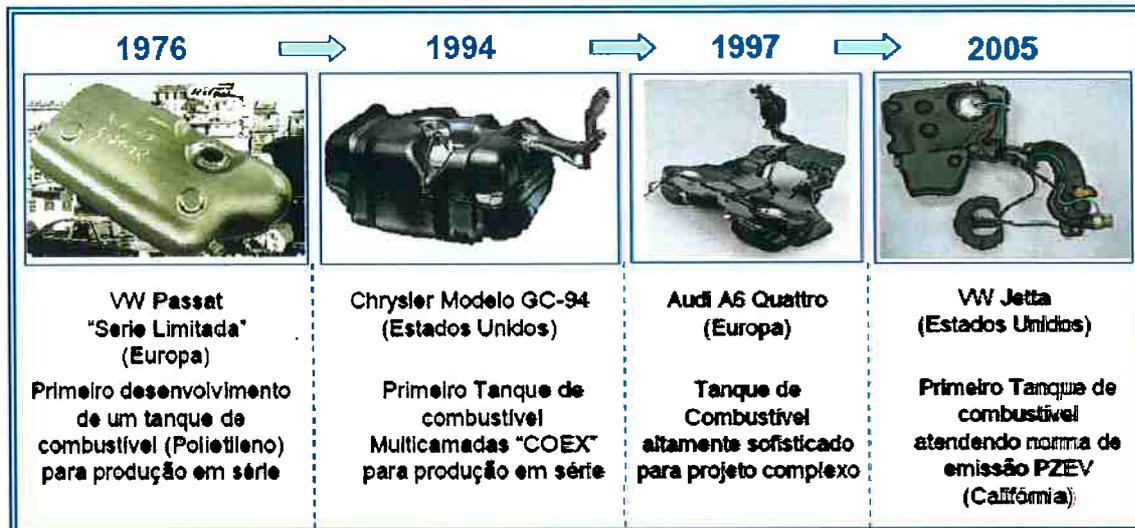


Figura 4 – Evolução dos tanques plásticos de combustível (Apresentação Kautex [5])

Embora a utilização de tanques plásticos tenha obtido um grande salto nas últimas décadas, a partir de 2004 apresentou ligeiras quedas de participação de mercado devido às novas exigências das legislações de emissão de gases evaporativos provenientes da gasolina. A introdução do programa "*Low Emission Vehicle*" (LEV), pelo governo norte americano, tornou mais restrita a utilização de tanques plásticos nos automóveis, bem como a preocupação com o meio ambiente através da reciclagem de materiais crescente no mundo, levando as indústrias automobilísticas a buscar soluções de materiais completamente recicláveis e o retorno ao uso das chapas de aço de baixo carbono. Mesmo assim, podemos considerar que as indústrias de tanques metálicos falharam em providenciar as montadoras alternativas que atingissem os critérios de relação custo por eficiência exigido por não terem acompanhado a evolução nos projetos dos automóveis.

As inovações nos tanques metálicos de combustíveis ocorreram na área de aplicação de diferentes materiais e revestimentos em resposta a uma demanda por aços mais duráveis no sistema de combustível.

Durante o século XX, as chapas de aço baixo carbono revestidas com chumbo (90% Chumbo e 10 Estanho), conhecidas como "*Terne Plate*" foram largamente utilizadas na indústria automobilística na construção de tanques de combustível. Mas em razão da obediência aos princípios de proteção ambiental, o

desenvolvimento de materiais recicláveis e não tóxicos tornaram-se mais importantes na indústria automobilística, e houve a regulamentação da quantidade de chumbo nos automóveis, conseqüentemente a utilização do chumbo como revestimento de proteção das chapas de aço empregadas nos tanques de combustível teve uma diminuição drástica. Neste período materiais alternativos, como chapas de aço estanhado e galvanizado foram desenvolvidos para aplicação em tanques de combustível.

Em 1989 Daimler Benz AG - Stuttgart introduziu a chapa de aço aluminizada em seus veículos de passageiros, o exemplo mais recente de aplicação deste material são os modelos esportivos da serie SLK [6].

E finalmente em 2003 uma empresa japonesa (JFE Steel Corporation) apresentou a utilização de aço inoxidável aplicados na construção dos tanques. Este tipo de material é pouco utilizado devido ao seu custo de matéria prima e do processo de conformação e não há registros de utilização de aço inoxidável em veículos em produção [7].

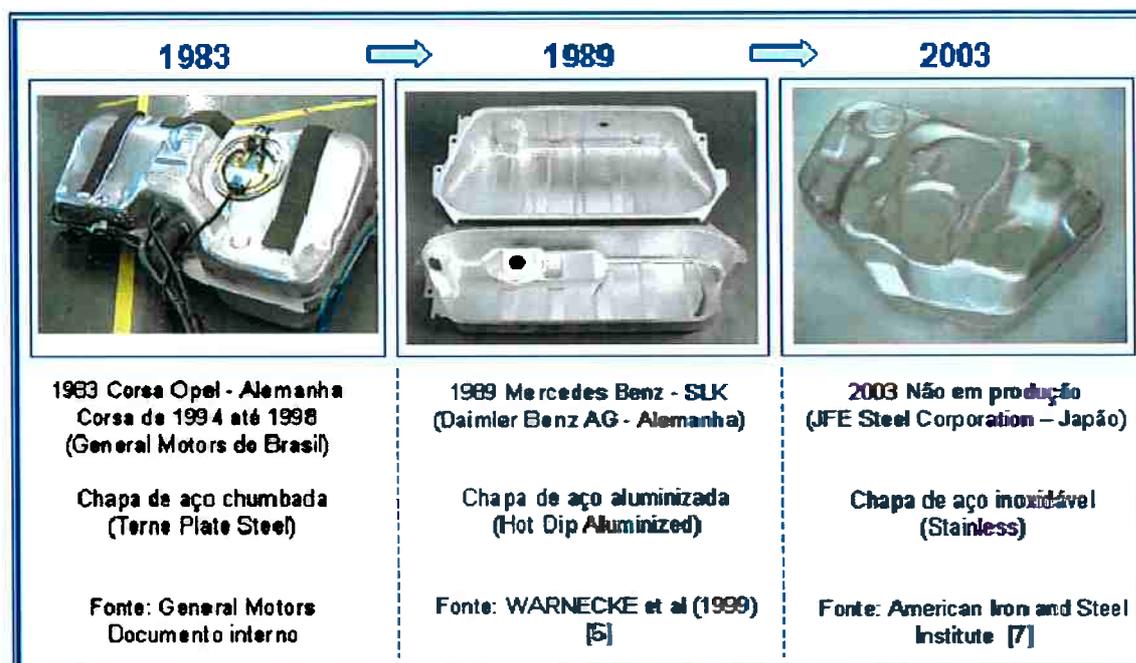


Figura 5 – Evolução dos tanques metálicos de combustível.

1.3. CENÁRIO MUNDIAL DA PARTICIPAÇÃO DE TANQUES PLÁSTICOS DE COMBUSTÍVEL VERSUS TANQUES METÁLICOS

Estudos realizados pela Associação de Fabricantes de Plásticos para Sistemas de Combustível, (Plasfuelsys) [8], demonstram que atualmente o mercado está dominado pelos tanques de combustível construídos em plásticos de alta densidade (PEAD), segundo os dados apresentados no congresso sobre tanques plásticos de combustíveis [5]. Em 2005 observamos que a participação do tanque plástico no mercado automobilístico atinge 91% na Europa, 77% na América do Norte, 60% na América do Sul e 26% na Ásia, totalizando no mundo 63% de participação sobre o metálico, conforme ilustrado na figura 6 [5].

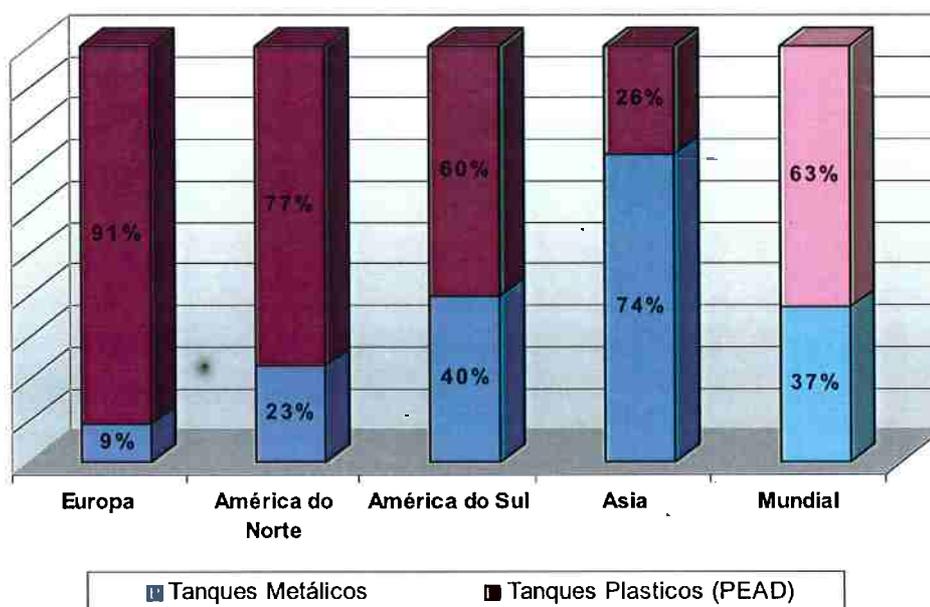


Figura 6 – Participação no mercado mundial de tanques plásticos de combustível [5].

Ainda segundo congresso de tanques plásticos de combustível [5], a estimativa de crescimento da utilização de tanques plásticos nestes mercados até o ano de 2012 seria de 6% na Europa, 4% na América do Norte, 5% na América do Sul e 5% na Ásia, conforme demonstrado na figura 7 [5].

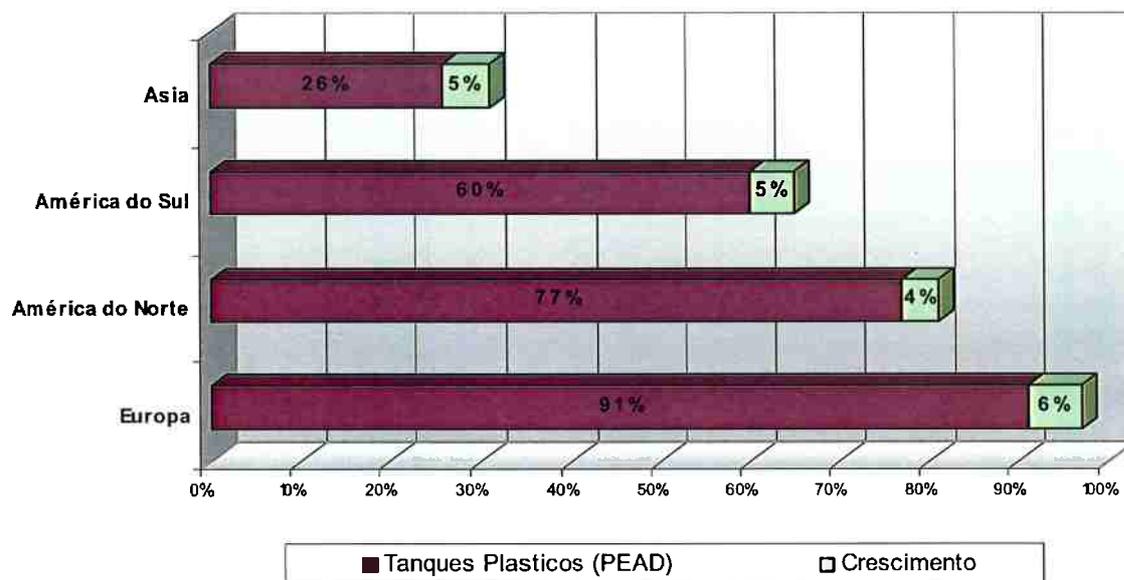


Figura 7 – Estimativa de crescimento de participação de mercado de tanques plásticos de combustível até 2012 [5].

A estimativa de crescimento apresentada está baseada pela visão otimista dos fabricantes de tanques plásticos em superar seus concorrentes metálicos com a substituição dos mesmos em quase 80% dos novos projetos a partir de 2006, apresentada pela Associação de Fabricantes de Plásticos para Sistemas de Combustível - Plasfuelsys [8].

1.4. JUSTIFICATIVA

A escolha do material do tanque de combustível em um novo projeto é um ponto fundamental na decisão do engenheiro de desenvolvimento. A definição correta dos parâmetros no início de um projeto de tanque de combustível automotivo é importante para:

- o Otimizar o processo de elaboração do tanque de combustível em sua fase conceitual;
- o Reduzir o tempo de projeto de tanque de combustível;
- o Redução dos custos de execução dos testes de desenvolvimento do tanque de combustível;
- o Otimizar o espaço físico disponível do veículo para o tanque de combustível;
- o Atender as necessidades específicas de cada projeto;
- o Elaborar projetos com qualidade e segurança.

Frente ao cenário das duas opções de materiais para serem utilizado em um projeto de tanque de combustível, este trabalho envolve a General Motors do Brasil – GMB na busca de um processo eficiente de escolha do material do tanque de combustível em fase inicial do projeto, através de um método simples de comparação dos parâmetros fundamentais na elaboração do projeto de tanque de combustível para veículos de passageiros.

Ainda, cada projeto de tanque de combustível tem sua particularidade, seja no desempenho frente às normas legislativas, seja na forma para atender sua montagem no veículo, seja no processo de manufatura, no custo da matéria prima e do processo, na massa, ou mesmo no descarte do tanque após a vida do veículo (a reciclagem). Por isso torna-se importante ressaltar os pontos fortes e fracos dos materiais metálicos e plásticos atualmente aplicados na fabricação de tanques de combustível automotivos.

Outro fator relevante motivador deste trabalho foi a constatação que a maioria das literaturas disponíveis trazem o assunto de tanque de combustível somente sob um ponto de vista, ou seja, pela ótica dos fabricantes de tanques plásticos ou dos fabricantes de tanques metálicos, sem uma comparação direta entre a aplicação dos dois materiais em tanques de combustível.

1.5. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estudar os materiais poliméricos (plásticos) e metálicos aplicados na fabricação de tanques de combustível de veículos de passageiros, realizando uma pesquisa nas publicações existentes e uma análise comparativa dos principais parâmetros de projeto, buscando responder a questão de qual material seria mais apropriado na construção de tanques de combustível.

Propor um método de escolha do material a ser aplicado em um projeto de tanque de combustível através de uma matriz de decisão entre o uso de metal ou plástico no desenvolvimento de um tanque de combustível em suas fases iniciais de projeto, com a finalidade de reduzir o tempo de projeto deste novo tanque.

Avaliar a aplicação do método de matriz de decisão através do estudo de caso.

Executar um ensaio de resistência ao impacto, comparando a aplicação do material plástico e metálico em um tanque de combustível.

Por fim, auxiliar o engenheiro de desenvolvimento na melhor escolha para que os custos de projetos sejam reduzidos, minimizando os gastos em estudos, investimentos e protótipos, muitas vezes desnecessários se houvesse uma ferramenta gerencial de decisão.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos principais :

- *Capítulo 2:* dedicado ao trabalho de pesquisa e revisão bibliográfica, sobre o tópico principal do trabalho, tanques de combustível e os principais materiais aplicados na construção dos mesmos;
- *Capítulo 3:* também dedicado a pesquisa e revisão bibliográfica, reservado para a apresentação do método de matriz de decisão de alternativas para a solução de um problema, sendo relacionado com a questão de qual o melhor material que deve ser aplicado aos tanques de combustível automotivos;
- *Capítulo 4:* dedicado especificamente no esclarecimento dos principais critérios de desempenho considerados em um projeto de tanque de combustível;
- *Capítulo 5:* dedicado exclusivamente na exposição do estudo de caso submetido na General Motors do Brasil em relação ao método de tomada de decisão e apresentando os resultados obtidos com o uso do método;
- *Capítulo 6:* dedicado exclusivamente na apresentação do ensaio experimental executado e nos resultados obtidos, na comparação direta de desempenho de tanques metálicos de combustível contra tanques plásticos em um ensaio destrutivo de resistência ao impacto.
- *Capítulo 7:* finalmente dedicado às conclusões relevantes que envolvem o objetivo deste trabalho
- *Capítulo 8:* sugestões de trabalhos futuros baseado nas conclusões obtidas e que possam complementar o estudo em tanques de combustível para veículos automotivos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS CONVENCIONAIS

Segundo MORAN; SHAPIRO [9], o combustível é qualquer substância que reage com o oxigênio de forma violenta, com produção de calor, chamas e gases e supõe-se a liberação de uma energia de sua forma potencial a uma forma utilizável.

Há vários tipos de combustíveis: sólidos, líquidos e gasosos.

2.1.1. COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Entre os combustíveis sólidos incluem-se o carvão, a madeira e a turfa.

O carvão é uma substância de coloração negra e de firme consistência, amplamente utilizada como combustível e de vital importância para muitas indústrias modernas. Formado pelos restos soterrados de plantas tropicais e subtropicais, especialmente durante períodos Carbonífero e Permiano. Embora utilizado como combustível, a queima de carvão para obtenção de energia produz efluentes altamente tóxicos como, por exemplo, o mercúrio e outros metais como vanádio, cádmio, arsênio, chumbo, etc. Não tem aplicação automotiva.

A turfa é um material de origem vegetal, parcialmente decomposto, encontrado em camadas, geralmente em regiões pantanosas. É formado principalmente por *Sphagnum* (esfagno, espécie de musgo) e *Hypnum*, mas também de juncos, árvores, etc. Sob condições geológicas adequadas, transforma-se em carvão. É utilizada como combustível para aquecimento doméstico.

2.1.2. COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS

Os combustíveis líquidos são a mistura de hidrocarbonetos, derivados de petróleo (óleo cru) através do processo de destilação fracionada e quebra térmica das moléculas. Entre os produtos gerados pela destilação fracionada encontram-se o óleo diesel (Gasóleo), o querosene e a gasolina (nafta), conforme mostra a figura 8.

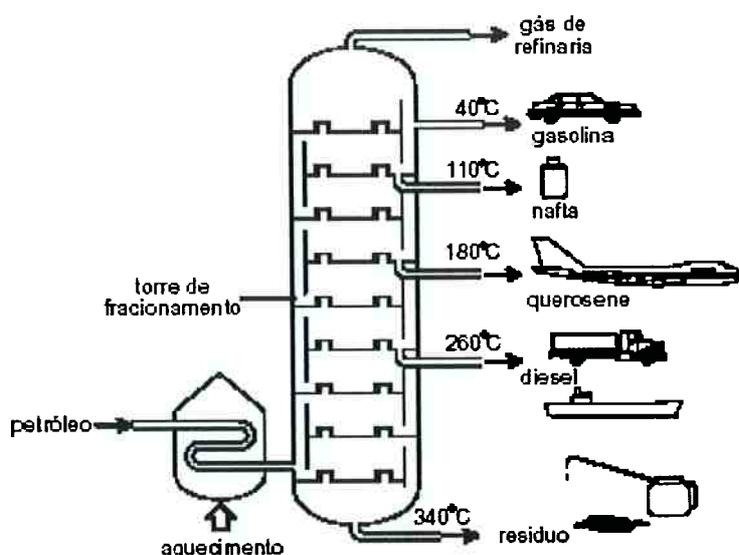


Figura 8 – Processo esquemático da destilação fracionada do petróleo

2.1.2.1. HIDROCARBONETOS

O petróleo e suas frações possuem uma composição complexa que pode ser classificada em dois grupos maiores de compostos: os hidrocarbonetos e os hetero-compostos.

Em química, um hidrocarboneto é um composto químico constituído apenas por átomos de carbono (C) e de hidrogênio (H).

Os hetero-compostos ou hidrocarbonetos naturais são compostos químicos constituídos por átomos de carbono (C) e de hidrogênio (H), aos quais se podem juntar átomos de oxigênio (O), ou nitrogênio (N) e enxofre (S) dando origem a diferentes compostos de outros grupos funcionais. São conhecidos alguns milhares de hidrocarbonetos. As diferentes características físicas são uma consequência das diferentes composições moleculares. Contudo, todos os hidrocarbonetos apresentam uma propriedade comum: oxidam-se facilmente libertando calor. Os hidrocarbonetos naturais formam-se a grandes pressões no interior da terra (abaixo de 150 Km de profundidade) e são trazidos para zonas de menor pressão através de processos geológicos, onde podem formar acumulações comerciais (petróleo, gás natural, etc). As moléculas de hidrocarbonetos, sobretudo as mais complexas, possuem alta estabilidade termodinâmica. Apenas o metano, que é a molécula mais simples (CH_4), pode se formar em condições de pressão e temperatura mais baixas.

Os demais hidrocarbonetos não são formados espontaneamente nas camadas superficiais da terra.

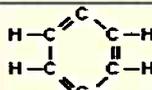
Quanto a forma das cadeias carbônicas, os hidrocarbonetos podem ser divididos, em hidrocarbonetos alifáticos e hidrocarbonetos cíclicos.

Hidrocarbonetos Alifáticos são hidrocarbonetos com átomos de carbono estruturais em cadeias abertas. Podem ser alcanos, alcenos, alcinos ou alcadienos, se as ligações entre esses átomos forem respectivamente simples, duplas ou triplas.

Hidrocarbonetos cíclicos: possuem pelo menos uma cadeia carbônica fechada, e são subdivididos em: cicloalcanos ou ciclanos, cicloalcenos ou ciclenos e aromáticos, que possuem pelo menos um anel aromático (anel benzênico) além de suas outras ligações.

Quanto ao tipo de ligação entre os carbonos, os hidrocarbonetos podem ainda ser divididos, didaticamente, em: hidrocarbonetos saturados, englobando alcanos e cicloalcanos, que não possuem ligações dupla, tripla ou aromática; hidrocarbonetos insaturados, que possuem uma ou mais ligações dupla ou tripla entre átomos de carbono (entre eles os alcenos, alcadienos e cicloalcenos - com ligação dupla; alcinos - com ligações tripla ; e aromáticos). A tabela 1 sumariza a classificação dos hidrocarbonetos segundo GARRET, T.K. [4].

Tabela 01 – Classificação dos hidrocarbonetos [4].

Cadeia Carbônica	Classe	Ligação Carbônica	Exemplo	Representação
Alifática (Aberta ou Acíclica)	Alcanos	Saturados	Butano (C ₄ H ₁₀)	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₃
	Alcenos	Insaturados	Buteno (C ₄ H ₈)	CH ₃ -CH=CH-CH ₃
	Alcinos ou alcadienos	Insaturados	Butino (C ₄ H ₆)	H ₂ C-C≡C-CH ₃
Cíclicos (Fechada)	Cicloalcanos ou Ciclanos	Saturados	Ciclobutano (C ₄ H ₈)	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} - \text{CH}_2 \\ \quad \\ \text{H}_2\text{C} - \text{CH}_2 \end{array}$
	Cicloalcenos ou Ciclenos	Insaturados	Ciclobuteno (C ₄ H ₆)	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{C} - \text{CH}_2 \\ \quad \\ \text{HC} = \text{CH} \end{array}$
	Aromáticos	Insaturados	Benzeno (C ₆ H ₆)	

2.1.2.2. ÓLEO DIESEL

O óleo diesel ou gasóleo é constituído basicamente por hidrocarbonetos e em baixas concentrações, por enxofre, nitrogênio e oxigênio e, selecionados de acordo com as características de ignição e de escoamento adequadas ao funcionamento dos motores diesel. É um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico. Altamente utilizado em motores de combustão interna de veículos de carga.

O óleo diesel pode ser classificado, de acordo com sua concentração de enxofre, nos seguintes tipos: Tipo B (máximo 0,35% de enxofre), Tipo D (máximo 0,2% de enxofre) e Tipo S500 (máximo de 0,05% de enxofre).

Existe ainda no mercado brasileiro o Extra Diesel Aditivado. É um óleo diesel que contém um pacote multifuncional de aditivos com o objetivo de manter limpo o sistema de alimentação de combustível, reduzir o desgaste dos bicos injetores, reduzir a formação de sedimentos e depósitos, proporcionar melhor separação da água eventualmente presente no diesel e conferir maior proteção anti-corrosiva a todo o sistema de alimentação do motor.

2.1.2.3. QUEROSENE

Querosene é um líquido resultante da destilação do petróleo, com temperatura de ebulição entre 150 °C a 300 °C, fração entre a gasolina e o óleo diesel, usado como combustível e como base de certos inseticidas. É um composto formado por uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos, naftênicos e aromáticos, com faixa de destilação compreendida entre 150 °C a 239 °C. O produto possui diversas características específicas como uma ampla curva de destilação, conferindo a este um excelente poder de solvência e uma taxa de evaporação lenta, além de um ponto de inflamação que oferece relativa segurança ao manuseamento. É insolúvel em água. Os usos mais comuns do querosene são para iluminação, solventes e QAV (querosene para aviação).

2.1.2.4. GASOLINA

A gasolina é um combustível constituído basicamente por hidrocarbonetos e, em menor quantidade, por produtos oxigenados. Esses hidrocarbonetos são, em geral, mais "leves" do que aqueles que compõem o óleo diesel, pois são formados por moléculas de menor cadeia carbônica (normalmente de 4 a 12 átomos de carbono). Além dos hidrocarbonetos e dos produtos oxigenados, a gasolina contém compostos de enxofre, compostos de nitrogênio e compostos metálicos, todos eles em baixas concentrações. A faixa de destilação da gasolina automotiva varia de 30 a 220°C.

A gasolina básica (sem oxigenados) possui uma composição complexa. A sua formulação pode demandar a utilização de diversas correntes nobres oriundas do processamento do petróleo como nafta leve (produto obtido a partir da destilação direta do petróleo), nafta craqueada que é obtida a partir da quebra de moléculas de hidrocarbonetos mais pesados (gasóleos), nafta reformada (obtida de um processo que aumenta a quantidade de substâncias aromáticas), nafta alquilada (de um processo que produz iso-parafinas de alta octanagem a partir de iso-butanos e olefinas), etc. Quanto maior a octanagem (número de moléculas com octanos) da gasolina melhor será sua qualidade.

A Petrobras, empresa petrolífera brasileira, produz diversos tipos de gasolina utilizando tecnologia própria, fabricando as diversas frações de petróleo constituintes da gasolina e misturando-as entre si e com os aditivos, através de formulações convenientemente definidas para atender aos requisitos de qualidade do produto.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) [10], define e especifica atualmente quatro tipos de gasolina para uso em automóveis, embarcações aquáticas, motos e etc. Gasolinas: Tipo A, Tipo A premium, Tipo C e tipo C premium:

I - GASOLINA AUTOMOTIVA TIPO A: É a gasolina produzida pelas refinarias de petróleo e entregue diretamente às companhias distribuidoras. Esta gasolina constitui-se basicamente de uma mistura de naftas numa proporção tal que enquadre o produto na especificação prevista. Este produto é a base da gasolina disponível nos postos revendedores;

II - GASOLINA TIPO A-PREMIUM: É uma gasolina que apresenta uma formulação especial. Ela é obtida a partir da mistura de Naftas de elevada octanagem (nafta craqueada, nafta alquilada, nafta reformada) e que fornecem ao

produto maior resistência à detonação, do que aquela fornecida pela gasolina tipo A comum. Esta gasolina é entregue diretamente às companhias distribuidoras e constitui a base da gasolina C PREMIUM disponibilizada para os consumidores finais nos postos de revenda;

III - GASOLINA TIPO C: É a gasolina comum que se encontra disponível no mercado sendo comercializada nos postos revendedores e utilizada em automóveis e etc. Esta gasolina é preparada pelas companhias distribuidoras que adicionam álcool etílico anidro à gasolina tipo A . O teor de álcool na gasolina final atinge à faixa de 21 a 23 por cento em volume, conforme prevê a legislação atual. Esta gasolina apresenta uma octanagem no mínimo igual a 80 MON (Motor Octane Number);

IV - GASOLINA TIPO C-PREMIUM: É a gasolina elaborada pela adição de 21 a 23% de álcool anidro à gasolina tipo A-PREMIUM. Essa gasolina foi desenvolvida com o objetivo principal de atender aos veículos, nacionais e importados, de altas taxas de compressão e alto desempenho e que tenham a recomendação dos fabricantes de utilizar um combustível de elevada resistência à detonação o que é no caso da gasolina PREMIUM, expresso pelo índice antidetonante (IAD).

A GASOLINA ADITIVADA, disponível em alguns postos de combustível, é a gasolina tipo C ou tipo C premium com a adição de produtos, ou aditivos químicos, que conferem a esta gasolina características especiais. Estes aditivos multifuncionais adicionados na gasolina possui, entre outras, características detergentes e dispersantes e tem a finalidade de melhorar o desempenho do produto auxiliando na minimização da formação de depósitos nos bicos injetores do motor, assim como no coletor e hastes das válvulas de admissão.

A gasolina aditivada recebe um corante que lhe confere uma cor distinta daquela apresentada pela gasolina comum, por exemplo a gasolina aditivada BR-SUPRA apresenta cor verde.

Também existem os combustíveis líquidos de origem vegetal como o álcool e o Bio-Diesel (exemplo: óleo de mamona)

2.1.2.5. ÁLCOOL

Álcool, em química, é qualquer composto orgânico que contenha, pelo menos, um grupo hidroxila (íon OH-) ligado diretamente a um átomo de carbono.

O Etanol (C₂H₅OH), também chamado de álcool etílico, é um dos principais álcoois que existe, sendo incolor, inflamável e de odor característico, comumente utilizado em bebidas e também muito utilizado como combustível de motores de explosão.

O álcool etílico hidratado pode ser obtido através da fermentação dos açúcares. Este é o método mais comum utilizado no Brasil, que utiliza a cana-de-açúcar para obter os açúcares que darão origem ao etanol. Nos Estados Unidos o etanol é obtido a partir do milho.

