

# ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE VIGAS ENCASTRADAS SUJEITAS A IMPACTO A MEIO VÃO

**Dina M. Dimas<sup>1</sup>, C. Guedes Soares<sup>2</sup>**

Bolseira de Investigação<sup>1</sup>, Professor Catedrático<sup>2</sup>  
Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
+351 218 417 468 / uetn@mar.ist.utl.pt



## RESUMO

*Descrevem-se os resultados de uma investigação experimental e numérica da energia absorvida em vigas encastradas em aço normal [St37] e de alta resistência [St60], sujeitas a impactos transversais a meio vão com diferentes energias de impacto. Neste estudo relaciona-se a energia de impacto com diferentes parâmetros geométricos da viga, tais com, espessura e comprimento, observando-se que a capacidade de absorção de energia das vigas diminui com o aumento da sua espessura e do seu comprimento.*

## 1 INTRODUÇÃO

A estrutura lateral do casco de navios apresenta uma geometria e modos de deformação muito complexos. No entanto, é possível identificar os diferentes componentes estruturais e obter a quantidade de energia absorvida por cada um deles, num processo de análise descrito em [Dimas e Guedes Soares, (2002)]. Um dos elementos mais básicos desses componentes estruturais, é a viga encastrada sujeita a impacto transversal, a qual tem sido objecto de vários estudos, [Dimas e Guedes Soares, (2003)].

Este tipo de estudos tem sido alvo de uma vasta investigação, da qual se salienta Menkes e Opat (1973), que conduziram uma investigação experimental sobre colapso inelástico dinâmico de vigas de

metal sujeitas a carregamentos impulsivos e Jones (1989), que mostrou como um simples método rígido-plástico pode prever as grandes deformações em vigas encastradas com carregamentos dinâmicos.

Liu e Jones em (1987) e (1988), apresentaram análises teóricas e experimentais, que examinam a influência do esforço transversal, do momento plástico e dos deslocamentos finitos no comportamento rígido, perfeitamente plástico de vigas encastradas que sofrem um impacto transversal por uma massa em qualquer ponto. Teoricamente foi verificado que a influência das forças de membrana são tanto mais importantes, quanto maiores forem as deformações transversais e portanto a energia dinâmica externa envolvida.

Para prever os modos de colapso de uma viga sujeita a carregamentos dinâmicos pode-se recorrer a critérios energéticos [Wen, *et al.* (1995)], onde são apresentados gráficos com a carga de colapso assumindo que as tensões axiais elásticas e o esforço de corte transversal são parâmetros independentes. Um critério de tensão efectiva é sugerido para a ruptura das vigas, combinando a influência destes parâmetros.

Mais recentemente Jones e Wierzbicki (1989), analisaram os critérios e os modos de colapso dinâmicos de elementos estruturais, tais como vigas, anéis, placas e placas finas, baseando-se em trabalhos experimentais e numéricos. Yu e Jones em (1989) e (1997), descrevem as simulações numéricas que fizeram para vigas encastradas sujeitas a impacto, comparando esses resultados com os elaborados por Liu e Jones em (1987) e (1988).

No seguimento da investigação feita por Liu e Jones em (1988) para vigas encastradas com igual comprimento e diferentes espessuras, pretende-se com este trabalho descrever os resultados de uma investigação experimental e numérica, da energia absorvida em vigas encastradas em aço sujeitas a impacto transversal a meio vão, com diferentes energias de impacto e diferentes parâmetros geométricos da viga, tais como, espessura e comprimento. Para as vigas de maior vão, é ainda feita a comparação entre o aço normal St37 e o de alta resistência St60.

## 2 ESTUDO EXPERIMENTAL

No estudo experimental que está ilustrado na Fig.1, considerou-se a resposta dinâmica plástica numa viga encastrada de comprimento  $2L$ , sujeita a um impacto a meio vão, por uma massa  $M$  [impactor], deslocando-se a uma velocidade inicial  $V_0$  variável de acordo com a energia de impacto pretendida.

Para o impacto a meio vão, a viga desloca-se com a mesma velocidade  $V_0$  no instante do impacto, enquanto a restante



Fig. 1 - Vigas encastrada sujeitas a um impacto transversal.

parte da viga fica imóvel. Por conseguinte, para manter o equilíbrio dinâmico a perturbação propaga-se a partir do meio vão em direcção aos suportes, enquanto o impactor se mantém em contacto com a viga.

Neste estudo de carregamento dinâmico, pode-se observar que se desenvolve por baixo do ponto de impacto no instante  $t=0s$ , uma rótula plástica que se propaga em direcção aos suportes e às restantes partes não deformadas da viga. No final do movimento, tem-se três rótulas plásticas que permanecem estacionárias no suporte e no ponto de impacto, até que a viga e o impactor entram em repouso, ou seja, quando a energia cinética inicial for totalmente dissipada plasticamente.

A resposta da viga é dominada pela fase final do movimento, uma vez que é nesta fase que se desenvolve a deformação plástica.

