



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Sustentabilidade no setor dos transportes

Joaquim Fernando Ribeiro Monteiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Paulo Nobre Balbis dos Reis

Covilhã, Outubro de 2013

Agradecimentos

Este trabalho só foi possível com o apoio de uma família magnífica, minha mulher e os meus dois encantadores filhos que me permitiram e apoiaram em momentos de grande turbulência, em que o trabalho, família, e actividades complementares se intercetavam, sendo só através da sua paciência e compreensão possível chegar até aqui.

Agradeço também à equipa de docentes da universidade da Beira Interior, especialmente ao Sr. Prof. Doutor Paulo Reis pelo suporte e incentivo na concretização desta etapa que é tão importante para mim.

Finalmente, mas sem menor importância, agradeço aos meus pais, amigos e colegas de trabalho, pelo suporte e também pela compreensão aquando da minha ausência para a elaboração deste trabalho.

Para todos supramencionados e também para os que eventualmente faltou mencionar, tenho que partilhar e afirmar que este trabalho ao ter sido possível com o vosso suporte, é efectivamente também parcialmente vosso.

Resumo

Actualmente, as questões ambientais criam uma elevada pressão nas empresas produtoras de equipamentos e estimulam novos desafios à comunidade científica. Uma forma explícita de reduzir os impactos ambientais é o recurso a materiais de baixo peso específico. O aço continua a ser, ainda, o material mais utilizado para fins estruturais por apresentar vantagens competitivas. Neste contexto, algumas siderurgias têm efectuado melhorias extraordinárias nas propriedades mecânicas dos aços vocacionados para aplicações estruturais. Exemplo típico deste comportamento é a empresa SSAB com a apresentação de aços de alta resistência e, mais recentemente, aços de ultra resistência. Neste contexto, este trabalho abordou dois casos de estudo onde, no primeiro, com base numa carroçaria basculante comprovou os benefícios de um aço de elevado limite elástico face a um tradicional aço macio. O segundo estudo analisou o comportamento à fadiga das juntas coladas sujeitas a frequência variável, com aderentes em aço de alta resistência, tendo sido estabelecida uma lei de previsão da vida de fadiga.

Palavras-chave

Sustentabilidade; Sector dos transportes; Aços de alta resistência; Juntas coladas.

Abstract

Currently, an environmental issue creates a high pressure on companies producing equipment and stimulates new challenges to the scientific community. An explicit way to reduce environmental impacts is the use of materials with low specific weight. The steel remains still the most common material used for structural purposes by presenting competitive advantages. In this context, some mills have made excellent improvements in the mechanical properties of steel oriented for structural applications. Typical example of this behavior is the company SSAB with the presentation of high-strength steels and, more recently, ultra high strength steels. In this context, this study addressed two case studies where the first, based on a Tipper, where are really visible the benefits of a high strength steel face to a traditional mild steel. The second study examined the fatigue behavior of bonded joints subjected to variable frequency, with adherents in high strength steel, a law has been established to predict the fatigue life.

Keywords

Sustainability, Transport Sector, High strength steels; glued joints.

Índice

1 - Enquadramento Teórico	3
1.1 - Introdução	3
1.2 - Considerações Teóricas sobre Sustentabilidade	3
1.3 - Aços de Alta Resistência	7
1.4 - Juntas Coladas	10
2 - Caso Estudo I	15
2.1 - Introdução	15
2.2 - Análise e Discussão do Caso de Estudo	16
3 - Caso Estudo II	28
3.1 - Introdução	28
3.2 - Material e Procedimento Experimental	30
3.3 - Análise e Discussão dos resultados	30
4 - Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros	41
4.1 - Conclusões Gerais	41
4.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros	42
Bibliografia	43

Lista de Figuras

Figura 1.1 –	As três dimensões do desenvolvimento sustentável -DS	5
Figura 1.2 –	Ciclo do aço (fonte SSAB)	7
Figura 1.3 –	Procura de aço a nível global (fonte SSAB)	8
Figura 1.4 –	Tipo de juntas e respectivas solicitações: a) juntas de sobreposição, b) juntas topo-a-topo	11
Figura 1.5 –	a) Distribuição das tensões de corte; b) Distribuição das tensões normais	13
Figura 1.6 –	Distribuição das tensões de corte ao longo da secção transversal de uma junta colada sobreposta simples	13
Figura 1.7 –	Distribuição das tensões ao longo da linha central da camada da cola, para uma junta colada de sobreposição dupla com e sem efeito do chanfro	14
Figura 2.1 –	Carroçaria basculante ROUNDTIPPER	17
Figura 2.2 –	a) Bâscula tradicional; b) Sub-chassi convencional	17
Figura 2.3 –	a) Actual báscula em Hardox 450; b) Actual sub-chassi em Domex 700	18
Figura 2.4 –	Análise de ciclo de vida (RUUKKI)	22
Figura 2.5 –	Análise de consumo de aço na produo de uma báscula	23
Figura 2.6 –	Consumo de combustível/ano e respectivo ganho	23
Figura 2.7 –	Benefício €/ano para o novo design	23
Figura 2.8 –	Ganho total/ano	24
Figura 2.9 –	Evoluo do desgaste em funo do ângulo de impacto para um aço macio e um Hardox	25
Figura 2.10 –	Evoluo do desgaste em funo da dureza	25
Figura 2.11 –	Evoluo do desgaste ao longo do ciclo de vida em funo do desgaste	26
Figura 2.12 –	Evoluo do desgaste por escorregamento em funo da dureza	26
Figura 2.13 –	Evoluo do desgaste por escorregamento ao longo do ciclo de vida em funo da dureza	27
Figura 3.1 –	Geometria dos provetes usados nos ensaios de fadiga	30
Figura 3.2 –	Exemplo tpico de uma sequência de blocos com diferentes frequências de carga (Ni=1000, 2500 e 4000 ciclos)	31
Figura 3.3 –	Amplitude de tenso de corte versus número de ciclos  rotura	31
Figura 3.4 –	a) Ligao do termopar ao provete para medir a temperatura no filme de cola; b)Evoluo da temperatura com o n de ciclos  fadiga	33
Figura 3.5 –	a) Evoluo dos ciclos de histerese para testes de fadiga realizados a 10Hz; b) Comparao do efeito das várias frequências no ciclo de histerese número.	34

Figura 3.6 - Falha típica observada nas superfícies de fractura das diferentes juntas coladas	35
Figura 3.7- Curvas S-N obtidas com blocos de duas sequências	37
Figura 3.8 - Ruína por modo misto	39
Figura 3.9 - Resultado de D em função do número de ciclos por bloco	39
Figura 3.10 - Vida prevista versus vida experimental	40

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Resumo das principais concepções de sustentabilidade	3
Tabela 1.2 – Resumo dos marcos, perspectiva histórica e cronológica	6
Tabela 1.3 – Vantagens e limitações que advêm da aplicação das juntas coladas	11
Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos diferentes aços	18
Tabela 2.2 – Variáveis analisadas no ciclo de vida	18
Tabela 3.1 – Valores de potência em função da frequência	35
Tabela 3.2 – Sequência de blocos estudadas e respectivas vidas de fadiga	38

Lista de Acrónimos

WCED	World Commission on Environment and Development
DS	Desenvolvimento sustentável
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
ONU	Organização das Nações Unidas
CCI	Câmara de Comércio Internacional
TBL	Triple Bottom Line
HSLA	High Strength Low Alloys
TRIP	Transformation Induced Plasticity
DP	Dual Phase
ASTM	American Society for Testing and Materials
WTT	Well to Tank
DEFRA	Department for Environment, Food and Rural Affairs
RASTU	Safety, environmental impacts and new technology (Org Finlandesa)
LIPASTO	Dicionário on-line (site Finlandês)
TEAM	Software de análise de ciclo de vida
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
WRI	World Resources Institute
ISWA	International Solid Waste Association
PM	Palmegren-Miner
FM	Mecânica da fratura
CzMS	Modelos da zona coesiva
MDL	Modelo de mecânica do dano contínuo
DMA	Dinamical Mechanical Analysis
VAL	Carregamentos de amplitude variável

Notação

Caracteres Latinos

VAL	Carregamentos de amplitude variável
R_m	Tensão de rotura
E	Energia absorvida
P	Carga de colapso
t	Espessura
R	Razão de tensões
N	Nº ciclos num instante determinado
N_r	Nº ciclos à rotura
ΔT	Variação de temperatura
n_1	Ciclos de 1/3 da vida de fadiga
n_2	Ciclos de vida até à ruína
D	Soma do dano

Símbolos Gregos

τ	Tensão de rotura
$\Delta\sigma$	Variação da tensão

Introdução

Actualmente, as questões ambientais exercem uma pressão muito elevada nas empresas produtoras de equipamentos, no sentido da inovação tecnológica dos seus produtos, e coloca novos desafios à capacidade de investigação da comunidade científica. Neste contexto, um aspecto de particular importância e premência é o efeito de estufa, segundo o qual o vapor de água e o dióxido de carbono interceptam a radiação emitida pela superfície da terra provocando o aquecimento do ar. A principal actividade humana causadora do efeito de estufa é a combustão de combustíveis fósseis, através da produção de CO₂, onde os sectores que apresentaram os maiores contributos foram o da produção de energia (32%), o dos transportes (24%) e o consumo industrial (23%). Para além deste problema, acresce ainda o facto dos combustíveis estarem a aumentar significativamente de preço dia após dia, conduzindo ao conseqüente aumento do custo final dos produtos.

Uma forma de reduzir os impactos negativos referidos, é o recurso a materiais de baixo peso específico, como é o caso das ligas de alumínio, ligas de magnésio e os compósitos. Todavia, o aço continua a ser, ainda, o material mais utilizado para fins estruturais por apresentar vantagens competitivas, sobre aqueles materiais, tornando-o na melhor escolha em sectores tais como a indústria automóvel e indústrias produtoras de equipamentos de carga e de transporte de mercadorias. Estas vantagens resultam sobretudo da sua maior rigidez, o menor custo e a facilidade de processamento dos componentes através da maioria das tecnologias actualmente existentes. Recentemente, algumas siderurgias têm efectuado melhorias extraordinárias nas propriedades mecânicas dos aços vocacionados para aplicações estruturais, melhorando o seu limite elástico e conseqüentemente o rácio resistência/peso. Exemplo típico deste comportamento é a empresa SSAB com a apresentação de aços de alta resistência e, mais recentemente, aços de ultra resistência. Desta forma, conseguem-se níveis de resistência bem mais elevados para a mesma massa específica conduzindo, deste modo, a estruturas mais leves e/ou à conseqüente poupança energética.

Neste contexto, foram elaborados dois “casos estudo” onde, no primeiro, se comparou os benefícios de um aço de elevado limite elástico face a um tradicional aço macio. Esta análise teve como elemento de estudo uma balsa para transporte de pedras e/ou terras fabricada pela empresa BT & ARVORENSE. O segundo estudo visa aumentar o conhecimento sobre o comportamento à fadiga das juntas coladas. Especial enfoque será dado ao efeito da frequência variável, de modo a estabelecer modelos de previsão.

Para tal, esta dissertação encontra-se organizada em 4 capítulos sendo, no primeiro, feito um enquadramento teórico sobre os temas abordados nos “casos estudo”. Considerações teóricas sobre sustentabilidade, em especial no sector automóvel, uma introdução aos aços de alta resistência e uma abordagem às juntas coladas fizeram parte desta contextualização. Posteriormente são introduzidos os “casos estudo” separadamente e em diferentes capítulos. Finalmente o capítulo 4 apresenta as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 1

Enquadramento teórico

1.1 - Introdução

De uma forma sucinta serão apresentados, neste capítulo, alguns conceitos fundamentais que estão inerentes ao estudo efectuado. Especial enfoque será dado aos conceitos de sustentabilidade, em particular no sector automóvel. Seguidamente faz-se uma introdução aos aços de alta resistência e, finalmente, conclui-se com uma abordagem às juntas coladas uma vez que esta técnica de união é bastante utilizada na indústria automóvel.

1.2 - Considerações Teóricas sobre Sustentabilidade

Podemos dizer que os meados do século XX ficaram caracterizados pela viragem de onde as consequências das actividades humanas passaram de um cariz local para um carácter global. A sociedade confrontou-se com uma situação de limite, na qual o crescimento da população, o sobreconsumo, as alterações das condições climatéricas, a degradação ambiental e as novas desigualdades sociais foram agravados pelo facto de se viver num planeta limitado em termos de recursos e espaço [1]. Neste contexto, foi necessário estimular a sociedade para a consciência destes problemas, de modo a reequaciona-los numa perspectiva de Sustentabilidade.

No entanto o termo *Sustentabilidade* deve ser analisado de uma forma abrangente, pois é uma questão complexa com diversas abordagens. As diversas definições, enfoques e visões de sustentabilidade apresentam contradições e ambiguidades, às vezes, incompatíveis, principalmente no que se refere à questão do desenvolvimento sustentável [2]. Na Tabela 1.1 apresenta-se um resumo das principais concepções de sustentabilidade [2]. Nestas análises transparecerem diferentes correntes de pensamento em relação aos enfoques de sustentabilidade, bem como as contradições e ambiguidades da expressão desenvolvimento sustentável. De uma maneira geral as definições procuram integrar viabilidade económica com prudência ecológica e justiça social, nas três dimensões conhecidas como *TRIPPLE BOTTOM LINE* [2]. De acordo com Carvalho e Viana [3] o desenvolvimento sustentável apresenta três grandes dimensões principais: crescimento económico, equidade social e

equilíbrio ecológico, ou seja, por outras palavras, o desenvolvimento sustentável equilibra as dimensões: económica, social e ambiental (figura 1.1).

Tabela 1.1 - Resumo das principais concepções de sustentabilidade [2].

<i>Autores</i>	<i>Sustentabilidade e desenvolvimento sustentável</i>
Claro e Amâncio (2008)	Consideram que as empresas têm encontrado dificuldade em associar discursos e práticas gerenciais à interpretação de sustentabilidade, embora o e o termo esteja cada vez mais presente no ambiente empresarial. Para os autores sustentabilidade e desenvolvimento sustentável seriam equivalentes. Segundo eles, a definição de sustentabilidade mais difundida é a da Comissão Brundtland (WCED, 1987). Essa definição deixa claro um dos princípios básicos de sustentabilidade, a visão de longo prazo, uma vez que os interesses das futuras gerações devem ser analisados.
Rodrigues, 2009	Sustentabilidade significa sobrevivência, perenidade dos empreendimentos humanos e do planeta.
Cabestré; Graziade; Polesel Filho (2008)	Sustentabilidade seria a relação entre os sistemas económicos e os sistemas ecológicos na qual a vida humana continuaria indefinidamente e os efeitos das actividades humanas permaneceriam dentro de limites sem destruir a diversidade, complexidade e funções do sistema ecológico de suporte da vida.
Oliveira Filho (2004)	Considera gestão ambiental e desenvolvimento sustentável, como sinónimo de sustentabilidade do negócio.
Giacometi (2008)	A sustentabilidade é um objectivo que deve permear as acções das sociedades contemporâneas, diminuindo o uso insensato dos recursos renováveis e não renováveis.
Tomazzoni (2007)	Sustentabilidade significa desenvolvimento económico. Desenvolvimento seria sinónimo de sustentabilidade social que depende de acções coordenadas de cooperação para reverter o quadro de concentração de renda em determinadas regiões.
Schweigert (2007)	A interpretação da sustentabilidade se vincula a efeitos sociais desejados, as funções práticas que o discurso pretende tornar realidade objectiva. Sustentabilidade é vista como algo bom, desejável, consensual. Sustentabilidade também pode ser considerada nova ordem de eficiência económica que beneficia todos os cidadãos, em vez de beneficiar poucos em detrimento de muitos.
Encarnação, 2007	Sustentabilidade fomenta uma visão de desenvolvimento que suplanta o reducionismo, o desenvolvimento sustentável representa para o homem e para a natureza uma garantia de sobrevivência.
<i>Autores</i>	<i>Sustentabilidade e responsabilidade social</i>
Junqueira; Adorno-Silva; Rodrigues; Barbieri (2008)	Sustentabilidade estende-se além da responsabilidade social, que determina acções que a empresa toma com relação apenas ao contexto no qual está inserida, porém, ambos os termos estão relacionados com a ética da empresa. As instituições estão deixando de usar o termo responsabilidade social apenas como uma postura frente à sociedade.
Miashiro (2007)	A responsabilidade social é uma das condições para garantir sustentabilidade das instituições. Os conceitos de governança corporativa e responsabilidade social estão integrados na medida em que se procura estabelecer padrões de conduta da empresa com seus <i>stakeholders</i> .
Cabestré; Graziade Polesel Filho (2008)	Ações de responsabilidade sócio-ambiental devem considerar os pressupostos do paradigma de sustentabilidade. A responsabilidade social caracteriza-se pelas atitudes e actividades baseadas em valores éticos e morais para minimizar os impactos negativos que as organizações causam ao ambiente.