Podemos classificar dois tipos principais de álcoois utilizados comercialmente em motores de combustão: o álcool etílico hidratado e o álcool etílico anidro.

O álcool etílico anidro é obtido através da desidratação do álcool hidratado, portanto o álcool anidro é o álcool etílico quase completamente isento de água.

A definição brasileira dos álcoois etílicos combustíveis, pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) [11], através da Resolução 036, de 06.12.2005, estabelece através do Artigo 2º:

I – Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) – produzido no País ou importado sob autorização, conforme especificação constante no Regulamento Técnico, destinado aos distribuidores para a mistura com gasolina A para formulação da gasolina C e,

II – Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC) – produzido no País ou importado sob autorização, conforme especificação constante no Regulamento Técnico, para a utilização como combustível em motores de combustão interna de ignição por centelha.

A Tabela 02 descreve as características de um álcool segundo ANP [11]:

**Tabela 2 – Especificações do álcool anidro e do álcool hidratado carburantes
(Resolução ANP nº 36/2005, 2005) [11].**

Característica	Unidade	Alcool anidro (AEAC)	Alcool hidratado (AEHC)
Aspecto	-	(2)	(2)
Cor	-	(3)	(4)
Acidez total, máx.	mg/L		30
Condutividade elétrica, máx.	uS/m		500
Massa específica a 20°C	kg/m ³	791,5 máx.	807,6 a 811,0
Teor alcoólico	%INPM	99,3 mín.	92,6 a 93,8
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	-	6,0 a 8,0
Resíduo por evaporação, máx. (6)	mg/100 mL	-	5
Teor de hidrocarbonetos, máx. (6)	%vol.		3,0
Ion cloreto, máx. (6)	mg/kg	-	1,0
Teor de etanol, mín. (8)	%vol.	99,6	95,1
Ion sulfato, máx. (9)	mg/kg	-	4
Ferro, máx. (9)	mg/kg	-	5
Sódio, máx. (9)	mg/kg	-	2
Cobre, máx. (9) (10)	mg/kg	0,07	-

(1) Poderão ser utilizados como métodos alternativos para avaliação das características nos casos de importação do álcool, com exceção do método ASTM D4052, que poderá ser sempre utilizado como método alternativo para a determinação da massa específica.

(2) Límpido e isento de impurezas.

(3) Incolor antes da adição de corante, segundo especificação constante da Tabela II deste Regulamento Técnico, que deverá ser adicionado no teor de 15 mg/L proporcionando ao produto a cor laranja.

(4) Incolor.

(5) Aplicam-se na Importação, Distribuição e Revenda os seguintes limites para massa específica e teor alcoólico do AEHC: 805,0 a 811,0 e 92,6 a 94,7 respectivamente.

(6) Limite requerido na Importação, Distribuição e Revenda, não sendo exigida esta análise para emissão do Certificado da Qualidade pelos Produtores.

(7) Procedimento C e modificação constante na ASTM D4806.

(8) Requerido quando o álcool não for produzido por via fermentativa a partir da cana-de-açúcar ou em caso de dúvida quando da possibilidade de contaminação por outros tipos de álcool.

(9) O produtor deverá transcrever no Certificado da Qualidade o resultado obtido na última determinação quinzenal, conforme previsto no § 1º do Art.5º da presente Resolução.

(10) Deverá ser determinado no AEAC que tiver sido transportado ou produzido em local que possua equipamentos ou linhas de cobre, ou lixas que contenham este metal.

2.1.2.6. COMBUSTÍVEIS ESPECIAIS PARA CORRIDAS

A seleção do combustível especial e aditivo para a finalidade de provas de corrida é altamente complexa e requer especialistas no assunto. Em geral, as decisões são baseadas no tipo de pista da prova, no número de paradas permitida para reabastecimento e outras regras aplicadas às certas provas. Por exemplo, se a distancia a ser percorrida sem o abastecimento é fundamental, a ênfase deve ser colocada na densidade do combustível, por outro lado, se as altas taxas de compressão são normas para corridas, então alta octanagem é muito importante.

Álcoois possuem taxas de octanagem altas, atendendo faixas de compressão até praticamente 15:1, tendem a ser favoráveis para o uso em corridas apesar de seus baixo poder calorífico. Entre eles está o metanol, podendo ser utilizado puro ou misturado a outros combustíveis de hidrocarbono.

O metanol, também conhecido como álcool metílico, é um composto químico, que pode ser produzido por um processo químico que utiliza o metano, ou

através do carvão ou biomassa. A sua produção requer temperatura alta, pressão alta e catalisadores especiais. Sua fórmula química é CH_3OH .

O metanol é um combustível perigoso, pois é absorvido pela pele e também pode causar cegueira quando inalado em grandes proporções, portanto aconselha-se o uso de luvas de borrachas e proteção no manuseio do metanol. Curiosamente, quando queima não emite chamas, e é por isso também muito perigoso, não se vê que um incêndio está ocorrendo até sentir seus efeitos.

2.1.2.7. BIO-DIESEL

Biodiesel é um combustível composto de mono-álquil-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa (com ou sem duplas ligações), derivados de fontes totalmente renováveis, como óleos vegetais, gorduras animais, óleos de fritura ou gordura usada, obtido da reação de transesterificação com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol, por craqueamento (por catálise ácida ou básica) (PENTEADO, 2005 [12])

O Biodiesel pode ser usado misturado ao óleo diesel proveniente do petróleo em qualquer concentração, sem a necessidade de alteração dos motores diesel já em funcionamento, porém alguns motores antigos no Brasil necessitam de alterações.

A concentração de Biodiesel é informada através de nomenclatura específica, definida como BX, onde X refere-se à percentagem em volume do Biodiesel. Assim, B5, B20 e B100 referem-se, respectivamente, a combustíveis com uma concentração de 5%, 20% e 100% de Biodiesel (puro).

A definição brasileira do Biodiesel, pela Agencia Nacional de Petróleo (ANP) [13], através da Resolução 042, de 24.11.2004, estabelece através do Artigo 2º:

I – Biodiesel – B100: combustível composto de alqui-ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou de gorduras animais, conforme a especificação contida no Regulamento Técnico nº 4/2004, parte integrante desta resolução;

II – Mistura óleo diesel/biodiesel – B2: combustível comercial, composto de 98%, em volume, de óleo diesel, conforme a especificação da ANP, e 2% em volume de Biodiesel, que deverá atender a especificação prevista pela Portaria ANP nº 310, de 27 de dezembro de 2001, e suas alterações;

III – Mistura autorizada óleo diesel / Biodiesel - combustível composto de biodiesel e óleo diesel em proporção definida quando da autorização concedida para testes e uso experimental conforme previsto pela Portaria ANP nº 240, de 25 de agosto de 2003;

IV – Distribuidor de combustíveis líquidos – pessoa autorizada pela ANP para o exercício da atividade de distribuição de combustíveis líquidos derivados de petróleo, álcool combustível, biodiesel, mistura diesel/biodiesel especificada ou autorizada pela ANP e outros combustíveis automotivos;

V – Batelada – quantidade segregada de produto que possa ser caracterizada por um "Certificado da Qualidade".

2.1.3. COMBUSTÍVEIS GASOSOS

Entre os combustíveis gasosos estão o gás natural ou os GLP (Gases Liquefeitos de Petróleo), obtidos de poços de gases naturais ou produzidos por reações químicas. O gás natural é uma mistura de gases encontrados freqüentemente em combustíveis fósseis, isolado ou acompanhado ao petróleo. Ainda que a sua composição seja diferente dependendo da fonte da qual é extraído, é composto principalmente por metano (CH_4) em quantidades que podem superar 90 ou 95%, e contém outros gases como nitrogênio, etano, CO_2 ou restos de butano ou propano.

A definição brasileira do gás natural, pela Agencia Nacional de Petróleo (ANP) [14], através da Resolução 118, de 11.07.2000, estabelece através do Artigo 2º as seguintes definições:

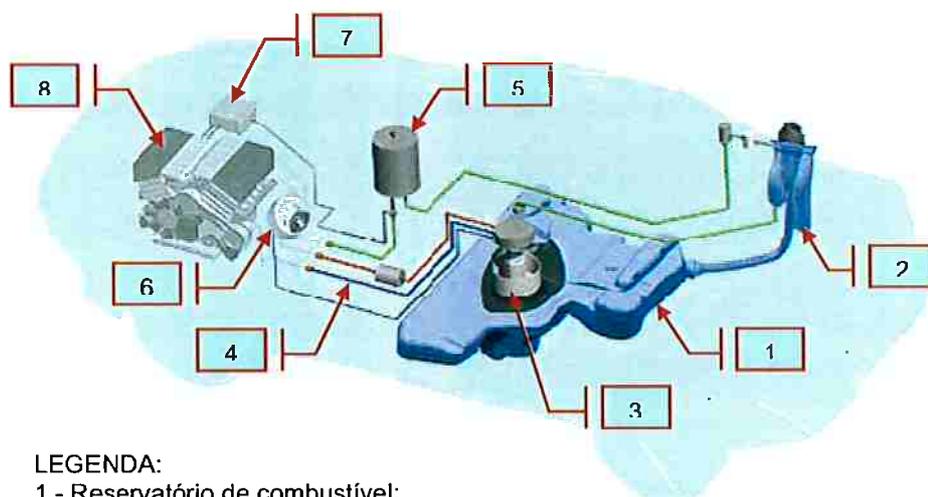
I – Gás Natural (GN) ou Gás, todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gasíferos, incluindo gases úmidos, secos, residuais e gases raros;

II – Gás Natural Liquefeito (GNL): fluido no estado líquido em condições criogênicas, composto predominantemente de metano e que pode conter quantidades mínimas de etano, propano, nitrogênio ou outros componentes normalmente encontrados no gás natural.

2.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE COMBUSTÍVEL

A General Motors do Brasil [15] define como o sistema de combustível automotivo, um conjunto de componentes que servem para armazenar o combustível que será fornecido para o motor na sua proporção correta, não permitir vazamentos em qualquer condição de operação, permitir o fácil reabastecimento pelo usuário e indicar a quantidade de combustível existente no reservatório do tanque de combustível. Ao mesmo tempo o sistema deve atender os requisitos físicos e mecânicos que assegurem a máxima segurança do usuário.

A figura 9 ilustra os principais componentes de um sistema de combustível em um veículo de passageiros e a figura 10 ilustra os principais componentes de um tanque de combustível genérico.



LEGENDA:

- 1 - Reservatório de combustível;
- 2 - Gargalo de reabastecimento;
- 3 - Módulo de alimentação (Bomba de Combustível);
- 4 - Linhas de combustível;
- 5 - Reservatório de carvão ativado (Canister);
- 6 - Indicador do nível de combustível;
- 7 - Módulo de controle de injeção;
- 8 - Motor.

FIGURA 09 – Componentes principais de um sistema de combustível

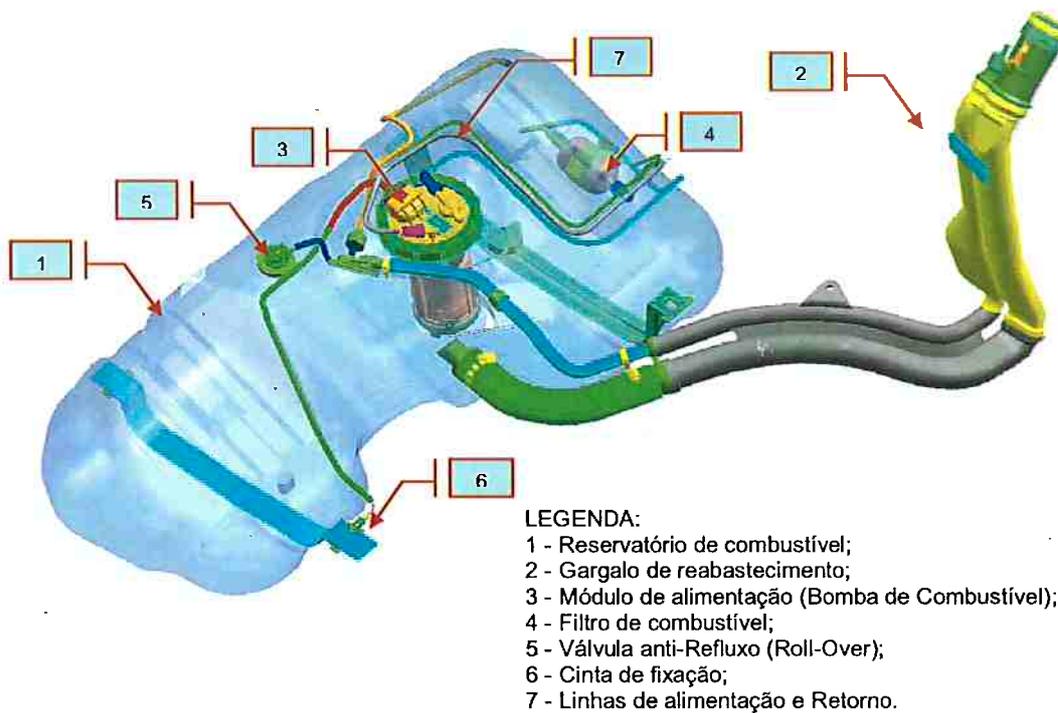


FIGURA 10 – Componentes básicos de um tanque de combustível

De maneira geral, pode-se classificar o sistema de combustível em 5 funções principais, conforme ilustrado na figura 11:

- Abastecimento do tanque de combustível;
- Armazenagem do combustível;
- Medição ou indicação da quantidade de combustível;
- Ventilação do sistema e;
- Alimentação do motor.

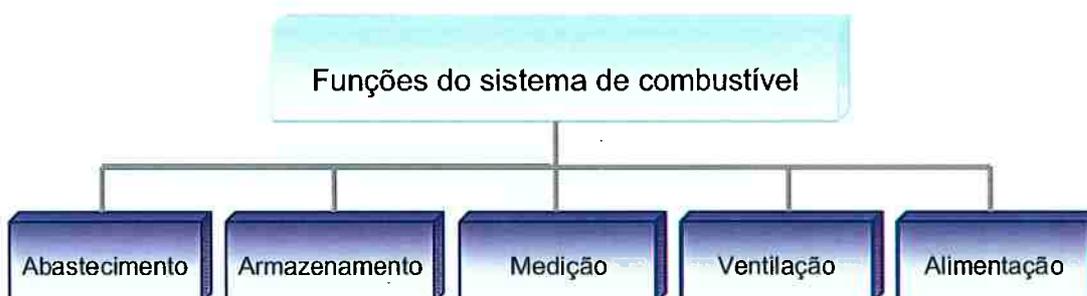


FIGURA 11 – Principais funções do sistema de combustível.

A função abastecimento do sistema de combustível inicia-se a partir da abertura da tampa do bocal de enchimento do gargalo do tanque. Quando introduzido o bico da pistola de bomba de combustível do posto de abastecimento, tem-se o aterramento do sistema de combustível para evitar acidentes causados por qualquer carga de eletricidade estática, conforme figura 12 [5].

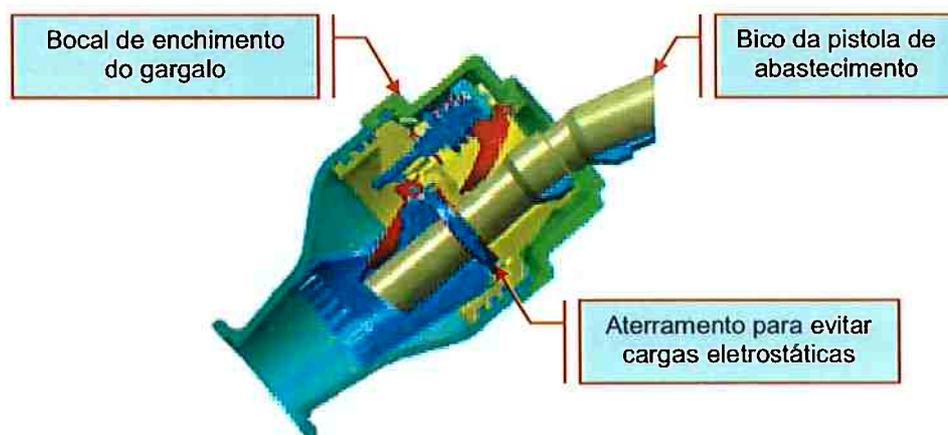


Figura 12 – Abastecimento de combustível através do gargalo

O combustível é conduzido pelo gargalo até o reservatório (tanque) e o ar de dentro do tanque é substituído pelo combustível, conseqüentemente as linhas de respiro, os separadores de líquido/vapor e canister são desenvolvidos para permitir que os vapores evacuados do tanque não sejam lançados na atmosfera, seguindo as leis de emissões de gases evaporativos, que serão descritos posteriormente neste trabalho.

A figura 13 [5] ilustra alguns exemplos de gargalos do sistema de combustível utilizados em veículos brasileiros.



Figura 13 – Exemplos de gargalos do sistema de combustível utilizados em veículos brasileiros

A pistola da bomba de combustível encerra o abastecimento de combustível (desarme), quando o líquido entra em contato ou muito próximo do contato com a ponta da pistola. Para se evitar o abastecimento acima da capacidade de ventilação do tanque de combustível são adicionadas válvulas anti-refluxo, que não permitem exceder a esta capacidade do tanque.

A função de armazenamento refere-se manter o combustível em um reservatório integrado ao veículo de forma segura a qualquer movimentação do veículo e, principalmente não permitir vazamentos em qualquer forma de utilização. Componentes como cintas de fixação, suportes no chassi do veículo e insertos são especialmente desenvolvidos para evitar qualquer deformação no tanque de combustível levando em consideração as vibrações e as diferentes situações de dirigibilidade.

A indicação de combustível no painel de instrumentos do veículo permite ao condutor saber quanto de combustível resta no tanque para percorrer uma certa distância.

O medidor está localizado dentro do tanque de combustível para medir o fluido remanescente. O curso do medidor é otimizado através de técnicas de simulação que minimizam o efeito de vibração do veículo ou quanto o veículo encontra-se com a frente ou a traseira inclinada. Dispositivos eletrônicos transmitem o sinal do medidor para o indicador de combustível no painel de instrumentos do veículo. A medição do nível de combustível está relacionada frequentemente aos dispositivos eletrônicos montados no sistema de alimentação. A figura 14 ilustra o posicionamento de um medidor de combustível dentro do tanque e a trajetória de leitura do volume interno.

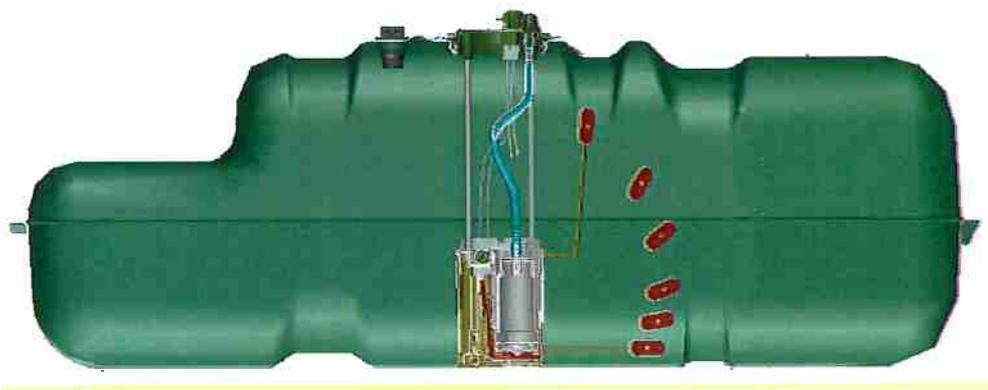


Figura 14 – Posicionamento do medidor de nível de combustível dentro do tanque

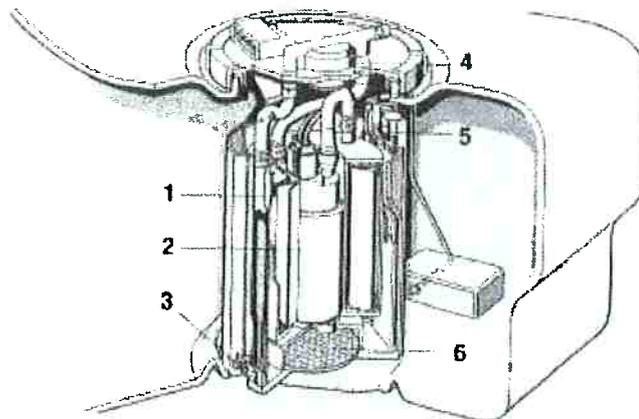
A função de ventilação do tanque inicialmente está relacionada ao seu abastecimento, conforme descrito anteriormente, contudo outras soluções são necessárias para administrar o ar e vapor dentro do tanque de combustível em condições estáticas, dinâmicas e outros fatores, como inclinações e variações de temperatura e pressão ambiente. Componentes como, válvulas limitadores de pressão e ventilação, válvulas de anti-refluxo, conhecidas como "*Roll Over*", e o reservatório de carvão ativado ("*Canister*") são desenvolvidos para garantir a função de ventilação, evitando a liberação de vapores de combustível para a atmosfera que muitos países possuem restrições exigentes a este respeito, ou mesmo para garantir a integridade do sistema de combustível.

A figura 15 [16] ilustra o funcionamento de uma válvula anti-refluxo, conhecido como "*Roll Over Valve*".



Figura 15 – Esquema de uma válvula *Roll Over* em corte.

A função de alimentação permite a entrega de combustível para o motor na quantidade adequada e com a pressão correta. A figura 16, retirada de BOSCH [17] apresenta os principais componentes de um módulo de alimentação interno ao tanque, também conhecido como módulo da bomba de combustível, de um veículo com sistema convencional de injeção eletrônica utilizado no Brasil.



LEGENDA:

- 1 – Filtro de combustível;
- 2 – Bomba elétrica de combustível;
- 3 – Sucção regularizada (Jet pump);
- 4 – Regulador de pressão;
- 5 – Medidor de nível de combustível;
- 6 – Filtro da sucção

Figura 16 – Módulo de alimentação de combustível

Neste estudo estaremos focando somente na interação do reservatório de combustível (tanque) na definição de sua melhor opção quanto ao material a ser aplicado em um projeto. Os demais componentes de um tanque de combustível não estão sendo estudados dentro desta análise.

2.3. MATERIAIS APLICADOS NA CONSTRUÇÃO DE TANQUES DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVOS

De forma geral, existem dois materiais aplicados na construção de tanques de combustível para veículos automotivos: Chapas de aço e plásticos de alta densidade (PEAD).

2.3.1. CHAPAS DE AÇO CARBONO

Dentro da indústria automobilística as chapas de aço são utilizadas em larga escala desde a estrutura do veículo como o chassi ou o monobloco, até os painéis externos de acabamento como laterais, portas, capô, e tampa do porta-malas, etc.

A maior parte do aço utilizado em chapas e folhas para a construção de peças automotivas é de aço baixo carbono, ou doce e sua aplicação em tanques de combustíveis é largamente utilizada devido às características principais do material:

- o Elevada ductibilidade;
- o Boa soldabilidade, essencial no processo de fabricação de tanques;
- o Superfícies sem defeitos;
- o Características de acabamento e;
- o Baixo custo da matéria prima.

Contudo a sua resistência a corrosão é inferior a do ferro puro devido maior concentração de carbono, para isto processos de revestimento das chapas de aço com camadas de zinco, conhecido como galvanização, e estanho são aplicadas para contornar esse inconveniente.

2.3.1.1 PROPRIEDADES DAS CHAPAS DE AÇO CARBONO

Pelo exame das especificações propostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pode-se ter uma idéia das propriedades que se desejam nesses produtos planos de aço.

No caso de chapas destinadas a serviços de estampagem e semelhantes, que constituem na fabricação de tanques de combustível por exemplo, além das características de sua composição, especificações mecânicas usuais são necessárias para conhecer a sua qualidade de conformação.

A GM [18] classifica através de siglas próprias as chapas finas compradas de seus fornecedores conforme a tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Classificação das chapas finas quanto à conformação segundo especificação da General Motors do Brasil [18].

Com ou Sem Revestimento	Nomenclatura
EM	Qualidade de estampagem média
EP	Qualidade de estampagem profunda
EEP	Qualidade de estampagem extra profunda
EEP-PC	Qualidade de estampagem extra profunda, Conformação crítica
CSC	Conformação super crítica
HSC	Aços alta resistência ao carbono
BH	Endurecível na estufa

Materiais com características de envelhecimento em estufa, usualmente conhecidos como BH (endureçível em estufa), classificam-se conforme o limite de escoamento mínimo (MPa), exemplos : 180BH; 210BH; 240BH; 270BH; 300BH e 340BH.

Aços de alta resistência também são classificados conforme o limite de escoamento mínimo (MPa), exemplos: 240HSC; 270HSC; 300HSC; 340HSC; 380HSC; 420HSC; 500HSC e 550HSC.

Segundo procedimento interno da General Motors do Brasil [18] a composição química das chapas de aço devem seguir a especificação descrita na tabela 4:

Tabela 4 – Composição química das chapas de aço segundo especificação da General Motors do Brasil [18].

GRADE GRAU	% CARBON/ CARBONO MAX.	% MANGANESE/ MANGANÉS MAX.	% PHOSPHORUS/ FÓSFORO MAX.	% SULFUR/ ENXOFRE MAX.	% ALUMINUM/ ALUMÍNIO MIN.	% TITANIUM/ TITÂNIO MAX.	% BORON BORO MAX.
EM	0,007 – 0,100	0,50	0,040	0,040	-X-	-X-	0,0005
EP	0,007 – 0,080	0,45	0,030	0,030	0,015	-X-	0,0005
EEP	0,001 – 0,080	0,45	0,020	0,020	0,015	0,010 – 0,20	0,0005
EEP-PC	0,001 – 0,060	0,35	0,020	0,020	0,015	0,010 – 0,20	0,0005
CSC	0,001 – 0,007	0,35	0,020	0,020	0,015	0,010 – 0,20	0,0005
180BH	0,05	0,70	0,06	0,030	0,015	-X-	0,0025
210BH	0,07	0,70	0,08	0,030	0,015	-X-	0,0025
240BH	0,08	0,80	0,10	0,030	0,015	-X-	0,0025
270BH	0,09	1,00	0,11	0,030	0,015	-X-	0,0025
300BH	0,10	1,30	0,12	0,030	0,015	-X-	0,0025
340BH	0,12	1,50	0,12	0,030	0,015	-X-	0,0025
Aço de Alta Resistência e Baixa Liga / High Strength Low Alloy Sheet Steel							
240HSC	0,07	0,8	0,03 – 0,08	0,030	-X-	-X-	0,001
270HSC	0,08	0,8	0,02 – 0,08	0,030	-X-	-X-	0,001
300HSC	0,10	0,8	0,10	0,030	0,015	0,010	0,001
340HSC	0,10	1,00	0,030	0,030	0,015	0,10	0,001
380HSC	0,12	1,20	0,030	0,030	0,015	0,50	0,001
420HSC	0,12	1,40	0,030	0,030	0,015	0,50	0,001
500HSC	0,12	1,40	0,030	0,030	0,015	0,50	0,001
550HSC	0,15	1,40	0,030	0,030	0,015	0,50	0,001

As propriedades mecânicas das chapas de aço carbono estão descritas conforme tabela 5 [18].

Tabela 5 – Propriedades mecânicas das chapas de aço segundo especificação interna da General Motors do Brasil [18].

Grau	Limite de Escoamento Max (Mpa)		Limite de Resis. à Tração (Mpa)	Alongamento min (%)				Índice de Embutimento Min. (mm)	Dureza Max. (HRB)	Anisotropia r mín. (r)	Expoente de Encruamento n mín
	t < 0,9 (mm)	t ≥ 0,9 (mm)		t ≤ 0,6 (mm)		t > 0,6 (mm)					
				Lo = 50 (mm)	Lo = 80 (mm)	Lo = 50 (mm)	Lo = 80 (mm)				
EM	-x-	-x-	390 Max.	29	28	30	29	Veja Tabela 6 (3)	65	-x-	-x-
EP	275	260	370 Max.	33	32	34	33		57	-x-	-x-
*EEP	140 - 220		270 Min.	37	36	38	37	-x-	-x-	-x-	-x-
*EEP-PC	140 - 210		270 Min.	38	37	39	38		-x-	1,6	0,20
*CSC	140 - 180		270 Min.	41	40	42	41		-x-	1,8	0,22
180BH ₍₂₎	180 - 240		300 Min.	33	31	34	32		-x-	1,5	0,17
210BH ₍₂₎	210 - 270		320 Min.	32	30	33	31		-x-	1,4	0,16
240BH ₍₂₎	240 - 300		340 Min.	31	29	32	30		-x-	1,2	0,16
270BH ₍₂₎	270 - 330		365 Min.	29	27	30	28		-x-	1,1	0,15
300BH ₍₂₎	300 - 360		390 Min.	27	25	28	26		-x-	1,0	0,14
340BH ₍₂₎	340 - 420		410 - 530	23	21	24	22		-x-	0,9	0,13
240HSC	240 - 300		340 - 400	-x-	-x-	32	30		-x-	1,2	0,16
270HSC	270 - 340		380 - 440	-x-	-x-	30	29		-x-	1,1	0,15
300HSC	300 - 380		380 - 490	-x-	-x-	28	26		-x-	1,0	0,14
340HSC	340 - 440		410 - 530	-x-	-x-	25	23		-x-	0,9	0,13
380HSC	380 - 500		460 - 600	-x-	-x-	21	19		-x-	0,9	0,12
420HSC	420 - 540		480 - 620	-x-	-x-	19	17		-x-	0,9	0,11
500HSC	500 - 600		560 - 680	-x-	-x-	16	14		-x-	0,9	0,10
550HSC	550 - 650		610 - 740	-x-	-x-	14	12		-x-	0,9	0,10

Nota (1): Para os materiais revestidos, por imersão a quente, admite-se uma redução de até 8% no valor da anisotropia

Nota (2): Os aços BH devem atingir um aumento no limite de escoamento, de acordo com a tabela acima, após 2% de pré-deformação e ter passado pela estufa a 170 ± 7 °C @ 20 a 25 minutos.