### 2.1 Máquina de Impacto

Os ensaios foram efectuados numa máquina de impacto (Rosand Precision Impact Tester), onde se obtém o impacto controlado de uma massa sobre a viga a ensaiar, predefinindo-se a energia incidente, a velocidade de impacto ou altura da massa. Essa máquina é constituída (Fig. 2 a) por uma torre, onde se desloca em queda livre a massa  $M$  do impactor que neste caso tem 10,9 kg, com uma extremidade de impacto de secção rectangular  $6,25 \times 20 \text{ mm}^2$  e por baixo da

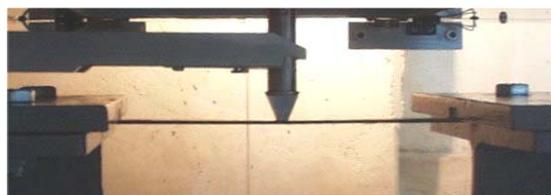
massa de impacto são colocados as vigas a ensaiar.

Uma unidade de controlo remoto (Fig. 2b), que contém os módulos electrónicos necessários à gestão dos sistemas da torre e capta os sinais que de seguida envia para o programa que faz o tratamento dos dados e respectiva visualização dos resultados de um modo compreensível (Fig. 2 c).

Os dados são adquiridos por um sensor de leitura óptica e por uma célula de carga. O sensor de leitura óptica, situa-se na parte inferior da torre, sendo ajustado manualmente de modo a ser definido o instante inicial ( $t = 0$  s) do contacto, que é o instante em que a extremidade do impactor toca a viga (Fig. 3). Esse sensor é accionado por uma bandeira metálica que se situa numa extremidade da cabeça do impactor que ao passar pelo sensor acciona a aquisição de dados.

A célula de carga, está situada na cabeça do impactor, sendo accionada electronicamente no instante em que o peso é solto, estando solidária com o impactor, como se pode ver na Fig. 4.

As variáveis primárias usadas para definir a magnitude do impacto, são: a massa, velocidade e energia cinética. A altura está directamente relacionada com a velocidade de impacto através da equação:



**Fig. 3** - A extremidade do impactor toca a viga no instante  $t = 0$ s.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

onde  $v$  é velocidade,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $h$  é a altura da massa.

A massa, velocidade e energia cinética estão relacionadas através de equação:

$$E = \frac{1}{2}Mv^2 \quad (2)$$

onde  $E$  é a energia cinética e  $M$  é a massa do impactor.

Para o correcto funcionamento do sistema de aquisição de sinal, é necessário introduzir no programa informação sobre a massa do impactor. Além disso especificando-se:

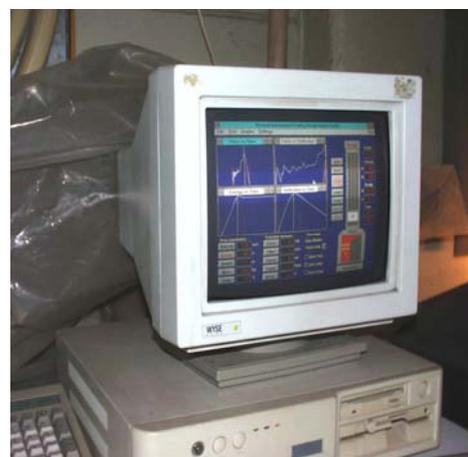
- (i) a energia de impacto, o programa calcula a velocidade de impacto e a altura a que o impactor deve estar inicialmente;
- (ii) a velocidade de impacto ou a altura do impactor a energia de impacto é calculado pelo programa.



(a)

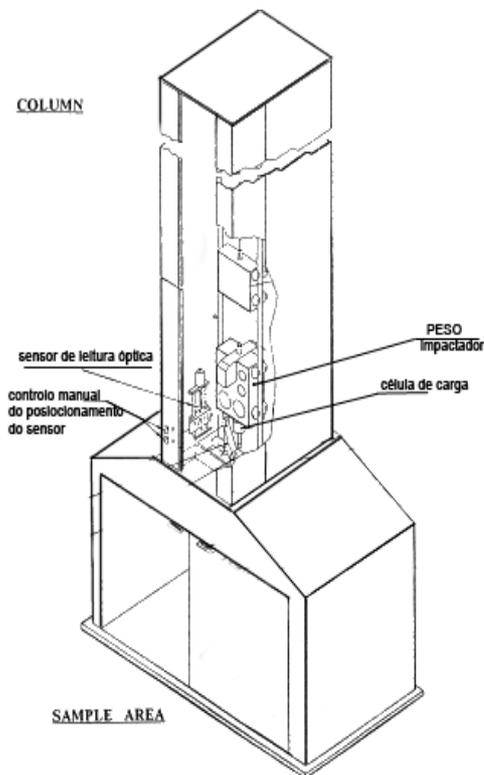


(b)



(c)

**Fig. 2** – Máquina de Impacto [Rosand Precision Impact Tester]



**Fig. 4** - Máquina de Impacto: visualizar o posicionamento da célula de carga e do sensor de leitura óptica.

Fundamentalmente são adquiridos três dados: tempo, força e velocidade inicial, para que seja possível, determinar o deslocamento e a energia absorvida pela viga.