De acordo com este autor uma melhor alocação dos recursos e uma melhor gestão possibilitariam a sustentabilidade económica. O equilíbrio social é visto como medida da eficiência económica e não apenas o lucro empresarial. A sustentabilidade ambiental seria alavancada pela limitação no uso dos recursos esgotáveis e sua substituição pelos renováveis, pela limitação no consumo, pela geração de tecnologias limpas, além da criação e consolidação de mecanismos administrativos de protecção ambiental [4].

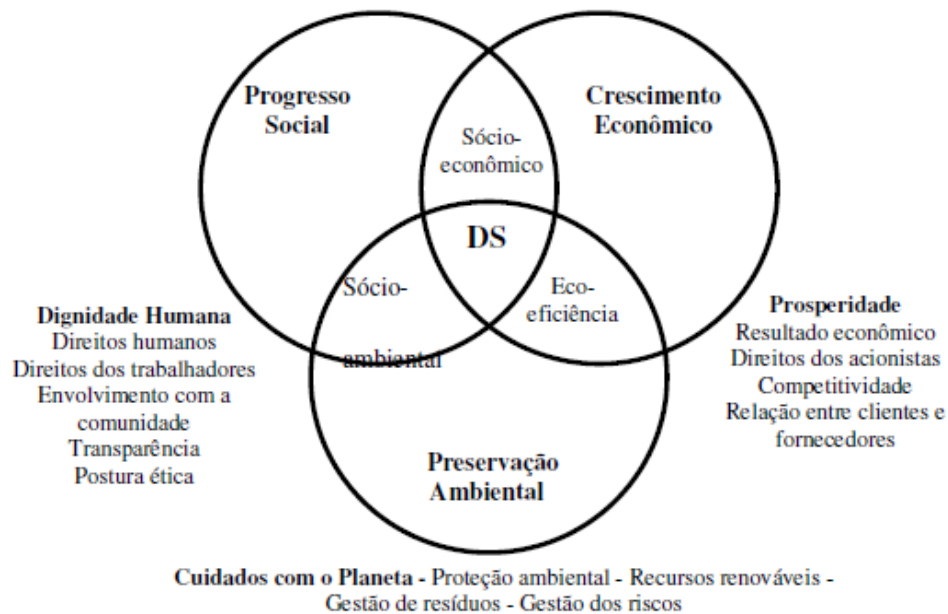


Figura 1.1 - As três dimensões do desenvolvimento sustentável - DS.

Segundo Bacha *et al* [2], “... os primeiros estudos teóricos sobre a sustentabilidade iniciaram-se no campo das ciências ambientais e ecológicas, trazendo à discussão contribuições de diferentes disciplinas, tais como: Economia, Sociologia, Filosofia, Política e Direito. No entanto, a questão da sustentabilidade ambiental passou a ocupar lugar de importância no debate acadêmico e político, sobretudo a partir do final dos anos 1960. Porém, as duas últimas décadas testemunharam a emergência do discurso da sustentabilidade como a expressão dominante no debate que envolve as questões de meio ambiente e de desenvolvimento social em sentido amplo”. De acordo com os mesmos autores “... o interesse por sustentabilidade se originou durante a década de 1980, a partir da conscientização dos países em descobrir formas de promover o crescimento sem destruir o meio ambiente, nem sacrificar o bem-estar das futuras gerações. Desde então, o termo se transformou em cenário para causas sociais e ambientais, principalmente no nos negócios, onde prevalece a idéia de que de geração de lucro para os acionistas, ao mesmo tempo em que protege o meio ambiente e melhora a qualidade de vida das pessoas com que mantém interações”. No sentido de identificar os vários marcos científicos e mediáticos que

contribuíram para o aumento das atenções voltadas para a questão da sustentabilidade, Bacha *et al* [2] construíram um resumo que se encontra apresentado na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 - Resumo dos marcos, perspectiva histórica e cronológica [2].

Ano	Perspectivas
1972	Publicação do Relatório do Clube de Roma (The Limits to Growth) sobre riscos globais dos efeitos da poluição e do esgotamento das fontes de recursos naturais. Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento e Meio Ambiente Humano, em Estocolmo, Suécia, com a participação de 113 países. O conceito de Ecodesenvolvimento foi apresentado por Ignacy Sachs, considerado precursor do Desenvolvimento Sustentável.
1975	Elaboração do Segundo Plano Nacional de Desenvolvimento (PND-1975/79) que definiu prioridades para o controle da poluição industrial.
1980	Em 1980 surge a noção de Ecologia profunda, que coloca o homem como o componente de sistema ambiental complexo, holístico e unificado.
1983	A ONU criou a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento que desenvolveu o paradigma de desenvolvimento sustentável, cujo relatório (<i>Our Common Future</i>) propunha limitação do crescimento populacional, garantia de alimentação, preservação da biodiversidade e ecossistemas, diminuição do consumo de energia e desenvolvimento de tecnologias de fontes energéticas renováveis, aumento da produção industrial a base de tecnologias adaptadas ecologicamente, controle da urbanização e integração campo e cidades menores e a satisfação das necessidades básicas.
1991	A Câmara de Comércio Internacional (CCI) aprovou "Directrizes Ambientais para a Indústria Mundial", definindo 16 compromissos de gestão ambiental a serem assumidos pelas empresas, conferindo à indústria responsabilidades económicas e sociais nas acções que interferem com o meio ambiente. Essas directrizes foram acatadas no Brasil, pelo Comité Nacional da Câmara de Comércio Internacional, tendo-se criado a Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável.
1992	Realizou-se no Rio de Janeiro a ECO-92 (a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento) na qual foram elaboradas a Carta da Terra (Declaração do Rio) e a Agenda 21, que reflecte o consenso global e compromisso político objectivando o desenvolvimento e o compromisso ambiental.
1997	Discutido e negociado em Quioto no Japão, o Protocolo propõe um calendário pelo qual os países membros teriam obrigação de reduzir a emissão de gases do efeito estufa. Em Novembro de 2009, 187 países haviam aderido ao Protocolo.
1999	John Elkington concebeu o Triple Bottom Line (TBL) para ajudar empresas a entrelaçarem os componentes do desenvolvimento sustentável: prosperidade económica, justiça social e protecção ao meio ambiente em suas operações.
2002	Aconteceu, em Johanesburgo, a conferência mundial denominada Rio + dez, onde se instituiu a iniciativa "Business Action For Sustainable Development".
2006	O documentário "Uma verdade inconveniente" de Davis Guggenheim (sobre a militância política de Al Gore a quem rendeu o Nobel da Paz em 2007 e dois Oscar) cuja mensagem principal (" <i>become carbon neutral</i> ") se coloca como um novo paradigma planetário.
2009	Realiza-se em Copenhagen a 15ª Conferência do Clima (COP 15) das Nações Unidas, evento que reuniu 25 Chefes de Estado.

Do ponto de vista económico, a introdução de aspectos relativos à sustentabilidade faz parte dos cenários de qualquer empresa. No domínio do sector automóvel esta abordagem

não é diferente, ainda mais que se trata de uma indústria de grande importância económica associada a enormes impactos sociais e ambientais. Carvalho e Junior [5] abordam um conjunto de trabalhos neste domínio e dão, por exemplo, o sector dos transportes como sendo responsável por 25% do consumo de energia primária em todo o mundo e 28% das emissões de CO₂ na Europa. Neste caso, as emissões de gases causadas por este sector revelam-se um enorme problema, pelo que a indústria automóvel está constantemente à procura de novas soluções, quer ao nível de materiais, eficiência dos motores de combustão interna ou desenvolvimento de veículos movidos a energias alternativas.

1.3 - Aços de Alta Resistência

A indústria siderúrgica tem um papel fundamental no desenvolvimento da sociedade. Se por um lado ela é altamente dependente dos recursos naturais e está relacionada com níveis de consumos energéticos bastante altos, por outro, as exigências ambientais são cada vez mais rigorosas. Neste contexto, uma produção eficiente passa por utilizar menos recursos naturais e apostar em produtos que visem a sustentabilidade. Os aços de elevado limite elástico apresentam, assim, um enorme contributo para um mundo mais estruturado e mais sustentável.

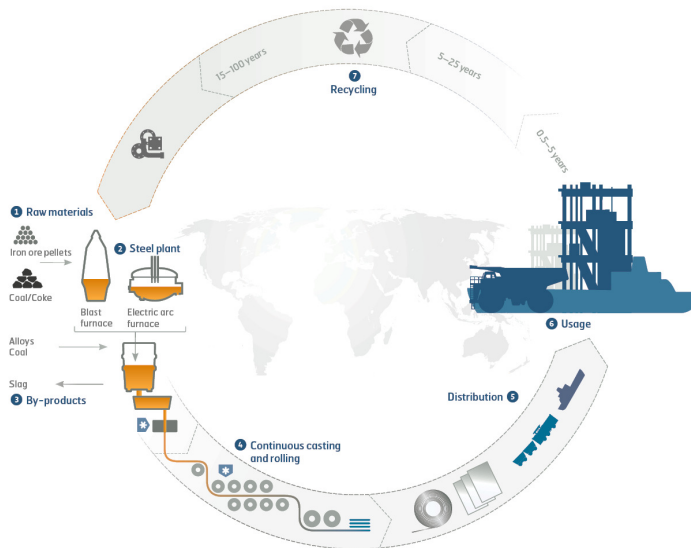


Figura 1.2 - Ciclo do aço (fonte SSAB).

Do ponto de vista energético, a consciência ambiental sugere melhorias de eficiência e inovação, visando reduzir o impacto ambiental da produção. É fundamental que da energia necessária à produção se retire o máximo aproveitamento, podendo ser utilizada simultaneamente para outras aplicações, minimizando, ao mesmo tempo, as emissões de

dióxido de carbono. Em termos de recursos naturais, o minério de ferro é uma matéria-prima finita, pelo que o aço apresenta a enorme vantagem de ser 100% reciclável. Ele pode ser infinitamente reciclado sem perder as suas propriedades características. Isto diferencia-o dos outros materiais, em que há uma perda de desempenho em cada reciclagem. Devido às suas propriedades magnéticas, o aço é fácil de ser separado dos outros resíduos, permitindo assim elevadas taxas de recuperação. Por exemplo, a taxa de reciclagem e reutilização de produtos de construção em aço no Reino Unido é de 94%. Em 2008, por exemplo, cerca de 475,5 milhões de toneladas de sucata de aço foi usado na produção de novos aços. Por sua vez, neste ano, a quantidade de aço produzido no mundo foi na ordem dos 1.327 milhões de toneladas.

O surgimento de novos mercados conduz a um aumento significativo do consumo de aço, conforme ilustra a figura 1.3. Como principal exemplo pode-se citar a China onde o consumo de aço tem crescido exponencialmente mas, embora com menor impacto, outros mercados também estão a despertar como é o caso da América do Sul e África. A China presentemente já é responsável por mais de metade da produção mundial, enquanto os mercados ditos desenvolvidos estão numa fase de estagnação pois, neste momento, o foco é produzir aços de maior valor acrescentado e reduzir o seu consumo por unidade produzida.

Steel demand – finished products

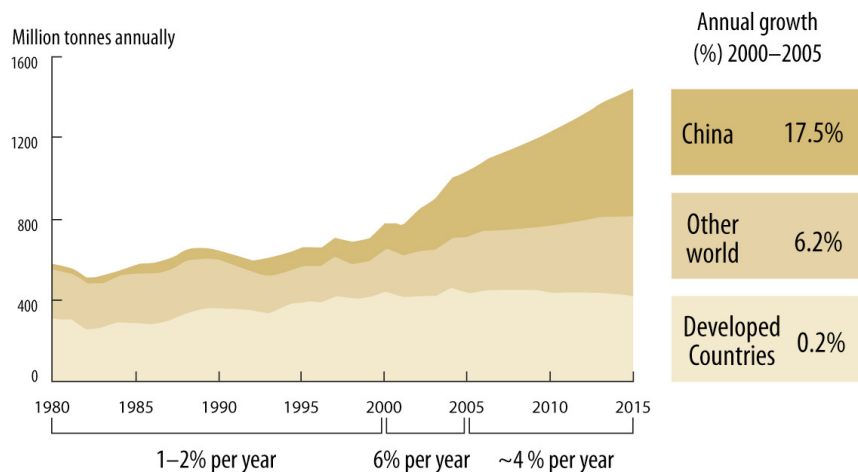


Figura 1.3 - Procura de aço a nível global (fonte SSAB).

Devido ao sector dos transportes ser responsável por um elevado consumo de aço, temos assistido nas últimas quatro décadas a uma enorme evolução destes materiais por razões tão diversas como:

- Generalização da soldadura como principal processo de união dos componentes, criando a necessidade de materiais com elevada resistência e boa soldabilidade (baixo teor de carbono);
- Choques petrolíferos (1973 e 1979) que estimularam a redução da massa dos veículos e, conseqüentemente, menores consumos;
- Normativas que regulamentam a segurança de cargas e ocupantes bem como as limitações das emissões de CO₂.

Os aços macios classicamente eram utilizados no fabrico de carrocerias e chassis, existindo sob a forma de laminados a quente, laminados a frio, perfis e, dentro de cada tipo, apresentam várias classes de formabilidade. Os aços macios laminados a quente abarcam uma gama de tensões de cedência entre 215 e 355 MPa, enquanto os laminados a frio abrangem uma gama de tensões de cedência entre os 260 e os 380 MPa. Actualmente o mercado disponibiliza vários tipos de aços de alta resistência, sendo os mais utilizados no sector automóvel:

- **Aços HSLA:** estes aços são de elevada resistência e apresentam percentagens muito baixas de elementos de liga como nióbio, titânio e vanádio. Caracterizam-se pela sua excelente formabilidade, boa formabilidade e resiliencia a baixa temperatura. Distinguem-se pela elevada relação entre a tensão de cedência e a tensão de ruptura, bem como pelas suas características anisotrópicas e elevada resiliência. Estes aços podem ser laminados a quente ou a frio.
- **Aços TRIP:** obtém maior ductilidade através da transformação de uma fase induzida por deformação plástica, tal como indica a sua sigla TRIP “Transformation Induced Plasticity”. A microestrutura deste material é inicialmente austenítica, mas apresenta uma composição química que permite a transformação da austenite em martensite por deformação. São aços muito ligados, e devido aos grandes teores de níquel e carbono não são de fácil soldadura para além de serem muito caros relativamente aos demais.
- **Aços DP:** os aços dual-phase (DP) apresentam uma estrutura entre 15 a 20% de martensite dispersa numa matriz de ferrite poligonal, obtida durante a austenitização na zona intercrítica (campo de estabilidade da ferrite e austenite no diagrama Fe-C), seguida de um arrefecimento rápido para transformação da austenite previamente formada em martensite. O termo dual-phase vem da predominância de duas fases na sua microestrutura, apesar de pequenas quantidades de outras microestruturas (bainite, austenite residual e perlite) poderem estar presentes. A percentagem de martensite na estrutura depende da percentagem de carbono e da temperatura na zona intercrítica e a resistência da liga dual-phase depende da fracção volumétrica da martensite. O comportamento mecânico é gerido pela ferrite, por se apresentar em quantidade superior na liga

dual-phase. Estes aços podem ser conformados como os aços de baixa liga, onde as peças produzidas apresentam uma elevada resistência mecânica devido ao seu elevado coeficiente de encruamento. Apresentam uma elevada tensão de cedência, com valores de 300 a 1400 MPa, e tensões de rotura que podem atingir os 1600 MPa.

- **Aços Martensíticos:** são aços laminados a frio de matriz totalmente martensítica. Caracterizam-se por uma boa formabilidade, elevados níveis de tensão combinados com uma boa soldabilidade. Estão disponíveis com tensão de rotura entre os 1200 MPa e os 1500 MPa. Graças à composição química simples, podem ser utilizados todos os métodos de soldadura convencionais. As aplicações mais comuns são em componentes de segurança da indústria automóvel, tais como pára-choques e barras de protecção laterais nas portas.

1.4 - Juntas Coladas

Devido às limitações, quer ao nível das dimensões dos materiais disponíveis ou do seu fabrico, a maioria das estruturas são constituídas por um conjunto de componentes individuais que se ligam entre si, visando garantir uma perfeita transmissão de esforços e consequente aptidão para o uso a que se destinam. Existem diversas formas de união, através de parafusos, rebites, ligações soldadas ou ligações coladas. Apesar das uniões mais clássicas apresentarem excelentes respostas ao nível de solicitações, não podemos omitir uma série de problemas associados aos orifícios, distribuição não uniforme de tensões, corrosão, entre outras. Recentemente, as juntas coladas têm-se revelado uma importante técnica de união nas indústrias aeronáutica, automóvel e electrónica [6-9]. Ainda que a sua utilização apresente inúmeras vantagens, não se pode omitir algumas limitações. Assim, a tabela 1.3 ilustra as principais vantagens e limitações que podem decorrer da sua aplicação [10].