Nota (3): Embutimento Erichsen vide Tabela 7

Os ensaios empregados para medir a qualidade deste material são a dureza e o embutimento Erichsen. A tabela 6 [18] mostra os valores mínimos que devem ser obtidos no ensaio de embutimento Erichsen, com diâmetro de punção 20 mm.

Tabela 6 – Valores mínimos de altura de embutimento em mm conforme grau de estampagem [18].

Espessuras (mm)	EM	EP	EEP	EEP-PC	CSC
0,50	8,8	9,5	9,8	10,0	10,2
0,55	8,9	9,6	9,9	10,1	10,3
0,60	9,0	9,7	10,0	10,2	10,4
0,65	9,1	9,8	10,1	10,3	10,5
0,70	9,2	9,9	10,2	10,4	10,6
0,75	9,3	10,0	10,3	10,5	10,7
0,80	9,4	10,1	10,4	10,6	10,8
0,85	9,5	10,2	10,5	10,7	10,9
0,90	9,6	10,3	10,6	10,8	11,0
0,95	9,7	10,4	10,7	10,9	11,1
1,00	9,8	10,5	10,8	11,0	11,2
1,10	9,9	10,7	11,0	11,1	11,3
1,20	10,1	10,8	11,1	11,3	11,5
1,30	10,2	11,0	11,2	11,4	11,7
1,40	10,4	11,1	11,4	11,6	11,8
1,50	10,5	11,2	11,5	11,7	11,9
1,60	10,6	11,4	11,6	11,8	12,0
1,70	10,7	11,5	11,8	11,9	12,1
1,80	10,9	11,6	11,9	12,0	12,2
1,90	11,0	11,7	12,0	12,2	12,4
2,00	11,1	11,8	12,1	12,3	12,5

2.3.1.2. REVESTIMENTOS DE CHAPAS DE AÇO

Os vários revestimentos superficiais a que são submetidas as chapas de aço tem como objetivo primário, melhorar a sua resistência à corrosão e eventualmente proporcionar uma aparência superficial decorativa.

No caso de tanques de combustível o revestimento das chapas deve ocorrer tanto na superfície externa devido à corrosão proveniente do meio ambiente como batidas de pedras, água salgada, bem como na superfície interna devido à ação corrosiva dos combustíveis armazenados especialmente em relação ao álcool. No mercado brasileiro além da opção de utilizar somente álcool como combustível, existe ainda a mistura de 20% de álcool na composição da gasolina comercializada no país e, portanto os tanques de combustível devem ter sua proteção interna contra o ataque destes agentes.

Segundo a Society of Automotive Engineers - SAE [19], as chapas de aço revestidas são normalmente produzidas por uma das duas técnicas existentes, por imersão a quente ("*Hot Dip*") ou por eletro deposição ("*Electroplating*").

2.3.1.2.1. REVESTIMENTOS DE CHAPAS DE AÇO POR PROCESSO DE IMERSÃO A QUENTE – *HOT DIP*

Chapas de aço revestidas por imersão a quente (*Hot dip*), são produzidas por processo contínuo de imersão, da chapa de aço recozida, em reservatórios do material de revestimento a ser aplicado no estado líquido. Este processo é o mais eficiente sob ponto de vista de custo, na promoção de resistência à corrosão em chapas de substrato de aço.

O esquema de uma linha contínua típica de produção de chapas com revestimento por imersão a quente está mostrado na Figura 17 [19].

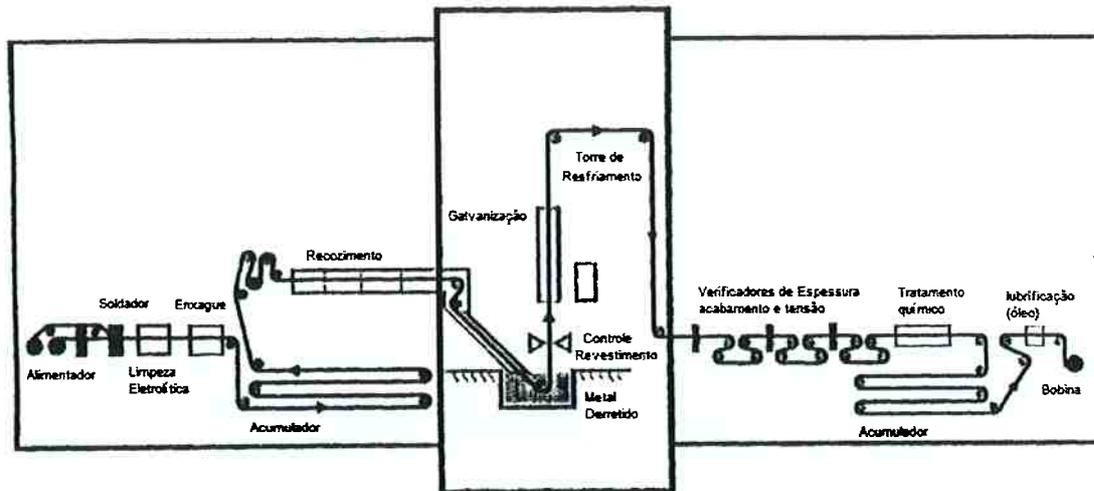


Figura 17 – Esquema de uma linha de revestimento contínuo por imersão a quente – *Hot Dip*

Os principais tipos de revestimento aplicados nas chapas de aço por imersão a quente disponível atualmente são:

- Revestimento de Zinco puro;
- Revestimento de ligas de Zinco e Ferro;
- Revestimento de Alumínio;
- Revestimento de ligas de Alumínio e Zinco;
- Revestimento de ligas de Chumbo e Estanho.

Chapas de zinco puro, ou Galvanizadas (*Hot-Dip Galvanized* - HDG) são produzidas pelo processo de imersão da tira de aço em um banho de zinco derretido contendo 0,1 a 0,2% de alumínio. Embora as chapas de aço possam ser revestidas somente uma face ou as duas faces, a indústria automobilística predominantemente especifica a utilização de revestimento em ambas as faces.

A SAE [19] descreve as especificações típicas utilizadas para chapas galvanizadas em peças automotivas, conforme apresentado pela Tabela 7 [19]

Tabela 7 – Especificações típicas de revestimento de chapas galvanizadas por imersão a quente [19].

Designação do revestimento	Limite Mínimo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m ²)	Limite Máximo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m ²)
0G	0	0
20G	20	60
60G	60	110
70G	70	120
90G	90	140
98G	100	160
100G	100	140

Notas:

- 60G0G refere-se um lado aço galvanizado: 60 à 110 g/m² um lado e 0 g/m² no outro lado.
- 100G100G refere-se aos dois lados igualmente galvanizados: 100 a 140 g/m² cada lado.
- 90G70G refere-se à aço galvanizado diferentemente: 90 a 140 g/m² em uma lado e 70 a 120 g/m² no outro lado.
- Algumas montadoras Norte Americanas têm limites mais restritos que os mostrados acima. Outras têm os limites baseado em medições de pontos triplos.

O Zinco oferece uma proteção anódica as superfícies expostas do aço na maioria das condições de exposição, agindo como proteção de sacrifício e o revestimento de zinco continuará oferecendo proteção ao metal base mesmo após a penetração da corrosão pelo revestimento ou o acontecimento de danos mecânicos ou cortes na chapa. O zinco protege a superfície do aço em temperaturas moderadas, contudo não é recomendado o uso em temperaturas acima de 260 °C.

As chapas galvanizadas podem ser estampadas, enroladas e conformadas em estampagem profunda, por isso são altamente utilizadas em componentes do automóvel. Podem ser soldadas pelas mais diversas formas, como por resistência elétrica, por arco de solda, laser e solda ponto, contudo o processo de solda deve ser ajustado conforme as peculiaridades do metal. O processo através de arco de solda produz vapores de oxido de zinco, prejudiciais a saúde e, portanto demandam um sistema de ventilação. Solda por resistência elétrica deste material requer altas correntes, alta pressões e ciclos mais longos comparando-se com aços não revestidos.

Chapas revestidas de liga Fe-Zn (*Galvaneal-GA*) são produzidas pelo aquecimento das tiras de aço revestidas com zinco durante a operação de

galvanização contínua, imediatamente após a imersão a quente. A preparação do revestimento GA começa pela imersão da tira de aço em banho de zinco fundido que também contém alumínio (0,1 a 0,2%) para o controle de extensão da liga de ferro e zinco. A densidade do revestimento é controlada pela remoção do excesso de zinco através de sopros de ar após a saída da tira de aço do banho de zinco. A tira então é re-aquecida para iniciar a difusão do zinco com o ferro do metal base. A temperatura da tira é mantida para permitir a difusão do ferro com a superfície do revestimento e então é resfriada rapidamente para interromper o processo de difusão.

O revestimento GA consiste em aproximadamente 8 a 18% de ferro e o balanço de zinco. Diferente do revestimento de zinco puro (HDG), que apresenta uma aparência prata reflexiva, o revestimento de liga de ferro e zinco (GA) tem uma coloração cinza.

O GA apresenta menor proteção de sacrifício para as superfícies expostas do aço quando comparado com revestimento de zinco puro. Também devido a presença de ferro no revestimento. Os produtos da corrosão apresentam coloração avermelhadas puxando para o marrom, enquanto os produtos de corrosão em galvanizados são brancos. As ligas de revestimento de zinco e ferro são também melhores para solda e oferecem melhor adesão à pintura do que os revestimentos de zinco puro. Elas são conseqüentemente, mais utilizadas para painéis externos, fechamento de painéis e componentes estruturais do veículo. A Tabela 8 [19] descreve as especificações típicas utilizadas para chapas com revestimento Fe-Zn em peças automotivas.

Tabela 8 - Especificações típicas de revestimento Ferro/Zinco de chapas por imersão a quente [19].

Designação do revestimento	Limite Mínimo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m ²)	Limite Máximo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m ²)
30A	30	60
40A	40	80
50A	50	90
60A	60	90

Notas:

- a. Algumas montadoras Norte Americanas têm limites mais restritos que os mostrados acima. Outras têm os limites baseado em medições de pontos triplos.

Chapas revestidas com alumínio, conhecidas como aluminizadas, são produzidas por imersão de tiras de aço limpas em um banho de alumínio fundido contendo 8 a 12% de silicone. A densidade do revestimento é normalmente 120 g/m² total em ambas superfícies.

As chapas aluminizadas são altamente aplicadas em peças do sistema de exaustão do motor do veículo incluindo tubos intermediários, abafadores e escapamento traseiro, devido a sua proteção contra a corrosão proveniente das altas temperaturas, contudo este tipo de material também tem aplicação na construção de tanques de combustíveis automotivos.

Revestimento de ligas de Alumínio e Zinco, conhecido como Galvalume também são produzidos por imersão de tiras de aço limpas em banho de alumínio fundido contendo 55% de alumínio, 43,5% de zinco e 1,5% de silicone. O revestimento consiste em um alumínio rico em zinco. A densidade do revestimento normalmente fica em 150 g/m² total em ambas superfícies da chapa de aço. A aplicação deste revestimento na indústria automobilística é similar a chapa aluminizada, em componentes que requeram proteção contra corrosão proveniente de alta temperaturas, podendo citar como exemplos defletores de calor do sistema de escapamento e do tanque de combustível e peças sob o capô.

Revestimento de ligas de Chumbo e Estanho, conhecidos como Chumbadas ("*Terne*") possuem uma liga de chumbo contendo normalmente 8% de estanho. Até o ano 1980, foram largamente utilizadas na indústria automobilística na construção de tanques de combustível, contudo, os princípios de proteção ambiental e desenvolvimento de materiais recicláveis e não tóxicos tornou-se cada vez mais importantes na indústria automobilística, e recentemente ocorreu a regulamentação da quantidade de chumbo nos automóveis, conseqüentemente a utilização do chumbo como revestimento de proteção das chapas de aços empregadas nos tanques de combustível teve uma diminuição drástica, sendo totalmente substituídos pelos revestimentos que não possuem chumbo em sua composição.

2.3.1.2.2. REVESTIMENTOS DE CHAPAS DE AÇO POR PROCESSO DE ELETRODEPOSIÇÃO – *ELECTROPLATED*

Revestimentos por eletrodeposição são aplicados em baixa temperatura em processo contínuos onde a carga negativa da chapa de aço é passada entre cargas

positivas de anodos. Íons metálicos em banho eletrolítico são reduzidos e depositados na superfície da chapa de aço formando o revestimento. A composição do banho, a velocidade eletrolítica, a intensidade da corrente, e a temperatura determinam a química e as propriedades da liga de revestimento metálica aplicada. A corrente de deposição e a velocidade de passagem da chapa determinam a espessura do revestimento.

O esquema de uma linha contínua típica de produção de chapas com revestimento por eletrodeposição está mostrado na Figura 18 [19].

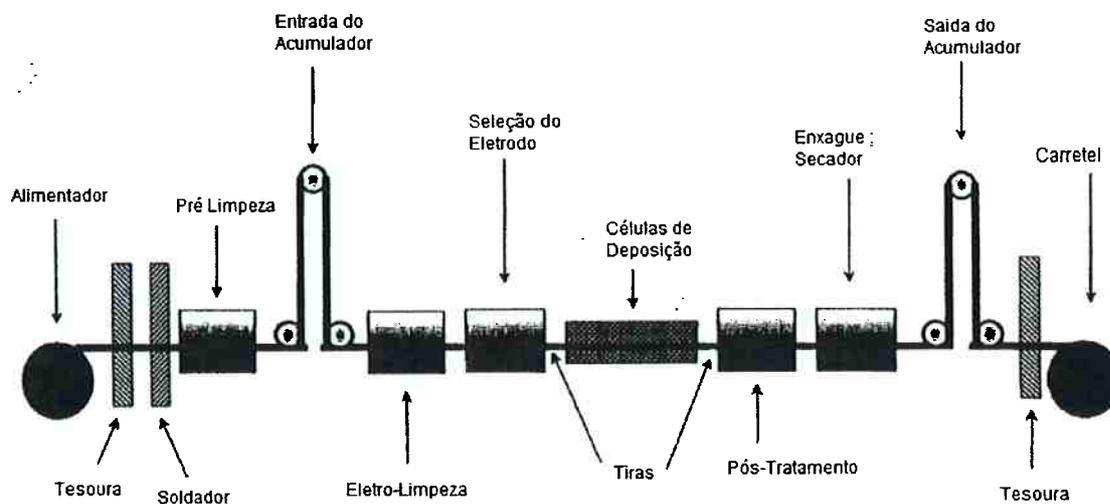


Figura 18 – Esquema de uma linha contínua de produção de chapas com revestimento por eletrodeposição.

Estes tipos de revestimentos são particularmente atrativos para a indústria automobilística, devido sua uniformidade na aparência, sua maleabilidade, sua qualidade no processo de solda e controle de espessura de revestimento. A Eletrodeposição pode ser aplicada em uma superfície ou em ambas as superfícies da chapa de aço com a mesma ou diferentes espessuras de revestimento em cada superfície.

Os principais tipos de revestimento aplicados nas chapas de aço por eletrodeposição disponível atualmente são:

- o Revestimento de Zinco puro e;

- o Revestimento de ligas de Zinco, como por exemplo, ligas de zinco-ferro e zinco-níquel.

Revestimento eletrolítico de zinco puro (EZ) é o mais utilizado como revestimento em chapas de aço, especialmente para painéis da carroceria expostos. Similar ao HDG, o revestimento de zinco é significativamente anódico para revestir o aço, conseqüentemente protege galvanicamente o metal base contra corrosão. Os produtos de corrosão em EZ e HDG são tipicamente de coloração brancas dos óxidos de zinco, hidróxidos ou carbonetos que normalmente são menos questionáveis para o consumidor quando comparados com produtos de corrosão vermelha. O uso de EZ no lugar de HDG se sobressai devido a uniformidade de espessura de revestimento e as características de superfície (rugosidade).

Segundo a SAE [19], a faixa de espessura de revestimento varia de 4 a 13 μm (20 a 90 g/m^2) por lado e está especificada conforme descrito na tabela 9 [19].

Tabela 9 – Especificação e tolerâncias de revestimentos de zinco por eletrodeposição [19].

Designação do revestimento	Limite Mínimo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m^2)	Limite Máximo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m^2)
60G00G	60/0	70/0
60G60G	60/60	60/60
70G70G	70/70	80/80

As dos dois principais revestimentos de ligas de zinco por eletrodeposição são as ligas formadas por zinco-níquel e zinco-ferro, sendo revestimentos de grande importância comercial para a indústria automobilística. Ambos protegem galvanicamente o aço, e são similares ao revestimento EZ, mas com a vantagem de diminuição das taxas de dissolução do revestimento possibilitando a mesma durabilidade do revestimento porém com menor densidade em peso.

Os revestimentos de zinco-níquel contem de 10 a 14% de níquel e são aplicadas em espessuras de 3 a 6 μm (20 a 40 g/m^2). Este revestimento é utilizado em painéis expostos ou não do veículo devido sua resistência à corrosão, superior soldabilidade sobre EZ, HDG e GA, e boa formabilidade.

Os revestimentos de zinco-ferro por eletrodeposição oferecem melhor soldabilidade, aparência e uniformidade de espessura de revestimento em

comparação a zinco-ferro por imersão a quente, e a superfície. Geralmente contém 8 a 18% de ferro e são aplicados a espessura de 7 μm por lado (50 g/m^2). São normalmente aplicados em painéis expostos do veículo, em regiões onde a aparência e uniformidade de espessura de revestimento são preocupantes.

Segundo a SAE, as especificações e tolerâncias para revestimentos de liga de zinco por eletrodeposição estão listadas na tabela 10 [19].

Tabela 10 – Especificação e tolerâncias de revestimentos de ligas zinco por eletrodeposição [19].

Designação do revestimento	Tipo de Liga	Limite Mínimo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m^2)	Limite Máximo de verificação em Teste de Ponto Simples (g/m^2)
30N30N	ZnNi	30/30	40/40
20N20N	ZnNi	20/20	30/30
40A40AEL	ZnFe	40/40	55/55
45A45A	ZnFe	45/45	55/55

E finalmente podemos citar a utilização de aço inoxidável aplicado na construção dos tanques. Este tipo de material é pouco utilizado comercialmente para a produção de tanques de combustível devido ao seu alto custo de matéria prima e de sua complexidade do processo de conformação. Somente em 2003 uma empresa japonesa (JFE Steel Corporation) apresentou a utilização de aço inoxidável aplicado na construção dos tanques, e ainda não há registros de utilização deste tanque em produção [20].

2.3.2. PLÁSTICOS DE ALTA DENSIDADE (PEAD)

2.3.2.1. INTRODUÇÃO AOS POLÍMEROS

O plástico é o termo comum para um dos materiais que pertence à família dos polímeros. Polímeros são materiais compostos por macromoléculas, e essas macromoléculas são compostas pela repetição de uma unidade básica, chamada mero. Daí o nome: *poli* (muitos) + *mero*.

A matéria prima que dá origem ao polímero chama-se monômero, e no caso do polietileno (PE) é o etileno ou anteriormente conhecido como eteno. O etileno é

obtido a partir do petróleo ou gás natural, pois atualmente este é o processo de menor custo para a sua obtenção.

2.3.2.2. CLASSIFICAÇÃO DOS POLÍMEROS

Segundo MICHAELI W. [42], existem diversas maneiras de se dividir os polímeros, a classificação conforme a características mecânicas talvez seja uma das mais importantes. Ela decorre na verdade, da configuração específica das moléculas do polímero.

Sob este aspecto, MICHAELI [42] apresenta os polímeros divididos em:

- o Termoplásticos;
- o Termorrígidos (ou termofixos) e;
- o Elastômeros (borrachas).

Termoplásticos são os chamados popularmente de plásticos, constituindo a maior parte dos polímeros comerciais. A principal característica desses polímeros é poder ser fundido diversas vezes, e dependendo do tipo de plástico, também podem dissolver-se em vários solventes. Logo sua reciclagem é possível, uma característica bastante desejável nos dias de hoje.

As propriedades mecânicas dos termoplásticos também variam conforme a temperatura, ou seja, com a variação da temperatura estes materiais podem ser maleáveis, rígidos ou mesmo frágeis.

A estrutura molecular é composta por moléculas lineares dispostas na forma de cadeias soltas, mas agregadas, com uma aparência de num novelo de lã.

Exemplos de termoplásticos são: polietileno (PE), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET), policarbonato (PC), poliestireno (PS), poli-cloreto de vinila (PVC), poli-metilmetacrilato (PMMA). Muito utilizados em diversas aplicações dentro da indústria automobilística, desde cliques de fixação até tanque de combustível.

Termorrígidos (termofixos), pelo próprio nome são rígidos e frágeis, sendo muito estáveis à variação de temperatura. Uma vez prontos, não mais se fundem. O aquecimento do polímero a altas temperaturas promove a decomposição do material antes de fusão, logo sua reciclagem é muito complicada.

A estrutura molecular, na verdade as cadeias estão ligadas fisicamente entre si, formando uma rede ou reticulado. Estes estão presos entre si através de

numerosas ligações, não se movimentam com alguma liberdade como nos casos dos termoplásticos. Pode-se fazer uma analogia com uma rede de malha muito fina.

Exemplos encontrados são, baquelite, usada em tomadas e no embutimento de amostras metalográficas, poliéster usado em carrocerias, caixas d'água, piscinas, etc., na forma de plástico reforçado (fiberglass).

Elastômeros ou borrachas são as classes intermediárias entre os termoplásticos e os termofixos, não são fusíveis, mas apresentam alta elasticidade, não sendo rígidos como os termofixos. A reciclagem é complicada pela incapacidade de fusão, de forma análoga aos termofixos.

A estrutura molecular é similar a apresentada nos termofixos, exacto pelo menor número de ligações entre as cadeias, ou seja, é como se fosse uma rede, mas com malhas bem mais largas que os termorrígidos.

Exemplos são pneus, vedações, mangueiras de borracha.

2.3.2.3. POLIETILENO (PE)

MICHAELI [42] apresenta o Polietileno ou abreviadamente PE como composto pela repetição de milhares de unidades da molécula básica do etileno conforme ilustrado na Figura 19 [42], onde o parâmetro n é definido como sendo o Grau de Polimerização do polímero (GP), ou seja, o número de meros que constitui a macromolécula. Normalmente n está contido entre 50.000 a 300.000. Ou seja, uma molécula de polietileno é constituída da repetição de 50.000 ou mais unidades de etileno.

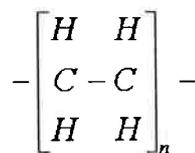


FIGURA 19 – Esquema de uma molécula de etileno

As principais propriedades do polietileno são: baixo custo, elevada resistência química a solventes, baixo coeficiente de atrito, macio e flexível, fácil processamento, excelentes propriedades isolantes, baixa permeabilidade à água, atóxico e inodoro.

Existem quatro tipos básicos de polietilenos:

- o Polietileno de baixa densidade (PEBD);
- o Polietileno de baixa densidade linear (PEBDL);
- o Polietileno de alta densidade (PEAD) e;
- o Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM).

Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), com densidade de 0,910 a 0,93 g/cm³. Apresenta moléculas com alto grau de ramificação. É a versão mais leve e flexível do PE. Utilizado basicamente em filmes, laminados, recipientes, embalagens, brinquedos, isolamento de fios elétricos.

Polietileno de Baixa Densidade Linear (PEBDL), possui densidade de 0,918 a 0,940 g/cm³. Apresenta menor incidência de ramificações, as quais se apresentam de forma mais regular e são mais curtas que no PEBD. As propriedades mecânicas são ligeiramente superiores ao PEBD em termos de resistência mecânica e seu custo de fabricação é menor. Sua flexibilidade e resistência ao impacto recomendam sua aplicação para embalagens de alimentos, bolsas de gelo, utensílios domésticos, canos e tubos.

Polietileno de Alta Densidade (PEAD), densidade de 0,935 a 0,960 g/cm³. Apresenta estrutura praticamente isenta de ramificações. É um plástico rígido, resistente a tração, com moderada resistência ao impacto. Utilizado em recipientes, garrafas, filmes, brinquedos, materiais hospitalares, tubos para distribuição de água e gás e tanques de combustível automotivos.

Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular (PEUAPM), grau de polimerização (GP) da ordem de 3.000.000 a 6.000.000. Alta inércia química, alta resistência a abrasão e ao impacto, baixo coeficiente de atrito e alta maciez. Praticamente infusível, e processado com grande dificuldade, geralmente através de sinterização. Aplicado em engrenagens, componentes para bombas de líquidos corrosivos, implante de ossos artificiais, isolamento de fios e cabos, mancais, revestimento de pistas, trilhos e guias.

2.3.2.4 PROPRIEDADES TÍPICAS DO POLIETILENO

Pelo exame das especificações propostas pela American Society of Metals – ASM, pode-se ter uma idéia das propriedades típicas do polietileno, resumido na tabelas 11 e 12 [43].

Tabela 11 – Propriedades mecânicas do polietileno conforme ASM International Handbook [43].

Material	Peso Específico (g/cm ³)	Resistência a Tração (MPa)	Alongamento na ruptura (%)	Módulo de Flexão (MPa)	Resistência ao impacto (kg.cm/cm)	Dureza Rockwell R
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	0.95 - 0.96	20 - 30	90/800	1100	0.21 - 7.5	40
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	0.91 - 0.93	17-Jun	20/1000	140 - 185	Não Quebra	10

Tabela 12 – Propriedades térmicas do polietileno conforme ASM International Handbook [43].

Material	Temperatura de Deflexão sob Carga (°C a 18,5 Mpa)	Temperatura máxima de serviço sem carga (°C)	Absorção de água (ASTM D570) (%)
Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	60 - 88	79 - 121	< 0.01
Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	38 - 49	82 - 100	< 0.01

2.3.2.5. POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE APLICADO EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL AUTOMOTIVOS

Devido a evolução das normas de emissões em todo mundo, que serão descritas posteriormente neste trabalho, os tanques em PEAD não são suficientes para garantir a permeabilidade de hidrocarbonetos (HC) e, portanto foi desenvolvido um tanque constituído de multicamadas de polietileno. Esta nova estrutura atende os mais exigentes requisitos de emissões evaporativas ELLIS [21]. Uma construção típica está mostrada na figura 20 [21], e apresenta 4 materiais diferentes em seis camadas. A característica principal é a utilização de uma camada de um copolímero formado de etileno-vinil álcool (EVOH) que funciona como uma barreira a emissões evaporativas, duas camadas de PEBDL maleáveis são necessárias para prover a adesão entre o EVOH e o PEAD virgem existente nas camadas externas e internas do tanque. Adicionalmente, uma camada de PEAD reciclado derivado do próprio processo de produção do tanque é adicionada para formar a estrutura da parede do tanque de combustível.

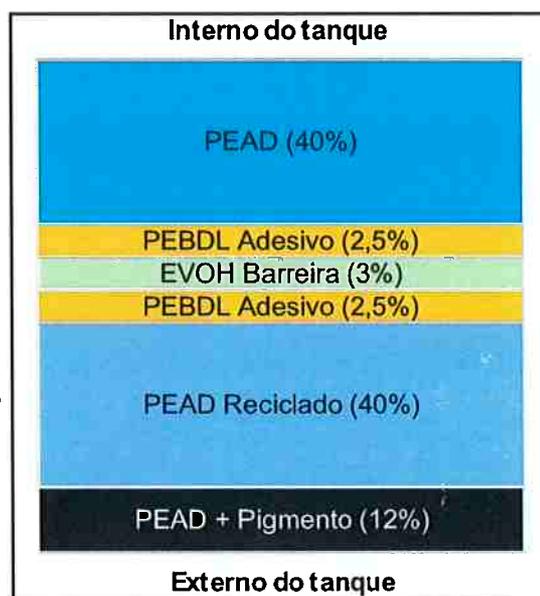


Figura 20 - Representação esquemática da estrutura de um tanque multicamadas de combustível.

Este tipo de construção de tanques plásticos de combustível em camadas é conhecido comercialmente como "COEX".

3. MODELOS DE DECISÃO

Em seu livro, KAMINSKI (2000) [22] define o anteprojeto, ou projeto básico, como o projeto preliminar cujo objetivo é estabelecer uma concepção geral para o produto a ser desenvolvido que servirá de base para o projeto executivo ou de fabricação. O primeiro passo a ser executado nesta etapa é a avaliação da alternativa, ou alternativas que se mostram mais promissoras. Essa escolha normalmente é realizada a partir de uma análise comparativa entre as várias propostas, procurando-se destacar os pontos fortes e fracos de cada uma.

Uma decisão não é uma tarefa fácil de realizar na prática, devido ao grau de incerteza ainda presente nos estudos desenvolvidos de cada alternativa, bem como ao grau de subjetividade ainda necessário para ponderar os atributos com base nos quais as soluções são classificadas.

Para diminuir a subjetividade KAMINSKI (2000) [22] propõe estabelecer critérios de projetos, ou atributos da forma mais quantitativa possível para facilitar a quantificar as grandezas abstratas envolvidas, de modo que se faça um bom julgamento da melhor opção. Lembrando ainda, que essa capacidade de julgamento e bom senso são adquiridos através da experiência e de um profundo conhecimento dos fenômenos e/ou processos envolvidos na fabricação e operação de um futuro produto.

VINCKE (1986) [23] demonstra que em muitos problemas de decisão, verifica-se que há mais de um objetivo a ser atingido. Este conjunto de objetivos chama-se conjunto de critérios ou atributos. Os critérios são utilizados como parâmetros de avaliação para o conjunto genérico "A" de alternativas. Através da definição dos critérios do problema podem-se utilizar estes para fazer comparações entre as alternativas.