A velocidade inicial é obtida em função do tempo que a bandeira metálica leva a atravessar o sensor óptico, sendo a força obtida pela célula de carga. A velocidade é calculada integrando a aceleração no tempo (a aceleração é calculada simplesmente pela força dividida pela massa) usando a velocidade inicial como condição inicial. A aceleração do impactor devido a gravidade também é tida em conta. A energia absorvida pela viga também pode ser calculada integrando a força em função da distância percorrida durante o contacto.

## 2.2 Propriedades do Material

As propriedades mecânicas do material das vigas, foram obtidas através de ensaios estáticos numa máquina 'Instron' (Fig. 5), impondo uma velocidade de deslocamento ao cabeçote de tracção de  $0,35 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,



**Fig. 5** – Máquina de ensaios estáticos 'INSTRON'

através dos quais se obtiveram a força [kN], o deslocamento [mm] e o tempo [ $\text{s}^{-1}$ ]. Posteriormente esses dados são tratados de modo a obter os valores tensão-deformação.

Os provetes para o ensaio de tracção têm um comprimento total  $L=250\text{mm}$  e  $L_0=100\text{mm}$  entre marcas, largura  $b=20\text{mm}$ , e diferentes espessuras  $H$  (mm), apresentadas na tabela 1, obtendo-se os valores das características mecânicas, através da média de três testes de tracção para cada espessura.

Na Fig. 6, pode-se observar que a cedência é iniciada num ponto de concentração de tensões. Como a tensão de cedência é proporcional ao logaritmo da velocidade de alongamento. Um aumento da velocidade de alongamento corresponde a uma aumento da tensão de cedência.

Como se pode ver na Fig. 6 a), com o aumento da espessura  $H$  o nível do patamar de cedência diminui, o qual se deve à influência da geometria dos provetes nesta característica, uma vez que os outros factores se mantêm.

Pelas razões mencionadas anteriormente, o acabamento superficial, a geometria do provete e a velocidade de alongamento, são factores importantes na determinação da tensão de cedência.

Na Fig. 6 b), pode-se observar que a região de domínio elástico é semelhante nos dois materiais. Quanto ao patamar de cedência, pode-se observar que no aço St37 esse patamar é mais longo.

Durante a deformação plástica uniforme, a capacidade de encruamento de um material traduz-se na inclinação da curva; maior encruamento implica maior inclinação, isto é, à medida que o provete aumenta de comprimento, a área da secção transversal diminui uniformemente  $A.L=A_o.L_o$ , sendo a inclinação maior no aço St60.

Na continuação do ensaio, após a carga máxima, verificar-se-á numa zona restrita de menor resistência, a zona de estricção, onde se iniciará uma concentração da deformação plástica. Esta resultará numa redução de área da secção, mais rápida do que o aumento de carga necessária à continuação da deformação devido ao encruamento, verificando-se uma diminuição da carga até à ruptura.

Verificando-se que o aço St60 resiste a maiores solicitações de carregamento axiais com menores deformações plásticas do que o aço St37, antes da ruptura.

### 2.3 Ensaio

Os ensaios foram feitos na máquina de impacto (Fig. 2), e as vigas a ensaiar têm um comprimento entre suportes  $[2L]$  de 125, 250 e 500 mm e largura  $[B]$  de 20 mm, com espessuras  $[H]$  de 3, 6, 8 e 10 mm. Nestes testes, optou-se por especificar a energia de impacto.

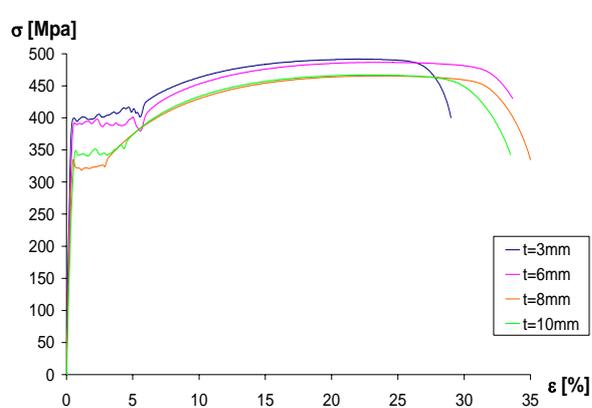
Para cada espessura foram efectuados ensaios com três níveis de energia de impacto, mantendo sempre a mesma massa do impactor.

Nas tabelas 2-5, pode-se ver os resultados experimentais, apresentando-se aqui a média de três resultados para a mesma espessura e energia cinética incidente.