A geometria da junta colada deve adaptar-se sempre ao carregamento imposto e, para tal, a figura 1.4 apresenta as juntas típicas de sobreposição e topo-a-topo. Em considerações de projecto, revela-se necessário conhecer a direcção de todas as forças que ocorrem em serviço e garantir que a maior parte da área colada seja utilizada na resistência à solicitação. A cola, definida como material polimérico que quando aplicado às superfícies não só as deve unir como resistir à sua separação, encontra-se disponível no mercado industrial num enorme leque de variedades, tornando-se, muitas vezes, difícil a sua classificação. A bibliografia especializada [11, 12] refere vários critérios que podem ser usados para agrupar os diferentes tipos de colas e classifica-as segundo a sua estrutura molecular, origem, processo de endurecimento, modo de apresentação e desempenho. No entanto, a classificação segundo o desempenho é talvez aquela que se apresenta como a mais próxima do utilizador. Trata-se de uma classificação que divide as colas em estruturais e não estruturais. Para Gauthier [13] uma cola estrutural é todo o material polimérico capaz de

transferir as forças aplicadas à junta, sem que ocorra falha durante um período de tempo considerado. Segundo Magalhães [14] e Correia [15] são cinco as grandes famílias de colas estruturais: fenólica, acrílica, poliuretanos, poliamidas e epoxídica.

Tabela 1.3 - Vantagens e limitações que advêm da aplicação das juntas coladas [10].

Vantagens	Desvantagens
Capacidade de se obter estruturas mais leves e rígidas	As peças não podem ser posteriormente separadas
Capacidade de unir materiais distintos (por exemplo metais com compósitos)	Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica
Capacidade de unir eficientemente materiais de espessuras finas	Sensibilidade a tensões de tracção segundo a espessura
Melhor distribuição de tensões (sem concentrações de tensões nos aderentes contrariamente às ligações tradicionais)	Fraca resistência à temperatura e ao fogo
Melhores propriedades à fadiga devido à melhor distribuição de tensões	Susceptíveis a degradação ambiental e incerteza relativamente à sua durabilidade a longo prazo em condições de serviço severas
Melhor resistência à corrosão	Problemas de toxicidade e inflamabilidade
Melhor aparência superficial (sem cabeças de parafusos, etc.)	Dificuldade ao nível de inspeções
Fabrico de formas complexas	-
Boa capacidade de vedação	-
O processo de colagem pode ser automatizado, tornando-se economicamente mais favorável	-

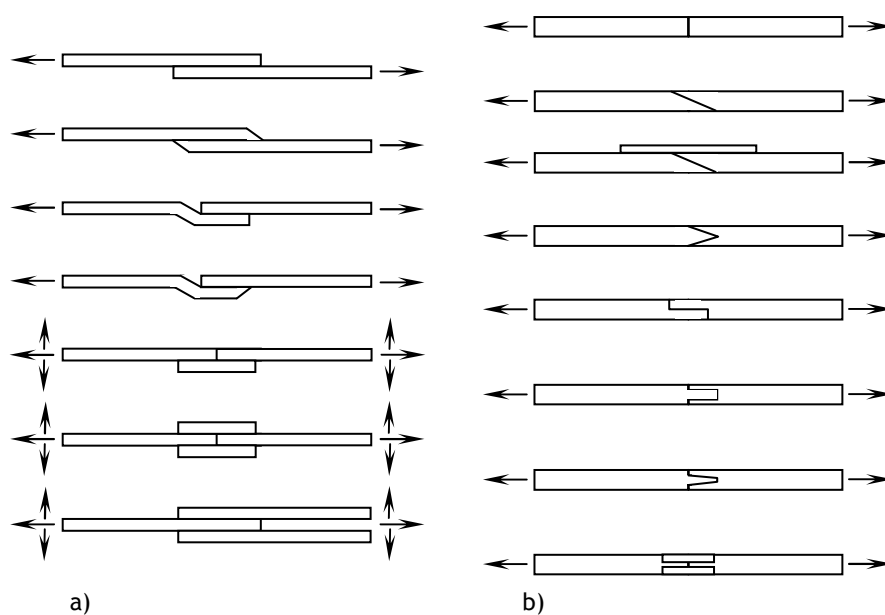


Figura 1.4 - Tipos de juntas e respectivas solicitações: a) juntas de sobreposição, b) juntas topo-a-topo.

A junta colada é assim, no mínimo, constituída por dois materiais distintos (a cola e o aderente) entre os quais se estabelece uma interface que deve assegurar uma forte ligação ao longo da vida útil da junta. Do ponto de vista químico, os mecanismos de adesão resultam essencialmente da actuação de diferentes forças ao longo da interface. Torna-se desta forma evidente que a preparação das superfícies a unir é uma fase de extrema importância, sendo usual o recurso a sistemas mecânicos e/ou químicos [6]. Apesar dos meios mecânicos serem mais económicos e menos complexos que os químicos, estes últimos acabam por produzir melhores efeitos e um aumento da vida da junta colada. Neste domínio Magalhães [14] faz uma revisão dos procedimentos de limpeza que mais se adequam tanto às superfícies metálicas como poliméricas. Na verdade a falha de uma junta não se deve muitas vezes a uma escolha errada da cola, mas de uma má descontaminação das superfícies dos aderentes.

Sendo as juntas coladas sobrepostas simples as mais utilizadas na indústria, uma vez que associam à boa capacidade de suportar as cargas aplicadas um baixo custo, não será de estranhar que sejam as mais frequentes na normalização de ensaios. Desta forma, e segundo a norma ASTM D 1002 [16], a tensão de rotura (τ) pode ser definida como sendo o quociente entre a carga para a qual ocorre o colapso (P) e a área de colagem. No entanto, ao assumir que os aderentes são rígidos e que as juntas apenas se deformam ao corte, dão origem a simplificações que não traduzem a realidade. Deste modo, a tensão de corte apresenta um valor médio constante ao longo da junta, a qual não corresponde à sua verdadeira distribuição de tensões. Todavia, dada a simplicidade do seu cálculo, este valor pode ser entendido como uma primeira aproximação, apesar da bibliografia disponibilizar também métodos capazes de modular com enorme exactidão o estado de tensões na junta [10].

Devido à não colinearidade das forças exteriores aplicadas, estas juntas conduzem ao aparecimento de um momento flector que vai provocar a sua rotação e o conseqüente aparecimento de tensões de corte e de tensões normais de tracção na cola. Simultaneamente os aderentes são traccionados e flectidos. A distribuição de tensões de corte e tensões normais de arrancamento [17, 18] apresentam uma distribuição típica à ilustrada na figura 1.5. Devido às restrições laterais dos aderentes (efeito de Poisson) surgem também tensões de corte significativas ao longo da secção transversal da junta, ou seja, perpendicularmente à carga aplicada, ver figura 1.6.

Vários parâmetros podem influenciar a distribuição de tensões nas juntas coladas [10]. O aumento da rigidez dos aderentes conduz a uma maior resistência da junta à flexão, o que desta forma não só diminui as concentrações de tensões (junto das extremidades da sobreposição) como também aumenta a sua resistência mecânica. O aumento da espessura dos aderentes também contribui para uma diminuição da concentração de tensões na extremidade da junta colada em virtude da sua menor rotação. O aumento da espessura da cola também conduz a uma melhoria da resistência mecânica da junta, no entanto, a partir de um dado valor esta tendência é invertida.

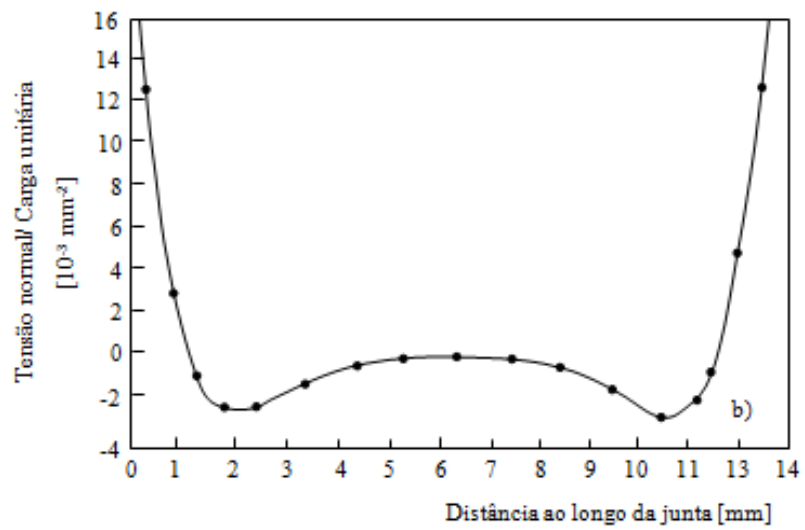
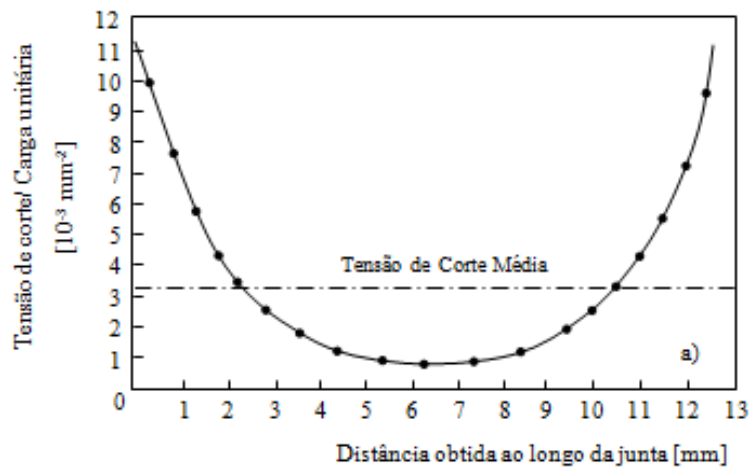


Figura 1.5 - a) Distribuição das tensões de corte; b) Distribuição das tensões normais [10].

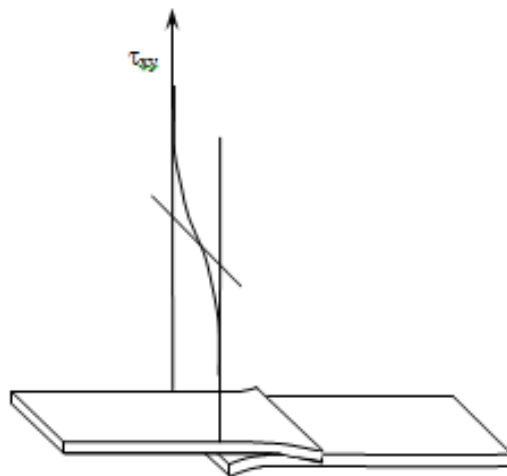


Figura 1.6 - Distribuição das tensões de corte ao longo da seção transversal de uma junta colada sobreposta simples [10].

Maiores comprimentos de sobreposição conduzem a cargas cada vez mais elevadas para se dar o colapso. Todavia, a partir de um dado valor deixa de produzir qualquer efeito na resistência da junta. Este fenómeno é justificado pelo aumento do momento flector e consequente aumento da concentração de tensões nas extremidades da sobreposição. A geometria usada nas extremidades da sobreposição também influencia a distribuição das tensões numa junta colada, onde o arredondamento da aresta dos aderentes, na parte interior da junta colada, permite que a singularidade seja substituída por uma distribuição mais uniforme tanto das tensões como das deformações. Na figura 1.7 compara-se, por exemplo, a variação da tensão normal de tracção e de corte para uma junta sem chanfros (extremidade em ângulo recto) com outra que apresenta um chanfro de 135°. Este efeito resulta essencialmente numa diminuição das tensões máximas.

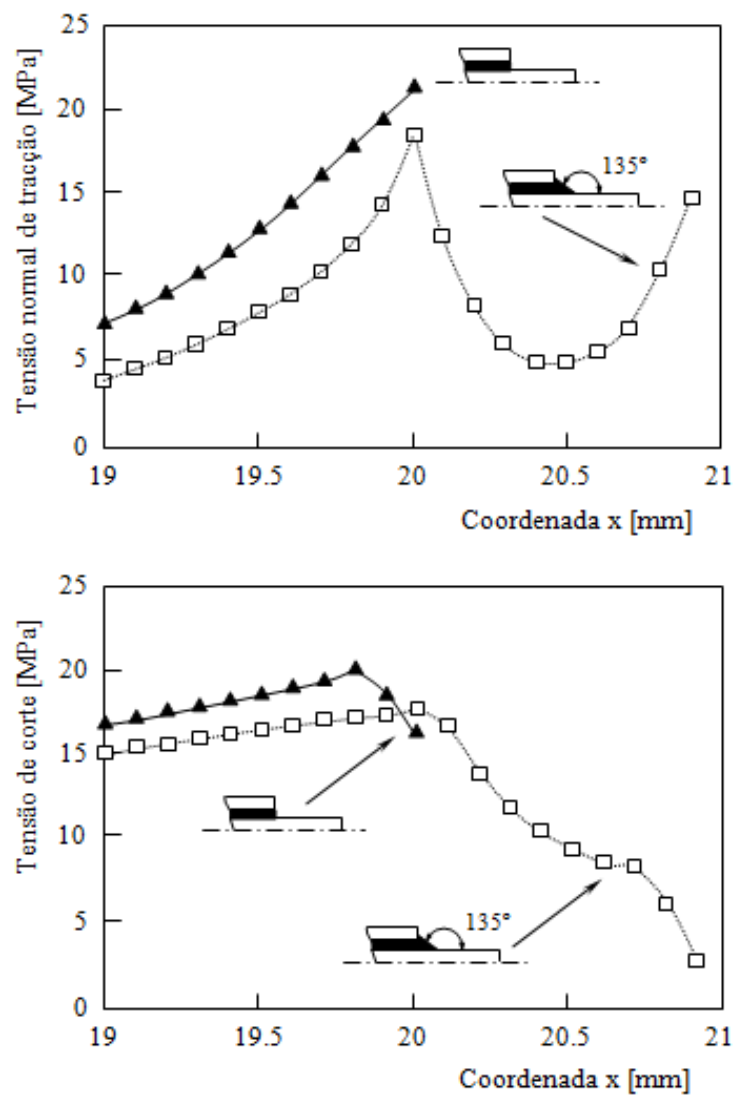


Figura 1.7 - Distribuição das tensões ao longo da linha central da camada da cola, para uma junta colada de sobreposição dupla com e sem o efeito do chanfro [10].

Capítulo 2

Caso Estudo I

Este capítulo aborda um “caso estudo” que pretende comparar os benefícios de um aço de elevado limite elástico face a um tradicional aço macio, tendo como elemento de estudo uma báscula para transporte de pedras e/ou terras fabricada pela empresa BT & ARVORENSE.

2.1 - Introdução

É bem sabido que os actuais aços de elevado limite elástico promovem um melhor desempenho em serviço. Os projectistas podem escolher, deste modo, entre diminuir a espessura ou aumentar significativamente a resistência mecânica do componente e/ou estrutura. Do ponto de vista do sector dos transportes estes materiais promovem uma grande redução de peso e, conseqüentemente, menor emissão de gases poluentes [19].

Trabalhos desenvolvidos por Sperle e Olsson [20] e Sperle e Lundh [21] envolveram os aços de elevado limite elástico Docol 600, 800 e 1000, encontrando um ganho significativo em termos de resistência ao impacto e redução de peso face aos aços macios. Por exemplo, em termos de energia absorvida foram obtidos ganhos na ordem dos 41%, 64% e 82%, respectivamente. Por outro lado, e de acordo com [20], as reduções de peso podem ser relacionadas com a espessura através da seguinte equação:

$$E = 0.158 \times R_m^{0.506} \times t^{1.498} \quad (2.1)$$

onde E é a energia absorvida em kJ, t a espessura em mm e R_m a tensão de rotura em MPa. Para o mesmo nível de energia absorvida encontraram reduções de peso na ordem dos 21%, 28% e 33% quando se comparam os aços Docol 600, 800 e 1000, respectivamente, com os tradicionais aços macios. De acordo com o fornecedor estes aços de elevada resistência apresentam uma microestrutura que contém ferrite, promovendo uma boa conformação, e a martensite é responsável pela resistência mecânica. Uenishi *et al* [22] também encontraram benefícios significativos em termos de redução de peso quando comparados os aços de elevado limite elástico com aços macios. Reis *et al* [23] compararam, por exemplo, a resistência ao impacto dos aços de elevado limite elástico, Docol 1000 e 1200, com uma liga de alumínio 1050 H24 tipicamente utilizada na indústria dos autocarros. Em termos dos valores limites de energia de impacto (que corresponde ao aparecimento das primeiras macro

fissuras nos provetes), estes autores obtiveram diferenças de 80% entre os aços de alta resistência e as ligas de alumínio. A recuperação elástica para a mesma energia de impacto também foi muito maior nos aços e, conseqüentemente, os danos são inferiores. Neste caso, os danos foram definidos pela deformação plástica ocorrida no sentido da espessura, dado o perigo de perfuração. A energia de impacto crítica por unidade de massa para os diferentes materiais também foi mensurada, tendo os aços de elevado limite elástico conduzido a valores 61,7 % mais elevados que os obtidos para a liga de alumínio 1050 H24.