VINCKE (1983) [23] ainda define critério como uma função "g", definida no conjunto "A", que atribui valores de ordenação do conjunto, e representa as preferências da pessoa que vai tomar a decisão segundo o seu ponto de vista.

Na exposição de ROTONDARO et al (2002) [24] referente a filosofia de projetos, *Design for Six Sigma* (DFSS), a primeira fase é atribuída à chamada seleção de projetos, onde os atributos que o cliente considera mais importantes em termos de decisão do projeto devem ser identificadas.

Em seu livro, KAMINSKI (2000) [22] apresenta uma forma de construção de uma matriz de decisão como uma forma sistemática de classificar as alternativas segundo os critérios de projeto. Esta matriz tem por entradas os atributos (critérios de projeto) nas linhas e as várias alternativas desenvolvidas nas colunas. Atribuindo-se pesos a cada atributo, tem-se a sua importância relativa. Atribuindo-se notas (por exemplo, de 0 a 5) a cada alternativa proposta, tem-se a avaliação relativa de cada uma para aquele atributo. A soma desses graus multiplicados pelos seus pesos fornece valores globais que permitem a classificação e seleção da melhor alternativa.

3.1. ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

Para aplicar qualquer método de decisão, o primeiro passo é a estruturação do problema. Conforme ENSSLIN et al. [25], adota-se o uso de estruturas hierárquicas, também denominadas arborescentes, para se representar o modelo de decisão. Nas estruturas hierárquicas, o objetivo da decisão é colocado no primeiro nível hierárquico. No segundo nível estão os critérios adotados e finalmente no último nível hierárquico encontram-se as alternativas.

Este estudo está focado na decisão de qual material, metálico ou plástico, tem a melhor aplicação em um determinado projeto de tanque de combustível de veículos de passageiros.

Um projeto de tanque de combustível tem como principais critérios de desempenho: processo de produção (Manufaturabilidade), forma e desenho, peso, segurança, proteção contra corrosão, permeabilidade (emissão de hidrocarbonetos) e reciclagem, o que torna difícil qualquer decisão sem uma profunda discussão dos pontos fortes e fracos da utilização de cada alternativa (metálico ou plástico).

A figura 21 ilustra a estrutura hierárquica de decisão para o início de um projeto de tanque de combustível.

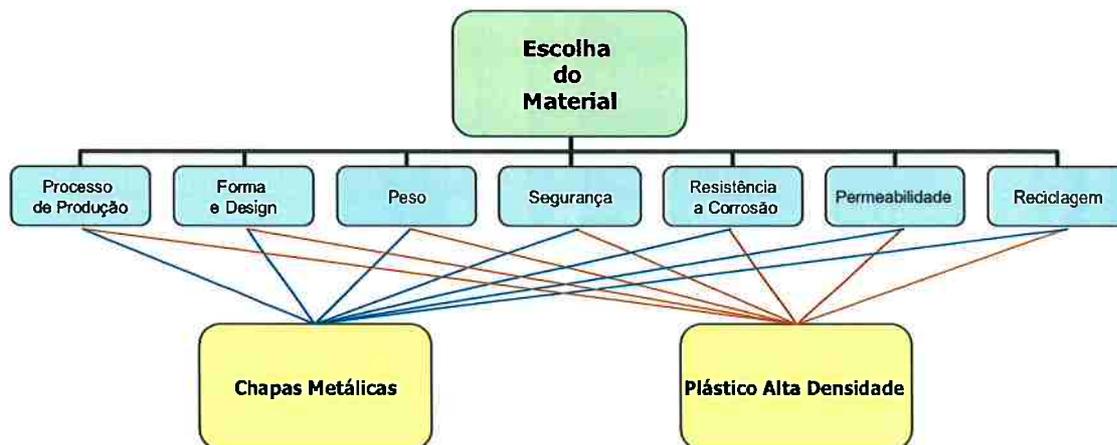


Figura 21 – Estrutura hierárquica para a escolha do material aplicado em um projeto de tanque de combustível.

4. PARAMETROS DE DESEMPENHO DOS TANQUES METÁLICOS DE COMBUSTÍVEL VERSUS PLÁSTICOS

Conforme mencionado anteriormente, os critérios utilizados para a decisão de qual o melhor tipo de material, plástico ou metálico, a ser aplicado em um projeto de tanque de combustível foram: processo de produção (Manufaturabilidade), forma e desenho, massa, segurança, proteção contra corrosão, emissões de hidrocarbonetos e reciclagem.

4.1. PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE TANQUES DE COMBUSTÍVEIS

Os processos de produção de um tanque metálico são bem distintos em relação a um tanque plástico, portanto abaixo descrevemos ambos os processos de produção.

4.1.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TANQUES METÁLICOS DE COMBUSTÍVEL

O processo de produção de um tanque metálico de combustível pode ser resumidamente dividido em 6 etapas distintas: Repuxo ou embutimento, estampagem e corte, soldagem das partes superiores e inferiores, soldagem dos componentes do tanques de combustível, pintura, montagem dos componentes e testes de verificação contra vazamentos.

O repuxo ou embutimento é um processo de fabricação de peças, pelo qual uma chapa metálica adquire forma volumétrica, oca, previamente definida. As ferramentas que executam esse trabalho tem as mesmas características dos estampos de corte e dobra. São formadas basicamente por um punção e uma matriz. Esta operação pode ser realizada em tipos diferentes de prensa, dependendo da força necessária, das dimensões da peça e da produção desejada. Existem vários tipos de prensa, com diferentes estruturas e funcionamento, como por exemplo, prensa de fricção, prensa excêntrica, prensa de alavanca e prensa hidráulica. Dessas, a prensa hidráulica é a mais indicada para a operação de repuxo devido à vantagem de regulagem da pressão do óleo evitando com isso a formação

de rugas. A figura 22 [20] ilustra uma prensa hidráulica utilizada na operação de repuxo.

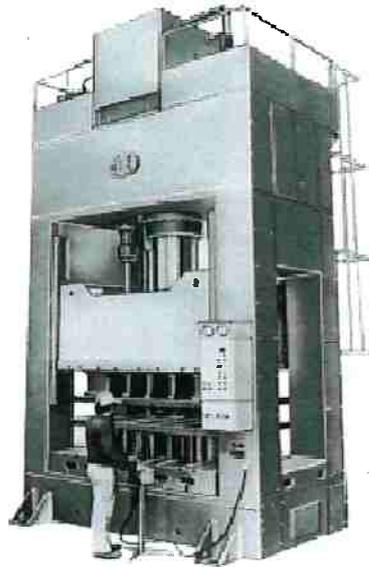


Figura 22 – Prensa hidráulica para operações de repuxo

A operação de repuxo é efetuada para a conformação das duas metades do tanque de combustível, a parte inferior e a parte superior, deixando sempre um flange no qual serão posteriormente soldadas para formar uma única peça. A figura 23 [26] ilustra o repuxo da parte inferior de um tanque de combustível.

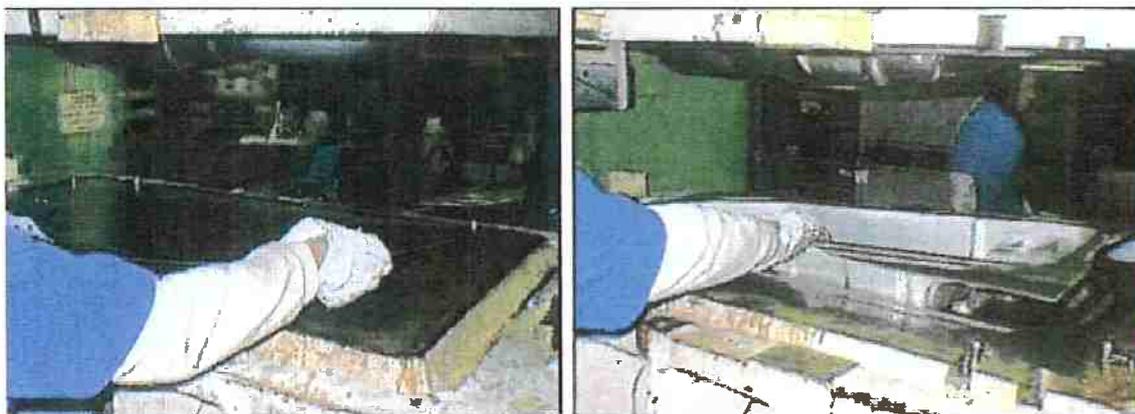


Figura 23 – Exemplo da operação de repuxo em tanque metálico de combustível.

Logo após a operação de repuxo a peça é analisada quando a qualidade da operação verificando a existência de rugas excessivas ou trincas na chapa do tanque, que possam comprometer a qualidade da peça.

Em seguida a peça segue para a operação de estampagem e corte, onde são realizados os furos e demais estampagens necessárias para a montagem dos diversos outros componentes do tanque de combustível (módulo de alimentação, válvulas de ventilação, conforme descrito anteriormente). A Figura 24 [26] exemplifica duas operações de corte realizadas após o repuxo da chapa de aço.

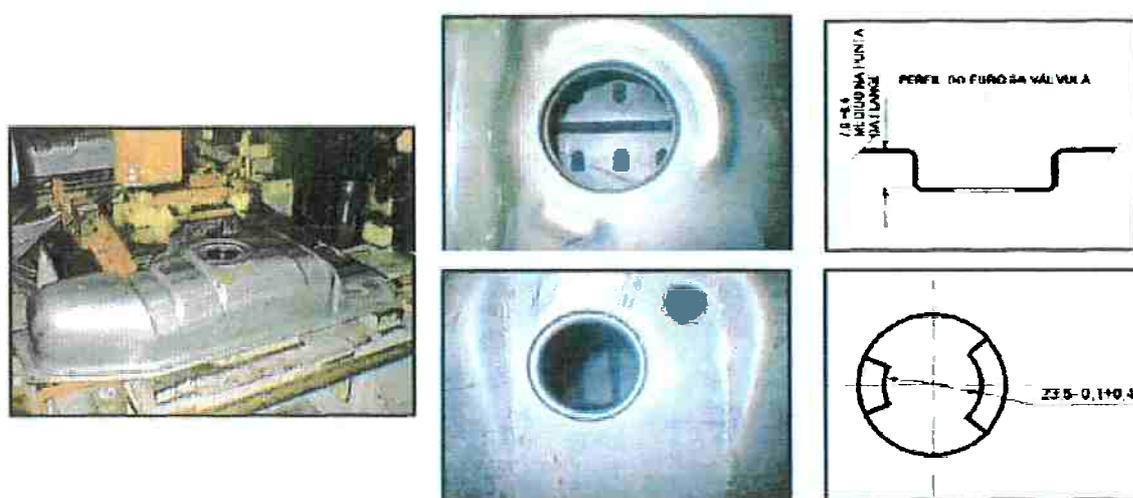


Figura 24 – Operação de estampagem, corte e furos do tanque metálico de combustível após repuxo.

Em seguida as peças são limpas de qualquer oleosidade e impureza proveniente das operações anteriores, preparando-as para o processo de soldagem das duas metades do tanque (parte inferior e superior).

A operação de solda das duas metades é realizada através de solda por rolos, ou conhecida como costura. Este é o processo no qual o calor gerado pela resistência do fluxo de corrente elétrica no metal é combinado com a pressão para produzir a costura soldada. A costura consiste numa série de pontos de solda. Dois eletrodos girando são utilizados para fornecer corrente, força e refrigeração durante o processo de soldagem. A Figura 25 [26] ilustra a operação de solda por rolos ou costura.



Figura 25 – Operação de solda por rolos (Costura) dos tanques metálicos de combustível.

O tanque então segue para a soldagem dos componentes como, tubo de enchimento, tubo de ventilação e elementos de fixação. Esta operação pode ser realizada através do processo de soldagem conhecido como brazagem. Este processo consiste na junção de metais através do uso de aquecimento de um metal de enchimento, no caso específico de tanques de combustível normalmente utiliza-se o estanho como metal de junção ou preenchimento. Importante ponto sobre este processo é que não há a fusão do metal base, e conseqüentemente as temperaturas utilizadas no processo são bem abaixo das temperaturas de fusão dos metais base. Outros componentes como o anel de travamento, por exemplo, são soldados através de solda ponto quando não precisam ultrapassar a superfície da chapa para dentro do tanque. A Figura 26 [26] ilustra a operação de soldagem dos componentes através da brazagem.

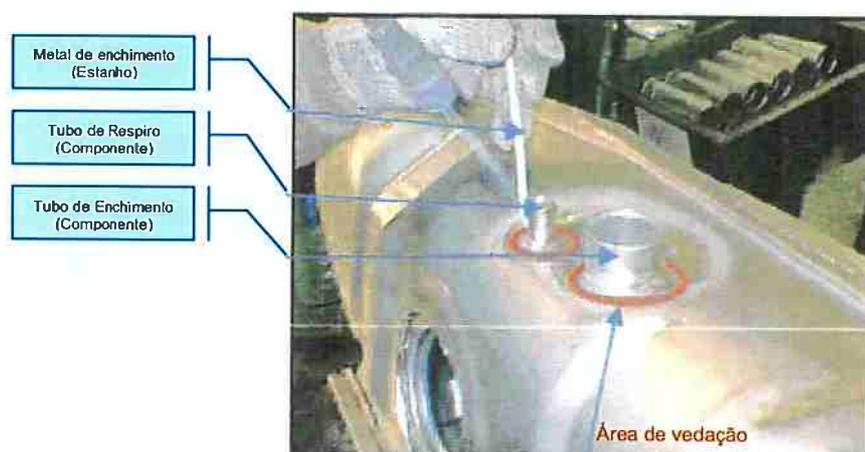


Figura 26 – Operação de solda dos componentes dos tanques metálicos de combustível.

Os tanques, então são enviados para o processo de pintura. Esta pintura tem somente a função de acabamento ou aparência, pois as chapas de aço utilizadas para produzir os tanques de combustível já possuem proteção contra corrosão, conforme mencionado anteriormente. O processo de pintura pode ser manual ou automatizado dependendo do volume de produção. Existem ainda tanques metálicos de combustível que não recebem nenhum tipo de pintura durante seu processo de fabricação, sendo entregues às montadoras diretamente no material de fabricação. A Figura 27 [26] ilustra a operação de pintura manual de um tanque metálico de combustível.



Figura 27 – Operação de pintura manual de tanques metálicos de combustível.

Finalmente os demais componentes, como módulo de alimentação (bomba de combustível), cintas de fixação, válvulas de controle de ventilação e em alguns casos o gargalo de enchimento são montados no tanque de combustível. Esta operação normalmente é realizada manualmente por operadores que têm auxílio de equipamentos de ajuste de torques e travamento das fixações aplicadas em cada componente. A Figura 28 [26] ilustra a montagem de alguns destes componentes no tanque metálico de combustível.

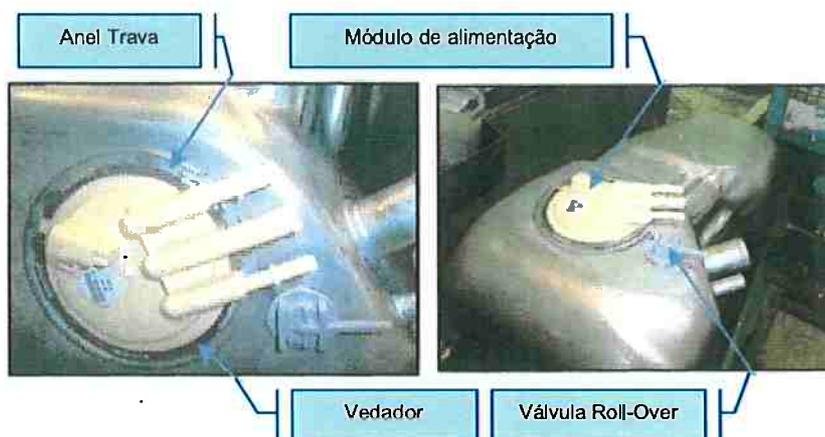


Figura 28 – Montagem final dos componentes dos tanques metálicos de combustível.

Por último, mas não menos importante temos a verificação de todos os componentes montados no tanque de combustível. Nesta fase é realizado também o teste contra vazamentos do conjunto. Esta avaliação ocorre em todas as peças que serão entregues para as montadoras, e controladas através de processo estatístico de produção. Isto representa uma garantia para a montadora que não haverá problemas de vazamentos de combustível nos tanques montados nos veículos de sua linha de produção. O teste consiste em mergulhar o conjunto tanque de combustível por completo em uma banheira com água, e então o tanque é pressurizado a uma pressão de 6,0 a 6,5 psi e inspecionado por em média 30 segundos para verificar a existência de vazamentos em qualquer região do tanque de combustível. A Figura 29 [26] ilustra o teste de verificação de vazamentos executados em tanques de combustíveis.



Figura 29 – Teste de verificação de vazamento em tanques metálicos de combustível.

4.1.2. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE TANQUES PLÁSTICOS DE COMBUSTÍVEL

Para a fabricação de um tanque plástico de combustível utiliza-se o processo conhecido como extrusão-sopro do plástico em moldes. O princípio geral de moldagem por extrusão-sopro consiste em fundir a matéria prima (PEAD) na exata proporção do produto final e então extrudar-la verticalmente na forma de um tubo chamado de parison.

A Figura 30 [5] ilustra a extrusão do parison para o sopro no molde.



Figura 30 – Operação de Extrusão Sopro de tanques plásticos de combustível.

O ("Parison") é expandido no interior de um molde oco bipartido, por meio de injeção de ar comprimido e forçado a assumir o formato interior do molde. Então o molde é aberto, retira-se a peça e remove-se o excesso de material acumulado (Rebarbas). E esta sobra é aproveitada como parte da matéria prima do sopro de demais tanques.

A Figura 31 [5] ilustra a saída do tanque de combustível do molde após o sopro.



FIGURA 31 – Operação de saída do tanque plástico do molde de sopro.

O tanque deve ser resfriado antes da montagem dos demais componentes. A operação de resfriamento do tanque é extremamente importante para a qualidade dimensional da peça, pois o resfriamento é que permite que o tanque plástico de combustível mantenha as dimensões estabelecidas no projeto. Em processo produtivo, equipamentos como tanques de água ou sopros de ar são utilizados para acelerar o processo de resfriamento das peças.

A Figura 32 [5] ilustra a operação de resfriamento do tanque de combustível após a saída do molde.



FIGURA 32 - Processo de resfriamento do tanque plástico de combustível.

E semelhante ao processo de fabricação de tanques metálicos, os tanques plásticos seguem para a montagem manual dos demais componentes do sistema de combustível. A Figura 33 [5] ilustra a operação de montagem dos componentes no tanque plástico de combustível.



FIGURA 33 - Processo de montagem dos componentes do tanque plástico de combustível.

O tanque plástico de combustível também é submetido à verificação contra vazamentos semelhante ao tanque metálico no mesmo processo de mergulho em um reservatório com água, antes da liberação do produto para o uso.

4.1.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE TANQUES METÁLICOS VERSUS PLÁSTICOS

O custo da matéria prima aplicada no processo de produção de tanques plásticos (PEAD) apresenta uma vantagem em relação ao custo de chapas de aço utilizadas no tanque metálico. Isso ocorre, pois as chapas de aço devem apresentar proteção contra corrosão tanto pelo combustível quanto pelo ambiente durante o uso de veículo.

Contudo o custo da matéria prima não é somente o único fator a ser considerado. O investimento necessário para os equipamentos de produção é outro fator de grande relevância na escolha do projeto do tanque de combustível. Neste ponto os equipamentos de estampagem, solda, e montagem dos tanques metálicos apresentam custos menores em relação aos equipamentos para a produção dos tanques de plástico considerando um mesmo volume de produção, uma vez que os equipamentos de produção de tanques de plástico como descrito anteriormente, são quase totalmente automatizados e por isso é necessário um alto volume de produção para compensar o investimento aplicado.

4.2. FORMA E DESENHO INDUSTRIAL

Os tanques plásticos de combustível têm a habilidade de atender maiores restrições de espaço, pois o material plástico e seu processo de fabricação através de moldes, permitem formas geométricas mais complexas quando comparadas a um tanque metálico, podem virtualmente se encaixar em qualquer espaço deixado no veículo, facilitando a sua instalação em projeto. Por outro lado os tanques metálicos necessitam de uma forma geométrica mais regular devido ao processo de fabricação de estampagem de chapas de aço e requerem um espaço mais adequado devido a flange existente nos mesmos.

Por exemplo, em um veículo de passageiro com tração traseira ou com transmissão nas quatro rodas (4x4), existe uma grande restrição de espaço disponível para se acomodar um tanque de combustível devido ao eixo de transferência da transmissão correr sob o veículo desde a transmissão localizada na parte dianteira até o eixo traseiro, sendo quase a total extensão do veículo. Neste caso um tanque plástico de combustível pode ser projetado para ocupar os espaços sobre o eixo de transferência (Cardã) de forma a obter o máximo volume de armazenamento possível. Em um tanque metálico este projeto teria uma grande dificuldade, e possivelmente não teria o mesmo volume de abastecimento de um tanque plástico.

A Figura 34 [5] ilustra exemplos de tanques de combustível de forma complexa.

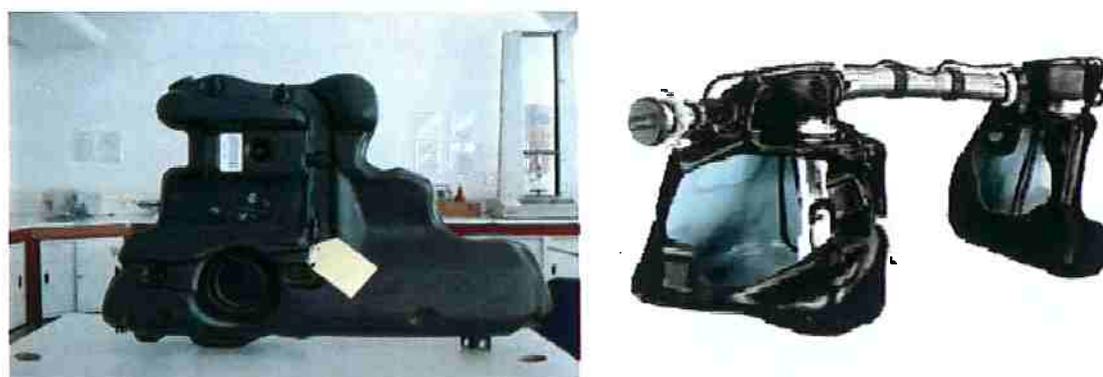


FIGURA 34 - Exemplos de tanques plásticos de combustível com formas complexas.

4.3. MASSA

A questão da massa dos automóveis tem sido um tópico bastante importante para a indústria automobilística. A busca de novas soluções que reduzem o peso dos veículos tem sido constante na implementação de novos projetos. A redução de peso melhora o desempenho do motor, diminuindo o consumo de combustível, e consequentemente maiores lucros para a indústria automobilística. Neste contexto, os tanques de combustível também entram na discussão no qual material seria mais bem aplicado, plástico ou metálico?

SASFT [20] demonstra que considerando somente o reservatório sem os componentes integrados no tanque de combustível e utilizando a mesma geometria para avaliação comparativa, os tanques metálicos de combustível podem ser mais leves que os tanques plásticos de combustível devido à densidade do material e espessura utilizada na chapas de aço.

Rebatendo a afirmação anterior, ALVARADO [27] descreve que tanque plástico de combustível em veículos de passageiros compactos, pode diminuir em até 30% de massa, quando comparado a um tanque metálico similar.

GARRET [4] afirma que tanques plásticos são mais leves em massa do que os metálicos. Tanques plásticos de PEAD com 3 mm de espessura de parede pode ser até 30% mais leve do que tanques metálicos com espessura média de 0,8 mm, comparado-os tanques com a mesma capacidade de volume.

A Figura 35 [4] apresenta um gráfico de massa/cm², elaborado pela empresa BASF, pioneira na produção de tanques em PEAD para combustíveis, comparando com chapas de aço aplicadas em tanques.

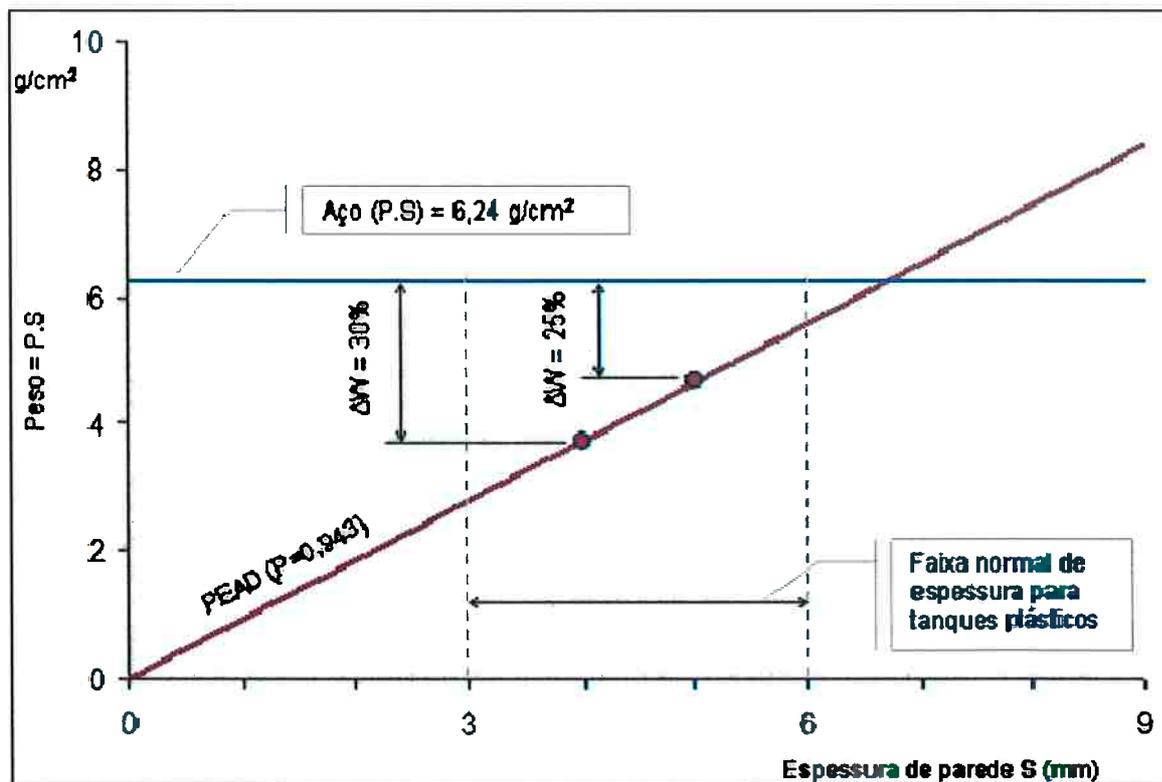


Figura 35 – Gráfico de massa/cm² de chapas de plásticos e chapas de aço [4].

Através do gráfico podemos concluir que tanques plásticos em PEAD apresentam vantagens em massa quando fabricado com espessuras de até 6,0 mm de parede. Espessuras acima de 6 mm, os tanques plásticos apresentam massa similar aos tanques metálicos. Atualmente os tanques de plásticos em PEAD são fabricados com espessura mínima de 6,0 mm devido às diversas camadas necessárias para atender as normas de emissões de hidrocarbonetos.

Por outro lado, todo o sistema de combustível deve ser levado em consideração na comparação de redução de massa, por exemplo, tanques de plásticos normalmente necessitam de suportes adicionais e desenvolvimento de novos suportes para a sua fixação no veículo, em compensação a flange existente nos tanques metálicos pode ser utilizada como vantagem na fixação do tanque no veículo.

4.4. SEGURANÇA

4.4.1 TESTES DE SIMULAÇÃO DE IMPACTO EM VEÍCULOS

A integridade dos tanques de combustível tem sido uma constante preocupação dos engenheiros de projeto dentro da indústria automobilística e especialmente verificada pelas autoridades de regulamentações governamentais nos Estados Unidos, Europa, Japão e Brasil.

Em 1967 o órgão norte americano National Highway Traffic Safety Administration (NHSTA) introduziu a regulamentação Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) n° 301 "Fuel System Integrity" para reduzir as mortes e ferimentos causados por impacto seguido por fogo. Inicialmente a regulamentação era aplicada somente a veículos de passageiros, mas em 1977 caminhonetes leves (pick-ups) foram incluídas. A regulamentação FMVSS n° 301 descreve três testes físicos em escala real, sendo eles: o impacto frontal, lateral e traseiro, seguido por uma verificação de vazamento de combustível, ou seja após o teste de impacto, o veículo é submetido a uma volta de 360° (capotamento) e verificado se a taxa de vazamento de combustível está dentro do especificado.

O impacto frontal compreende em submeter o veículo diretamente à uma barreira rígida plana à uma velocidade de 30 mph (48 km/h). A Figura 36 [39] ilustra alguns exemplos de veículos de passageiros submetidos aos testes de impactos frontais segundo a norma FMVSS 301.

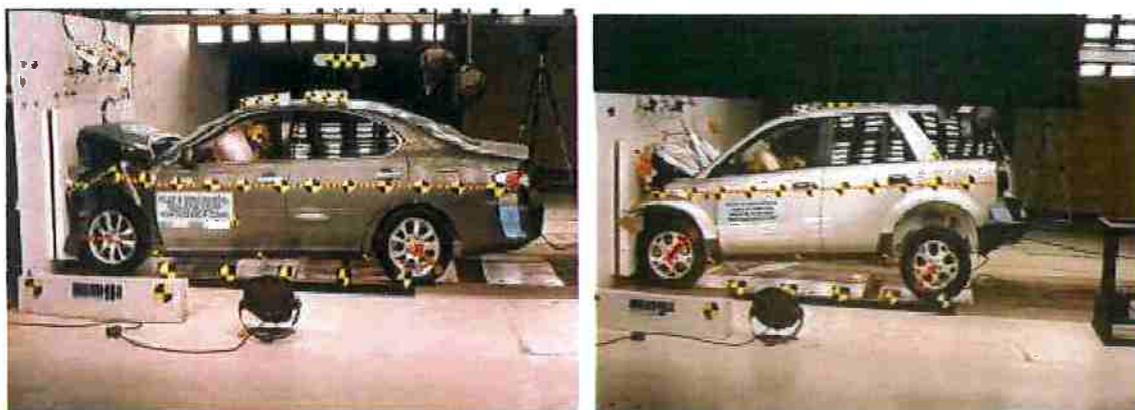


Figura 36 – Exemplos de veículos de passageiros submetidos aos testes de impactos frontais segundo FMVSS 301.