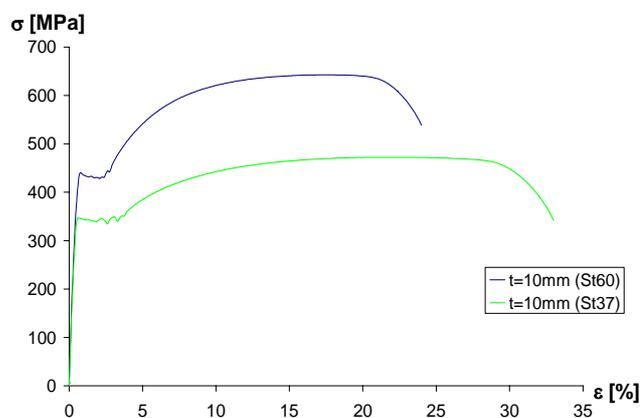
A energia cinética incidente  $E=1/2GV_o^2$  é a energia de impacto. A energia de impacto é totalmente absorvida pelas vigas através das deformações plásticas a que estas estão sujeitas.

**Tabela 1** – Características mecânicas do material

Aço tipo	H	$L_f$	$\sigma_c$	$\sigma_u$	$\sigma_R$	$\epsilon$
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[%]
St37	3	129,0	401,3	491,5	400,3	29
St37	6	135,0	379,6	486,5	357,6	35
St37	8	135,0	318,3	465,4	334,6	35
St37	10	133	334,5	472,3	341,9	33
St60	10	124	428,6	642,7	538,8	24



(a)



(b)

**Fig. 6** – Curvas Tensão-Deformação

**Tabela 2** - Resultados experimentais para as vigas com comprimento  $2L = 125$  mm de aço St37

Espessura [mm]	Valores Incidentes		Resultados à Força Máxima			Resultados Máximos		Resultados Permanentes	
	Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]
3	180,0	5,8	19,27	30,41	182,80	31,66	196,65	30,29	190,60
	100,0	4,3	15,95	30,01	104,00	30,28	108,20	27,95	99,20
	20,0	1,9	1,83	11,57	18,37	13,05	21,03	11,58	20,40
6	180,0	5,8	12,41	20,11	162,25	22,76	192,25	21,30	188,15
	100,0	4,3	8,06	14,88	95,28	16,29	106,30	15,00	103,35
	20,0	1,9	5,89	3,89	15,94	4,61	20,10	3,23	17,29
8	180,0	5,8	12,63	18,60	168,20	20,57	191,96	19,03	186,55
	100,0	4,3	9,70	12,12	93,96	13,46	106,60	12,10	101,90
	20,0	1,9	7,31	4,23	19,44	4,31	19,99	3,13	16,90

**Tabela 3** - Resultados experimentais para as vigas com comprimento  $2L = 250$  mm de aço St37

Espessura [mm]	Valores Incidentes		Resultados à Força Máxima			Resultados Máximos		Resultados Permanentes	
	Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]
3	180,0	5,8	16,66	43,20	188,65	43,77	197,90	40,48	180,45
	100,0	4,3	11,81	40,38	105,60	40,85	111,10	38,26	100,90
	20,0	1,9	1,70	21,87	22,92	22,28	23,55	21,64	23,23
6	180,0	5,8	13,01	37,03	190,30	37,31	193,80	34,68	184,10
	100,0	4,3	5,99	27,83	104,15	28,85	109,70	27,26	107,15
	20,0	1,9	3,23	5,25	10,04	9,15	21,79	6,36	18,47
8	180,0	5,8	11,53	33,50	191,20	34,03	196,90	31,63	189,45
	100,0	4,3	6,39	20,35	88,82	24,02	109,20	21,81	104,80
	20,0	1,9	3,95	6,80	17,70	7,60	20,71	5,00	16,77

**Tabela 4** – Resultados experimentais para as vigas com comprimento  $2L = 500$  mm de aço St37

Espessura [mm]	Valores Incidentes		Resultados à Força Máxima			Resultados Máximos		Resultados Permanentes	
	Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]
8	180,0	5,8	12,65	52,51	196,55	52,66	198,40	46,81	172,75
	100,0	4,3	4,84	41,24	109,25	41,59	110,85	40,14	107,25
	20,0	1,9	2,73	6,95	6,32	14,97	22,89	12,41	19,10
10	180,0	5,8	9,29	46,16	188,50	46,86	194,25	40,14	177,60
	100,0	4,3	5,44	0,72	1,99	33,81	108,67	27,72	100,88
	20,0	1,9	3,53	7,79	12,37	11,15	22,14	4,90	14,84

**Tabela 5** – Resultados experimentais para as vigas com comprimento  $2L = 500$  mm de aço St60

Espessura [mm]	Valores Incidentes		Resultados à Força Máxima			Resultados Máximos		Resultados Permanentes	
	Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]	Def. [mm]	Energia [J]
10	180,0	5,8	7,36	1,071	3,82	44,928	198,11	36,461	184,88
	100,0	4,3	5,52	0,658	2,12	30,332	108,41	21,038	94,01
	20,0	1,9	3,79	10,974	20,47	11,314	21,65	2,794	8,94

Nas tabelas 2–5, nas colunas a que corresponde os valores incidentes, tem-se a energia de impacto e a respectiva velocidade, no instante em que o impactor

toca a viga. Na coluna com os resultados à força máxima, tem-se os valores obtidos quando a velocidade do impactor é zero, onde se pode ver que a maior parte da

energia de impacto já foi dissipada através das deformações. Na coluna dos resultados máximos, a força de contacto é nula, atingindo o valor máximo a deformação e a energia dissipada. Os resultados são permanentes quando o sistema fica em repouso, não havendo qualquer alteração nos resultados.