Por outro lado, as decisões tomadas na fase de projecto apresentam não só uma influência significativa nos custos finais do produto, como também no seu impacto ambiental [24-28]. Se é muito importante a avaliação das propriedades mecânicas, hoje em dia, cada vez mais, este assunto deve estar associado aos aspectos económicos considerando-se, assim, um problema multiobjectivo onde várias abordagens podem ser encontradas na literatura [29, 30]. Ribeiro *et al* [31], por exemplo, mostraram a importância da selecção de materiais com base num estudo que abordava um pára-choques dianteiro de um automóvel. Para tal foram comparados aços carbono, aços de alta resistência e ligas de alumínio. Os autores concluíram que, do ponto de vista da indústria, os aços macios são os preferidos pelo seu menor custo, contudo, os custos envolvidos no seu desempenho em serviço são mais baixos com os aços de elevada resistência. Ao mesmo tempo, a “Avaliação do Ciclo de Vida” mostra que os aços de alta resistência são os materiais com melhor desempenho em termos de impacto ambiental, como consequência do seu baixo peso.

2.2 - Análise e Discussão do Caso de Estudo

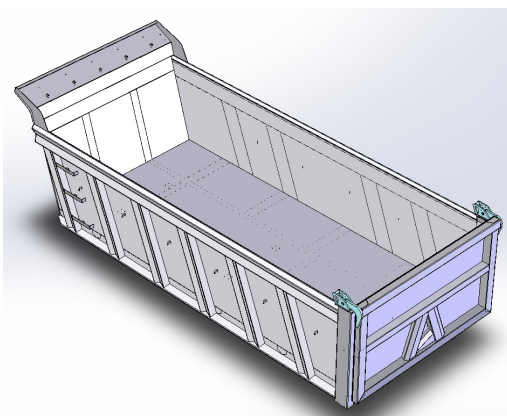
A Metalúrgica Arvoreense foi fundada em 1967, dedicando-se ao fabrico e comercialização de alfaias agrícolas, actividade na qual se valorizou ao longo de vários anos. Em 1980 iniciou-se no sector dos transportes começando a fabricação de todo o tipo de carroçarias para veículos de baixa e média tonelagem, onde rapidamente se assumiu como líder neste segmento de mercado. Fruto dos investimentos em recursos humanos e tecnológicos foi criado um departamento técnico de desenho, iniciando-se então a produção de carroçarias basculantes para todas as gamas de veículos bem como de semi-reboques basculantes.

Actualmente a empresa apresenta uma nova carroçaria basculante cuja caixa é integralmente fabricada em aço Hardox 450 (figura 2.1) com espessuras de 5, 6, 8 ou 10 mm (A5, A6, A8 ou A10). O chassis é totalmente fabricado em aço de alto limite elástico Domex 700. Para esta nova solução contribuíram vários pontos que serão, seguidamente, confrontados em termos de critérios de selecção de materiais. Basicamente serão analisados os benefícios dos aços de alta resistência face aos tradicionais aços macios.

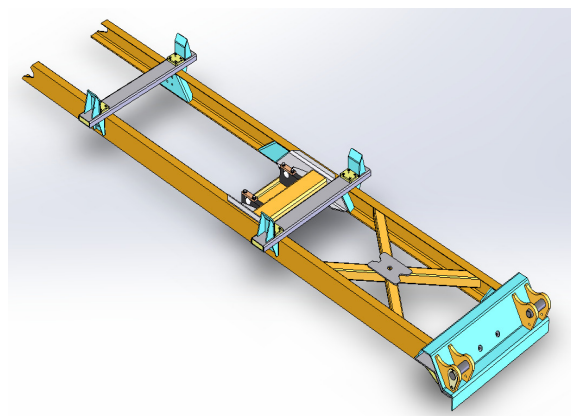


Figura 2.1 - Carroçaria basculante ROUNDTIPPER.

Inicialmente estas básculas eram fabricadas com os aços S275/S355 obrigando, deste modo, a um desenho onde os reforços e a utilização de chapas de maior espessura são necessários para garantir o bom funcionamento do equipamento. Actualmente, em sua substituição, estão os aços Hardox 450 e Domex 700. As principais propriedades mecânicas destes materiais encontram-se apresentadas na tabela 2.1. Neste caso, a báscula e o sub-chassi, ambos ilustrados na figura 2.2, podem apresentar um novo design (ver figura 2.3) que se caracteriza pela ausência dos reforços e o recurso a menores espessuras. As principais diferenças estruturais resultam, basicamente, do aumento da tensão de cedência de 355 MPa para os actuais 1200 MPa proporcionados pelos aços de alta resistência. Logo a capacidade de carga aumenta, o consumo de combustível diminui nas deslocações em vazio e ao aumentar a carga útil reduz-se o número de viagens.



a)



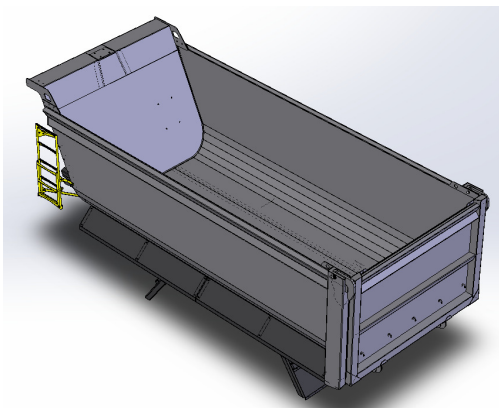
b)

Figura 2.2 - a) Báscula tradicional; b) Sub-chassi convencional.

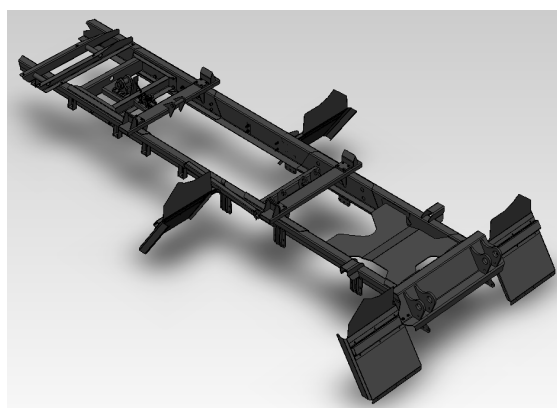
Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos diferentes aços.

Materiais	Tensão de cedência [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Alongamento [%]		Dureza HB
			<3 mm	>3 mm	
S 355 MC	355	430 - 550	23	19	180 ^(a)
Hardox 450	1200	1400	-	10	425 - 475
Domex 700	700	750 - 950	10	12	280 ^(a)

^(a) Não certificada



a)



b)

Figura 2.3 - a) Actual bascula em Hardox 450; b) Actual sub-chassi em Domex 700.

Com recurso ao software da empresa Ruuki, estimaram-se os benefícios da aplicação destes novos aços. Na tabela 2.2 encontram-se sintetizadas as variáveis de entrada no referido programa para obtenção do relatório final.

Tabela 2.2 - Variáveis analisadas no ciclo de vida.

	Aço Tradicional	Aço de alta resistência
Massa Bascula (kg)	7.500	5.250
Capacidade de carga (kg) 20m ³	6.650	9500
Frete/ton (€)	10	10
Nº médio cargas/ano	400	400
Vida útil média (anos)	10	10
Vida útil média (km)	1.000.000	1.000.000
Utilização Urbana (%)	10	10
% Utilização em vazio	15	15
Valor Aço €/kg	0,75	1,2
Quantidade de CO ₂ / ton aço (tons)	2	1,5
Preço de combustível (€)	1,40	1,40
Custo aço €/basculante matéria prima	5.625,00	6.300,00

Conclusão

Relatório impresso

Carroceria basculante



Classe do veículo:	Caminhão caçamba: Carroceria bascu
Distância percorrida:	100 000 km/ano
Vida útil:	10 anos
Peso:	5250 kg (antigo: 7500kg)

Informação operacional

Quilômetros urbanos percorridos do total:	10.0 %
Quilômetros sem carga:	15.0 %
Biocombustível:	0.0 %
Preço do combustível (€/litro):	1.40 €
Economias de combustível devido a menor resistência do ar	5.0 %

Esta ferramenta de cálculo e seus dados são baseados no conteúdo das seguintes referências e páginas da Web:

Relatório WTT versão de 2 de março de 2007

Relatório final do DEFRA, n de referência do contrato CSA 5982/NFO422. Relatório n 20/1 (2003) por N. D. Mortimer, P Cormack, M. A. Elsayed e R. E. Horne

Relatório anual (2006): Veículos pesados: segurança, impactos ambientais e nova tecnologia RASTU; VTT-R-04803-07

LIPASTO: <http://lipasto.vtt.fi>

TEAM: <http://www.ecobalance.com>

IPCC: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessments-reports.htm>


WRI: <http://www.wri.com>


ISWA: <http://www.iswa.org>


worldsteel: <http://www.worldsteel.org/index.php?action=storypages&id=112>


Conclusão

Aumento da carga útil

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Consumo de combustível (litro)	347 517	367 575	20 058	5.46
ANTIGO	367 575 litros		Valor das economias em 5.46% (20 058 litros)	
NOVO	347 517 litros			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Custos do consumo de combustível	486 524	514 605	28 081	5.46
ANTIGO	514 605 €		Valor das economias em 5.46% (28 081 €)	
NOVO	486 524 €			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Emissão de carbono	975	1 033	58	5.59
ANTIGO	1 033 tn CO2 eq		Valor das economias em 5.59% (58 tn CO2 eq)	
NOVO	975 tn CO2 eq			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Energia (MJ)	12 638 680	13 390 793	752 113	5.62
ANTIGO	13 390 793MJ		Valor das economias em 5.62% (752 113 MJ)	
NOVO	12 638 680MJ			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
Carga útil (tkm)	1 806 250	1 615 000	191 250	11.84

Conclusão

Mesma carga útil

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Consumo de combustível (litro)	338 003	367 575	29 573	8.05
ANTIGO	367 575 litros		Valor das economias em 8.05% (29 573 litros)	
NOVO	338 003 litros			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Custos do consumo de combustível	473 204	514 605	41 402	8.05
ANTIGO	514 605 €		Valor das economias em 8.05% (41 402 €)	
NOVO	473 204 €			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Emissão de carbono	948	1 033	84	8.17
ANTIGO	1 033 tn CO2 eq		Valor das economias em 8.17% (84 tn CO2 eq)	
NOVO	948 tn CO2 eq			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
 Energia (MJ)	12 313 555	13 390 793	1 077 238	8.04
ANTIGO	13 390 793 MJ		Valor das economias em 8.04% (1 077 238 MJ)	
NOVO	12 313 555 MJ			

Conclusão

Fase de produção

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
Peso do produto unitário	5 250	7 500	2 250	30.00
ANTIGO	7 500kg		Valor das economias em 30.00% (2 250 kg)	
NOVO	5 250 kg			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
Consumo de combustível (litro)	6	8	2	30.00
ANTIGO	8 litros		Valor das economias em 30.00% (2 litros)	
NOVO	6 litros			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
Custos do consumo de combustível	77 635	110 907	33 272	30.00
ANTIGO	110 907€		Valor das economias em 30.00% (33 272 €)	
NOVO	77 635€			

Com o aço mais fino no novo design, o peso do produto unitário diminuiu. Essas figuras ilustram apenas, a nível do produto, a percentagem e o impacto da redução do peso do produto nos custos e no consumo de

Fase de produção do ciclo de vida do produto

Produto mais fino significa menos matéria-prima, menos consumo de energia e menos emissões de dióxido de carbono na fabricação do produto.

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
Emissão de carbono	4	6	2	30.00
ANTIGO	6 tn CO2		Valor das economias em 30.00% (2 tn CO2)	
NOVO	4 tn CO2			

CICLO DE VIDA DO PRODUTO	NOVO DESIGN	ANTIGO DESIGN	ECONOMIAS	% DE ECONOMIAS
Energia (MJ)	70 555	100 793	30 238	30.00
ANTIGO	100 793 MJ		Valor das economias em 30.00% (30 238 MJ)	
NOVO	70 555 MJ			

Figura 2.4 - Análise de Ciclo de Vida (RUUKKI).

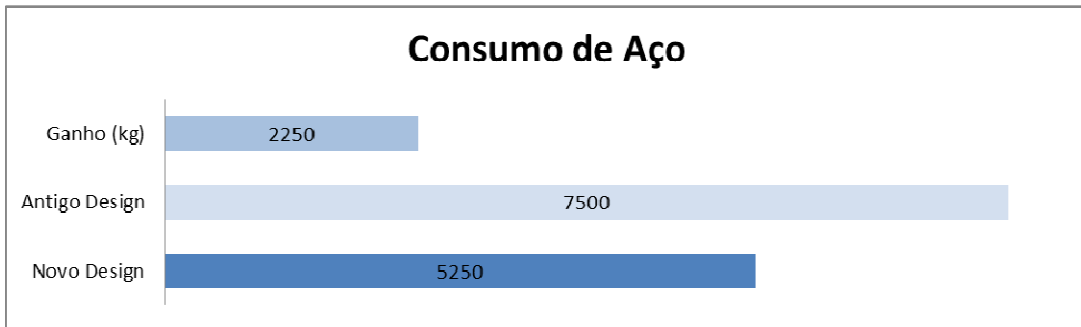


Figura 2.5 - Análise de consumo de aço na produção de 1 báscula.

Podemos, da análise deste relatório, tirar algumas conclusões. Assim, ao nível de peso, a construção da báscula com um aço de elevado limite elástico promove uma poupança na ordem dos 2250 kg, o que corresponde a uma diminuição de peso na ordem dos 30%.

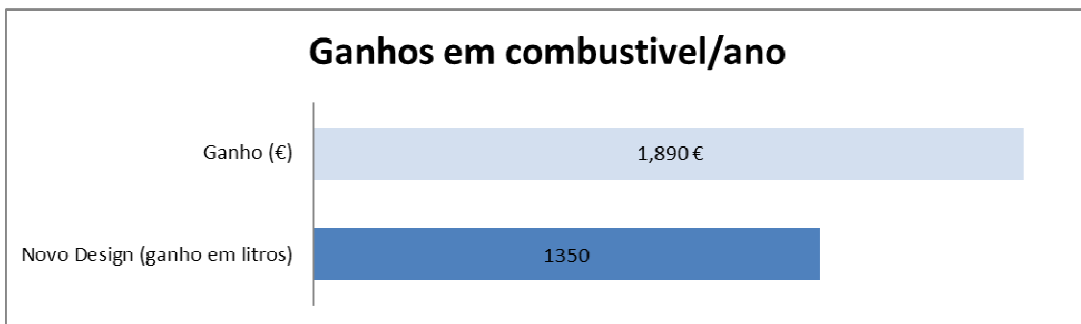


Figura 2.6 - C.

Para este decréscimo de peso, corresponde um ganho de combustível por ano na ordem de 1350 litros, ou seja, 1.890,00 euros se considerarmos uma distância média por ano de 100.000 km. Este ganho é benéfico para o utilizador final, pois o frete é mais competitivo, e em termos de meio ambiente diminui, conseqüentemente, os níveis de emissões de CO₂.