O impacto lateral e traseiro consiste em uma barreira móvel plana de 1814 kg lançada sobre o veículo estacionado. A velocidade do teste é de 30 mph (48 km/h) para o impacto traseiro e de 20 mph (32 km/h) para o impacto lateral. Em cada teste o tanque deve estar com líquido de 90 a 95% de sua capacidade.

A Figura 37 [28] ilustra veículos de passageiros submetidos aos testes de impactos laterais e traseiros segundo norma FMVSS 301.



Figura 37 – Exemplos de veículos de passageiros submetidos aos testes de impactos laterais e traseiros conforme FMVSS 301.

No Brasil, o Conselho Nacional de Trânsito (CONTRAN) [29] estabelece somente os métodos de ensaio de colisão contra barreira frontal para os veículos de passageiros através da resolução CONTRAN N° 463 de 21 de agosto de 1973:

A resolução do CONTRAN N° 463 [29], define que o sistema de combustível composto pelo, reservatório de combustível, o gargalo e a linhas contendo no mínimo 90% de sua capacidade total, quando submetido ao ensaio de colisão contra barreira, não deverá perder líquido a uma vazão superior a 28 g/min, a perda de líquido durante a colisão não deve exceder a 28g.

Contudo as montadoras nacionais também executam os demais testes de impactos conforme as normas americanas e/ou européias para assegurar que seus produtos atendam os mais altos índices de segurança veicular.

Os tanques de combustível antes da realização dos testes de impacto em veículos são avaliados quanto a sua resistência a fraturas permanentes em testes executados em laboratórios, sendo que o mais famoso e mais crítico para o

desempenho dos tanques de combustível é teste do trenó, conhecido como "*Sled Test*".

Este teste simula o comportamento do tanque de combustível, no caso de um impacto, e consiste em atingir com uma barreira conhecida como trenó o tanque de combustível com 90% a 100% de sua capacidade útil total. A massa do trenó pode variar de 400 a 600 Kg, dependendo do equipamento disponível, contudo deve-se realizar os cálculos para atingir o tanque de combustível a uma energia equivalente a 4000 Joules. O teste é executado após o condicionamento prévio do tanque em diversas temperaturas (-40 °C, 20°C e 75 °C). O tanque de combustível deve se manter íntegro sem vazamentos após o ensaio. Este teste tem sido executado somente nos tanques plásticos.

A Figura 38 ilustra o equipamento de execução de um *Sled Test* em tanques de combustível.



Figura 38 – Dispositivo de teste de impacto ("teste do trenó") executado em tanques de combustível.

Normalmente, os tanques plásticos são considerados mais seguros em impactos porque não possuem emendas, sendo assim menos vulneráveis a falhas, não são fontes de uma possível fagulha e também deformam, tendo alguma habilidade de retornar a forma anterior após o impacto. Quando tanques metálicos absorvem a energia e deformam, a pressão no tanque aumenta à medida que o volume diminui, fazendo com que eles sejam vulneráveis nas soldas ou nas junções onde potencialmente pode ocorrer uma falha.

4.4.2 PROTEÇÃO CONTRA FOGO

As propriedades térmicas também são um grande problema na escolha do material a ser aplicado em tanques de combustível, devido aos efeitos da globalização dos mercados em que um veículo projetado em um local pode ser vendido em qualquer lugar do mundo, por isso os tanques de combustível devem ser projetados para atender as temperaturas ambiente extremas de -40°C até 79°C .

As temperaturas de -40°C no tanque são encontradas em países de temperatura extremamente fria como a Suécia, Finlândia e União Soviética entre outros, afetam diretamente o material plástico do tanque de combustível de forma a fragilizar o material deixando-o mais suscetível a trincas ou ruptura em um eventual impacto, por isso os testes de simulação de impacto descritos no capítulo anterior são executados também com tanque de combustível condicionado a -40°C .

Por outro lado, a temperatura de 79°C ocorre não apenas devido as condições climáticas mas também do calor irradiado do escapamento, que normalmente fica próximo do tanque de combustível. Esta temperatura não somente excede o ponto de ebulição de combustíveis com álcool, mas também pode proporcionar deformações no tanque plástico. Para evitar este problema, as montadoras tem utilizado maiores espessuras de plástico, sendo que no caso de tanques em PEAD até 6 mm, que impacta negativamente na massa da peça, bem como a necessidade de utilizar protetores contra as fontes de calor (escapamentos e catalisador ou mesmo a temperatura ambiente sob o veículo)

Apesar de o tanque plástico agir como um isolante para retardar a transferência de calor para o combustível quando comparado com o metálico, em um caso de fogo sob o veículo, o plástico irá retardar o aumento da temperatura do combustível por um período de tempo, mas irá suavemente deformar e eventualmente vazar combustível. O tanque metálico por sua vez não deforma, contudo a temperatura do combustível aumentará rapidamente, e talvez resulte em uma pressão excessiva do sistema e ocorrerá o vazamento de combustível através de uma trinca no tanque.

A AISI (American Iron and Steel Institute) [7] reporta que após uma série de mais de 75 testes realizados pela Fundação de Pesquisa de Prevenção de Incêndios, os tanques metálicos de combustível mostraram-se mais eficientes que os plásticos quando expostos ao fogo, pois apresentaram menores índices de

vazamento, e em alguns casos o fogo foi extinto naturalmente sem qualquer vazamento. Estes resultados levaram as montadoras e seus fornecedores de tanques plásticos a executar testes de validação utilizando fogo para assegurar que seus produtos apresentam o mínimo de segurança quando expostos ao fogo.

A norma ECE R34 [30] emitida pela comunidade europeia, em julho de 1975 e atualizada em outubro de 2004 apresentada no anexo 5, descreve o procedimento para a realização do teste de exposição ao fogo para tanques plásticos de combustível. O teste consiste em 4 fases distintas: pré-aquecimento, exposição direta as chamas, exposição indireta as chamas, finalização do teste.

Pré-aquecimento: Inicia-se o fogo em combustível na bandeja a uma distancia de 3 m do tanque a ser testado, após 60 segundos, move-se a bandeja com fogo em direção ao tanque. Exposição direta: coloca-se o tanque de combustível diretamente sob a bandeja com fogo com chamas livres por 60 segundos. Exposição indireta: a final da fase anterior, adiciona-se uma grade ou grelha entre o tanque de combustível e a bandeja de fogo para espalhar as chamas durante adicionais 60 segundos. Finalização do teste: retira-se a bandeja com fogo e a grade de separação do tanque de combustível sendo testado, e elimina-se imediatamente o fogo da bandeja. A Figura 39 [30] ilustra as fases do procedimento de exposição ao fogo conforme norma ECE R34.

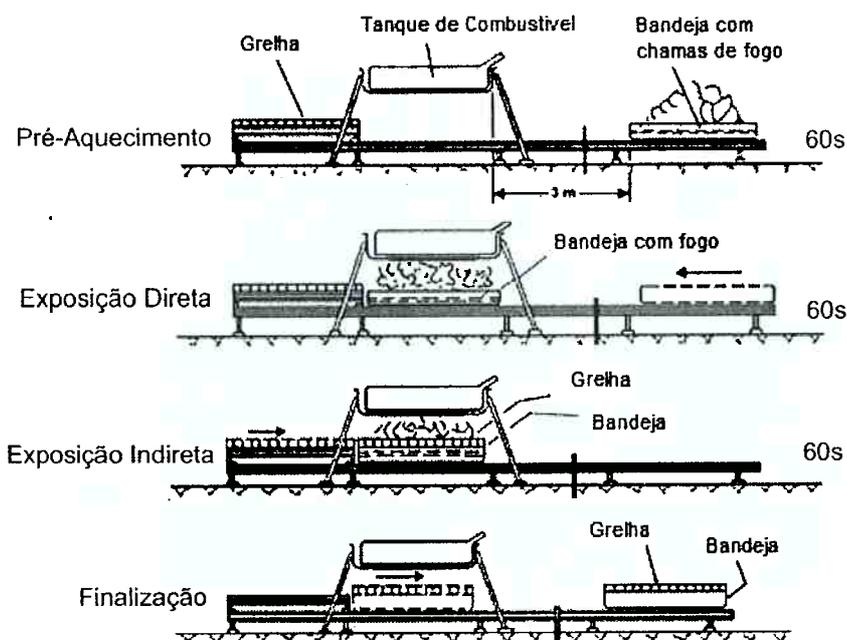


Figura 39 – Procedimento de teste conforme norma ECE R34 Anexo 5.

A Figura 40 apresenta exemplos de testes conforme a norma ECE R34 anexo 5.

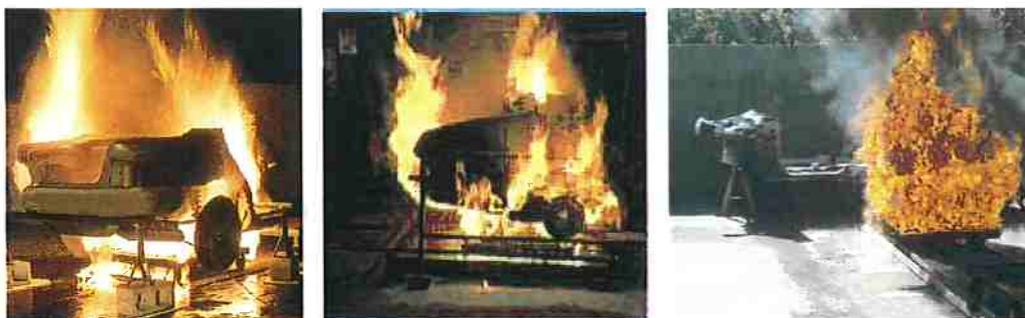


FIGURA 40 – Testes de exposição ao fogo para tanques plásticos conforme ECE R34 anexo 5.

A Figura 41 apresenta alguns tanques plásticos de combustível de veículos automotivos após o teste de exposição ao fogo. (GRIFFITH [31]).

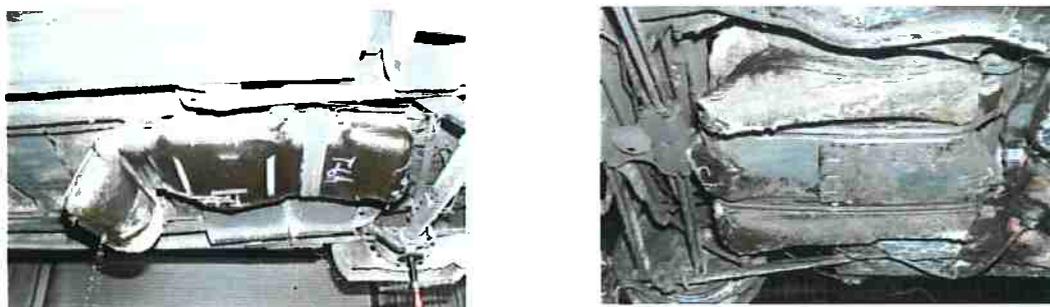


Figura 41 – Exemplos de tanques de combustível após teste de exposição ao fogo.

No Brasil, apesar do teste de fogo não ser um requisito legal para a venda dos veículos, os tanques plásticos de combustível são avaliados segunda a mesma norma europeia (ECE R34).

4.5. PROTEÇÃO CONTRA CORROSÃO

A prevenção contra a corrosão é um fator importante de desempenho a ser considerado no uso de metais em componentes de carroceria e chassi, especialmente em tanques de combustível. Em alguns casos, a resistência à corrosão pode ser o fator dominante na seleção do material ou do processo. Isto significa que a prevenção ou retardamento da corrosão em tanques de combustível pode ser um importante ponto de partida para garantir o correto funcionamento do componente, o tempo de vida, a produção e a manutenção de sua aparência. O engenheiro deve estar familiarizado com a prevenção contra corrosão necessária para sua peça na seleção do metal e/ou do tratamento, para que o desempenho atenda os requisitos desejados.

4.5.1. PRINCÍPIOS DA CORROSÃO

A SAE [19] define como corrosão, a degradação de qualquer material devido a sua reação com o ambiente, ou seja, materiais como plástico, cerâmica, concreto, vidro, e outros poderiam ser incluídos nesta definição. Contudo mais frequentemente, corrosão é associada com a degradação de metais e ligas metálicas. O processo envolvido na corrosão de metais e ligas metálicas é predominantemente químico ou eletroquímico. O processo eletroquímico é aquele que envolve a transferência de elétrons em uma reação oxidação.

Uma reação eletroquímica é um processo heterogêneo, que envolve dois eletrodos de materiais diferentes que são imersos em um eletrólito e eletricamente ligados entre si, SAE [19]. Na figura 42 [19] está ilustrada esquematicamente uma célula eletroquímica em que pode ser identificados o catodo, o anodo e o sentido real do fluxo de elétrons.

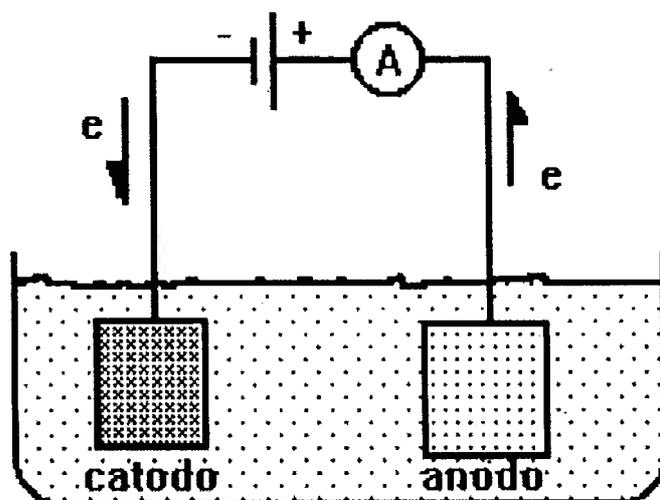


Figura 42 – Representação esquemática de uma célula eletroquímica.

A transferência de carga pode ser um processo catódico no qual uma espécie é reduzida pela transferência de elétrons para o eletrodo. Ou ao contrário, transferência anódica onde uma espécie é oxidada pela remoção de elétrons do eletrodo.

Um processo eletroquímico só é possível em um sistema que apresente ambas as reações catódica e anódica de forma a se manter um balanço de cargas, isto é, a quantidade de carga envolvida no processo de redução tem que ser a mesma que no processo de oxidação.

D'ALKAINE [32] define o funcionamento das pilhas eletroquímicas, ou pilhas de corrosão, envolve uma importante grandeza que se denomina “potencial de eletrodo” ou simplesmente “potencial” como se costuma dizer na prática. O seu aparecimento se baseia num princípio geral segundo o qual, sempre que se tem um metal em contato com um eletrólito, desenvolve-se entre o metal e o eletrólito uma diferença de potencial elétrico que pode ser positiva, negativa ou nula, dependendo do metal das espécies presentes no eletrólito, além de outras variáveis.

Considere um metal no vácuo. Para se trazer uma carga unitária do infinito até este metal será necessário exercer um trabalho, pois haverá uma interação entre a carga unitária e as cargas da estrutura eletrônica do metal.

Cada metal ou material possui uma distribuição de suas cargas que é característica do material. Desta forma, o trabalho para se trazer uma carga unitária do infinito para o interior do cobre é diferente para o caso do níquel e para todos os

outros materiais. Este trabalho se traduz numa energia absoluta Φ_{abs} sendo, portanto características de cada material.

Entretanto, um material não se encontra no vácuo. Ele está num meio (um eletrólito). Haverá da mesma forma, um potencial consequentemente do trabalho de se trazer uma carga unitária do infinito para o interior da solução. Este trabalho, se traduz num $\Phi_{SOL abs}$, e dependerá, entretanto, da concentração de íons metálicos na solução.

Como consequência, tem-se um sistema composto por um eletrólito e um metal em que se tem uma diferença de potencial absoluto.

$$\Delta\Phi_{abs} = \Phi_M - \Phi_{sol} \quad (\text{Eq. 1})$$

Este $\Delta\Phi$ funciona como uma força motriz para as reações de corrosão.

Este fenômeno é observado fisicamente pela tendência natural da maioria dos metais passarem para um eletrólito. Para que isto ocorra é necessário que ele passe para a forma iônica, o que ocorre segundo a reação anódica da Eq. 2, e ilustrado na figura 43 [32].

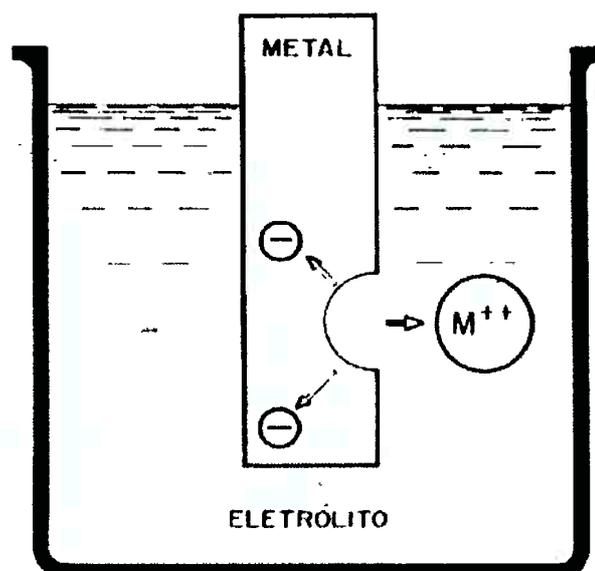


Figura 43 – Estágio inicial da reação anódica

A reação prossegue no sentido indicado até ocorrer a saturação do eletrólito, com os íons de metal, nas imediações da interface metal/meio, quando então a entrada de um íon a mais na solução, provoca a redução de outro íon que se deposita no próprio metal, mantendo o equilíbrio das cargas tendo-se:



Assim, a diferença de potencial mencionada é explicada pela presença de cargas elétricas de um sinal, no eletrólito, e cargas de sinal oposto, no metal, conforme ilustrado na figura 44 [32]. Na prática o valor desta diferença, ou seja, do potencial, depende de muitos fatores ligados ao metal e outros, relacionados com o eletrólito, tais como tipo de eletrólito, concentração, temperatura, grau de aeração e grau de agitação.

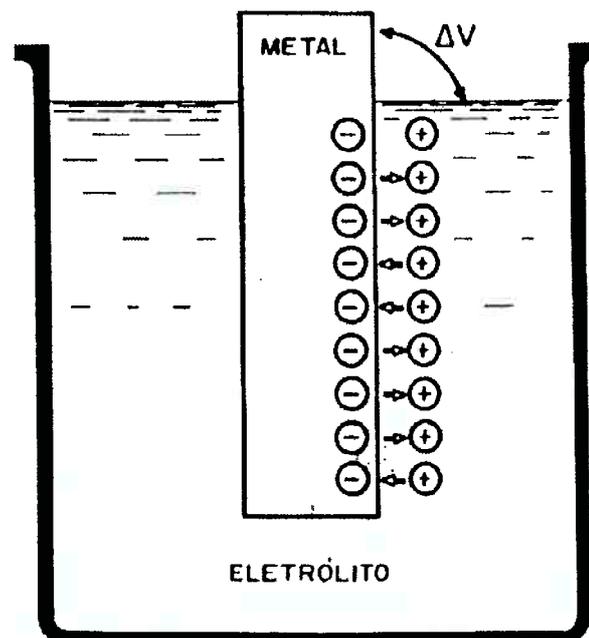


Figura 44 – Condições de equilíbrio metal/eletrólito.

Como já foi observado, quando os metais reagem têm tendência de perder elétrons sofrendo oxidação e conseqüentemente corrosão. Verifica-se experimentalmente que os metais apresentam distintas tendências à oxidação. É, portanto interessante para a previsão de alguns problemas de corrosão ter em mãos

uma tabela que indique a ordem preferencial de oxidação dos metais. Esta tabela é conhecida como tabela dos potenciais de eletrodo ou série eletroquímica. A tabela 11 SAE [19] apresenta os potenciais padrões de redução para um grande número de metais, ordenados com relação ao eletrodo de referência (padrão de hidrogênio), já que a medida direta deste potencial é impossível.

Tabela 11 – Potenciais padrão de redução (25 °C, Volts vs Eletrodo de hidrogênio padrão).

Elemento	Reação do Eletrodo	Potenciais de Redução
Ouro	$Au = Au^{+3} + 3e$	+ 1,498
Oxigênio (media ácida)	$O_2 + 4H^+ + 4e = 2H_2O$	+1,229
Paládio	$Pt = Pt^{+2} + 2e$	+1,2
Platino	$Pd = Pd^{+2} + 2e$	+0,987
Mercúrio	$Hg = Hg^+ + e$	+0,799
Prata	$2Ag = Ag_2^{+2} + 2e$	+0,788
Ferro (Ferrítico)	$Fe^{+2} = Fe^{+3} + e$	+0,771
Oxigênio (Neutro ou Alkalino)	$O_2 + 2H_2O + 4e = 4OH$	+0,401
Cobre	$Cu = Cu^{+2} + 2e$	+0,337
Estanho (<i>Stannic</i>)	$Sn^{+2} = Sn^{+4} + 2e$	+0,15
Hidrogênio	$H_2 = 2H^+ + 2e$	0,000
Chumbo	$Pb = Pb^{+2} + 2e$	-0,126
Estanho (<i>Stannous</i>)	$Sn = Sn^{+2} + 2e$	-0,136
Níquel	$Ni = Ni^{+2} + 2e$	-0,250
Cobalto	$Co = Co^{+2} + 2e$	-0,277
Cádmio	$Cd = Cd^{+2} + 2e$	-0,403
Ferro (Ferroso)	$Fe = Fe^{+2} + 2e$	-0,440
Cromo	$Cr = Cr^{+3} + 3e$	-0,744
Zinco	$Zn = Zn^{+2} + 2e$	-0,763
Alumínio	$Al = Al^{+3} + 3e$	-1,662
Magnésio	$Mg = Mg^{+2} + 2e$	-2,363
Sódio	$Na = Na^+ + e$	-2,714
Potássio	$K = K^+ + e$	-2,925

Notas:

- Os valores potenciais dos eletrodos são dados e não variam (ex.: $Zn = Zn^{+2} + 2e$ e $Zn^{+2} + 2e = Zn$ são idênticos e representam Zinco em equilíbrio com seus íons com o potencial de -0,763V versus o eletrodo normal de hidrogênio.)

4.5.2. FATORES QUE AFETAM A CORROSÃO

Segundo NACE [33], os parâmetros que afetam os índices de corrosão para os metais e ligas metálicas são:

- A composição química do eletrólito;
- A temperatura;
- A umidade relativa;
- As condições de superfície;
- A tensão do metal;
- Os efeitos galvânicos e;
- A relação de área dos eletrodos.

O efeito da composição química do eletrólito está mais associado com a concentração de sal, pH e a natureza dos íons. Para a solução ser corrosiva, tem que ser condutiva. Deve ter a força iônica suficiente para o volume da corrente. A acidez e a alcalinidade da solução afetam os diferentes metais de forma diferenciada, ou seja, metais como zinco, alumínio, chumbo e estanho são solúveis tanto em ácidos como em alcalinos, mas eles são mais solúveis quando o pH da solução é tanto mais alto ou mais baixo. Outros metais como níquel, cobre, cobalto, cromo, manganês, cádmio, magnésio e ferro são solúveis em ácidos, mas geralmente insolúveis em alcalinos. Certos íons, particularmente cloretos, possuem alta mobilidade e habilidade de penetrar nas camadas de óxidos da superfície do metal, o que pode levar a corrosão localizada. Também, algumas espécies de sais no eletrólito irão frequentemente determinar se os produtos da corrosão formados na superfície são aderentes e protegem ou se eles se desprendem ou são permeáveis a solução, permitindo o progresso da corrosão.

O aumento da temperatura geralmente aumenta a taxa de reação, mas isto também afeta a corrosão através do efeito nos filmes. As diferenças de temperatura podem também mudar a relação anodo/catodo do metal em questão, ou seja, a peça em temperaturas elevadas pode ser anódica para a peça em baixa temperatura.

A umidade relativa pode ter um efeito dramático na corrosão dos metais, ou para certos metais existe uma faixa de umidade no qual o processo de corrosão é acelerado. Por exemplo, a faixa crítica da umidade relativa para o ferro, cobre, níquel e zinco normalmente encontra-se entre 50 a 70%.

As sujeiras depositadas na superfície das chapas exercem uma forte influência no princípio e na aceleração do processo de corrosão. Por exemplo, sujeira, lama, detritos podem absorver e manter umidade e também criar anodos locais e catodos na superfície no qual iniciará e prolongará o ataque da corrosão.

Irregularidades e variações metalúrgicas nas superfícies são potenciais focos de início de corrosão. Descontinuidade na camada de proteção pode contribuir também para os focos de corrosão.

Materiais estressados normalmente corroem mais rápido que materiais não estressados, e aqueles sob tensão irão corroer mais rapidamente e em maior progressão do que aqueles materiais sob tensão de compressão.

Efeitos galvânicos resultam de acoplamentos de metais similares e são particularmente devastadores quando a diferença de potencial entre eles é grande. Adicionalmente, há um efeito da área a ser considerado, pois a taxa de corrosão do membro mais anódico do acoplamento aumentará quase na mesma proporção da área de relação entre o anodo e catodo. O pior caso é quando um largo catodo é conectado a um pequeno anodo.

A corrosão pode se manifestar sob diversas formas e sua perfeita identificação auxilia no conhecimento dos mecanismos envolvidos e também na escolha da melhor forma de proteção. Essas formas de corrosão estão relacionadas de acordo com o aspecto do metal corroído. Cada forma pode muitas vezes ser identificada por simples observação a olho nu, sendo algumas vezes necessário o auxílio de instrumentos de aumento, por exemplo, de uma lupa ou até mesmo de um microscópio. Na Figura 45 NACE [33], estão os esquemas de representação destas formas de corrosão.

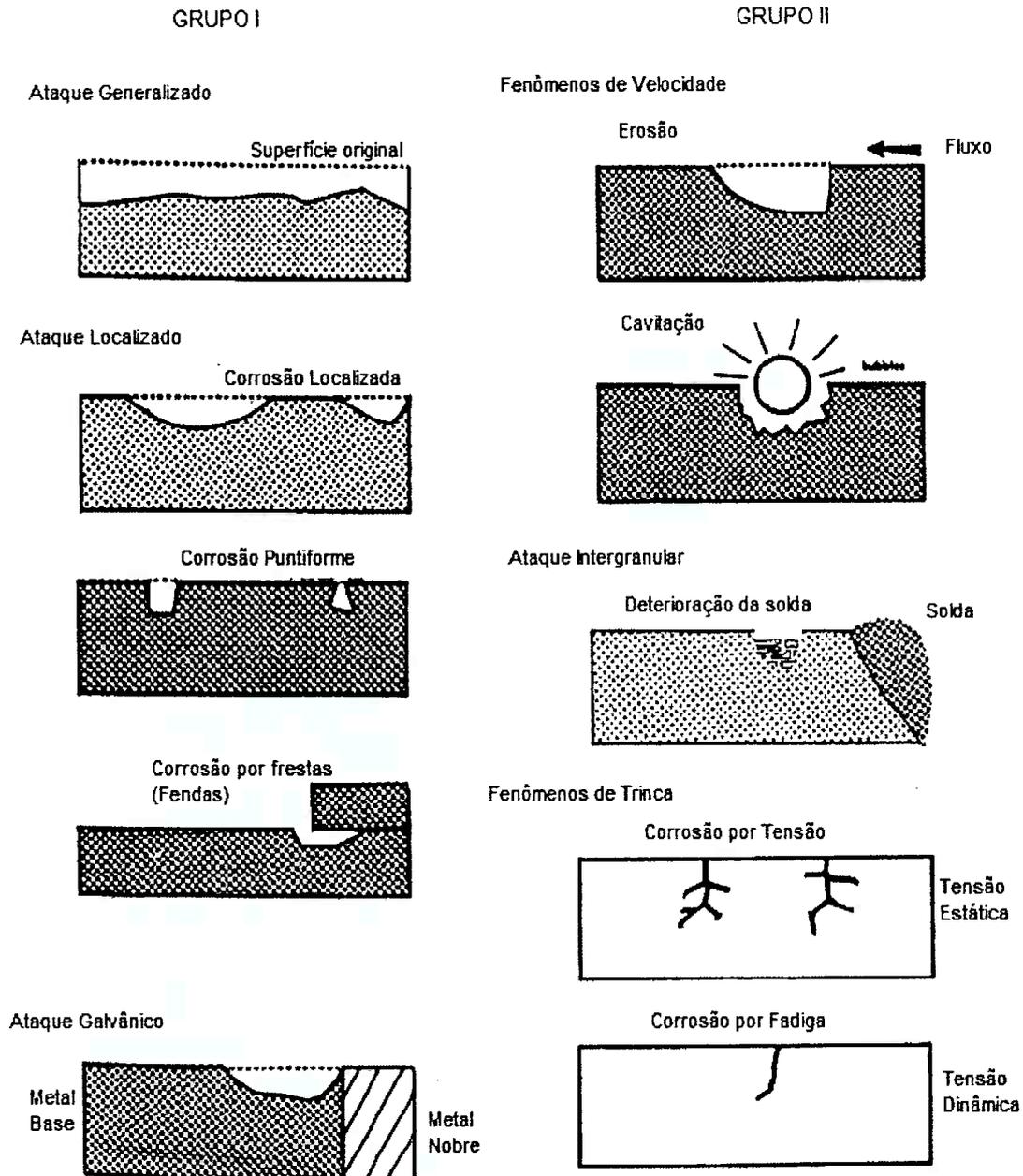


Figura 45 – Esquematização das formas de corrosão.