Na tabela 4, em que a viga é em aço macio St37, pode-se ver que os resultados não obedecem bem aos critérios descritos anteriormente, e isso deve-se ao facto de durante a resposta da viga ao impacto dinâmico, haver muita vibração elástica para as energias de impacto mais elevadas, o que diminui a capacidade de absorver a energia pela viga.

Neste estudo, foi observado que, quanto maior é o vão entre os suportes, mais vibrações elásticas se verificam após o contacto.

### 3 ANÁLISE NUMÉRICA

A modelação apresentada foi feita com elementos finitos no programa LsDyna3D, que é o mais indicado para simulação dinâmicas explícitas não-lineares com deformações plásticas.

A formulação utilizada para este tipo de simulações, foi a formulação de Lagrange com três pontos de integração ao longo da espessura. As equações do movimento são integradas explicitamente no tempo, usando o método das diferenças centrais. Este método requer, espaçamentos de tempo muito reduzidos para uma solução estável, o que acontece particularmente em casos de impacto, como é o caso que se apresenta.

#### 3.1 Geometria e Malha

As simulações numéricas tiveram como objectivo, obter um modelo que se ajuste ao modelo experimental, com a intenção de acelerar as próximas investigações nesta área.

Nestes casos específicos, tem-se um impacto transversal de um corpo rígido numa viga de aço encastrada, com diferentes comprimentos e espessuras.

Os elementos para este tipo de simulação têm que ter uma boa capacidade de flexão e membrana para grandes deformações, tanto para esforços transversais como axiais. Com estas exigências, o elemento escolhido é um elemento casca de 4 nós, (fig.7) com 12 graus de liberdade em cada nó, translação, rotação, velocidade e aceleração em cada nó, na direcção dos eixos X, Y, e Z. Este elemento só é usado em análises dinâmicas explícitas.

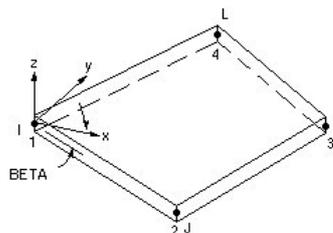


Fig. 7 – Elemento casca de 4 nós.

Para o contacto foram necessárias duas componentes, modeladas como superfícies e o contacto definido como “Nó–Superfície”. A superfície principal, ‘VIGA’ modelada como um segmento de elementos casca e a superfície secundária, ‘IMPACTOR’ modelada como uma parte rígida com velocidade inicial aplicada em todos os nós.

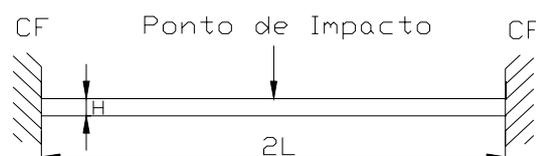


Fig. 8 – Modelação Numérica.

A ‘VIGA’ foi modelada como tendo o comportamento de um material elásto-plástico [Hallquist, (1998)]. O ‘IMPACTOR’ foi modelado como sendo um material rígido, restringido nas translações globais na direcção do eixo X e Y e em todas as rotações globais na direcção do eixo X, Y e Z. É ainda de salientar que a massa M do impactor, está contida na sua densidade  $\rho$ , sabendo que:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3)$$

sendo, V o volume do ‘IMPACTOR’ que entra em contacto com a viga.

Por cada modelo experimental, foram feitas duas simulações numéricas, com variação na condição fronteira:

1. totalmente encastrada: restringida em todas as translações globais Tx, Ty e Tz e em todas as rotações globais Rx, Ry e Rz.
2. Ry=0: restringida em todas as translações globais Tx, Ty e Tz e nas rotações globais Rx e Rz.

Optou-se por simular a CF com Ry=0, uma vez que durante os ensaios verificou-se que ocorreu escorregamento na zona do contacto e dos suportes devido ao impacto.

**Tabela 6** – Malha definida para a modelação numérica da Fig. 8

Modelo	Nós		Elementos ‘Casca’	
	Viga	Impact.	Viga	Impact.
125 mm	1574	34	1440	24
250 mm	910	44	800	32
500 mm	1128	20	960	12

### 3.2 Material

O material definido para a modelação no programa LsDyna3D foi o “Mat.28 – Material Resultant Plasticity”, o qual tem um comportamento elasto-plástico. Neste caso o que é pretendido, são as forças de contacto, os deslocamentos máximos e as energias envolvidas no impacto, nomeadamente a energia absorvida pela estrutura.