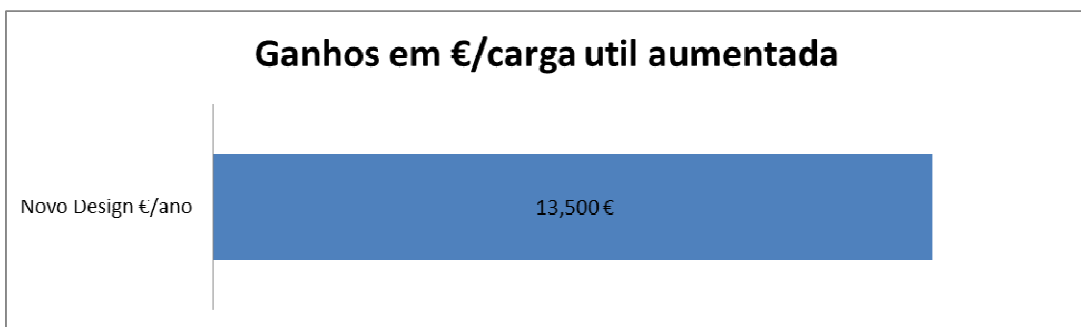


Figura 2.7 - Benefício em €/ano para novo design.

O recurso aos aços de alta resistência promove um ganho de 13.500,00 euros em termos de carga útil, ou seja, um aumento de capacidade de carga de 2.250 kg/carga efectuada, considerando, para esta análise, um valor médio de 400 cargas por ano.

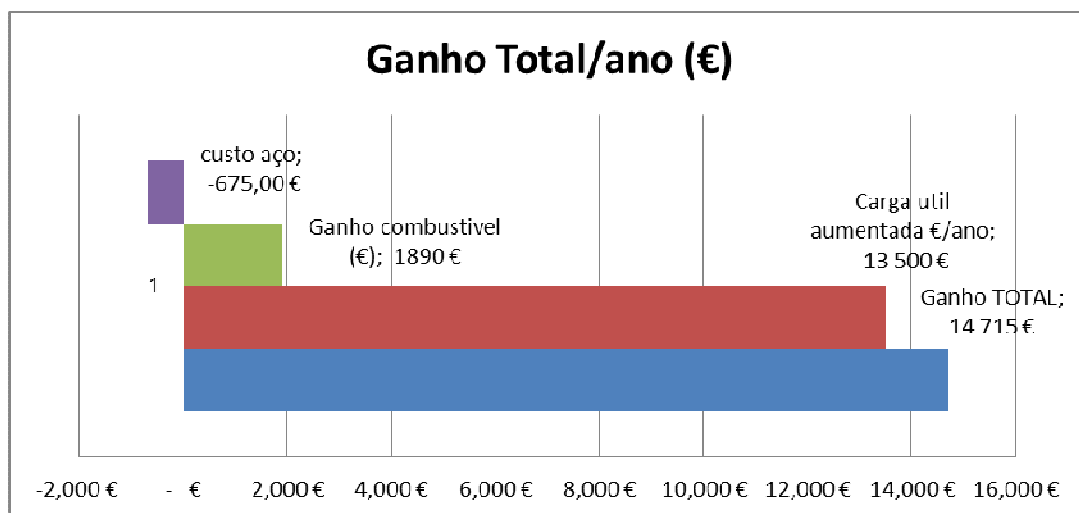


Figura 2.8 - Ganho total/ano.

Finalmente, o somatório de todos os benefícios promovem ganhos, por ano, bastante acentuados com o recurso a este tipo de aços. De acordo com este ultima gráfico estimam-se ganhos na ordem dos 14.715,00 euros por ano, apesar do preço mais elevado dos aços de alto desempenho.

Paralelamente, no desempenho da báscula em serviço, os aços de elevado limite elástico também trazem benefícios do ponto de vista do seu comportamento mecânico. Por exemplo, a figura 2.9 compara o desgaste ao impacto do equipamento, quando sujeito à projecção de pedras de granito, entre um aço macio e um Hardox 450. Verifica-se que o desgaste relativo varia em função do angulo e da dureza do aço utilizado (figura 2.5). A situação mais desfavorável é uma função do tipo de carga e ocorre entre os 30° e os 50°, pelo que o mais habitual é utilizar-se como base de descarga um ângulo de 45°. Conclui-se que o benefício dos aços de alta resistência é significativo, pois são previsíveis valores de desgaste relativos de aproximadamente 0,85 mm/ano, enquanto que os aços macios apresentam valores de 1,65 mm/ano. O gráfico da figura 2.10 indica, para um angulo de carga de 45°, que o aumento da dureza diminui o desgaste relativo, atingindo os valores mais baixos para os aços com durezas na ordem dos 750 HV. De um modo geral recorre-se a materiais com durezas inferiores a 450 HV devido ao preço e à dificuldade de serem trabalhados nas operações de dobragem, maquinagem e soldadura. Finalmente, em termos de ciclo de vida, a

figura 2.11 mostra que esta aumenta com a dureza do material, sendo o incremento mais visível acima do 300HV.

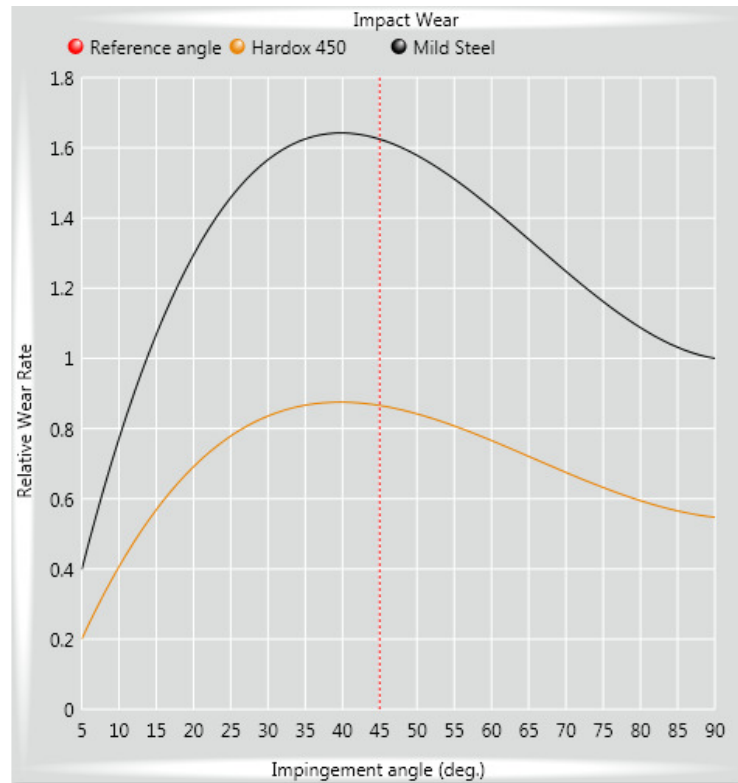


Figura 2.9 - Evolução do desgaste em função do ângulo de impacto para um aço macio e um Hardox.

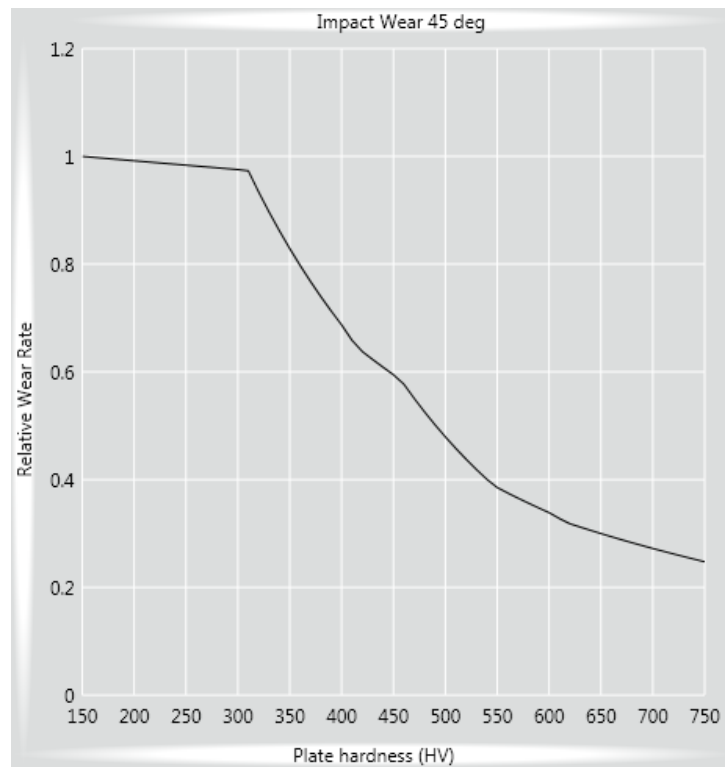


Figura 2.10 - Evolução do desgaste em função da dureza.

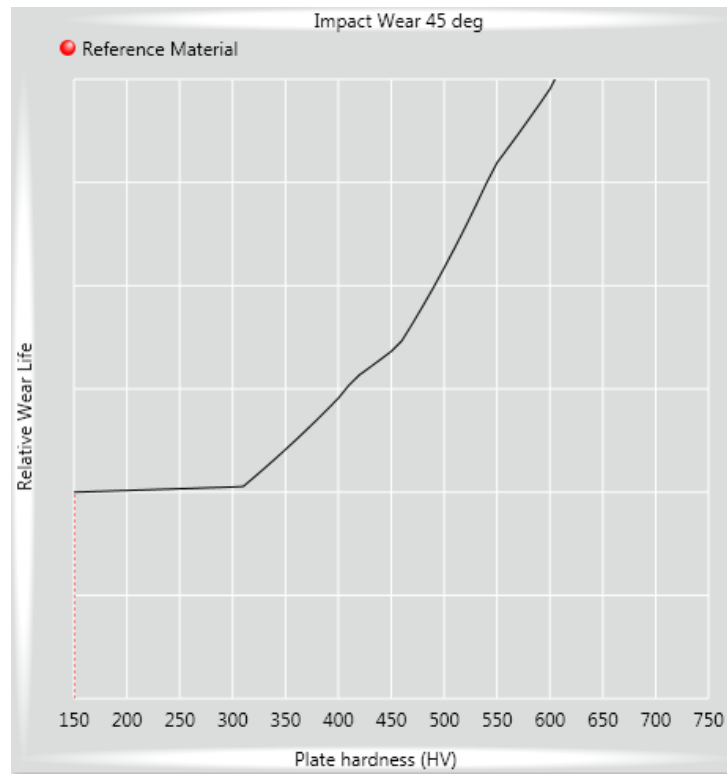


Figura 2.11 - Evolução do desgaste ao longo do ciclo de vida em função da dureza.

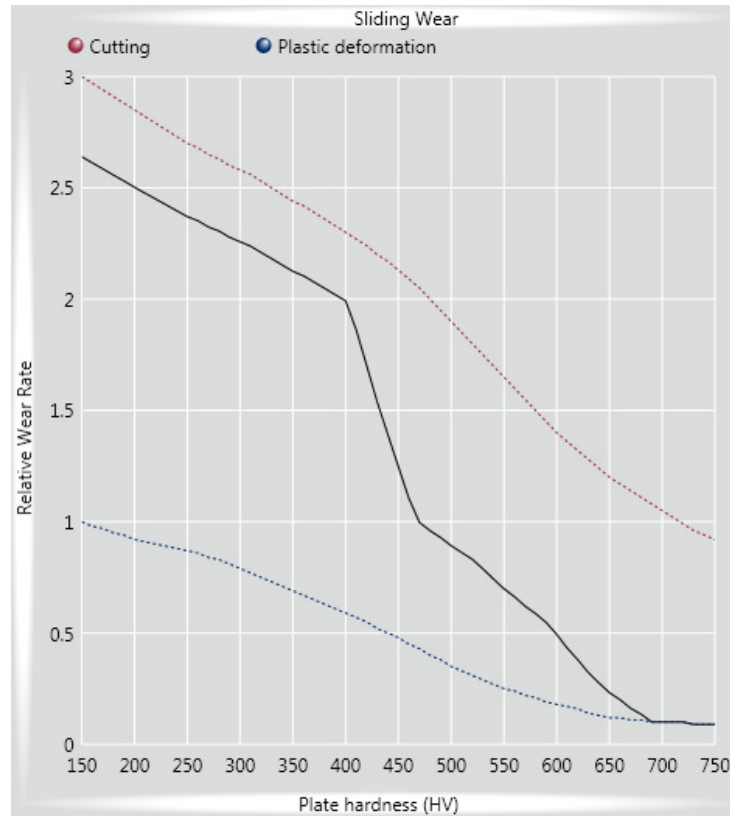


Figura 2.12 - Evolução do desgaste por escorregamento em função da dureza.

Em termos de desgaste por escorregamento da carga, a figura 2.12 ilustra o desgaste efectivo (curva a preto), o desgaste provocado pelo corte (vermelho) e o desgaste provocado pela deformação plástica (azul). Conclui-se, mais uma vez, que a dureza influencia significativamente o desgaste e que os aços de alto desempenho apresentam o melhor desempenho (menor desgaste relativo). A figura 2.13 apresenta o desgaste relativo por deslizamento da carga (para situações de descargas), em termos de ciclo de vida, onde é bem visível que os aços de elevado limite elástico apresentam valores na ordem dos 50 % mais baixos que os expectáveis para os aços macios.

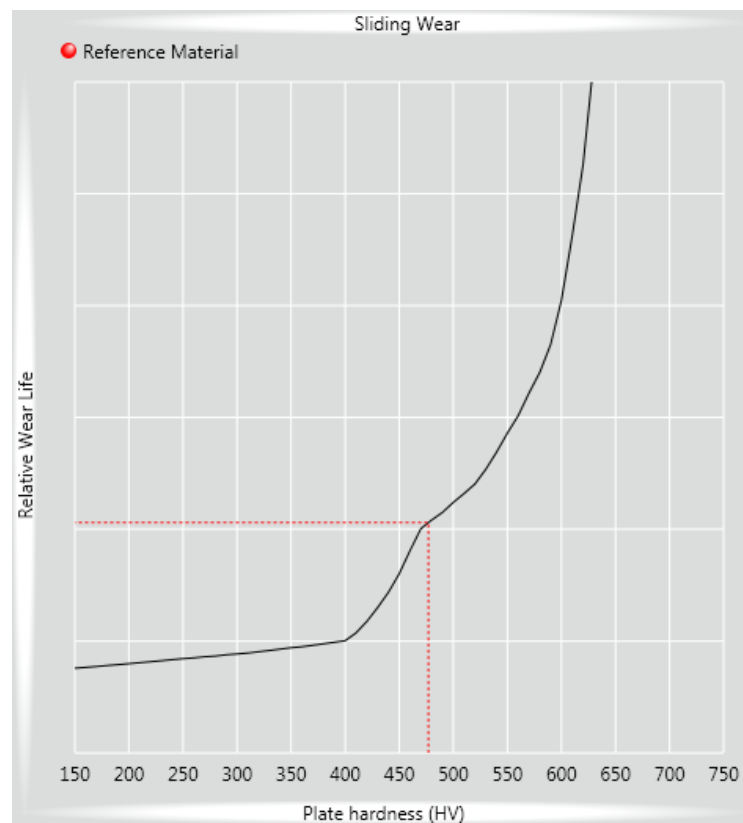


Figura 2.13 - Evolução do desgaste por escorregamento ao longo do ciclo de vida em função da dureza.

Capítulo 3

Caso Estudo II

Neste capítulo será feita uma abordagem a um “caso estudo” que pretende aumentar o conhecimento sobre o comportamento à fadiga das juntas coladas. Especial enfoque será dado ao efeito da frequência variável, de modo a estabelecer modelos de previsão. Este modo de dano é muito frequente em estruturas/componentes mecânicos e os projectistas devem estar munidos de ferramentas capazes de extrapolar resultados fiáveis. Deste modo reduz-se tanto o tempo de projecto como o dispêndio monetário com os ensaios experimentais.

3.1 - Introdução

Em muitas aplicações as juntas coladas estão a substituir as tradicionais técnicas de união, devido às suas inúmeras vantagens como: alta rigidez, boa relação resistência-peso e a capacidade de unir diferentes materiais, geometrias complexas e de pequena espessura. Neste contexto, a aplicação desta técnica de união assume uma principal importância na indústria automóvel e aeroespacial.

A maioria dos trabalhos de investigação, no domínio do comportamento à fadiga de juntas coladas, estão basicamente centrados nos testes realizados a amplitude de carga constante. No entanto, na maioria das vezes, estas juntas estão sujeitas a carregamentos complexos de fadiga que se caracterizam por alterações ao nível de amplitude, razão de tensões (R), frequência e forma da onda.

Vários métodos para prever a vida de fadiga a amplitude variável podem ser encontrados na literatura, os quais se classificam em: modelos baseados na lei de Palmgren-Miner (PM), leis fenomenológicas e modelos de dano progressivo [32]. Em termos da lei P-M o dano é calculado a partir dos diferentes blocos, os quais são adicionados de uma forma linear. Todavia, esta metodologia tende a exagerar a vida de fadiga quando há efeitos de interacção de cargas (sobrecargas, diversas sequências de carga, etc.) [33]. No caso dos materiais dúcteis (como o alumínio), a presença das sobrecargas pode levar a uma retardação da propagação das fendas, enquanto que, no caso dos materiais frágeis (colas e compósitos), pode dar-se a sua aceleração [34]. Em termos de juntas coladas, vários estudos revelam que a variação da tensão média acelera a propagação das fendas de fadiga e que as sobrecargas são importantes na sua iniciação [33, 35-37].