A observação da amostra corroída permite obter informações importantes para a solução do problema de corrosão. Geralmente, as formas de corrosão citadas na literatura são oito, com algumas inter-relacionadas e outras apresentando características totalmente particulares. Neste trabalho serão apresentadas e discutidas as seguintes formas de corrosão, definições apresentadas em SAE [19]:

- Uniforme;
- Galvânica;
- Frestas;
- Puntiforme (pite);
- Intergranular;
- Seletiva;
- Erosão e;
- Sob tensão.

4.5.3. FORMAS DE CORROSÃO

Corrosão uniforme generalizada é uma forma de corrosão bastante comum e consiste normalmente de uma reação química ou eletroquímica que ocorre uniformemente sobre toda a superfície exposta. Em vista disso, o metal torna-se mais fino, podendo eventualmente sofrer uma ruptura. Exemplos de corrosão uniforme: Uma peça de aço ou zinco imersa em ácido sulfúrico diluída, geralmente dissolve a uma taxa uniforme sobre toda a superfície; Uma chapa de aço aquecida a altas temperaturas.

Quando o ataque é uniforme, a corrosão pode ser medida através das unidades *mda* ou *ipy*. A primeira representa a perda ou ganho de massa em miligramas por decímetro quadrado por dia, enquanto que a segunda é a unidade de penetração em polegadas por ano. Podem aparecer ainda:

- *mm/ano* = milímetros de penetração por ano;
- *mpy* = milésimos de polegada por ano.

Do ponto de vista da corrosão uniforme pode-se classificar os materiais em 3 grupos:

- Taxa de corrosão menor que 0,1 mm/ano ou menor que 5 mpy. Nesse caso, os materiais são resistentes à corrosão e podem ser utilizados sem restrição.

- o Taxa de corrosão entre 0,1 e 1,1 mm/ano: os materiais podem ser utilizados onde certa corrosão é tolerável.
- o Taxa de corrosão maior que 1,1 mm/ano. Geralmente não são utilizados.

Corrosão galvânica: existe uma diferença de potencial entre dois metais diferentes quando imersos em um meio corrosivo. Se eles estiverem em contato, essa diferença de potencial produz um fluxo de elétrons entre eles. Dessa forma, o metal menos resistente (mais negativo) torna-se anódico e é corroído, enquanto que o metal mais resistente torna-se catódico e não sofre corrosão significativa.

Nos casos práticos de corrosão, os metais raramente encontram-se mergulhados em solução de seus íons como previsto pela série eletroquímica. São situações muito mais complicadas. Ao mesmo tempo, os metais usados em engenharia, geralmente são ligas metálicas que não estão incluídas naquela série.

As tabelas práticas de potenciais aproximam-se mais das condições geralmente encontradas. A mais comum é a Série Galvânica de Metais em Água do Mar e é apresentada na Tabela 12 SAE [19].

Num par galvânico, o metal que sofre corrosão é aquele que está do lado mais anódico (ou ativo). As ligas indicadas entre chaves apresentam uma composição semelhante, de forma que em muitas aplicações práticas, a corrosão galvânica pode não ser significativa entre estes metais.

A natureza e agressividade do meio determinam o grau de corrosão galvânica. Algumas vezes pode ocorrer uma inversão na posição relativa de dois metais na série galvânica se as condições do meio forem alteradas.

A corrosão galvânica pode ocorrer também na atmosfera, não ocorrendo, entretanto, se os metais estiverem completamente secos, já que não haveria eletrólito para conduzir a corrente entre as duas áreas, anódica e catódica.

Geralmente, os efeitos produzidos pela corrosão são localizados muito próximos à junção dos dois metais, sendo que o ataque vai diminuindo com o aumento da distância daquele ponto.

Tabela 12 – Série galvânica de metais em água do mar [19].

Reação	Material
Catódica (Nobre)	Platina
	Ouro
	Grafita
	Prata
	Aço Inoxidável SAE 30310, 30316 (passivo)
	Aço Inoxidável SAE 30301, 30304 (passivo)
	Titânio
	Aço Inoxidável SAE 51410, 51430 (passivo)
	67Ni-33Cu (liga de Níquel – Cobre)
	76Ni-16Cr-7Fe (liga de Níquel – Cromo - Ferro)
	Níquel (passivo)
	Bronze
	Cobre
	Estanho
	Cádmio
	Chumbo
	Liga de Estanho – Chumbo
	Ferro fundido
	Solda estanho chumbo
	Latões
	Alumínio 1100, 3003, 5052, 6053
	Alumínio 2024
	Aço Inoxidável SAE 30310, 30316 (ativo)
	Aço Inoxidável SAE 30301, 30304 (ativo)
Aço Galvanizado	
Zinco	
Anódica (Ativo)	Ligas de Magnésio
	Magnésio

A relação entre as áreas anódicas e catódicas exercem também um significativo efeito. A razão favorável é:

$$\frac{Area \cdot anodica}{Area \cdot catodica} \gggg 1,0 \quad (\text{Eq. 4})$$

Quando dois metais estão em contato e um deles deve ser recoberto, é desejável que seja o metal mais resistente à corrosão.

Podem-se citar alguns procedimentos que podem diminuir o efeito da corrosão galvânica:

- o Selecionar materiais localizados o mais próximo possível na série galvânica;
- o Manter uma relação de área favorável;
- o Isolar completamente metais diferentes;
- o Aplicações de recobrimentos protetores sobre o cátodo;
- o Adição de inibidores, quando possível, para diminuir a agressividade do meio;
- o Prever no projeto facilidade para substituição das partes anódicas. Usar maior espessura para aumentar a vida útil;
- o Instalar um terceiro metal que seja anódico em relação aos dois metais do contato galvânico (ânodo de sacrifício).

Corrosão em frestas: é muito freqüente encontrar um fenômeno de intensa corrosão localizada onde existem pequenas frestas provocadas por soldas mal acabadas, chapas rebitadas, contato de metal com um não metálico (por exemplo, madeira, borracha, etc.).

Este fenômeno geralmente está associado a pequenos volumes de soluções estagnadas e recebe o nome de corrosão em frestas e apresenta-se de forma localizada.

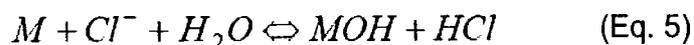
Depósitos de materiais não metálicos como areia, produtos de corrosão ou outro tipo de depósito também provocam este tipo de corrosão, do mesmo modo que pequenos orifícios ou frestas sob porcas ou rebites.

Os aços inoxidáveis são particularmente sensíveis a este tipo de ataque. Entretanto, para que uma fresta funcione como um sítio de corrosão deve ser

suficientemente grande para permitir a entrada do líquido, porém suficientemente estreita para manter o líquido estagnado.

O mecanismo básico da corrosão em frestas consiste nas seguintes etapas:

- o Início de corrosão generalizada;
- o Diminuição da concentração de O_2 no interior da fresta induzindo a formação de pilha de aeração diferencial;
- o Com a continuidade do processo de corrosão, há um aumento da concentração de cátions metálicos na fresta;
- o Com o aumento da concentração de cátions metálicos na fresta, inicia-se um processo de difusão de ânions para a fresta. Dentre estes ânions um dos que apresenta maior coeficiente de difusão é o íon cloreto;
- o O íon cloreto se combina com os íons metálicos formando cloretos metálicos que reagem com a água formando hidróxidos e ácido clorídrico, a conforme reação:



Resultando numa condição auto-catalítica para o processo de corrosão. Na Figura 46 [19] está esquematizado o mecanismo básico de corrosão em frestas.

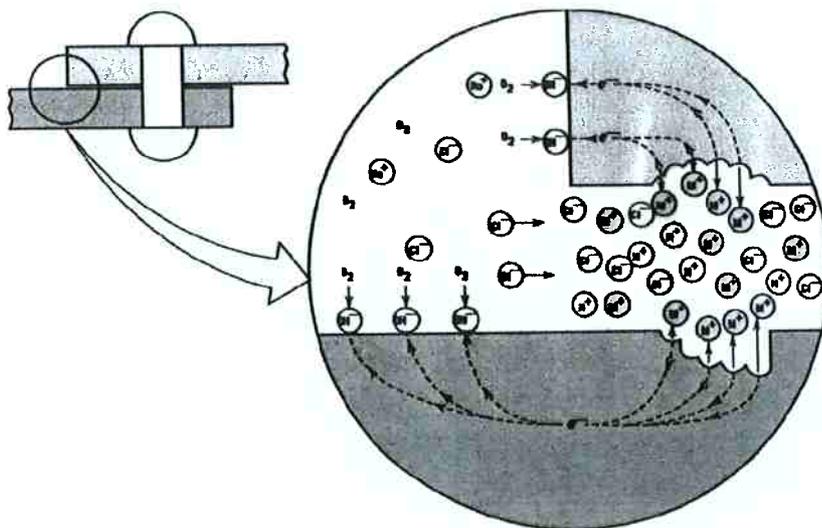


Figura 46 – Mecanismo de corrosão em frestas.

A seguir são citados alguns procedimentos para diminuir a corrosão em frestas:

- o Usar soldas bem acabadas no lugar de rebites ou parafusos;
- o Proteger equipamentos que permitam completa drenagem, evitando cantos vivos ou áreas estagnadas;
- o Inspeção do equipamento e remoção de depósitos freqüentemente;
- o Remoção de sólidos em suspensão;
- o Remoção de materiais que retenham umidade.

Corrosão por Pite (Puntiforme): É uma forma de corrosão muito localizada, apresentando um ataque muito intenso em áreas de ordem de mm^2 , permanecendo o metal ao seu redor, sem sofrer corrosão. Alguns pesquisadores como D'ALKAINE [32] estimam que o ataque nos pite pode ser da ordem de 30.000 a um milhão de vezes mais rápido do que no restante da superfície. A forma como um pite se apresenta varia e pode ser visualizada na Figura 47 [32].

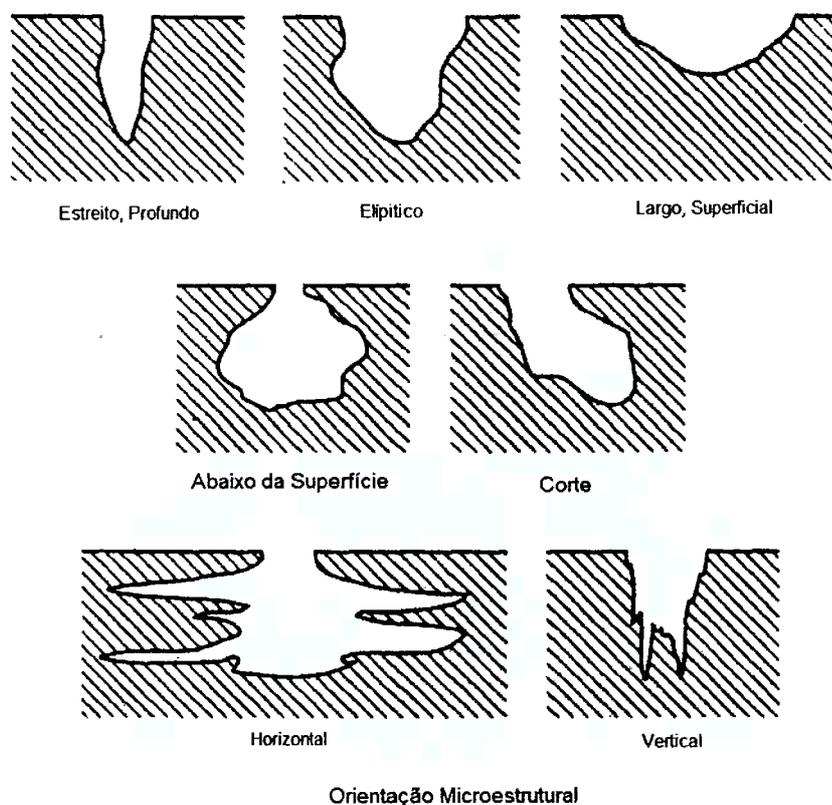


Figura 47 – Variações nas formas das seções transversais de pites.

A densidade de pites, seu tamanho superficial e profundidade podem ser comparados utilizando desenhos padrão. Entretanto, uma alternativa para a avaliação dos pites é a seleção do de maior profundidade. Para se quantificar a extensão de um pite em relação à corrosão generalizada, determina-se o fator de pite (p/d), onde (p) é a penetração máxima do pite, medida com um microscópio, e (d) é a penetração média obtida pela perda de massa. Entretanto, o fator de pite tende a infinito quando a penetração média é muito pequena ou nula. Uma representação da medida do fator de pite pode ser observada na Figura 48 [32].

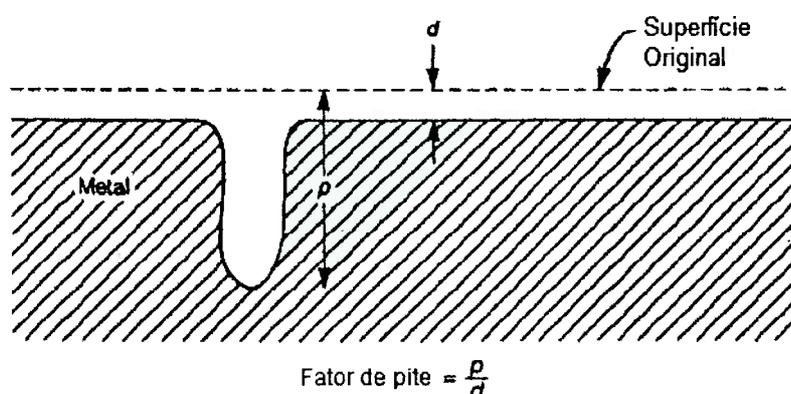


Figura 48 – Diagrama esquemático para determinação do fator de pite.

Inúmeros metais apresentam suscetibilidade a pites, entre eles pode-se citar o estanho, zinco, titânio e inúmeras ligas tais como os aços inoxidáveis. De uma maneira em geral, os metais que são particularmente sensíveis a esse tipo de corrosão são aqueles que dependem de filmes de óxido para a resistência à corrosão. Esses filmes são destruídos por alta concentração de determinados íons (Cl^- , Br^- ou H^+).

A presença de certos ânions em meios considerados como agressivos é necessária para o aparecimento dos pites. O mais freqüente é o Cl^- . Para que haja pites, no entanto, é necessário que a concentração do ânion agressivo seja superior a uma dada concentração limite. Para o ferro em meio ácido surgem pites para concentração de cloretos da ordem de $3 \cdot 10^{-4}$ mol/l.

Geralmente os pites requerem um longo período de latência antes de se tornarem visíveis, período este que pode variar de alguns meses até anos, dependendo da combinação específica metal/meio corrosivo. Os pites apresentam

uma reação anódica típica, caracterizada como um processo auto-catalítico, isto é, o processo de corrosão dentro de um pite produz condições que são tanto estimulantes como necessárias para a continuação da atividade do pite. O aumento da turbulência do meio corrosivo geralmente diminui o ataque por pites. Os aços inoxidáveis são muito sensíveis à corrosão por pites. A adição de elementos de liga tem diferentes efeitos na resistência a pites dos aços inox.

O mecanismo básico de formação de pite é semelhante ao de formação de corrosão em frestas. Entretanto, a iniciação de um pite ocorre a um potencial crítico, E_{pit} , que é utilizado para a medida da resistência a corrosão por pite. A presença de cloreto em uma solução ácida geralmente aumenta o potencial ou as correntes anódicas, mas o fato mais importante é o grande aumento na corrente no E_{pit} . Quanto mais nobre o E_{pit} , mais resistente é o material ao pite.

A seguir são citados alguns procedimentos para diminuir a corrosão em pites:

- Usar materiais com elementos de liga designados para minimizar o efeito de pites, por exemplo, o molibdênio ou níquel no aço inoxidável;
- Prover superfícies mais homogêneas possível através da limpeza correta, tratamento térmico e acabamento de superfície;
- Reduzir a exposição a íons agressivos através de protetores, acabamentos ou mesmo a redução da concentração destes íons;
- Aumentar a capacidade da solução em tornar o metal passivo. Se o metal estiver imerso, utilizar inibidores ou outros aditivos.

A corrosão intergranular é uma forma de ataque localizado na superfície metálica, na qual um caminho estreito é corroído preferencialmente ao longo dos contornos de grãos. Ela se inicia sobre a superfície e ocorre devido a células de ação local, na vizinhança imediata de um contorno de grão. A força motriz é a diferença no potencial de corrosão que se desenvolve entre uma zona fina do contorno de grão e o volume dos grãos adjacentes.

Esta diferença de potencial pode ser devida a diferenças na composição entre as duas zonas. A diferença na composição pode desenvolver-se como um resultado da migração de impurezas ou elementos de liga, para os contornos de grãos. A corrosão intergranular pode causar uma diminuição na elongação, e em

casos severos isto leva à perda marcante nas propriedades de tração, embora somente um pequeno volume do metal tenha sido corroído.

Em algumas circunstâncias, a região de um contorno de grão torna-se muito reativa, resultando numa corrosão inter-granular, provocando a desintegração da liga ou perda de resistência mecânica. Este fenômeno pode ser causado pela presença de impurezas no contorno de grão, diminuição do teor de um elemento nas áreas do contorno ou ainda um enriquecimento do contorno por um elemento de liga. Um exemplo deste tipo de corrosão está ilustrado na figura 49 [19].

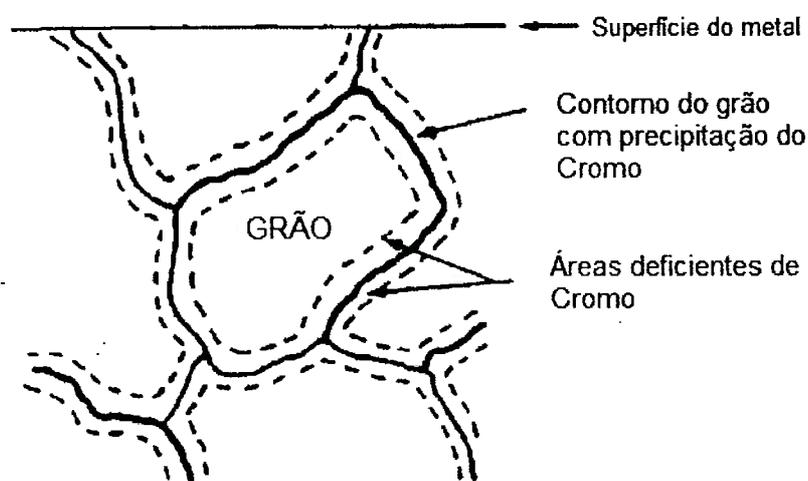


Figura 49 – Corrosão intergranular na região da borda do grão causada pela deficiência de cromo.

Uma vez que a maioria da corrosão intergranular é o resultado de pequenas diferenças na composição nos contornos de grãos, a história metalúrgica de uma liga torna-se importante. Tratamentos térmicos e trabalho a frio de ligas não somente afetam o tamanho e forma de grãos, mas também a composição, localização, quantidade e tamanho dos constituintes inter-metálicos.

A corrosão intergranular ocorre mais comumente em aços inoxidáveis austeníticos, ligas de cobre e de alumínio.

Quando esses aços são aquecidos na faixa de temperatura compreendida entre 425 °C – 815 °C, tornam-se suscetíveis à corrosão intergranular. A teoria mais aceita para este fenômeno baseia-se no empobrecimento de cromo nas áreas adjacentes ao contorno de grão, devido à precipitação de Cr_{23}C_6 .

A fase da liga com menor concentração de cromo, no contorno de grão, torna-se muito menos resistente à corrosão. Abaixo de uma concentração de 12% de Cr, o filme de óxido de cromo formado na superfície de liga, torna-se pouco passivante. Forma-se, portanto, uma pilha entre o contorno do grão (zona anódica) e a região central do grão (zona catódica). Com o agravante da relação desfavorável entre as áreas anódicas e catódicas ($A_{\text{anódica}} \ll A_{\text{catódica}}$) inicia-se o processo de corrosão localizada que progride por entre os grãos (intergranular).

A seguir são citados alguns procedimentos para diminuir a corrosão intergranular:

- o Utilizar ligas de aço inoxidável com baixo teor de carbono;
- o Utilizar ligas de aço inoxidável que contenham elementos estabilizantes como titânio;
- o Substituir as ligas que são mais suscetíveis a corrosão intergranular, como por exemplo, as ligas tipo (Al-Cu) endurecidos por precipitação.

Corrosão por ataque seletivo ocorre quando um ou mais componentes da liga são mais susceptíveis a corrosão que os outros. Os elementos susceptíveis de dissolução seletiva são geralmente mais ativos eletroquimicamente e são dissolvidos anodicamente por contato galvânico com componentes mais nobres. O exemplo mais importante de corrosão seletiva é a remoção de zinco de latão (dezincificação). Um outro exemplo é a corrosão gráfica do aço fundido.

Dezincificação é o nome dado ao ataque seletivo que ocorre nos latões com teor de zinco maior que 15%, normalmente devido a prolongadas exposições a água aerada com altas concentrações de CO_2 e/ou Cl^- . Ligas de cobre zinco contendo duas fases ($\alpha + \beta$) são mais susceptíveis a dezincificação, especialmente se a liga rica em zinco – fase β for contínua. A remoção do zinco origina uma superfície porosa com uma fina camada de cobre e óxido de cobre.

O processo de dezincificação pode ocorrer de uma forma uniforme ou de forma localizada. Embora não ocorram variações dimensionais significativas, o material pode sofrer falha inesperada devido à diminuição na resistência do material dezincificado. O ataque uniforme aparece, preferencialmente, em latões de alto teor de zinco em ambientes ácidos, enquanto que o localizado aparece em latões de baixo teor de zinco em soluções neutras ou alcalinas. Estes são aspectos gerais e muitas exceções têm ocorrido.

A dezincificação pode ser eliminada ou reduzida, diminuindo-se a agressividade do meio (por exemplo, retirando o O₂) ou por proteção catódica. Tais métodos são anti-econômicos, de forma que é comum o uso de ligas menos suscetíveis a esse fenômeno. O latão vermelho (< 15% Zn) é quase imune à dezincificação, e a adição de pequenas quantidades de P, As ou Sb à liga de Cu, 28% Zn, 1% Sn provou ser muito eficaz.

O mecanismo que mais explica o processo de dezincificação considera duas etapas. Numa primeira há a dissolução simultânea da liga seguida pela redeposição do cobre. Como conseqüência haverá a formação de uma camada de cobre porosa. Numa Segunda etapa há a dissolução seletiva do zinco. Esta última etapa não é a etapa determinante do processo devido à baixa taxa de difusão do zinco no estado sólido.

A corrosão gráfitica é um ataque seletivo que ocorre em ferros fundidos cinzentos. Recebe esse nome devido ao fato que o ferro fundido parece tornar-se grafitizado. Neste caso, o ataque seletivo ocorre na matriz do ferro, deixando uma rede de grafite, que é catódica em relação ao ferro. Situações perigosas podem ocorrer, já que o ferro fundido perde sua resistência mecânica. A corrosão gráfitica é um processo lento e não ocorre em ferros fundidos dúcteis, maleáveis ou brancos, porque a rede de grafite não é contínua.

Corrosão por erosão é o aumento da taxa de deterioração do filme protetor da superfície de um metal provocado pelo movimento relativo do fluido e superfície metálica, como apresenta a Figura 50 [32].

A velocidade do meio corrosivo exerce um papel importante, pois quanto maior a velocidade do fluido, maior a velocidade de corrosão. A presença de partículas sólidas no fluido aumenta a taxa de corrosão por erosão.

A corrosão por erosão pode ocorrer em metais ou ligas que são completamente resistentes a um meio particular e baixas velocidades. O contato galvânico pode aumentar significativamente o efeito deste tipo de corrosão.

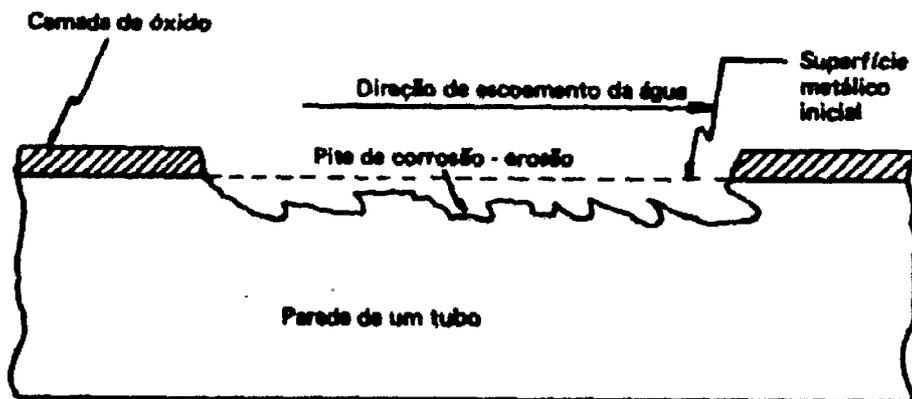


Figura 50 – Representação esquemática dos defeitos causados por corrosão-erosão na parede de um tubo.

Para se combater a corrosão por erosão, pode-se realizar, em ordem de importância, os seguintes procedimentos:

- Usar materiais de maior resistência mecânica;
- Projetos adequados, no sentido da forma ou da geometria do equipamento. Um exemplo típico é o aumento do diâmetro de um tubo diminuindo assim a velocidade do fluido e assegurando um fluxo laminar;
- Alteração do meio ambiente, desaeração ou adição de inibidores (pouco econômico);
- Recobrimentos (aplicações de recobrimentos de diferentes espécies);
- Proteção catódica (ajuda a reduzir o ataque, não sendo porém muito eficiente).

Um caso particular da corrosão por erosão é conhecido como danos por cavitação, que é causada pela formação e colapso de bolhas de vapor em um líquido, próximo à superfície metálica.

Entretanto, materiais com resistência mecânica semelhante, como o aço inox e o aço carbono, apresentam diferentes resistências à corrosão por erosão. Da mesma forma, ligas de níquel e de titânio são resistentes à corrosão por erosão. O fator que explica esta resistência é a maior dureza das camadas passivantes formadas sobre estas ligas. A corrosão por erosão se manifesta na forma de ondas, lágrimas ou de depressões na forma de patas de cavalo na superfície da liga.

A prevenção deste tipo de corrosão pode ser feita através de modificações no desenho das peças de forma a diminuir zonas de alta turbulência e velocidade de fluido.

Corrosão sob tensão: Os projetos de equipamentos, estruturas ou qualquer dispositivo metálico são realizados geralmente com base no limite de escoamento do material, que pode ser determinado conhecendo-se sua curva tensão-elongação.

Ocorre, no entanto, que os materiais metálicos em determinados ambientes corrosivos podem sofrer uma ruptura inesperada, mesmo quando submetidos a tensões muito menores do que aquelas para os quais foram projetados para resistir. Isto pode ocorrer mesmo que o metal seja corroído muito lentamente nesse meio corrosivo e na ausência de tensões mecânicas.

O que se observa é que a associação de esforços mecânicos e corrosão provoca um comportamento distinto daquele que o metal teria quando sujeito a apenas uma dessas variáveis, podendo apresentar falhas prematuras em níveis de tensão muito abaixo da tensão de escoamento, como mostrado esquematicamente na Figura 51 [32]. Este fenômeno é conhecido como corrosão sob tensão fraturante SCC (*Stress Corrosion Cracking*). Basicamente, considera-se que são necessárias três condições para que ocorra corrosão sob tensão: Ambiente corrosivo; material susceptível; tensão de tração.

Esta forma de corrosão se manifesta através do aparecimento de trincas que se desenvolvem, produzindo a ruptura dos metais, sem que o metal ou liga seja virtualmente atacado em sua superfície.

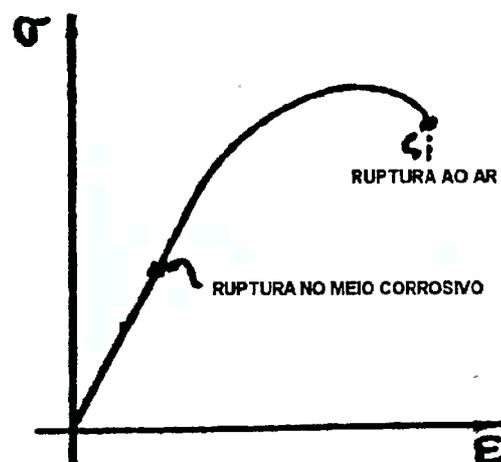


Figura 51 – Efeito do meio corrosivo na curva tensão-elongação.

De acordo com o caminho que essas trincas percorrem diferenciam-se dois tipos de propagação;

- o Intergranular: a fratura se propaga pelo contorno do grão;
- o Transgranular: a fratura se propaga dentro do grão.

É importante salientar que a corrosão sob tensão não precisa, necessariamente, de uma tensão mecânica aplicada para se manifestar. Tensões residuais provocadas por tratamentos térmicos, trabalho a frio, etc. também induzem esse tipo de ataque.

Para prevenir a corrosão sob tensão pode-se realizar os seguintes procedimentos:

- o Evitar formas que tendem a concentrar efeitos específicos de concentração de tensão como pontas, grandes depressões, cantos vivos, etc;
- o Alterar a estrutura metalúrgica do material através da têmpera por exemplo;
- o Incluir tratamentos de alívio de tensão residual. (um dos mais efetivos tratamentos é a introdução de medidas de compressão das camadas chapas por enrolamento ou *shot peening*).
- o Utilizar revestimentos de proteção, incluindo revestimentos orgânicos ou metálicos.
- o Modificar o ambiente através da mudança do pH ou reduzindo o conteúdo de oxigênio;

Desta forma pode-se dizer que a corrosão em tanques metálicos de combustível é uma preocupação bem conhecida em ambas as superfícies do tanque (interna e externa). Em contraste com os tanques de plástico PEAD, são inertes aos ambientes corrosivos.