Os resultados das simulações numéricas podem ser consultados nas Tabelas 8 – 11

**Tabela 7** – Propriedades do material definidas para o Mat.-28.

E – Modulo de Elasticidade	200x10 <sup>9</sup>	N.m <sup>-2</sup>
v – Coeficiente de Poisson	0,28	-
ρ – Densidade	7850	Kg.m <sup>-3</sup>
σ <sub>y</sub> – Tensão de Cedência	(ensaio de tracção)	N.m <sup>-2</sup>

**Tabela 8** – Resultados numéricos para as vigas com comprimento 2L = 125 mm de aço St37

Espessura [mm]	CF	Valores Incidentes		Resultados Máximos		
		Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	E [J]
3	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	6,17 7,46	40,98 33,65	183,42 170,90
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	6,15 7,39	22,94 20,05	106,54 101,25
	Encastrada Ry =0	20,0	1,9	4,40 4,71	8,47 8,73	20,66 20,11
6	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	13,10 14,12	17,79 18,23	180,29 166,71
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	13,08 14,53	11,70 12,24	104,25 99,81
	Encastrada Ry =0	20,0	1,9	6,01 6,70	4,80 5,94	20,54 20,41
8	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	17,99 14,61	13,34 17,59	176,70 170,41
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	16,35 16,20	9,09 10,39	103,08 99,65
	Encastrada Ry =0	20,0	1,9	7,25 7,28	3,23 4,79	20,36 20,28

**Tabela 9** – Resultados numéricos para as vigas com comprimento  $2L = 250$  mm de aço St37

Espessura [mm]	CF	Valores Incidentes		Resultados Máximos		
		Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	E [J]
3	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	6,70	40,54	193,85
				6,95	46,15	188,87
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	6,70	26,58	112,30
6,69				27,39	109,30	
Encastrada Ry =0	20,0	1,9	4,47	11,78	22,12	
			4,50	12,07	22,04	
6	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	13,08	24,13	192,07
				11,47	26,34	188,30
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	11,96	17,77	111,42
11,34				18,58	110,08	
Encastrada Ry =0	20,0	1,9	5,32	7,79	22,09	
			6,19	9,03	22,04	
8	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	14,66	21,94	191,26
				12,31	24,11	188,24
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	12,41	16,11	111,36
12,09				17,24	110,12	
Encastrada Ry =0	20,0	1,9	5,28	6,18	21,89	
			6,12	8,05	21,99	

**Tabela 10** – Resultados numéricos para as vigas com comprimento  $2L = 500$  mm de aço St37

Espessura [mm]	CF	Valores Incidentes		Resultados Máximos		
		Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	E [J]
8	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	9,54	38,35	184,48
				9,42	39,05	184,48
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	7,19	28,61	101,38
7,15				29,25	101,36	
Encastrada Ry =0	20,0	1,9	3,07	13,01	19,83	
			3,66	14,30	19,78	
10	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	10,37	34,09	184,37
				10,40	34,94	184,30
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	7,90	25,31	101,34
7,94				26,21	101,33	
Encastrada Ry =0	20,0	1,9	4,49	10,73	19,85	
			4,08	12,84	19,78	

**Tabela 11** – Resultados numéricos para as vigas com comprimento  $2L = 500$  mm de aço St60

Espessura [mm]	CF	Valores Incidentes		Resultados Máximos		
		Energia [J]	Velocidade [m/s]	F [kN]	Def. [mm]	E [J]
10	Encastrada Ry =0	180,0	5,8	12,25	29,21	190,21
				11,57	30,52	190,50
	Encastrada Ry =0	100,0	4,3	9,57	21,29	100,83
10,17				22,52	101,43	
Encastrada Ry =0	20,0	1,9	5,67	9,10	19,48	
			4,67	11,76	19,87	

#### 4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E NUMÉRICOS

No âmbito destes ensaios, é difícil medir as deformações devido aos esforços globais envolvidos, uma vez que elevadas forças locais de compressão e de tracção ocorrem no ponto de impacto e nos suportes. Essas forças reduzem a espessura local das vigas, nos quais ocorre alguma indentação, embora este tipo de deformação não seja aqui contabilizada.

Para comparar os resultados experimentais e numéricos, recorreu-se às energias absorvidas pelas vigas encastradas com comportamento elasto-plástico sujeitas a um impacto transversal de um corpo rígido.

Nas Fig. 9 e 10, pode-se observar uma boa concordância entre os valores experimentais e os obtidos por simulação numérica, para o aço macio (St37).

Na Fig. 9, pode-se ver que as diferenças percentuais entre os resultados experimentais e numéricos para vigas com comprimentos  $2L=125\text{mm}$  para  $H=3\text{ mm}$  é de 5.7%, para  $H=6\text{ mm}$  é de 3.9% e para  $H=8\text{ mm}$  é de 4.2%. Para vigas com comprimentos  $2L=250\text{mm}$  para  $H=3\text{ mm}$  é de 1,6% para  $H=6\text{ mm}$  é de 4.4% e para  $H=8\text{ mm}$  é de 4.3%, o que é bastante satisfatório.

Na Fig. 11, pode-se observar que as energias incidentes são absorvidas na deformação plástica dos diferentes materiais, aço St37 e aço St60.