Relativamente aos modelos fenomenológicos, tanto a rigidez como a resistência podem ser usadas na monitorização dos danos de fadiga. A rigidez, por exemplo, tem a vantagem de ser uma metodologia não-destrutiva, no entanto, ao não estar directamente ligada a um critério de falha pode revelar-se pouco sensível na fase de iniciação [38]. Por outro lado, uma abordagem com base na resistência residual conduz a uma equação empírica, linear [33] ou não-linear [39], que se ajusta aos resultados experimentais (resistência residual em função do número de ciclos de fadiga). A falha ocorre quando a resistência residual igualar a tensão máxima do ciclo de carga [38, 40-41]. A principal desvantagem deste método consiste no elevado número de ensaios destrutivos que são necessários [38].

O recurso à mecânica da fractura (FM) para estudar a propagação de fendas de fadiga em juntas coladas foi utilizado pela primeira vez por Mostovoy e Ripling [42]. Hoje em dia existem vários trabalhos, onde a taxa de crescimento da fenda está normalmente relacionada com a taxa de liberação de energia de deformação [32, 34-36, 43-46]. No entanto, estas abordagens consideram apenas a fase de propagação das fendas de fadiga e, se a fase de iniciação é dominante, elas não estimam convenientemente a vida de fadiga [32]. Neste caso o recurso a modelos de dano que contenham a fase de iniciação revela-se determinante e são, basicamente, classificados em dois grupos: modelos de zona coesiva (CzMS) e modelos baseados na mecânica do dano contínuo (MDL) [32].

Se a bibliografia apresenta vários trabalhos que apontam diferentes metodologias para prever a vida de fadiga a amplitude variável, o efeito dos vários níveis de frequência em juntas coladas ainda não está suficientemente estudado para estabelecer técnicas de previsão realistas. O tempo necessário para produzir resultados de fadiga é responsável pela utilização de frequências relativamente altas, normalmente entre 5 e 10 Hz [47], mas, devido à natureza visco-elástica das colas, intervalos de frequência mais dilatados devem ser tidos em conta. De acordo com Pirondi e Nicoletto [46], no caso das colas apresentarem um forte comportamento visco-elástico, a influência da frequência de carregamento é fortemente condicionada pela temperatura. Com base na mecânica de fractura, por exemplo, Al-Ghamdi *et al* [48] propõe um método de acumulação de dano simples, com base na Lei de Paris, que prevê a propagação da fenda em função do número de ciclos ou tempo.

Assim, este “caso estudo” tem como objectivo analisar os efeitos da frequência de carga no comportamento à fadiga de juntas coladas sobrepostas simples com aderentes em aço. Diagramas S-N, obtidos a partir de ensaios de fadiga a amplitude constante, são obtidos para as frequências de 2, 10 e 40 Hz e convenientemente discutidos. Testes experimentais compostos por dois blocos de carregamento de amplitude constante, passando de um nível de baixa frequência para alta frequência (sequência L-H) e vice-versa (sequência H-L), serão também analisados. Finalmente, a vida de fadiga é estimada com base nas curvas S-N obtidas a amplitude constante, usando uma lei de dano semelhante à lei de Palmgren-Miner. As previsões serão comparadas com os resultados experimentais.

3.2 - Material e Procedimento Experimental

Placas de aço de elevado limite elástico, Docol 1000, com 1,5 mm de espessura, foi o material utilizado nos aderentes das juntas coladas sobrepostas simples. Mais detalhes sobre este material podem ser encontrados em [49, 50] e as principais propriedades mecânicas estão apresentados em [50]. Os provetes foram fabricados a partir de chapas com 20 mm de largura e unidas por uma cola "Araldite® 420 A/B" cujas propriedades se encontram em [50]. A geometria e respectivas dimensões encontram-se ilustradas na figura 3.1. Para melhorar a adesão as amostras foram previamente sujeitas a um polimento com recurso a uma lixa P220 ($R_z=4,66\pm 0,34 \mu\text{m}$) e seguidamente limpas com álcool e ar seco.

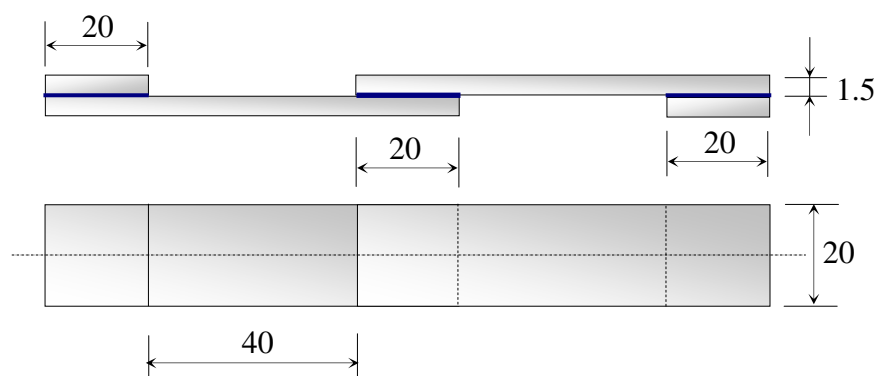


Figura 3.1 - Geometria dos provetes usados nos ensaios de fadiga.

Os testes de fadiga a amplitude de carga constante foram realizados em tracção numa máquina axial Instron Electropulse, Mod E10000, equipado com uma célula de carga de 10 kN e controlada por um computador com aquisição de dados. Os testes foram realizados à temperatura ambiente, com uma onda sinusoidal de amplitude constante, uma razão de tensões $R=0,05$ e frequências de 2, 10 e 40 Hz. Os testes com frequências variáveis foram realizados com um espectro de carga composto por um bloco com três níveis de frequência: 10, 2 e 40 Hz. O número de ciclos em cada nível foi de 1000, 2500 e 4000, respectivamente (ver figura 3.2).

3.3 - Análise e Discussão de Resultados

Uma das principais ferramentas utilizadas na resistência à fadiga são os diagramas S-N, os quais representam a tensão em função do número de ciclos [51]. Os resultados dos ensaios realizados para as diferentes frequências são apresentados na figura 3.3, em termos de amplitude de tensão de corte versus o número de ciclos à rotura, já que o critério de falha adoptado, no presente estudo, foi a separação total dos provetes. Cada ponto representa um

ensaio de fadiga e as curvas médias são obtidas por correlação linear (método dos mínimos quadrados) dos resultados experimentais.

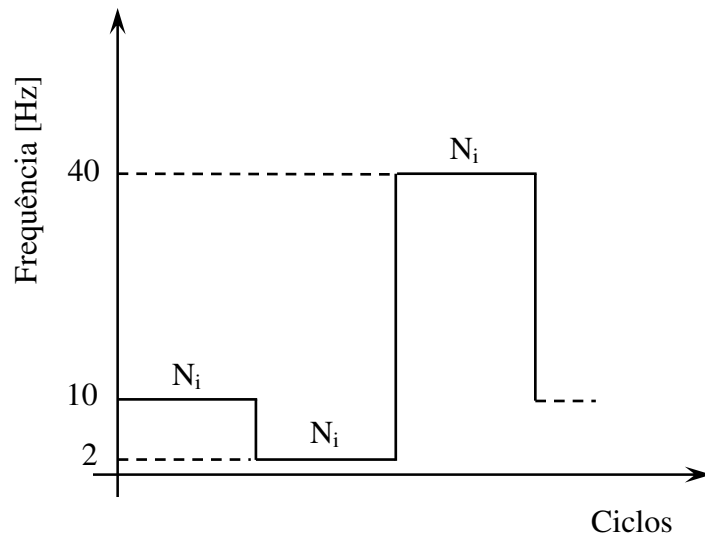


Figura 3.2 - Exemplo típico de uma sequência de blocos com diferentes frequências de carga ($N_i = 1000$, 2500 e 4000 ciclos).

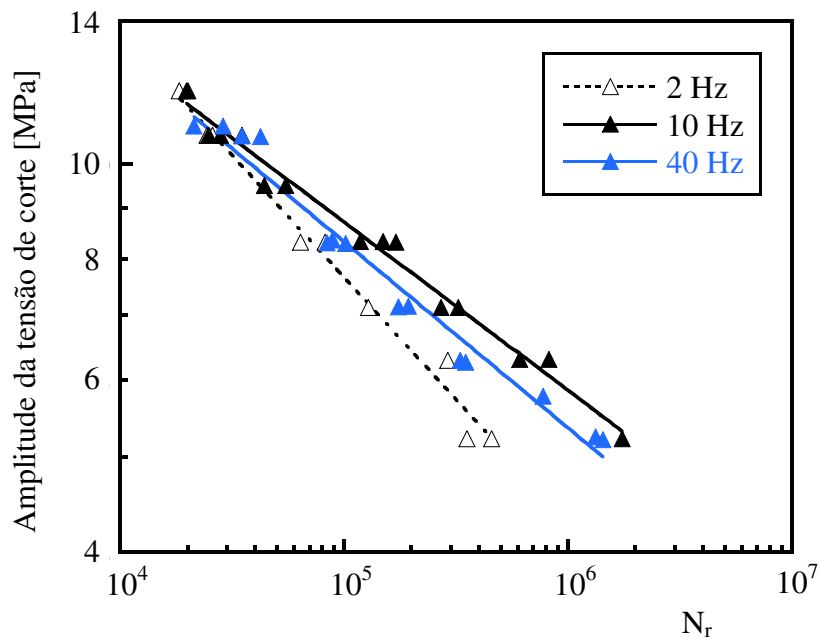


Figura 3.3 - Amplitude de tensão de corte versus número de ciclos à rotura.

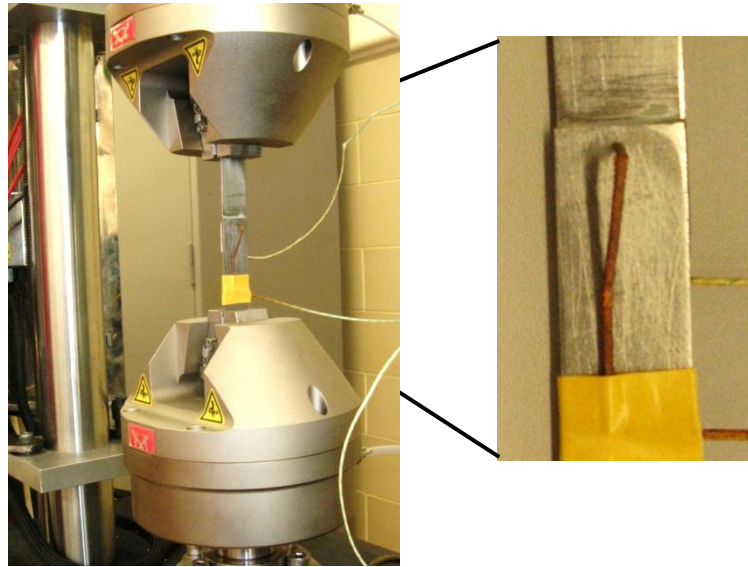
É possível observar que, para as tensões de corte mais elevadas, a frequência apresenta apenas um efeito marginal. Independentemente do seu valor, a vida de fadiga é muito semelhante. Por outro lado, para as tensões de corte mais baixas, a vida de fadiga das

juntas coladas é muito dependente da frequência. Os ensaios de fadiga realizados a 2 Hz promovem a menor resistência à fadiga, mas, para os valores estudados, esta aumenta com o aumento da frequência até 10 Hz. No entanto, depois de 10 Hz, a vida à fadiga diminui novamente, mas para valores mais elevados do que os observados a 2 Hz. Estes resultados estão de acordo com os estudos desenvolvidos por Marceau *et al* [52], onde as menores frequências são mais prejudiciais para as juntas coladas do que as frequências mais elevadas. Para Althof [53] a falha por fadiga é controlada pelo fenómeno de fluência enquanto que, de acordo com Pirondi e Nicoletto [46], o efeito da frequência deve ser analisado em função da temperatura nas colas cujas propriedades mecânicas são fortemente dependentes dela.

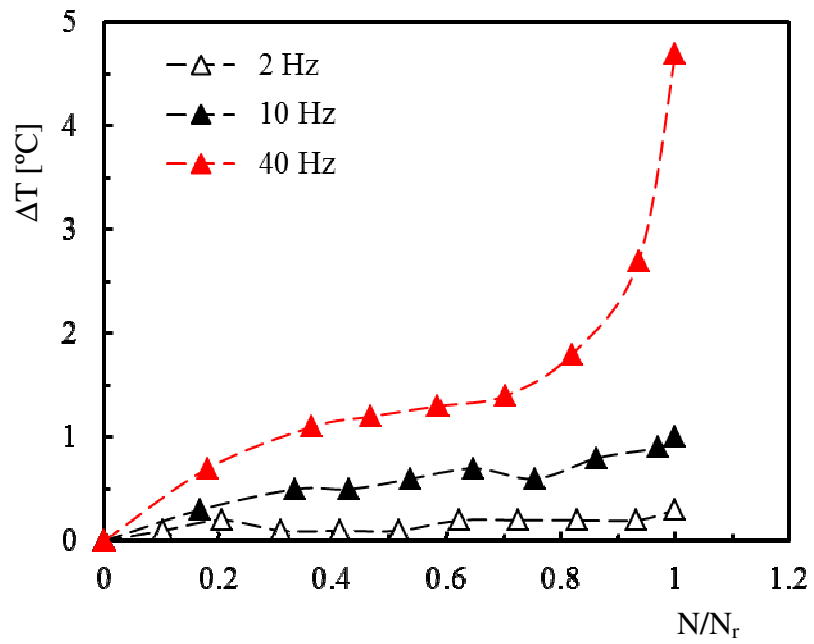
Ao longo de todos os ensaios de fadiga a evolução da temperatura com o número de ciclos foi medida com recurso a termopares do tipo K. Os termopares foram colocados nas extremidades dos provetes (figura 3.4a), dado serem os pontos onde a concentração de tensões e as tensões de “arrancamento” (normais aos aderentes) são mais elevadas [54-56]. Visando recolher a temperatura no filme de cola, foi efectuado um furo com 1,5 mm de diâmetro nos aderentes. A figura 3.4 ilustra o aumento da temperatura versus N/N_r , onde N é o número de ciclos num determinado instante e N_r é o número de ciclos à rotura. O traçado da temperatura corresponde ao máximo das temperaturas medidas pelos termopares, sendo sempre a diferença entre eles inferior a 3 °C. As curvas mostradas são representativas de todas as outras.

Para os testes realizados a 2 e 10 Hz verifica-se a existência de um equilíbrio entre a energia interna produzida e a capacidade de transferência do aderente, ocorrendo, neste caso, um ligeiro aumento da temperatura. No entanto, para os testes realizados a 40 Hz, a temperatura aumenta com o número de ciclos e o seu valor máximo verifica-se no momento da falha. Podem ser identificados três estágios distintos onde, numa primeira fase, existe um aumento da temperatura na ordem dos 4%. O segundo estágio, representando cerca de 40% da vida de fadiga, caracteriza-se por um aumento lento e linear da temperatura. Finalmente, o terceiro estágio, pauta-se por um aumento significativo da temperatura até ocorrer a ruína final.

A histerese também foi avaliada ao longo dos testes de fadiga e a Figura 3.5 mostra a sua evolução. O comportamento tensão versus deformação, para a frequência de 40 Hz, é mais elástico, como consequência da maior velocidade de deformação, conduzindo, neste caso, a um comportamento frágil. Por outro lado, o calor aumenta como resultado do maior número de ciclos por unidade de tempo e observa-se temperaturas mais elevadas. A Tabela 3.1, por exemplo, compara a frequência, a energia por ciclo e a potência em Watts relativamente a um determinado número de ciclos. Foi escolhido, para tal, dentro do regime de estabilização o ciclo número 25.000. A potência foi obtida multiplicando a energia pela frequência.