Dependendo dos fatores envolvidos em relação a prevenção a corrosão, pode-se levar a uma decisão imediata quanto a definição do material a ser utilizado no projeto.

4.6. PERMEABILIDADE DE HIDROCARBONETOS E EMISSÕES EVAPORATIVAS

Existem diversas publicações referentes à poluição causada pelas emissões dos gases provenientes da combustão, e durante os anos os órgãos governamentais têm aumentado às restrições que regulamentam a emissão de gases do escapamento. Contudo o que é pouco divulgado é a existência de outras fontes de hidrocarbonetos (HC), chamado de emissões evaporativas, no qual também são regulamentadas por legislações de governo. As mais conhecidas mundialmente são as legislações dos Estados Unidos representada pelo órgão federal, *Environmental Protection Agency* (EPA) e pelo órgão estadual *California Air Resources Board* (CARB).

Segundo apresentado por ABU-ISA [34] e ADAM e DELBARRE [35], as emissões evaporativas são criadas quando vapores de HC são liberados na atmosfera, e a maior fonte de vapores de HC é o sistema de combustível. Para limitar as emissões evaporativas, o governo divide seus padrões em 4 componentes: diurno, rodando, marcha lenta e reabastecimento.

O primeiro teste de emissão de evaporativos foi implementado em 1970 nos Estados Unidos, e consistia em aquecer o tanque de combustível de 15°C para 28°C por uma hora e medir a emissão de HC no reservatório de carvão ativado (Canister). A norma permitia o ganho máximo de peso do canister em 6,0 g. Em 1972 a norma reduziu o valor para 2,0 g.

Em 1978 o procedimento de teste foi alterado da medição do ganho em peso do canister para a medição da quantidade de HC emitida pelo veículo como um todo. Para medir as emissões do veículo o teste era conduzido em uma câmara selada conhecida como SHED (*Sealed Housing for Evaporative Determinations*). Novamente, o tanque de combustível era aquecido de 15°C para 28°C por uma hora, e a norma permitia o máximo de 6,0 g. Em 1980 a norma reduziu o valor permitido para 2,0 g.

Em 1995 normas evaporativas mais exigentes foram implementadas. No lugar de uma hora de teste, o veículo tinha que ser submetido pelos testes de dois dias e três dias. As normas destes testes variam de acordo com a classe e categoria do veículo. Novas normas foram decretadas para simular as condições reais de uso através da medição de emissões enquanto o veículo está sendo dirigido, enquanto o

veículo está aquecido após ter sido dirigido, e enquanto o veículo está estacionado durante um dia típico de verão.

Em 2004, o órgão americano *Environmental Protection Agency* (EPA) decretou a norma federal *Tier II* e o órgão americano *California Air Resources Board* (CARB) decretou a lei estadual *Low Emissions Vehicle II* (LEV II). Estes decretos reduziram consideravelmente os valores das normas para emissões evaporativas para os veículos norte americanos. A figura 52, apresentada por TACHI et al. [36] ilustra a evolução das normas de emissões evaporativas para o veículo, decretadas nos Estados Unidos até 2004 para serem incorporadas conforme tabela de Ano/Modelo.

		Limite de Emissões (Veículos de Passageiros)	Ano Modelo				
			03	04	05	06	07
EPA	Tier 1	Limite: 2,0 g/teste Durabilidade: 10 anos ou 100.000 milhas	[Gráfico de área mostrando a implementação de Tier 1 a partir de 2005]				
	Tier 2	Limite: 0,95 g/teste Durabilidade: 10 anos ou 120.000 milhas					
CARB	LEV I	Limite: 2,0 g/teste Durabilidade: 10 anos ou 100.000 milhas	[Gráfico de área mostrando a implementação de LEV I a partir de 2005]				
	LEV II	Limite: 0,5 g/teste Durabilidade: 15 anos ou 150.000 milhas					

Nota: O gráfico de área na tabela indica a porcentagem mínima de veículos que devem cumprir cada norma ao longo do tempo. Para a EPA Tier 2, a transição começa em 2004 (25%) e atinge 100% em 2007. Para o CARB LEV II, a transição começa em 2004 (40%) e atinge 100% em 2007.

Figura 52 – Evolução normas de emissões evaporativas até 2004 conforme agências EPA & CARB – EUA [36].

Em 2005 o CARB decretou a legislação estadual *Partial Zero Emission Vehicle* (PZEV) aplicado no estado da Califórnia, onde as montadoras de veículos deveriam diminuir ainda mais os valores de emissões provenientes de seus veículos.

A norma PZEV define que os valores limites de emissão de evaporativos para veículos de passageiros a caminhonetes leves são de 0,0 g/teste para todo o veículo e isto significa racionalmente 0,054 g g/teste para o sistema de combustível.

A Europa também revisou suas regulamentações na emissão de evaporativos e, desde o ano 2000 o valor limite de emissões evaporativas ficou

estabelecido em 2,0 g por dia de teste. O órgão que regulamenta as legislações da Europa é *Economic Commission for Europe* (ECE) ou (ECC), através das normas EC 2000 (Euro 3) e EC 2005 (Euro 4).

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) [37] estabelece os padrões de emissões, através da resolução nº 315 de 29 de outubro de 2002 e atualizada através resolução nº 354 de 13 de dezembro de 2004 [38], estabelecem que o valor limite de emissões de evaporativos é de 2g por teste para veículos de passageiros e comerciais em carga máxima menor que 3856 kg.

Importante ressaltar que em futuro próximo, provavelmente no final da década, estas regulamentações irão reduzir seus limites para os valores próximos dos aplicados pela EPA e CARB.

Para atender estas regulamentações de emissões, os tanques plásticos de combustível tiveram que desenvolver soluções de barreiras para evitar a permeabilidade de HC para o meio ambiente. A solução mais comum aplicada em tanques foi a implementação do PEAD multicamadas com barreiras de EVOH, conforme descrito anteriormente no capítulo 2.2.2.4.

Contudo existem áreas no tanque plástico que são muito complexas para evitar a permeabilidade de HC. Um destes pontos é na região de junção do molde de sopro, conhecido como ("*PINCH*"), conforme ilustrado na Figura 53 [35]. Isto pode ocorrer devido a falta da barreira nesta região, onde há a sobreposição de diversas camadas.

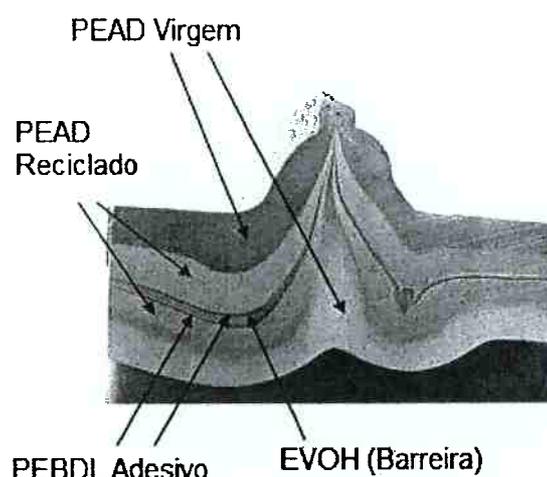


Figura 53 – Micrografia de uma seção transversal da parede de um tanque na área da junção do molde.

No caso de tanques metálicos de combustível, os engenheiros de projeto não precisam se preocupar com a permeabilidade de HC pela chapa de aço, para atender as atuais e futuras legislações de emissões, devem se preocupar somente com os vapores provenientes das conexões e vedações existentes no sistema de combustível como um todo.

Portanto no critério de permeabilidade de vapores de HC os tanques metálicos levam grande vantagem em relação aos tanques plásticos.

4.7. RECICLAGEM

Segundo TAM [39] o termo reciclagem refere-se no sentido puro da palavra a re-assimilação do material no fluxo de matéria prima virgem, de uma forma que este material possa ser usado em um propósito idêntico ou similar ao seu primeiro uso. Reciclagem deve ser diferenciada do termo re-uso, que se refere à reutilização de um objeto. Deve também ser diferenciada de diversas atividades que fazem com que descartes de material em processo sejam reaproveitados pelo fabricante, como por exemplo, a utilização de plástico PEAD do recorte das rebarbas do molde utilizado como matéria prima do um novo tanque. Pode-se definir que somente quando um material for recuperado, ou obtido de um canal de descarte é que este é considerado como sendo reciclagem e que a recuperação deve preceder a reciclagem.

De forma bem simplista, o termo reciclabilidade refere-se à facilidade técnica de re-introduzir um material recuperado de produtos que estão nos canais de descarte após o uso, em uma nova fonte de matéria prima. Isso leva à recuperação de materiais como sendo o oposto à extração de energia.

Em uma análise mais geral, a reciclabilidade também inclui:

- A facilidade de recuperação ou separação do descarte;
- Especificação e aceitabilidade dos produtos recuperados;
- Mercado para os produtos recuperados;
- Disposição para os resíduos, deixados após a recuperação dos materiais valiosos e;
- Custo de recuperação dos materiais valiosos.

O decreto RCRA (Resource Conservation and Recovery Act) publicado em 07 de janeiro de 2003 através do órgão, US Environmental Protection Agency [40], não recomenda a utilização o uso de materiais que não podem ser reciclados e podem parar abandonados em terrenos baldios. Como resultado, os engenheiros automotivos devem não somente atender o consumidor, forma, estilo, custo, massa e legislações, mas também os critérios ambientais. Todos os fornecedores de materiais devem mostrar que seus produtos são não somente leves e apresentam custos competitivos, mas também recicláveis. A este respeito, os fabricantes de plásticos devem trabalhar mais efetivamente para demonstrar que eles são recicláveis e tem a habilidade de ser recuperado de forma economicamente viável na desmontagem do veículo.

Uma das grandes desvantagens do tanque plástico em relação ao metálico é com relação a permeabilidade do plástico para os combustíveis como descrito no capítulo anterior, e portanto a sua dificuldade de reciclagem.

BROOKS et al. [41] apresenta em seu estudo que, devido à similaridade dos polímeros com os componentes dos combustíveis, tem-se que um tanque plástico pode absorver mais de 5% do seu peso em resíduos de combustível, incluindo butano, pentano, heptano, benzeno e tolueno, e com isso ocorre que estes resíduos cheguem até o ambiente externo.

Ainda de acordo com BROOKS et al. [41] mesmo tanques plásticos de PEAD multicamadas elaborados para impedir o fluxo de vapores de combustível para o ambiente, em suas camada interna primária (PEAD virgem) ocorre à contaminação e, portanto torna-se um problema para a reciclagem deste produto.

Apesar de ter grandes dimensões e de ser facilmente removido do veículo, o tanque de combustível contaminado é um grande impedimento para a reciclagem, pois faz com que a matéria-prima gerada com a moagem do material seja de baixa qualidade e de difícil processamento devido aos vapores de combustível gerados no processo de injeção da matéria-prima reciclada.

Segundo ALVARADO [27] existem outros fatores que dificultam a reciclagem de tanques plásticos.

A falta de uma infra-estrutura de plásticos recicláveis. Uma vez que a infra-estrutura para recuperar e reciclar componentes ferrosos de veículos está bem estabelecida, sendo que 70 a 80% de um veículo típico de passageiros é feito com aço e ferro recuperados.

Outro fator apresentado por ALVARADO [27] é a necessidade de diversos tipos de plásticos uma vez que a mistura de tipos podem prejudicar o lote da matéria-prima. Este problema não ocorre com os metálicos, o descarte industrial recicla 10.8 milhões de toneladas por ano de componentes automotivos em aço e ferro, o qual é utilizado para fazer novos produtos.

E finalmente, a falta de tecnologia que possa realizar a operação de separar os diversos tipos de plásticos existentes. A infra-estrutura atual de desmontagem, separação e descarte está baseada e dominada por equipamentos magnéticos para realizar a separação de metais, sendo equipamentos muito eficientes e de relativo baixo custo. No caso dos tanques metálicos de combustível, estes são removidos do veículo, amassados, esmagados e enviados para serem moídos, podendo retornar a sua origem.

E ainda o custo investido para recuperar plásticos, não é competitivo em relação à utilização de plásticos virgens.

BROOKS et al. [41] apresenta uma perspectiva para o processamento dos materiais de tanque de combustível e outros tipos de polietilenos que estejam contaminados com combustível. O processo desenvolvido possibilita a conversão desses materiais contaminados em um composto de fibra de madeira com plástico que pode ser empregado para a confecção de painéis de porta, estrados (*pallets*) e outras peças prensadas.

O processo consiste primeiramente em remover todo o conteúdo não plástico do tanque através do corte em grandes pedaços que depois são lavados para a remoção de qualquer resíduo de combustível. Estes pedaços de tanque são colocados em uma máquina moedora, capaz de transformar-los em pequenos pedaços de material de aproximadamente 10 mm de tamanho. Através de um sistema magnético, são removidos resíduos metálicos que por ventura ainda estejam presentes.

Os pequenos pedaços de material são colocados em um sistema que expande por vapor estes materiais, juntamente com a madeira moída pela mesma máquina que processa o plástico. Durante esta expansão com vapor, o material plástico se funde com a madeira, dando origem a um material chamado mazonite, que logo após é prensado, dando origem às novas peças. Exemplos destas peças de mazonite como painel de porta e estrados estão ilustrados na Figura 54 [41].



Figura 54 – Peças desenvolvidas a partir de material reciclado de tanques plásticos de combustível.

Apesar desta aplicação de reciclagem de tanques plásticos de combustível, todas as outras dificuldades descritas anteriormente fazem dos tanques metálicos indiscutivelmente a melhor opção de projeto em relação à reciclabilidade.

5. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este estudo de caso é pertinente à aplicação da proposta da matriz de decisão de projeto em relação à escolha do material metálico ou plástico para tanques de combustível de veículos de passageiros.

Determinados valores que não prejudicam o desenvolvimento do estudo não serão mostrados, como custos de peças e investimentos, por serem considerados como informações confidenciais dentro da General Motors do Brasil.

5.2 MATRIZ DE DECISÃO ENTRE MATERIAL METÁLICO OU PLÁSTICO PARA APLICAÇÃO EM TANQUES DE COMBUSTÍVEL

5.2.1 APRESENTAÇÃO DO PROJETO

O projeto escolhido para este estudo de caso foi o desenvolvimento de um novo tanque de combustível para uma linha de caminhonetes leves da General Motors do Brasil (*Mid Size Truck*), a S10 cabine dupla.

5.2.1.1. DADOS INICIAIS

O objetivo principal do projeto é aumentar o volume útil do tanque de combustível atualmente aplicado na S-10 sem acarretar grandes alterações de carroceria ou do chassi do veículo. Importantes fatores na definição do projeto estão relacionados abaixo:

- Veículo: S10 Cabine Dupla;
- Motor 4 cilindros em linha MPFI (Multi-Point Fuel Injection) de 2.4 litros de cilindrada (128 cv @ 4800 rpm) ;
- Tipo de Combustível: Gasolina E22 (Gasolina com 22% de álcool Anidro);
- Mercados de aplicação: Brasil, Argentina e Uruguai;
- Volume de produção estimado: baixo (35.000 unidades/ano);

- o Prazo do projeto: 2 anos.

5.2.1.2. MOTIVO

Um novo tanque de combustível deveria ser projetado para a S10 devido à identificação dos atuais índices de desempenho existentes para o modelo em produção em comparação com seus principais concorrentes do mesmo setor. Estes indicativos são comprovados através de índices externos, como avaliações comparativas dos modelos realizadas por empresas independentes do setor como a QAS (*Quality Audit Survey*) e também indicativos internos da GMB quanto a satisfação de seus clientes.

O novo sistema a ser desenvolvido requer um aumento de volume real de no mínimo 13 litros de combustível em relação ao modelo atual de produção, ou seja, alterando o volume útil percebido pelo consumidor de 67 litros para no mínimo 80 litros. Tecnicamente analisando, um dos grandes desafios neste projeto são as restrições de modificação do veículo, ou seja, espaço físico disponível que o projeto impunha. E a falta de possibilidades de grandes modificações de carroceria ou chassi do veículo restringem o desenvolvimento de um novo tanque de combustível, conforme mostra a Figura 55. Por este motivo a escolha do material mais apropriado desde o início do projeto era fundamental para o seu sucesso.

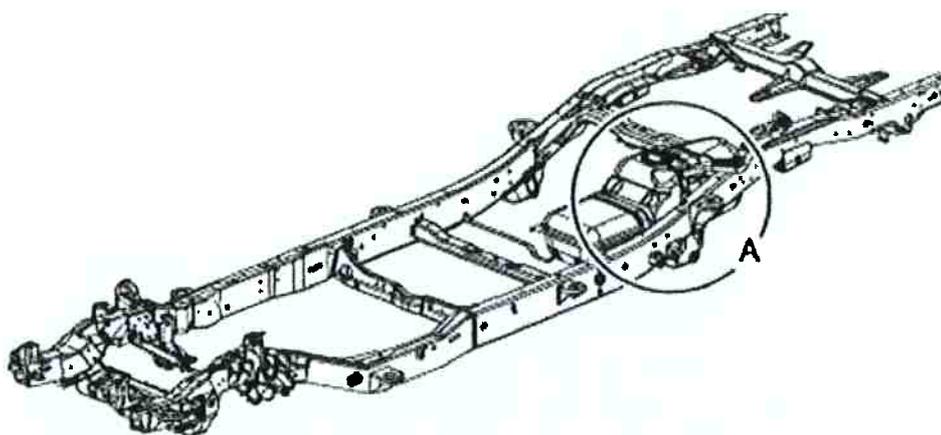


Figura 55 – Localização do tanque de combustível - veículo S10 Cabine Dupla.

Toda esta análise concluiu que o sistema de combustível passou a configurar uma espécie de ranking entre os modelos com relação a capacidade em

volume dos tanques, no qual as empresas buscam aprimorar seus projetos para melhor atender as necessidades dos cliente e de tornar também a referencia em sua classe (*Best in Class*).

5.2.1.2.1. DEFINIÇÃO DE CAPACIDADE DE VOLUME EM TANQUES DE COMBUSTIVEL

Para a melhor compreensão da finalidade deste projeto de pesquisa precisamos definir como é dividido o tanque de combustível em relação aos seus volumes. Temos na Figura 56 o seguinte:

- **Volume útil**, este é o volume de combustível que é realmente utilizado pelo motor do veículo, ou seja, o volume consumido pelo motor em sua totalidade, divulgado no manual do proprietário e percebido pelo cliente no posto de gasolina;
- **Volume residual**, este é o volume de combustível no qual a bomba de combustível não se consegue enviar ao motor, e fica retido no tanque;
- **Volume de expansão** do líquido, este é o volume que deve ser considerado em projeto devido a expansão do combustível líquido em vapor em relação as variações de temperatura e devido as movimentações do líquido no tanque, este volume é considerado de 10 a 14% do volume útil mais o volume residual;
- **Volume total**, este é a soma de todos os volumes acima citados.

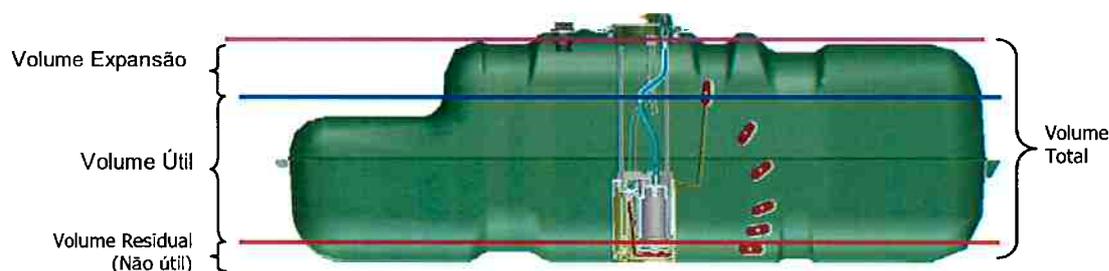


Figura 56 – Esquemática das definições de volumes internos de um tanque de combustível.

Para este projeto, conforme mencionado anteriormente, o aumento do volume útil estabelecido como meta, foi de 13 litros em relação ao tanque atual de produção.

5.2.2 APRESENTAÇÃO DAS ALTERNATIVAS

Duas propostas foram apresentadas pela engenharia de produto como alternativas para a solução do aumento de volume útil do tanque de combustível de 67 litros para 80 litros e seguindo as restrições do projeto.

Alternativa 01: Tanque metálico similar ao atual de produção, com um aumento da parte dianteira do tanque para o ganho de volume. A modificação consiste no aumento do comprimento do tanque por aproximadamente 443 mm ao longo de toda a sua largura. A figura 57 ilustra a projeto esquemático da proposta.

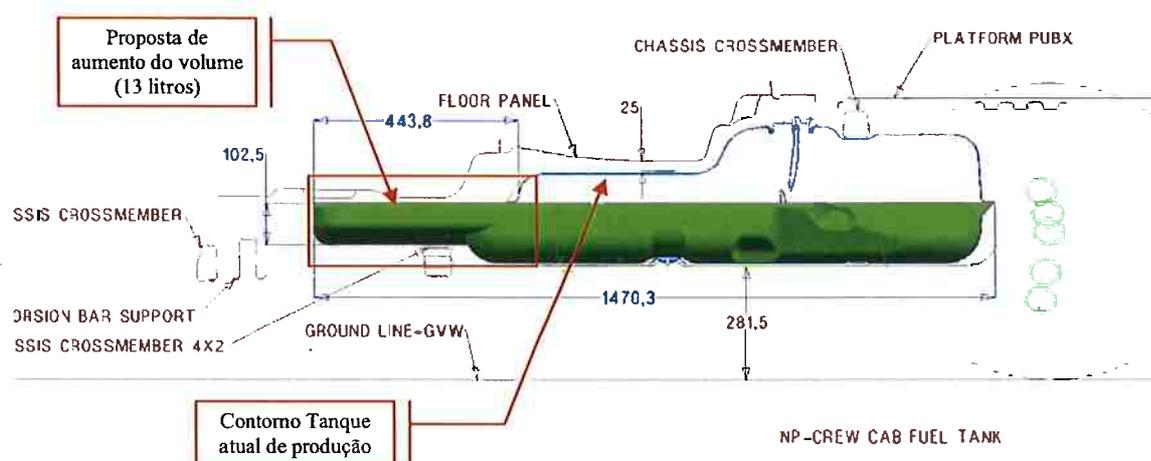


Figura 57 – Ilustração da proposta de tanque metálico (alternativa 01).

Essa proposta apresentou um acréscimo do volume útil em 13 litros (teórico), contudo apresenta uma diminuição do volume de expansão para o limite inferior de projeto, ou seja, 10% do volume total de combustível (Volume útil + Residual). Portanto a proposta foi considerada tecnicamente viável dentro dos critérios necessários de um desenvolvimento de tanque de combustível.

Material do tanque proposto foi o mesmo do tanque atual de produção: Chapa de aço revestida com Estanho na face interna e Zinco na face externa do

tanque de combustível, material de estampagem profunda (EPP). Espessura da chapa de 0,75 mm.

Alternativa 02: Tanque em material plástico de alta densidade (PEAD) sem barreira contra permeabilidade, similar ao tanque atual de produção, exceto pela a otimização dos espaços necessários da emenda das chapas do tanque metálicos (Flanges), e pela altura do tanque aumentada em 30 mm.

O aumento de volume deste tanque também foi de 13 litros de volume útil, ficando, portanto igual em volume do tanque metálico proposto.

A espessura de parede do tanque plástico estabelecida foi no mínimo de 3 mm em todas as superfícies do tanque. A figura 58 ilustra a proposta do tanque em material plástico.

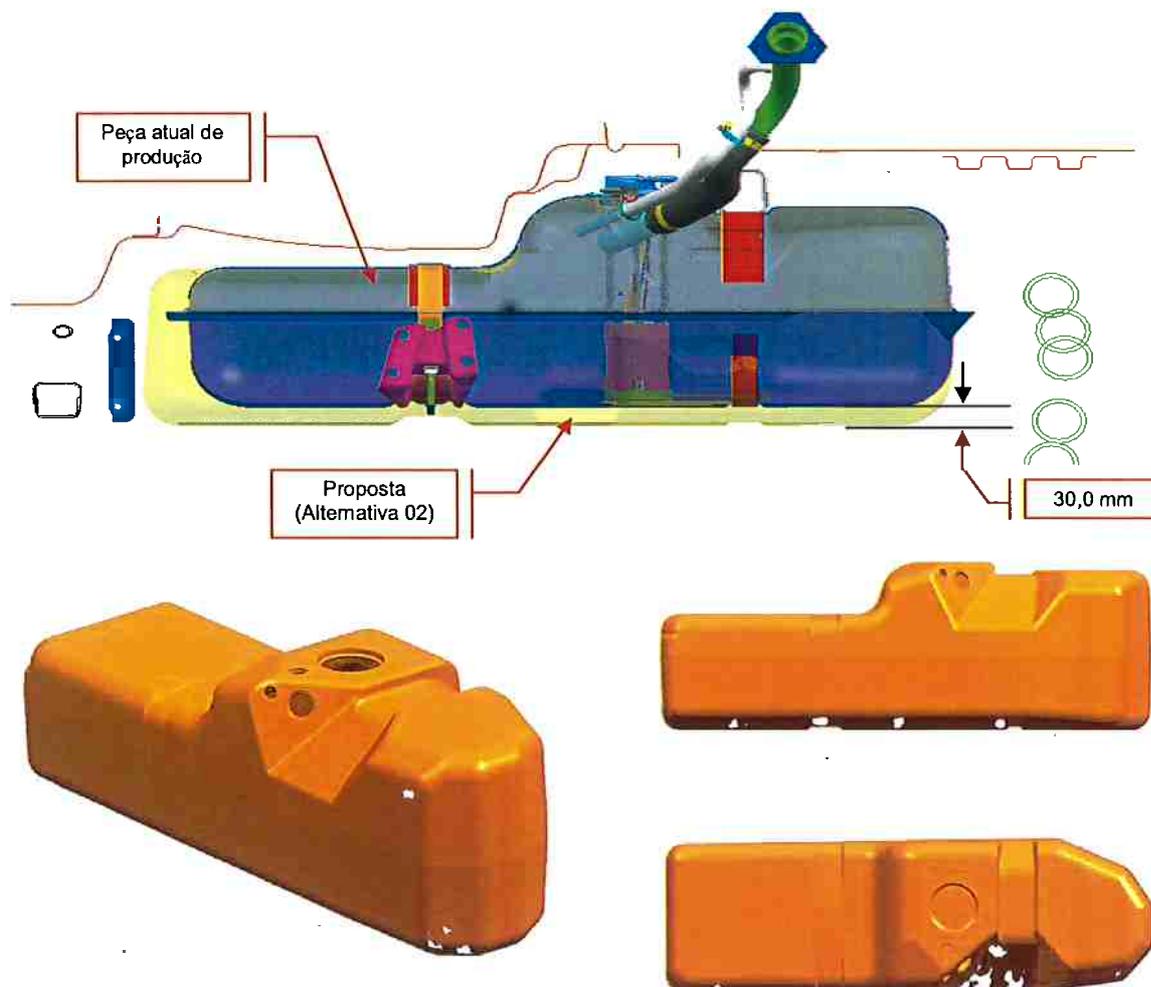


Figura 58 - Ilustração da proposta de tanque plástico (alternativa 02).

5.2.3 ESTRUTURAÇÃO DO PROBLEMA

Descrevendo a estruturação do problema conforme mencionado no esquema hierárquico apresentado no capítulo 3.1, temos os principais critérios de desempenho para projeto de tanques de combustível, conforme figura 59 :

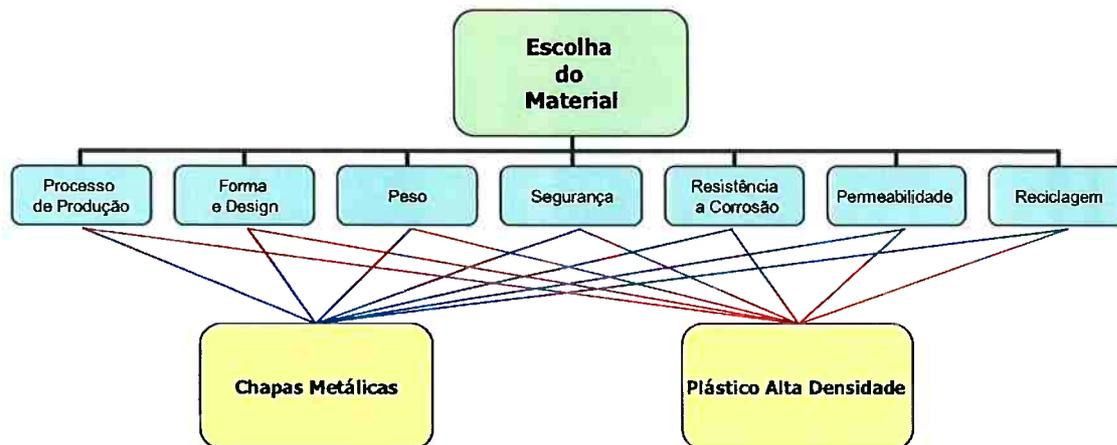


Figura 59 – Estrutura hierárquica para a escolha do material metálico ou plástico aplicado em um projeto de tanque de combustível.

5.2.3.1. PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

Seguindo os princípios da matriz de decisão, a equipe estabeleceu para cada atributo um valor de importância, uma vez que nem todos os atributos têm os mesmos graus de importância na escolha adequada do material a ser aplicado considerando este projeto em específico. As atribuições dos pesos estão descritas na tabela 13.

Tabela 13 – Pesos atribuídos para cada critério de desempenho.