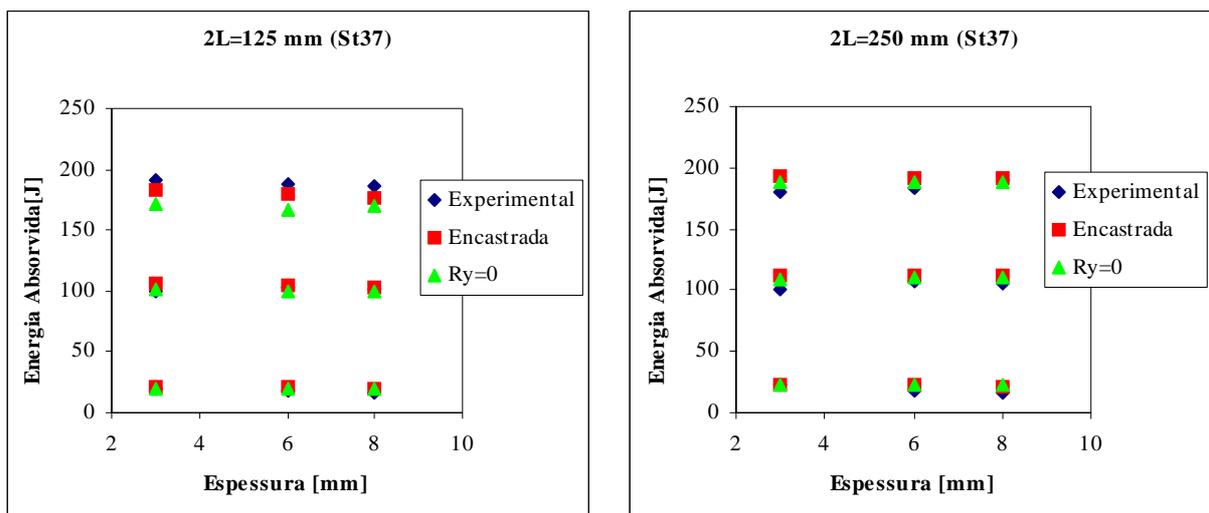


Fig. 9 – Energia absorvida em função das espessuras 3, 6 e 8 mm.

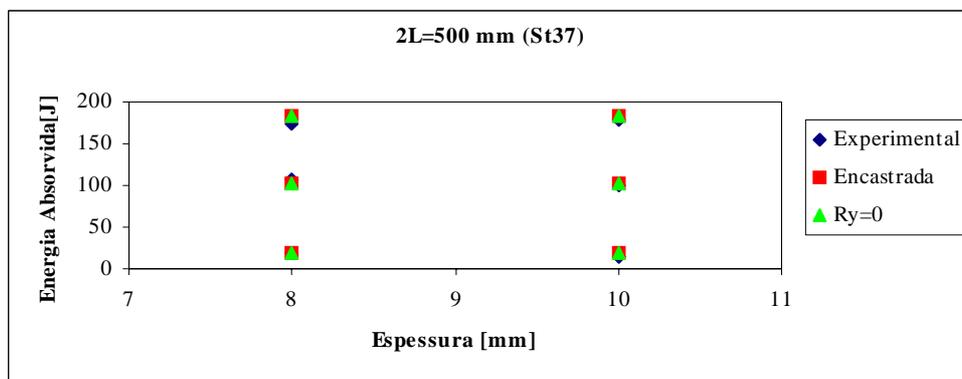


Fig. 10 – Energia absorvida em função das espessuras de 8 mm e 10 mm.

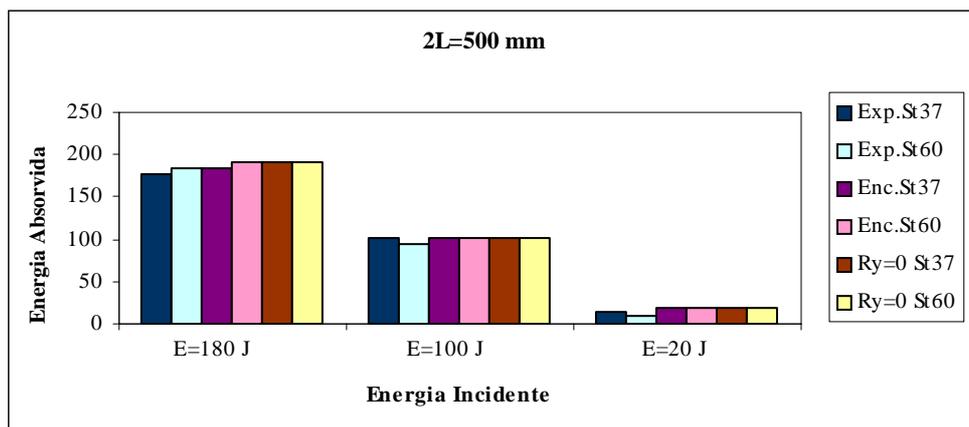


Fig. 11 – Comparação entre os aços St37 e St60 em termos das energias envolvidas para  $H=10\text{mm}$ .