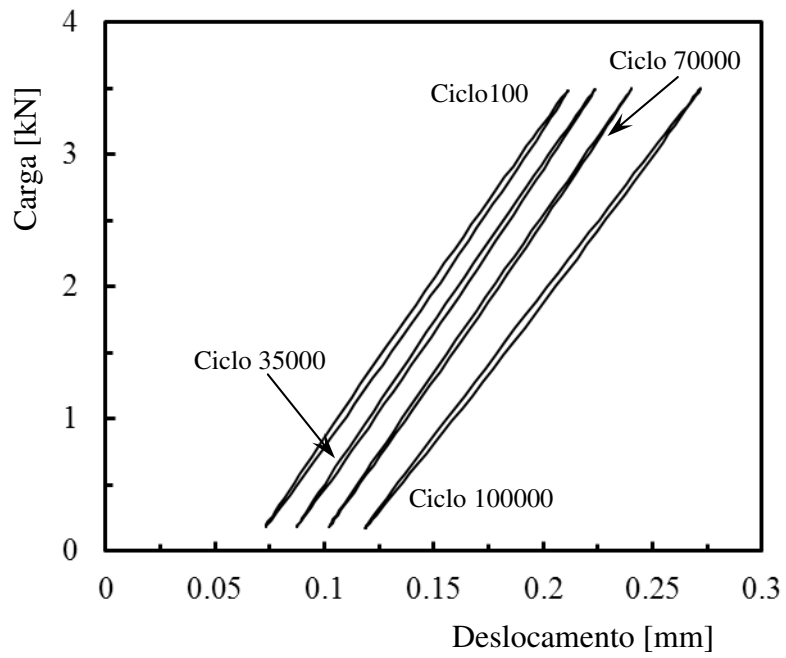


a)

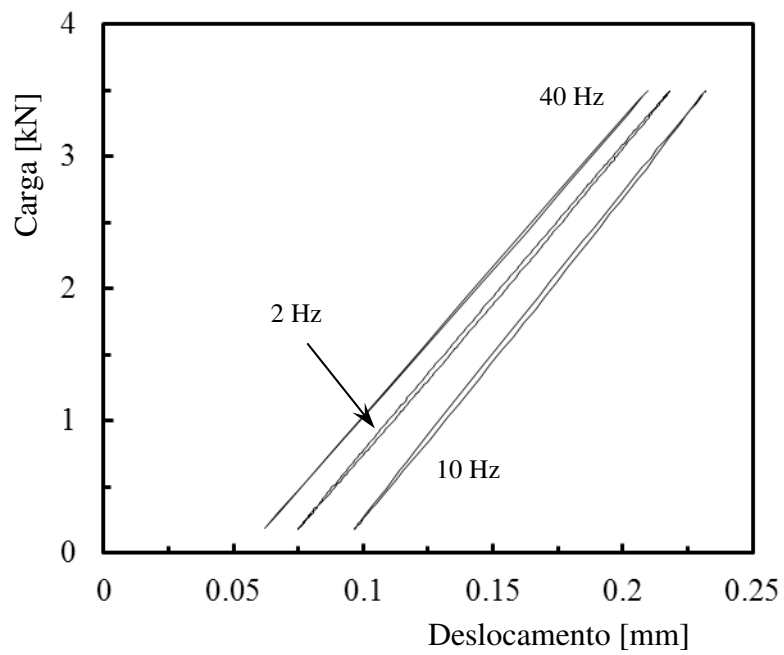


b)

Figura 3.4 - a) Ligação do termopar ao provete para medir a temperatura no filme de cola; b) Evolução da temperatura com o número de ciclos à fadiga.



a)



b)

Figura 3.5 - a) Evolução dos ciclos de histerese para testes de fadiga realizados a 10 Hz; b) Comparação do efeito das várias frequências no ciclo de histerese número.

Tabela 3.1 - Valores da potência em função da frequência.

Frequência	Energia por ciclo	Potência [W]
2	0.007	0.014
10	0.008	0.081
40	0.006	0.248

Em termos de resistência à fadiga, não se verifica nenhum efeito discernível da frequência entre os 2 e os 10 Hz promovido pela temperatura. De facto, o máximo ΔT observado é inferior a 1,1 °C e a Araldite® 420 A/B tem uma temperatura de transição vítrea na ordem dos 52±2 °C (obtida por DMA). Portanto, de acordo com Pirondi e Nicoletto [46], para temperaturas abaixo de T_g a falha de um polímero é frágil, acompanhada apenas por deformação visco-elástica acima de um determinado valor da tensão. Por outro lado, para os níveis de frequência de 40 Hz a vida de fadiga mostra ser influenciada pela temperatura. Existe um aumento na ordem dos 5,8 °C, mas são expectáveis valores mais elevados devido aos termopares não cobrirem toda a zona colada. Além disso, de acordo com o fabricante, a resistência desta cola é significativamente afectada pela temperatura de cura e de serviço. Assim, para colas com propriedades mecânicas dependentes da temperatura, a influência da frequência de carregamento deve ser discutida em termos da temperatura [46]. Para as frequências mais altas a ruína da cola passa a ser visco-elástica e um maior alongamento na rotura. Deformações plásticas localizadas também podem ocorrer dependendo, neste caso, do grau de polimerização da cola [46].

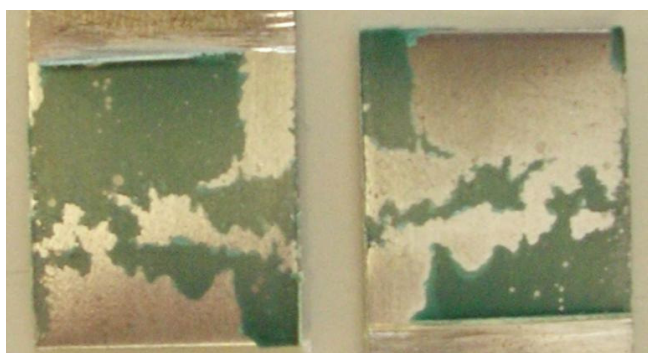


Figura 3.6 - Falha típica observada nas superfícies de fractura das diferentes juntas coladas.

A figura 3.6 mostra a morfologia típica da superfície de fractura. Independentemente do nível de frequência ocorre uma falha adesiva e este modo de ruína está de acordo com os estudos desenvolvidos por Pereira *et al* [57]. As juntas coladas quando estão sujeitas a um carregamento cíclico desenvolvem fissuras no adesivo ou na interface adesivo/aderente. Estas

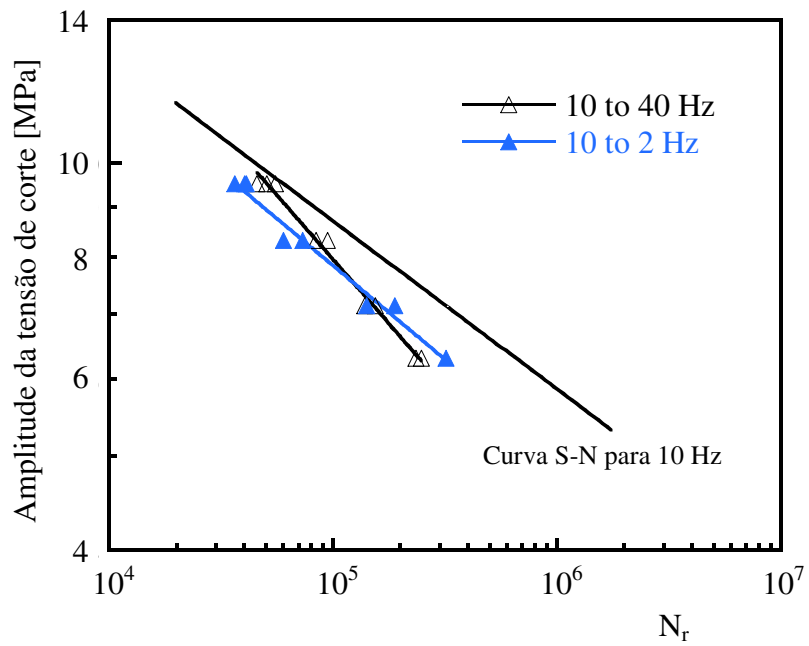
fendas podem eventualmente propagar-se e causar a falha da junta. Esta descolagem inicia-se tipicamente nas extremidades das juntas e, devido às elevadas tensões e concentração de tensões, encaminha-se em direção ao seu centro [54-56]. Por outro lado, os aços de elevado limite elástico promovem uma distribuição de tensões mais uniforme nas juntas coladas como resultado da sua elevada tensão de cedência [58].

A Figura 3.7 mostra os efeitos promovidos por blocos de diferentes níveis de frequência, os quais ajudam a compreender a influência da frequência variável nos ensaios de fadiga. Sequências de dois blocos com transições de altas frequências para baixas frequências (L-H) e vice-versa (H-L) serão analisadas. Os níveis de carregamento foram escolhidos com base nas curvas S-N, obtidas em amplitude/frequência constante, e o comprimento do primeiro bloco em termos do número de ciclos (n_1) foi definido como sendo um terço da vida de fadiga obtida a partir das curvas representadas na figura 3.3. O segundo bloco (n_2) foi aplicado até à ruína. A tabela 3.2 mostra as sequências de blocos e as respectivas vidas de fadiga.

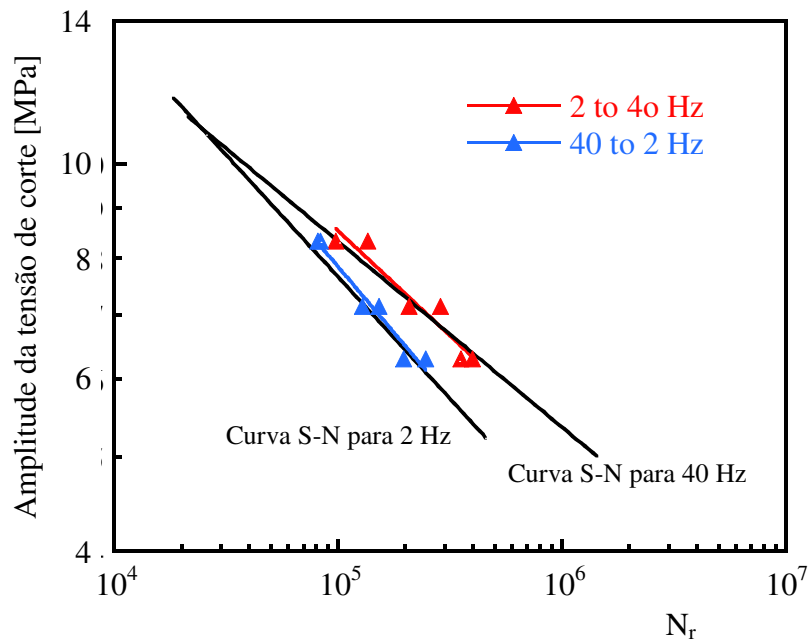
Para ambas as transições, de 10 para 2 Hz (H-L) e de 10 para 40 Hz (L-H), foi observado um efeito muito semelhante e que se caracteriza, para as tensões mais elevadas, por uma pequena diminuição da resistência à fadiga relativamente à curva S-N obtida a 10 Hz. Por outro lado, para as menores tensões de corte, verifica-se uma diminuição significativa da vida à fadiga. Finalmente, considerando as sequências com frequências de 40 e 2 Hz, é possível observar que a transição de 2 para 40 Hz promove valores, em termos de resistência à fadiga, que se ajustam bastante bem à curva S-N para 40 Hz, ao passo que, a transição de 40 para 2 Hz, as vidas de fadiga obtidas ajustam-se à curva de 2 Hz.

Em termos dos modos de ruína, os resultados foram consistentes com os observados nas curvas amplitude/frequência constante. No entanto, algumas exceções ocorreram para as sequências 40-2 Hz e 2-40 Hz, as quais se encontram ilustradas na Figura 3.8. Neste caso deu-se uma falha em modo misto, combinando a ruína adesiva com a coesiva. Para estas condições de dano a vida à fadiga aumentou na ordem dos 22%, em termos de valor médio, relativamente aos provetes que apresentaram uma falha adesiva.

Cada vez mais se revela de enorme importância o desenvolvimento de métodos fiáveis para a previsão de vida de fadiga, no entanto, em termos de juntas adesivas, estes cálculos são complicados como consequência dos vários modos de falha. Para este efeito, uma série de testes foram realizados contendo blocos compostos por sequências de diferentes níveis de frequência (ver figura 3.2). De acordo com a bibliografia, os testes efectuados com carregamentos de amplitude variável (VAL) apenas apresentam alguma validade se a sequência for repetida pelo menos de 5 a 10 vezes [59, 60]. Só deste modo eles conseguem replicar as condições de serviço. No presente trabalho, pelo menos, cada sequência foi repetida sete vezes.



a)



b)

Figura 3.7 - Curvas S-N obtidas com blocos de duas seqüências.

Tabela 3.2 - Sequências de blocos estudadas e respectivas vidas de fadiga.

Sequência	$\Delta\sigma$ [MPa]	n_1	n_2	N_t
10 - 40 Hz	9.5	20329	35168	55497
10 - 40 Hz	9.5	20329	30616	50945
10 - 40 Hz	9.5	20329	25568	45897
10 - 40 Hz	8.3	43987	40168	84155
10 - 40 Hz	8.3	43987	50940	94927
10 - 40 Hz	7.1	107226	47444	154670
10 - 40 Hz	7.1	107226	31359	138585
10 - 40 Hz	6.3	219644	30054	249698
10 - 40 Hz	6.3	219644	15618	235262
10 - 2 Hz	9.5	20329	16331	36660
10 - 2 Hz	9.5	20329	20061	40390
10 - 2 Hz	9.5	20329	20734	41063
10 - 2 Hz	8.3	43987	16402	60389
10 - 2 Hz	8.3	43987	29383	73370
10 - 2 Hz	7.1	107226	82178	189404
10 - 2 Hz	7.1	107226	34228	141454
10 - 2 Hz	6.3	219644	101822	321466
40 - 2 Hz	8.3	35068	46154	81222
40 - 2 Hz	8.3	35068	48656	83724
40 - 2 Hz	7.1	77307	51689	128996
40 - 2 Hz	7.1	77307	76087	153394
40 - 2 Hz	6.3	146051	101819	247870
40 - 2 Hz	6.3	146051	50855	196906
2 - 40 Hz	8.3	24180	111991	136171
2 - 40 Hz	8.3	24180	73873	98053
2 - 40 Hz	7.1	44797	241969	286766
2 - 40 Hz	7.1	44797	163179	207976
2 - 40 Hz	6.3	73579	282961	356540
2 - 40 Hz	6.3	73579	324644	398223

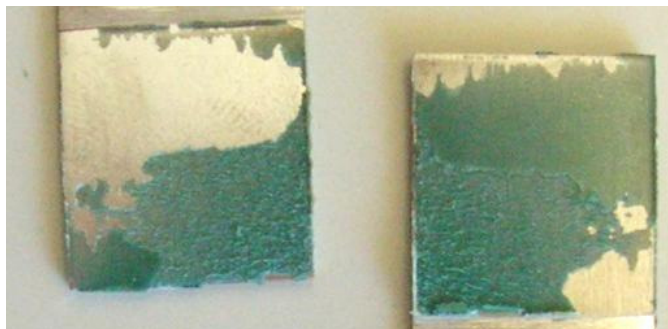


Figura 3.8 - Ruína por modo misto.

Com base na lei de Palmgren-Miner, a vida de fadiga foi estimada pressupondo que o dano provocado por qualquer ciclo não é afectado pelo histórico da carga no provete. Se isto for verdadeiro, então a soma do dano (D), em qualquer ensaio individual, deve ser igual a 1. A figura 3.9 apresenta os resultados da soma dos danos (D). Cada ponto representa um ensaio de fadiga. A lei usada mostra ser conservativa porque, basicamente, todos os valores de D são maiores do que 1.

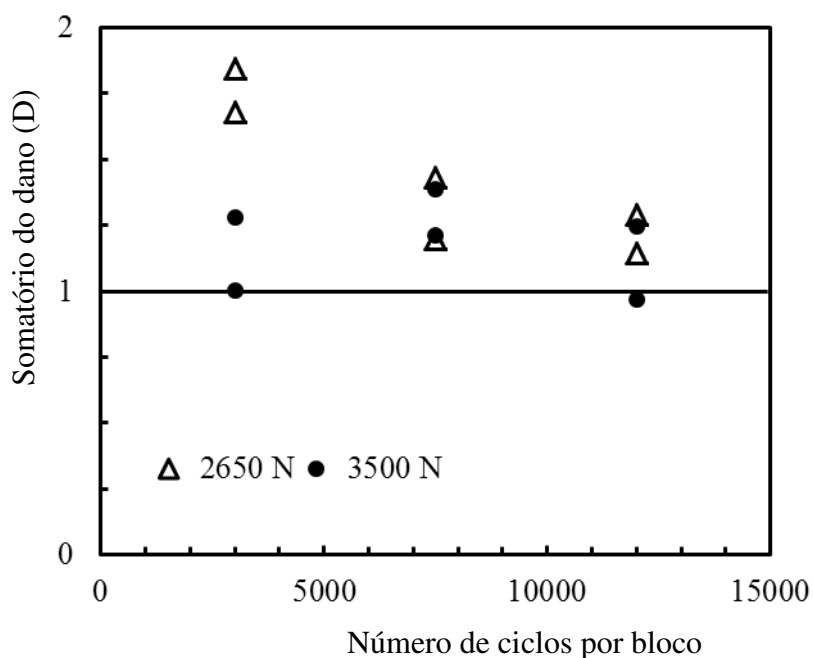


Figura 3.9 - Resultados de D em função do número de ciclos por bloco.