Pesos atribuídos a cada critério de desempenho de tanques de combustíveis		
Crítérios:	Peso	Comentários
Custos do Processo de Produção	0.35	Muito Relevante devido baixo volume de produção - Projeto deve amortizar investimentos em curto prazo
Forma e Design	0.15	Relevante - Lay-out limitado devido as restrições do projeto
Massa	0.10	Satisfatório - aumento do peso do veículo considerado pouco significativo
Segurança	0.10	Satisfatório - Ambos materiais atendem as normas necessárias sem custos adicionais
Resistência à Corrosão	0.20	Relevante - Ure de S10 como faixa de estrada
Permeabilidade	0.05	Critério pouco relevante - ambos materiais atendem as normas sem custos adicionais
Reciclagem	0.05	Critério pouco relevante - ambos materiais atendem as normas sem custos adicionais
Somatória	1.00	

É importante ressaltar que a atribuição dos pesos foi executada com a participação de pessoas de diferentes áreas de atuação, para contribuir com o bom senso e com o correto julgamento da importância de cada atributo de desempenho. Lembrando que essa capacidade de julgamento e bom senso são adquiridos através da experiência e do profundo conhecimento dos fenômenos ou processos envolvidos na fabricação e operação do futuro produto.

5.2.4. MATRIZ DE DECISÃO (RESULTADOS)

Para esta técnica não existe um formato fixo de matriz, podendo ser incrementada de acordo com as necessidades do projeto.

O critério de notas atribuídas para cada alternativa (Metálico ou Plástico) seguiu-se conforme tabela de notas descritas no anexo I deste trabalho.

Cada participante atribuiu a sua nota a cada um dos critérios seguido por uma extensa discussão para consolidar o resultado final.

A tabela 14 apresenta os resultados obtidos através da matriz de decisão.

Tabela 14 – Matriz de decisão das alternativas de tanque de combustível.

Qual é o melhor material a ser aplicado em tanque de combustível S10 ?					
<i>Critérios:</i>	PESO	<i>Alternativa 01</i> Tanque Metálico		<i>Alternativa 02</i> Tanque Plástico	
		Nota	Score Final	Nota	Score Final
01 - Processo de Produção	0.35	3	1.05	1	0.35
02 - Forma e Design	0.15	4	0.60	4	0.60
03 - Massa	0.10	2	0.20	3	0.30
04 - Segurança	0.10	4	0.40	4	0.40
05 - Resistência a Corrosão	0.20	2	0.40	4	0.80
06 - Permeabilidade	0.05	3	0.15	2	0.10
07 - Reciclagem	0.05	4	0.20	4	0.20
<i>Score Total</i>		3.00		2.75	

Nota: Atribuição direta de valores de desempenho entre 0 e 4 (Anexo I)

O tanque metálico de combustível apresentou a melhor pontuação final para este projeto (3.15 pontos). Este resultado ocorreu principalmente devido ao critério de desempenho custo de produção ser o grande fator determinante no projeto.

A alternativa 01, conseguiu atingir a meta de aumento de volume com poucas modificações na peça atual, conseqüentemente apresentou os menores custos de investimento em ferramental, uma vez que os mesmos equipamentos serão apenas modificados para este novo produto.

5.3. ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

Através do estudo de caso apresentado anteriormente, pode-se verificar que o processo de tomada de decisão com base nos critérios de desempenho de tanques de combustível automotivos definidos neste trabalho auxilia no processo de escolha da melhor alternativa de material para a construção de tanques de combustível.

Isto ocorre devido à forma de explicitar e quantificar os critérios de projeto. Assim os atributos ficam claros e podem ser aplicados de maneira uniforme a todas as alternativas em estudo.

Apesar da simplicidade do estudo de caso, com apenas duas alternativas de solução ao projeto proposto, o resultado demonstrou que os critérios estabelecidos como atributos de desempenho para a comparação direta entre tanques plásticos e metálicos foram eficientes na escolhas das alternativas, pois promovem a discussão e ressaltam os pontos fortes e fracos de cada material.

Outro ponto importante que deve ser ressaltado é que o método apresentado gerou atividades em grupos multifuncionais e discussões sobre o assunto que nunca haviam sido realizadas na área de tanque de combustível em uma fase inicial de projeto. Cada departamento contribuiu com sua experiência e bom senso no julgamento para a correta definição dos pesos de cada critério. O que foi fundamental para o sucesso do método. Para uso do método em outros projetos esta atividade deve ser continuada, pois os pesos dos critérios variam de acordo com o projeto em estudo.

Um ponto negativo deste estudo foi o critério de custo de produção ser definido pelo grupo como o mais importante na definição da alternativa. Isto acarretou uma definição mais objetiva do problema onde o fator lucro do projeto sobrepôs qualquer outro critério de desempenho, uma vez também que os projetos eram muito similares. Uma análise mais profunda pode ocorrer na discussão de projetos onde os fatores técnicos sejam mais destacados do que os fatores econômicos.

Finalmente, é importante ressaltar que a utilização de um número excessivo de atributos não necessariamente melhora o resultado da análise comparativa, pois pode haver uma correlação entre os atributos, provocando uma ponderação relativa inadequada.

6. ENSAIO EXPERIMENTAL

O ensaio experimental foi adicionado neste trabalho com a finalidade de executar um teste comparativo direto entre tanques de combustível de material metálico e plástico em condições idênticas de ensaio, tornando-se pertinente ao objetivo proposto deste estudo.

O teste escolhido para fazer esta comparação entre tanques metálicos e plásticos foi de simulação de impacto de veículos em laboratório, conhecido como teste do trenó (ou *Sled Test*). Este ensaio foi escolhido basicamente por dois motivos: primeiro, demonstra um dos principais critérios de desempenho em tanques de combustível que é a sua resistência (rigidez), e segundo pela maior facilidade na execução do procedimento, devido sua repetibilidade e precisão nos resultados.

6.1. AMOSTRAS DE TESTE

Dois tanques de combustível existentes no mercado foram escolhidos para a realização do experimento, sendo um plástico e um metálico. Estes tanques foram escolhidos pelos seguintes motivos:

- Similaridade de forma e desenho industrial. Apresentam dimensões básicas similares e forma retangular semelhantes sem muitos ressaltos ou rebaixos em sua superfície;
- Similaridade de aplicação. Ambos são utilizados em veículos de passageiros do segmento de compactos econômicos (Popular);
- A maior disponibilidade de amostras para a realização do ensaio devido ao custo de cada tanque de combustível.

Devido a limitação de recursos disponíveis para a execução do experimento, foram disponibilizadas três amostras de tanques de combustível gentilmente cedidos por duas empresas fabricante de tanques de combustível.

Amostra 01: Tanque plástico de combustível (Figura 60).

- o Material: Plástico de alta densidade (PEAD);
- o Espessura: mínimo de 3,0 mm em todo seu contorno;
- o Dimensões básicas: 1000 mm x 390 mm x 250 mm;
- o Volume útil: 47 litros.



Figura 60 – Dimensões básicas da amostra 01.

Amostra 02: Idêntica a amostra 01

Amostra 03: Tanque metálico de combustível (Figura 61).

Material: Chapa de aço revestido externamente Zinco Internamente Estanho;

Espessura: 0,8 mm em todo seu contorno;

Dimensões básicas: 785 mm x 460 mm x 150 mm;

Volume útil: 44 litros.



Figura 61 – Dimensões básicas da amostra 03.

6.2. EQUIPAMENTO DE TESTE

O equipamento de teste de impacto consiste em um carrinho (ou trenó) que corre sobre um trilho. Este carrinho é posicionado a certa altura (1,4 m) através de cabos, onde acumula a energia potencial. Após a liberação dos cabos o carrinho corre sobre os trilhos acumulando energia cinética até o momento de impacto com o tanque de combustível, onde deve ter um trabalho equivalente a 4000 joules. A figura 62 mostra o dispositivo de teste onde foram efetuados os ensaios.



Figura 62 – Dispositivo de teste para simulação de impacto (*Sled Test*).

O equipamento de teste onde foram realizados os ensaios possui as seguintes características (Figura 63):

Altura de elevação do carrinho: 1400 mm (para 4000 N.m)

Peso do carrinho: 488,04 kg

Dimensões da superfície de contato: 550 mm x 150 mm



Figura 63 – Características do dispositivo de teste de impacto

6.3. PROCEDIMENTO DE TESTE

O tanque de combustível é preenchido com uma solução contendo 50% de do seu volume em água e 50% de etilenoglicol até seu volume útil total. Esta solução serve para manter o líquido e o tanque de combustível condicionados na temperatura requisitada para o ensaio. Nas amostras 01 e 02 foram colocados 47 litros da solução e na amostra 03 foram 44 litros.

Todas as aberturas do tanque de combustível são fechadas (lacradas) e verificadas para que não ocorram vazamentos. Como, por exemplo, saídas de ventilação, bocal de enchimento e abertura para o módulo de combustível.

O tanque é condicionado para a temperatura especificada para o ensaio em câmaras frigoríficas dependendo da solicitação do teste.

As condições de ensaios estabelecidas foram: a amostra 01 foi condicionada a temperatura ambiente (aproximadamente 21°C), e as amostras 02 e 03 foram condicionadas a temperatura de -40°C por um período de 24 horas antes da

execução dos ensaios. (Figura 64). Esta temperatura é a considerada mais crítica, pois enrijece as moléculas do material dos tanques, tanto plásticos quanto metálicos, deixando-os mais frágeis a ruptura.



Figura 64 – Amostras 02 e 03 condicionadas a temperatura de -40°C por 24 horas.

O tanque de combustível é posicionado no ponto de impacto, de forma que a superfície de contato do trenó atinja os pontos considerados mais críticos de projeto, como saliências e recortes do tanque, contudo não deve ser localizado para atingir o bocal de enchimento. (Figura 65).



Figura 65 – Posicionamento do tanque de combustível para o ensaio.

O tanque é amarrado através de cintas a parede de impacto, para que não se movimente muito durante o impacto.

O trenó é posicionado na altura de 1,4 m para que atinja 4000 joules no momento de impacto (Este valor de altura depende do dispositivo de teste).

E finalmente libera-se o trenó para a realização do ensaio.

Verifica-se a deformação do tanque e se há pontos de ruptura que consequentemente ocorra vazamentos.

6.4. RESULTADOS

Amostra 01: Tanque plástico de combustível a temperatura ambiente.

- Resultado: Não apresentou vazamentos.

Amostra 02: Tanque plástico de combustível a temperatura de -40°C.

- Resultado: Não apresentou vazamentos.

Amostra 03: Tanque metálico de combustível a temperatura de -40°C.

- Resultado: Não apresentou vazamentos.

A figura 66 mostra todos os resultados obtidos com as amostras de tanques de combustível antes e imediatamente após a realização do teste.

Maiores detalhes dos resultados do ensaio podem ser obtidos nos anexos II, III e IV deste trabalho.

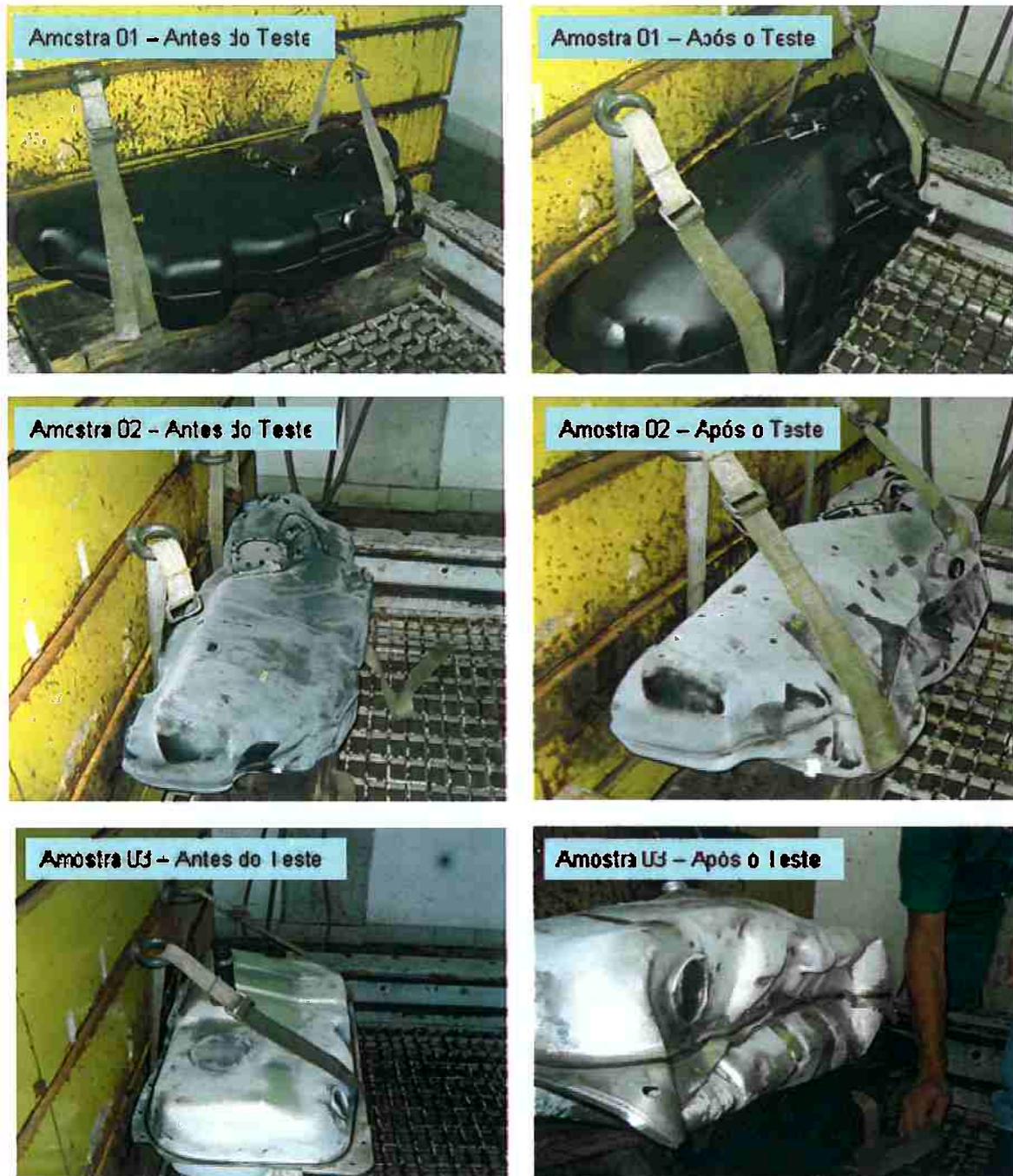


Figura 66 – Fotos das amostras após a execução do ensaio experimental.

6.5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados do ensaio, pode-se verificar que os tanques plásticos ou metálicos possuem desempenhos semelhantes quanto a sua resistência ao impacto. Todas as amostras testadas sofreram deformação permanente, contudo sem o acontecimento de vazamentos.

Comparativamente, pode-se acrescentar que o tanque metálico de combustível obteve maior deformação do impacto do que o tanque plástico, mas isso não significa que ele é pior ou melhor que os tanques plásticos, apenas que a deformação foi mais acentuada, e que em projetos de tanques metálicos de combustível deve-se tomar maiores cuidados em relação ao acúmulo de tensões provenientes da forma da peça.

O ponto positivo deste ensaio foi a comprovação com dados físicos que os tanques plásticos de combustíveis são equivalentes na questão de sua rigidez.

É importante ressaltar que este tipo de teste, apenas apresenta um indicativo de possíveis falhas que possam ocorrer durante um impacto diretamente no tanque de combustível. E os resultados apresentados servem somente como parâmetros de comparação destas amostras, os resultados de aprovação de um tanque de combustível quanto a sua segurança deve ser obtidos através dos ensaios em veículos realizados pelas montadoras de automóveis e regulamentado pelos órgãos governamentais.

Um ponto negativo do ensaio foi a falta de uma quantidade maior de amostras para a realização dos testes, o que poderia evidenciar alguma tendência de superioridade de algum tipo de material aplicado no tanque com relação a variações de projeto ou processo aplicando-se métodos estatísticos.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu esclarecer os principais atributos de desempenho que devem ser considerados em um projeto de tanque de combustível para veículos automotivos, apontando os pontos fortes e fracos das duas alternativas de material (metálico ou plástico) aplicado em tanques de combustível.

Conclusão 01: a questão de qual material é o mais adequado para a aplicação em tanques de combustível não pode ser respondida assim tão facilmente ou de forma direta. Observa-se que, não existe dominância entre as alternativas, ou seja, não há alternativa de material superior simultaneamente em todos os atributos de desempenho e, portanto qualquer das alternativas, material metálico ou plástico, deve ser considerada. Para tomar essa decisão, a matriz proposta neste estudo, dentro de sua simplicidade, demonstrou ser um processo eficiente a ser aplicado no auxílio da escolha do material, uma vez que permite a visualização clara dos atributos relevantes a um novo projeto.

Conclusão 02: o ensaio experimental realizado permitiu verificar que em relação à resistência ao impacto, um dos fatores de desempenho descritos neste trabalho, as alternativas de material plástico e metálico aplicados em tanques apresentaram resultados equivalentes, pois nenhuma amostra apresentou vazamento de líquido e, portanto reforçando a consideração que não há material melhor do que o outro na fabricação de tanques de combustível.

Conclusão 03: apesar do material plástico não conseguir demonstrar sua superioridade em relação aos metálicos nos principais critérios de desempenho, nota-se que existe uma tendência mundial crescente de tanques de combustível em veículos automotivos seguirem para a alternativa de utilização do plástico de alta densidade.

7. TRABALHOS FUTUROS

Através da análise crítica do ensaio experimental executado pode-se concluir que a falta de uma quantidade maior de amostras para serem avaliadas no teste, não permitiu o estudo profundo nas tendências de desempenho de cada material com relação ao requisito de resistência ao impacto. Não foi possível levantar uma curva estatística para maior confiança nos resultados. Portanto aqui fica a sugestão de um próximo estudo a ser realizado para verificar a influência das variações de projeto e processo em tanques de combustível no seu desempenho quanto à resistência ao impacto. Podem-se variar as condições de amostras como, por exemplo, a espessura do material, ou as condições do teste como o volume no tanque ou ainda levar as amostras até ruptura para uma posterior verificação sobre o tipo de fratura ocorrida em cada tanque em função das condições de variações escolhidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHANARON, J.-J. "Automobiles: a static technology, a 'wait-and-see' industry?" *Technology Management*, v. 16, n. 7. p. 595-630, 1998.
- [2] CLARK, K. B.; FUJIMOTO, T. "Product development performance: strategy, organization and management in the world auto industry." Boston: Harvard Business, School Press, 1991.
- [3] PUGH, S. "Creating innovative products using total design: the living legacy of Stuart Pugh." Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1996.
- [4] GARRET, T. K. *Automotive Fuels and Fuel Systems, V1 Gasoline*, Pentech Press, London, 1991.
- [5] KAUTEX TEXTRON DO BRASIL LTDA, Congresso Internacional "Tanques plásticos com alta barreira para combustíveis", São Paulo 14 setembro de 2006.
- [6] WARNECKE, W.; FROEBER, J.; BODE, R. Hot dip aluminized steel sheet—An excellent material for fuel tank application. SAE, 1999-01-0222.
- [7] AISI - American Iron and Steel Institute – Fuel Tanks new material, disponível em <<http://www.autosteel.org>> acesso em 12 de janeiro de 2007 (Autosteel, 2007).
- [8] Pesquisa sobre Tanques plásticos de combustível, disponível em <<http://www.plasfuelsys.org/plasfuelsys.htm>> acessado em setembro 2006.
- [9] MORAN M. J. e SHAPIRO H. N. "Fundamentals of Engineering Thermodynamics" 5 ed. John Wiley and Sons Inc. 2004. Cap. 13.
- [10] ANP - Agência Nacional do Petróleo - Legislação de Combustíveis disponível em <<http://www.anp.gov.br/petro/petroleo.asp>> acesso em setembro de 2006 (ANP, 2006).
- [11] ANP - Agência Nacional de Petróleo – Legislação Álcool Etílico Anidro Combustível (AEAC) e Álcool Etílico Hidratado Combustível (AEHC) Resolução 36, de 06 dezembro 2005, disponível em <http://www.anp.gov.br/petro/legis_qualidade.asp> acesso em 12 de janeiro de 2007 (ANP, 2007).
- [12] PENTEADO, M. C. P. S. Identificação dos gargalos e estabelecimento de um plano de ação para o sucesso do programa brasileiro de biodiesel. São Paulo, 2005 177p Dissertação (Mestrado Profissional) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

- [13] ANP - Agência Nacional de Petróleo – Legislação Biodiesel Resolução 042, de 24 de novembro de 2004, disponível em http://www.anp.gov.br/petro/legis_biodiesel.asp acesso em 12 de janeiro de 2007 (ANP,2007).
- [14] ANP - Agência Nacional de Petróleo – Legislação Gás Natural Liquefeito Resolução 118, de 11 de julho de 2000, disponível em http://www.anp.gov.br/gas/legis_gas.asp acesso em 13 de janeiro de 2007 (ANP,2007).
- [15] GENERAL MOTORS DO BRASIL, Engineering Standards GMN11062 - Specification for fuel storage and handling subsystem, October 2004.
- [16] Inergy Automotive System; Pesquisa sobre sistema de combustível disponível em <http://www.inergyautomotive.com> acesso em 18 de janeiro de 2007.
- [17] BOSCH; "**Automotive Handbook**". 4th Edition; SAE – Society of Automotive Engineers, Outubro 1996; 892p.
- [18] GENERAL MOTORS CORPORATION. USA, 1996. "**Cold Rolled Carbon Steel Sheets, Coated or Uncoated, for drawing**", EMS.ME.1508 disponível em intranet em <http://pai.gm.engineeringdocuments.html> . Acesso em 22 novembro 2006.
- [19] SAE – Society of Automotive Engineers. SAE J447 "**Prevention of Corrosion of Motor Vehicle Body and Chassis Components**", USA, 1995 64p.
- [20] SASFT – Strategic Alliance for Steel Fuel Tanks, Pesquisa sobre tanques metálicos de combustível, disponível em <http://www.sasft.org/AM/Template.cfm>, acessado em setembro de 2006.
- [21] ELLIS, T. "**Structural and Material Features that influence Emissions from Thermoplastics Multilayer Fuel Tanks**", SAE Paper N° 2003-01-1121, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 2003.
- [22] KAMINSKI, P. C. "**Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**". Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000.
- [23] VINCKE, P. "**Analysis of Multicriteria Descision Aid in Europe**". EJOR, v.25, 168p, 1986.
- [24] ROTONDARO, R. G. et al. "**Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**". Ed. Atlas, São Paulo, 2002.

- [25] ENSSLIN, L.; DUTRA, A.; ENSSLIN, S. R. (1997), "Instrumentos de apoio à fase de estruturação dos processos decisórios - mapas cognitivos e árvore hierárquica de objetivos: um estudo de caso", XXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, anais de resumos, Salvador, Abril de 1997: SOBRAPO.
- [26] JARDIM SISTEMAS AUTOMOTIVOS "Pesquisa sobre processo de produção de tanques de combustível", Reunião realizada com representante da empresa Sr. Marcelo Valero em 24 setembro 2006, São Paulo, 2006.
- [27] ALVARADO, P. J. "Steel vs. Plastics: The competition for light-vehicle fuel tanks" JOM, USA 1996, vol. 48, n°7, p 22-25.
- [28] MGA - Research Corporation pesquisa sobre impactos frontais, laterais e traseiros segundo norma FMVSS 301, disponível em <[http://www.mgaresearch.com/products and services/Testing_Services/Crash_Testing/Crash_Testing.htm](http://www.mgaresearch.com/products_and_services/Testing_Services/Crash_Testing/Crash_Testing.htm)>, acesso em 22 de janeiro de 2007.
- [29] CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito, Resolução n° 463 de 21 de agosto de 1973, disponível em <<http://www.transitobr.com.br/res463-73.htm>>, acesso em 22 de janeiro de 2007.
- [30] European Community 2004, Regulation ECE R34 "Vehicles with regard to the prevention of fire risks", October 1st, 2004.
- [31] GRIFFITH, J. R.; MACHADO, C. R.; BENDELE, B. B.; "Comparative Evaluation of Automotive Fuel Tanks in General Accordance with R34 Annex 5 Section 5.0 – Resistance to Fire" SAE 2005-01-1561.
- [32] D'ALKAINE, C. V.; FILHO, A. R.; BOCCHI, N.; ROCHA, S. B.; "Corrosão e proteção de pinturas industriais", Editora UFSCar, 1988.
- [33] NACE – Internacional the Corrosion Society; "Electrical and Electrochemical Methods for Determining Corrosion Rates", 3D170, Houston, TX, September 1984.
- [34] ABU-ISA, I.; SABIHA, K.; DEBARR, G.; ZHI, S. "Mechanical, Thermal and Rheological Properties of Polymers used in Plastic Fuel Tanks" SAE 2006-01-0333.
- [35] ADAM. V; DALBARRE, P; "Innovative Testing Device for Ultra-Low Fuel Permeation System " SAE 2001-01-3769.
- [36] TACHI, T.; GOTO, T.; KATO. H.; TAKASHIMA, T. "Low Permeation Technologies for Plastic Fuel Tank" SAE 2003-01-0790, pag 1.
- [37] CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução n° 315 de 29 de outubro de 2002, disponível em

<<http://www.ibama.gov.br/proncove/legislacao.php>>, acesso em 21 de janeiro de 2007.

- [38] CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução nº 354 de 13 de dezembro de 2004, disponível em <<http://www.ibama.gov.br/proncove/legislacao.php>>, acesso em 21 de janeiro de 2007.
- [39] TAM, E. K. L.; JEKEL, L. J.; "**Separation and liberation factors designing for automotive materials recovery** " SAE 2004-01-0471.
- [40] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – Resource Conservation and Recovery Act, January 7th 2003, disponível em <<http://www.epa.gov/region5/defs/html/rcra.htm>>, acesso em 21 de Janeiro de 2007.
- [41] BROOKS, S. H. W.; DURANCEU C. M.; GALLMEYER W. W.; WILLIAMS R. L.; WINSLOW G. R.; "**Stake digester process for HPDE fuel tank recycling** " SAE 2003-01-1371.
- [42] MICHAELI, W.; **Tecnologia dos Plásticos**. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1995. Introdução e Lição 1, p. 1 a 13.
- [43] ASM International; "**Engineering Materials Handbook**", disponível em ASM Handooks Online <<http://products.asminternational.org/hbk/lindex.jsp>>, acesso em 02 de maio de 2007.

ANEXO I – CRITÉRIOS DE DESEMPENHO

Notas referentes ao critério de desempenho: Custos do processo de produção

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Custo Zero	Extensão de uso de componente já disponível
3	Baixo	Reaproveitamento do equipamento existente com pequenas alterações
2	Médio	Alteração significativa nos equipamentos existentes
1	Alto	Novo equipamento de produção
0	Altíssimo	Equipamento totalmente novo incluindo nova planta de produção

Notas referentes ao critério de desempenho: Forma e Design

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Excelente	Formas conhecidas já utilizadas em outros veículos
3	Bom	Formas com modificações simples
2	Satisfatório	Formas simples mas com locais complexos específicos
1	Ruim	Formas complexas mais elaboradas de difícil controle do processo
0	Péssimo	Formas complexas que exigem novas tecnologias

Notas referentes ao critério de desempenho: Peso

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Excelente	Redução do peso total do veículo ($m < 0$)
3	Bom	Acréscimo de peso total no veículo insignificante ($0 < m < 1.0 \text{ kg}$)
2	Satisfatório	Acréscimo pouco perceptível do peso total veículo ($1.0 < m < 3.0 \text{ kg}$)
1	Ruim	Acréscimo significativo do peso total do veículo ($3.0 < m < 5.0 \text{ kg}$)
0	Péssimo	Acréscimo inaceitável do peso total do veículo ($m > 5.0 \text{ kg}$)

Notas referentes ao critério de desempenho: Segurança

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Excelente	Atende todas as legislações de segurança e todos os testes de validação
3	Bom	Atende todas as legislações de segurança e quase todos os testes de validação
2	Satisfatório	Atende todas as legislações de segurança e alguns testes de validação
1	Ruim	Atende somente as legislações de segurança
0	Péssimo	Não conforme as legislações de segurança

Notas referentes ao critério de desempenho: Resistência contra Corrosão

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Excelente	Totalmente protegido (Inerte ao ambiente corrosivo)
3	Bom	Proteção contra corrosão até 8 anos (cosmética e perfurante)
2	Satisfatório	Proteção contra corrosão até 4 anos (cosmética e perfurante)
1	Ruim	Proteção contra corrosão cosmética somente até 4 anos
0	Péssimo	Não atende critérios proteção contra corrosão (exemplo: Salt Spray)

Notas referentes ao critério de desempenho: Permeabilidade

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Excelente	Barreira permanente contra a permeabilidade (PZEV - USA)
3	Bom	Atende as legislações internacionais de permeabilidade (USA LEV-II)
2	Satisfatório	Atende as legislações locais de permeabilidade
1	Ruim	Proteção contra corrosão cosmética somente até 4 anos
0	Péssimo	Não atende critérios proteção contra permeabilidade locais

Notas referentes ao critério de desempenho: Reciclagem

Nota	Racionalidade	Comentários
4	Excelente	Totalmente reciclável sem qualquer operação
3	Bom	Totalmente reciclável após processo de descontaminação
2	Satisfatório	Parcialmente reciclável após processo de descontaminação
1	Ruim	Parcialmente reciclável ou auto custo para reciclagem
0	Péssimo	Não reciclável

ANEXO II – RESULTADOS ENSAIO EXPERIMENTAL AMOSTRA 01



ANEXO III – RESULTADOS ENSAIO EXPERIMENTAL AMOSTRA 02



ANEXO IV – RESULTADOS ENSAIO EXPERIMENTAL AMOSTRA 03