Na Fig. 12, pode-se observar que para a mesma energia incidente, o deslocamento devido ao impacto transversal no aço St60 é inferior ao do St37, sendo esse fenómeno devido ao aço St60 resistir a maiores solicitações de carregamento, com menores deformações plásticas do que o St37.

As ligeiras diferenças que se observam, devem-se ao facto de se compararem valores dos deslocamentos permanentes nos resultados experimentais e máximos nos resultados numéricos, uma vez que o material escolhido para a modelação é elasto-plástico, sendo essas diferenças mais visíveis nas energias mais baixas.

Pode-se ainda observar que as condições fronteira escolhidas nestes casos, pouco alteram os resultados numéricos.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados experimentais obtidos são consistentes com os descritos por diversos autores, o que permite confiar no método e no equipamento usado para estes ensaios.

Os resultados numéricos obtidos através do programa LSDYNA, ajustam-se bem aos resultados experimentais, o que permite confiar na modelação criada para este tipo de simulações.

Neste estudo, foi também observado que quanto maior é o vão entre os suportes, mais vibrações elásticas se verificam após o contacto.

Conclui-se também que a capacidade que as vigas têm em absorver a energia de impacto diminui com o aumento da espessura das vigas.

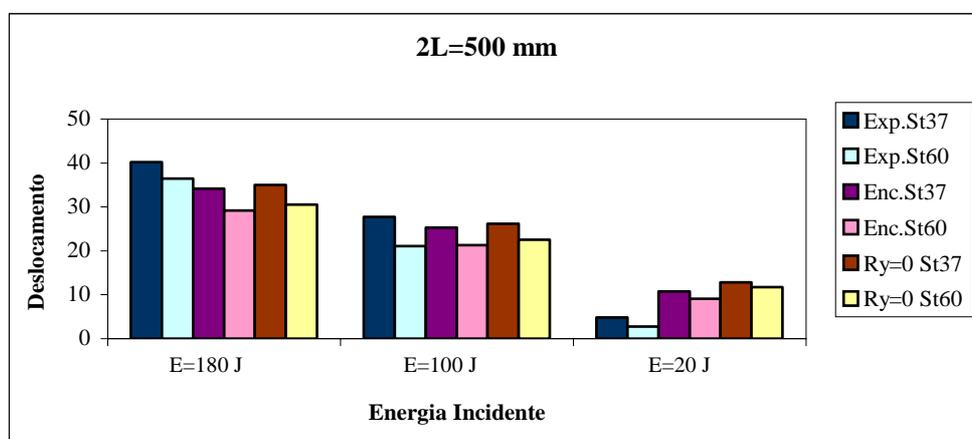


Fig. 12 – Comparação entre os aços St37 e St60 para  $H=10\text{mm}$ ; deslocamento provocado devido ao impacto transversal.

## 6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi feito no âmbito Projecto Europeu 'Crashworthy Side Structures for Improved Collision Damage Survivability of Coasters and Medium Size Ro-Ro Cargo Ships [CRASHCOASTER]' que é financiado parcialmente pela Comissão Europeia com o contrato N° G3RD-CT2000-00253 no âmbito do programa Growth.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Dimas, D. M. e Guedes Soares, C., "Modelação e Dimensionamento de Navios Relativamente à Colisão," *O Mar Fonte de Desenvolvimento Sustentado* Edições Salamandra, Lisboa 2002, pp. 347-368.
- Dimas, D. M. e Guedes Soares, C., "Estudo Experimental do Comportamento Plástico de Vigas Encastradas Sujeitas a Impactos," *Actas do VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional*, Vol. III, Secção IV, 2003, pp. 1399-1409.
- Menkes, S. B. and Opat, H. J., "Broken Beams," *Exp. Mech.*, Vol. 13, 1973, pp. 480-486.
- Jones, N., *Structural Impact*, Cambridge University Press 1989.
- Liu, J. H. and Jones, N., "Dynamic Response of a Rigid Plastic Clamped Beam Struck by a Mass at Any Point on the Span," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 24, 1988, pp. 251-270.
- Liu, J. H. and Jones, N., "Experimental Investigation of Clamped Beam Struck Transversely by a Mass," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 6, 1987, pp. 303-335.
- Wen, H. M., Reddy, T. Y., and Reid, S. R., "Deformation and Failure of Clamped Beams Under Low Speed Impact Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 16 (3), 1995, pp. 435-454.
- Jones, N. and Wierzbicki, T., *Structural Failure*, Wiley, New York, 1989.
- Yu, J. and Jones, N., "Numerical Simulation of a Clamped Beam under Impact Loading," *Computers & Structures*, Vol. 32, 1989, pp. 281-293.
- Yu, J. and Jones, N., "Numerical Simulation of Impact Loaded Steel Beams and the Failure Criteria," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34 (30), 1997, pp. 3977-4004.
- IFWIT, "Manual of Rosand Precision Impact Tester"
- Hallquist, J. O., "LS-DYNA3D, Theoretical Manual," Livermore Software, 1998.