A comparação entre os resultados previstos e experimentais é apresentado na figura 3.10, onde também são apresentadas duas curvas correspondendo a uma gama de tolerância de duas vezes maior ou menor do que a estimativa. Os pontos obtidos estão dentro da faixa de tolerância e a relação média entre as previsões e as vidas experimentais estão próximas da unidade. Portanto, pode concluir-se que o método é suficientemente preciso para prever a vida à fadiga em juntas coladas semelhantes às estudadas.

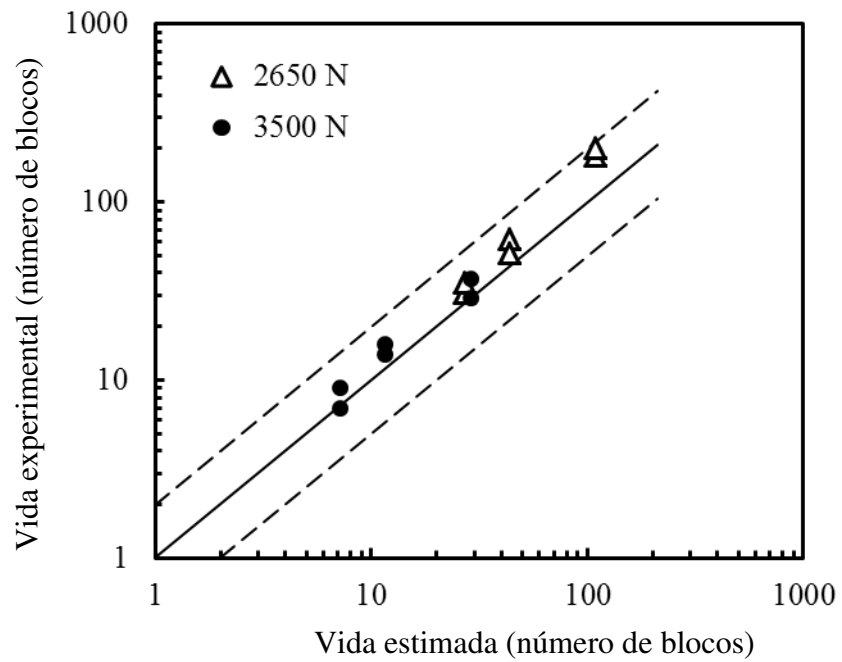


Figura 3.10 - Vida prevista versus vida experimental.

Capítulo 4

Conclusões Finais e Recomendações para Trabalhos Futuros

De acordo com os objectivos estabelecidos, esta tese apresentou uma análise e discussão de resultados que conduziu a algumas conclusões. Neste capítulo serão abordadas apenas as que se julguem serem mais importantes.

Numa fase seguinte apresenta-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

4.1 - Conclusões Gerais

- 1 - Da análise efectuada verificou-se que os aços de elevado limite elástico apresentam enormes vantagens. Se do ponto de vista da indústria os equipamentos podem ficar mais onerosos, comparativamente aos fabricados com os tradicionais aços macios, a avaliação do ciclo de vida dá como sendo os que promovem melhor desempenho em termos de impacto ambiental.
- 2 - Tendo como base o estudo efectuada, uma báscula fabricada com aços de alta resistência conduz a benefícios significativos ao nível de emissões de CO₂ e combustível.
- 3 - As juntas coladas revelam-se uma alternativa promissora às tradicionais técnicas de união. A sua aplicao industrial traz-benefícios em termos de impacto ambiental.
- 4 - A frequência de carregamento condiciona a vida  fadiga das juntas coladas. Verifica-se que a frequência de 2 Hz promove a menor resistência  fadiga, mas, para os valores estudados, esta aumenta com o aumento da frequência até 10 Hz. Após os 10 Hz o aumento da frequência conduz a menores vidas de fadiga.
- 5 - O efeito da frequência deve ser analisado em funo da temperatura nas colas cujas propriedades mecânicas são fortemente dependentes desta.
- 6 - Nas transies de 10 para 2 Hz e de 10 para 40 Hz (L-H), ocorre uma pequena diminuio da resistência  fadiga, comparativamente  curva mestre de 10 Hz, para as tensões mais elevadas e uma diminuio significativa da vida de fadiga nas tensões mais baixas. Relativamente às sequências com as frequências de 40 e 2 Hz, a resistência  fadiga ajusta-se às respectivas curvas S-N obtidas a 40 e 2 Hz.
- 7 - Uma lei baseada na regra de Palmgren-Miner para modular o efeito da frequência mostra-se conservativa. Praticamente todos os valores do parâmetro de dano (D) são maiores do que 1.

8 - A lei adoptada prevê bastante bem a vida à fadiga e pode ser aplicada a juntas coladas semelhantes às analisadas.

4.2 - Recomendações para Trabalhos Futuros

Na sequência do presente trabalho surgiram alguns aspectos que se revelaram interessantes para uma abordagem mais detalhada. De seguida, são referidos sumariamente aqueles que poderão vir a ser alvo de estudo:

- 1 - Estudar mais detalhadamente o ciclo de vida de um produto com o recurso a códigos comerciais mais evoluídos.
- 2 - Estudar mais detalhadamente o fenómeno de fluência nestas juntas coladas para, deste modo, ter uma compreensão mais ampla do efeito das baixas frequências.
- 3 - Aplicar a mecânica da fractura à análise de dano.
- 4 - Estudar o efeito simultâneo da frequência e meio ambiente na resistência à fadiga de juntas coladas.

Bibliografia

- [1] Ferreira ACSB (2007) Educação Ambiental: a Ecologia e as atitudes para a Sustentabilidade, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Biologia para o Ensino, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto.
- [2] Bacha ML, Santos J, Schaun A (2010) Considerações teóricas sobre o conceito de Sustentabilidade, Proc. Do VII SEGeT - Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende-RJ, 20 a 22 de Outubro de 2010.
- [3] Carvalho O, VIANA O (1998). Ecodesenvolvimento e equilíbrio ecológico: algumas considerações sobre o Estado do Ceará, Revista Económica do Nordeste, Fortaleza, Vol. 29.
- [4] Araújo GC, Bueno MP, Sousa AA, Mendonça PSM (2006) *Sustentabilidade Empresarial: Conceito e Indicadores*, Proc. do III CONVIBRA - III Congresso Virtual Brasileiro de Administração, 24 a 26 de Novembro.
- [5] Carvalho A, Junior FH (2012) A sustentabilidade na indústria automobilística: Vantagem competitiva ou um sonho distante?, Rev. Adm. UFSM, Santa Maria, Vol. 5, pp. 785-798.
- [6] Liesa F, Bilurbina L (1990) Adhesivos Industriales, Marcombo Boixareu Editores, Barcelona, Espanha.
- [7] Hattori T (1991) A Stress-Singularity-Parameter Approach for Evaluating the Adhesive Strength of Single-Lap Joints, JSME International Journal, Series I, Vol. 34, pp. 326-331.
- [8] Sawa T, Liu J, Nakano K, Tanaka J (2000) A Two-Dimensional Stress Analysis of Single-Lap Adhesive Joints of Dissimilar Adherends Subjected to Tensile Loads, Journal Adhesion Science and Technology, Vol. 14, pp. 43-66.
- [9] Tong L (1994) Bond Shear Strength for Adhesive Bonded Double-Lap Joints", International Journal of Solids and Structures, Vol. 31, pp. 2919-2931.
- [10] Reis PNB (2001) Resistência de Uniões Estruturais em Polipropileno Reforçado com Fibra de Vidro, Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Electromecânica, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- [11] Esteves JL (1990) Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- [12] Skeist I (1990) Handbook of Adhesives, 3ª Edição, Chapman & Hall, New York, USA.
- [13] Gauthier MM (1990) Sorting out Structural Adhesives, Advanced Materials & Processes, Vol. 138, ASM International.
- [14] Magalhães AG (1999) Aplicação das Técnicas de Emissão Acústica e Radiografia na Caracterização do Dano Produzido por Fluência em Juntas de Materiais Compósitos Sujeitas a

Diferentes Condições Ambientais, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto.

- [15] Correia ACM (1993) Estudo Químico e Envelhecimento Higrotérmico de um Adesivo de Epóxico. Comportamento Mecânico de Juntas Coladas, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Universidade do Coimbra, Coimbra.
- [16] American Society for Testing and Materials (1996) Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)" Annual Book of ASTM Standards, Section 15, Vol. 15.06, D 1002-94.
- [17] Lee CC (1997) Determination of the Mechanical Properties of Adhesive for Design of Bonded Joints, Dissertação para Doutoramento em Engenharia dos Materiais, Faculty of Applied Science, School of Materials Science and Engineering, University of New South Wales, Austrália.
- [18] Adams RD, Peppiatt NA (1974) Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints, Journal of Strain Analysis, Vol. 9, pp. 185-196.
- [19] Takahashi M (2003) Development of High Strength Steels for Automobiles, NIPPON Steel Technical Report, 88, pp. 2-7.
- [20] Sperle J-O, Olsson K (1994) High Strength Automotive Sheet Steels for Weight Reduction and Safety Applications. High strength steels for automotive symposium proceedings, pp. 65-77.
- [21] Sperle J-O, Lundh H (1984) Strength and Crash Resistance of Structural Members in High Strength Dual-Phase Steel Sheet, Journal of Metallurgy, Vol. 13, pp. 343-351.
- [22] Uenishi A, Kuriyama Y, Takahashi M (2000) High Strength Steel Sheets Offering High Impact Energy-absorbing Capacity, NIPPON Steel Thecnical Report, 81, pp. 17-21.
- [23] Reis PNB, Ferreira JAM, Rodrigues NFS (2010) Impact Behavior of Panels for Automotive Applications. Strain (2010) doi: 10.1111/j.1475-1305.2010.00735.
- [24] Kurk F, Eagan P (2008) The value of adding design-for-the-environment to pollution prevention assistance options, Journal of Cleaner Production, Vol. 16, pp. 722-726.
- [25] Shtub A, Bard JF, Globerson S (2005) Project Management - Processes, Methodologies and Economics, Pearson Prentice Hall.
- [26] Krozer Y (2006) Life cycle costing for innovations in product chains. Journal of Cleaner Production, Vol. 16, pp. 310-321.
- [27] de Haes HAU, Heijungs R (2007) Life-cycle assessment for energy analysis and management, Applied Energy, Vol. 84, pp. 817-827.
- [28] Manshadi BD, Mahmudi H, Abedian A, Mahmudi R (2005) A novel method for material selection in mechanical design: Combination of non-linear normalization and a modified digital logic method, Materials and Design, Vol. 28, pp. 8-15.

- [29] Ashby MF (2011) *Materials Selection in Mechanical Design*, 4th edition, Butterworth-Heinemann.
- [30] Pugh S (1991) *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Development*, Addison-Wesley.
- [31] Ribeiro I, Peças P, Henriques E (2008) The Need for a Life Cycle Approach on the Material Selection: a Case Study of an Automobile Fender, *Proceedings of the World Congress on Engineering 2008, London-UK, Vol II*.
- [32] Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD. Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue. *Eng Fract Mech* 2010; 77: 1073-90.
- [33] Erpolat S, Ashcroft IA, Crocombe AD, Abdel-Wahab MM. A study of adhesively bonded joints subjected to constant and variable amplitude fatigue. *Int J Fatigue* 2004; 26: 1189-96.
- [34] Khoramshad H, Crocombe AD, Katnam KB, Ashcroft IA. Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model. *Eng Fract Mech* 2011; 78: 3212-25.
- [35] Erpolat S, Ashcroft IA, Crocombe AD, Abdel-Wahab MM. Fatigue crack growth acceleration due to intermittent overstressing in adhesively bonded CFRP joints. *Compos Part A* 2004; 35: 1175-83.
- [36] Ashcroft IA. A simple model to predict crack growth in bonded joints and laminates under variable amplitude fatigue. *J Struct Anal* 2004; 39: 707-16.
- [37] Gomatam R, Sancaktar E. A novel cumulative fatigue damage model for electronically-conductive adhesive joints under variable loading. *J Adhes Sci Technol* 2006; 20: 69-86.
- [38] Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD, Wahab MMA. An evaluation of strength wearout models for the lifetime prediction of adhesive joints subjected to variable amplitude fatigue. *Int J Adhes Adhes* 2009; 29: 639-49.
- [39] Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD, Wahab MMA. Strength wearout of adhesively bonded joints under constant amplitude fatigue. *Int J Fatigue* 2009; 31: 820-30.
- [40] Schaff JR, Davidson BD. Life prediction methodology for composite structures. Part I- Constant amplitude and two-stress level fatigue. *J Compos Mater* 1997; 31: 128-57.
- [41] Schaff JR, Davidson BD. Part II - Life prediction methodology for composite structures. Part-II-Spectrum fatigue. *J Compos Mater* 1997; 31: 158-81.
- [42] Mostovoy S, Ripling EJ. Flaw tolerance of a number of commercial and experimental adhesives. *Adhesion science and technology*, Vol. 9, New York: Plenum Press, 1975, p. 64-80.
- [43] Johnson S, Mall S. A fracture mechanics approach for designing adhesively bonded joints, *ASTM STP* 1985; 876: 189-99.

- [44] Kinloch AJ, Osiyemi SO. Predicting the fatigue life of adhesively bonded joints. *J Adhes* 1993; 43: 79-90.
- [45] Xu XX, Crocombe AD, Smith PA. Mixed-mode fatigue and fracture behaviour of joints bonded with either filled or filled and toughened adhesive. *Int J Fatigue* 1997; 17: 279-86.
- [46] Pirondi A, Nicoletto G. Fatigue crack growth in bonded DCB specimens. *Eng Fract Mech* 2004; 71: 859-71.
- [47] Luckyram J, Vardy AE. Fatigue performance of two structural adhesives. *J Adhes* 1988; 26: 273-91.
- [48] Al-Ghamdi AH, Ashcroft IA, Crocombe AD, Wahab MMA. Crack growth in adhesively bonded joints subjected to variable frequency fatigue loading. *J Adhes* 2003; 79: 1161-82.
- [49] Reis PNB, Ferreira JAM, Rodrigues NFS. Impact behavior of panels for automotive applications. *Strain* 2011; 47(Suppl. 2): 79-86.
- [50] Reis PNB, Ferreira JAM, Pereira AM, Antunes FJV. Influence of superposition length on transverse impact response of single-strap adhesive joints. *J Adhesion* DOI:10.1080/00218464.2013.797341.
- [51] Casas-Rodriguez JP, Ashcroft IA, Silberschmidt VV. Damage evolution in adhesive joints subjected to impact fatigue. *J Sound Vib* 2007; 308: 467-78.
- [52] Marceau JA, McMillan JC, Scardino WM. Cyclic stress testing of adhesive bonds. *Proc. of the 22nd National SAMPE Symposium and Exhibition, San Diego, California, 1977*, pp. 64-80.
- [53] Althof W. Effect of low cyclic loading on shear stressed adhesive bondlines. *Proc. of the Int. Symp. on "Adhesive Joints: Formation, Characteristics and Testing"* Ed. K. L. Mittal, Plenum Press, New York, 1984, pp. 659-677.
- [54] Hart-Smith LJ. Designing to minimize peel stresses in adhesive-bonded joints. *Delamination and debonding of materials ASTM STP 876*, 1985, pp. 238-66.
- [55] Pandey PC, Shankaragouda H, Singh AK. Nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives. *Comput Struct* 1999; 70: 387-413.
- [56] Reis PNB, Antunes FJV, Ferreira JAM. Influence of Superposition length on Mechanical Resistance of Single-Lap Adhesive Joints. *Compos Struct* 2005; 67: 125-33.
- [57] Pereira AM, Reis PNB, Ferreira JAM, Antunes FV. Effect of saline environment on mechanical properties of adhesive joints. *Int J Adhes Adhes* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.08.002>.
- [58] Reis PNB, Ferreira JAM, Antunes F. Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints. *Int J Adhes Adhes* 2011; 31: 193-201.

- [59] Sonsino CM. Fatigue testing under variable amplitude loading. *Int J Fatigue* 2007; 29: 1080-9.
- [60] Reis PNB, Ferreira JAM, Costa JDM, Richardson MOW. Fatigue life evaluation for carbon/epoxy laminate composites under constant and variable block loading. *Compos Sci Technol* 2009; 69: 154-60.