

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO SOFTWARE

H60 Calculator

Lajes Mistas com Cofragem Metálica Colaborante



O Feliz – Metalomecânica S. A.

COIMBRA, SETEMBRO 2011

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	3
2. LAJES MISTAS COM COFRAGEM METÁLICA COLABORANTE	4
2.1. Conceitos Gerais	4
2.2. Materiais	5
2.3. Modos de Rotura	6
2.3.1. Estados limites últimos	6
2.3.2. Estados limites de utilização	7
2.4. Disposições Construtivas	7
3. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO H60-CALCULATOR	9
3.1. Introdução	9
3.2. Dados da chapa perfilada H60	9
3.3. Dados referentes à laje mista	10
3.4. Pressupostos de cálculo e dimensionamento	12
3.5. Descrição e aplicação do programa de cálculo automático	14
4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO	36
4.1. Introdução	36
4.2. Exemplo 1	36
4.3. Exemplo 2	45
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO A – Gráficos para obtenção da classe de vibração	56

1. INTRODUÇÃO

O presente manual pretende servir de ferramenta de apoio à utilização do software **H60 Calculator**, para cálculo e dimensionamento de lajes mistas com chapa colaborante, com o perfil H60 desenvolvido e produzido por “O Feliz – Metalomecânica S.A.”, com o apoio do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

O manual contém as seguintes partes:

- 1 – Introdução – apresentação do manual.
- 2 – Lajes mistas com cofragem metálica colaborante – aqui apresenta-se de uma forma sintética os conceitos de comportamento estrutural e os modelos de dimensionamento previstos na NP EN 1994-1-1 (Eurocódigo 4) e utilizados no software de cálculo desenvolvido.
- 3 – Programa de cálculo automático **H60 Calculator** – neste capítulo faz-se uma descrição geral do programa, com notas explicativas da sua utilização, desde a entrada de dados até à saída de resultados.
- 4 – Exemplos de aplicação – apresentam-se 2 exemplos de aplicação para o utilizador se familiarizar com os modelos de cálculo envolvidos e melhor entender os resultados obtidos com o software.

As lajes mistas com cofragem metálica colaborante tem tido uma utilização crescente na construção de edifícios metálicos e mistos, com aplicações em edifícios de escritórios, edifícios industriais e comerciais, parques de estacionamento e também em hospitais e edifícios de habitação. Na fase de construção as chapas funcionam como plataforma de trabalho; na fase definitiva combinam-se estruturalmente com o betão, desempenhando total ou parcialmente o papel das armaduras de tracção. O dimensionamento deste tipo de laje é previsto no Eurocódigo 4: Projecto de Estruturas Mistas Aço-Betão (NP EN 1994-1-1); neste regulamento são apresentados modelos de cálculo suficientemente desenvolvidos para a verificação da resistência à flexão, ao esforço transversal, ao punçoamento, bem como para a verificação de condições de serviço: deformações, vibrações e fendilhação. A resistência ao corte longitudinal, o modo de rotura mais condicionante em vãos correntes, é verificada através de métodos semi-empíricos, que utilizam parâmetros calibrados experimentalmente (m e k ou τ_{uRd}); no caso do perfil H60 fabricado por “O Feliz – Metalomecânica S.A.”, estes parâmetros foram obtidos no Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

2. LAJES MISTAS COM COFRAGEM METÁLICA COLABORANTE

2.1. Conceitos Gerais

Uma laje mista aço-betão é um elemento estrutural que resulta da associação de uma chapa de aço perfilada de espessura reduzida (em geral entre 0.7 a 1.25 mm), enformada a frio, com uma camada de betão (Figura 2.1). As lajes mistas são executadas com espessuras totais, em geral entre 100 e 250 mm, sendo aplicada na face superior uma armadura construtiva. No caso de lajes mistas contínuas deve ser colocada uma armadura longitudinal adicional sobre os apoios de continuidade.

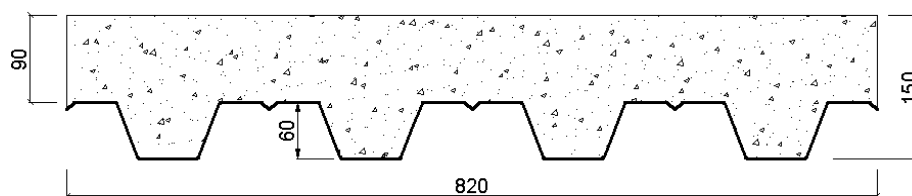


Figura 2.1 – Laje mista aço-betão

Uma laje mista deve ser verificada em duas fases:

- 1 – Fase construtiva;
- 2 – Fase definitiva (fase mista).

Na fase construtiva a chapa funciona como cofragem, servindo de plataforma para a execução dos trabalhos, para suportar o betão fresco, as armaduras e as restantes cargas de construção definidas na cláusula 9.3.2 da NP EN 1994-1-1. Nesta fase, a chapa metálica, eventualmente com escoramentos provisórios, constitui o único elemento resistente. Como se trata de um elemento metálico enformado a frio, o seu dimensionamento deve ser efectuado de acordo com o Eurocódigo 3: Parte 1.3 – Elementos e chapas finas enformados a frio (EN 1993-1-3). Como em geral as chapas apresentam maior resistência a flexão positiva e de forma a evitar a interacção com o esforço transversal, na fase de montagem adopta-se normalmente o modelo de chapa perfilada simplesmente apoiada entre apoios, incluindo os apoios provisórios. Quando as lajes não são escoradas, as deformações na fase de montagem podem ser significativas, logo devem ser verificadas e adicionadas às deformações da fase mista, ao verificar o estado limite de deformação na fase definitiva; nestas circunstâncias a flecha na fase definitiva deve ser calculada apenas para as sobrecargas de utilização e cargas permanentes que sejam aplicadas após a cura do betão, ou seja, já com a laje a trabalhar como mista.

Na fase definitiva (fase mista) as chapas perfiladas combinam-se estruturalmente com o betão, passando a funcionar como armadura de tracção. A análise e o dimensionamento da laje na fase definitiva devem ser efectuados de acordo com o Eurocódigo 4 – Projecto de Estruturas Mistas Aço-Betão (NP EN 1994-1-1).

As chapas perfiladas apresentam uma configuração do tipo da ilustrada na Figura 2.2, com as nervuras a desenvolverem-se segundo uma direcção. Antes do processo de enformagem, todas as chapas passam por um processo de galvanização (cerca de 20 μm em cada face), garantindo assim a protecção do aço contra os fenómenos de corrosão.

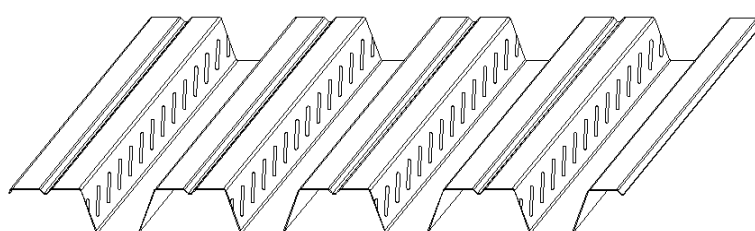


Figura 2.2 – Vista isométrica de uma chapa perfilada H60

2.2. Materiais

As propriedades mecânicas do aço das chapas perfiladas deverão ser obtidas a partir da EN 1993-1-3, secções 3.1 e 3.2. Os modelos de cálculo previstos na norma NP EN 1994-1-1 aplicam-se a chapas perfiladas fabricadas a partir de aço conforme as normas EN 10025, EN 10149-2, EN 10149-3 ou EN 10147.

As chapas H60 têm forma trapezoidal e são fabricadas em aço da classe S320 GD segundo a norma EN 10147. A diminuição de resistência na zona das bossas (almas dos perfil) é tida em conta na quantificação das propriedades geométricas da chapa utilizadas no cálculo.

O betão deve obedecer ao especificado no Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1). Segundo o Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1), no caso de betões de densidade normal, podem ser utilizadas classes C20/25 a C60/70. Embora no Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1) esteja prevista a utilização de betão leve, deve referir-se que os parâmetros de cálculo do corte longitudinal (parâmetros $m-k$) em lajes mistas, a utilizar no âmbito deste manual, são válidos apenas para betão de densidade normal.

As armaduras longitudinais de reforço devem ser definidas de acordo com o Eurocódigo 2 (NP EN 1992-1-1) ou regulamentação nacional ainda em vigor. O valor característico da tensão de cedência à tracção (f_{sk}) deverá estar compreendido no intervalo 400 MPa a 600 MPa.

A armadura de distribuição, em geral não contabilizada na avaliação da resistência da laje (excepto se verificar os mesmos requisitos de ductilidade que se exigem à armadura principal), pode ser constituída por rede electrossoldada, com um mínimo de $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ em cada direcção, segundo o Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1).

2.3. Modos de Rotura

2.3.1. *Estados limites últimos*

Na fase mista, as lajes podem romper por um dos três modos de rotura seguintes: **flexão** numa secção tipo I, **esforço transversal vertical** numa secção tipo III e **corte longitudinal** numa secção tipo II, sendo este último o modo de rotura mais comum (Figura 2.3). A resistência ao corte longitudinal pode ser obtida por diversos mecanismos: interligação mecânica através das bossas ou saliências existentes ao longo da superfície da chapa, atrito desenvolvido entre a chapa de aço e o betão e amarrações de extremidade.

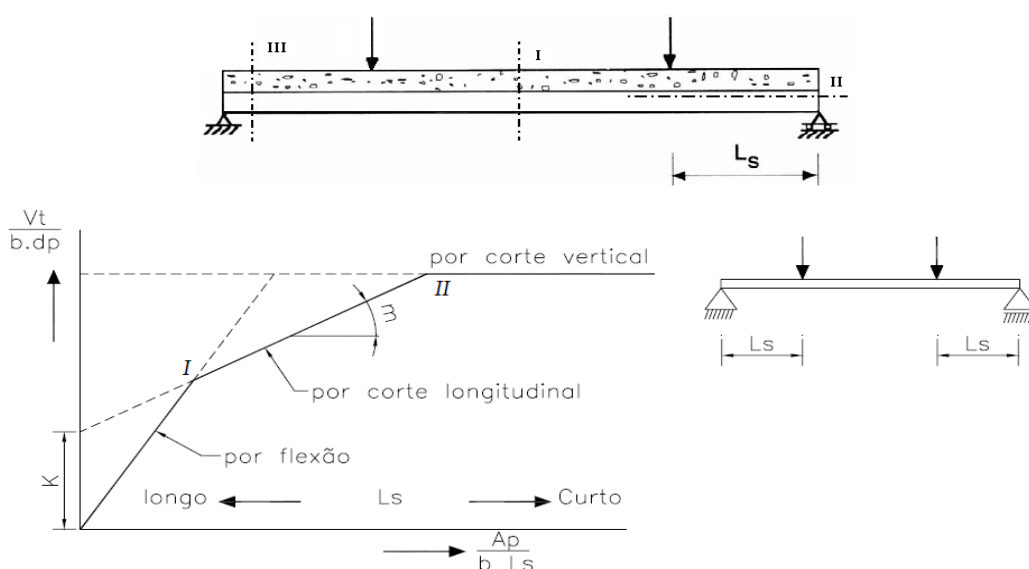


Figura 2.3 – Secções críticas e modos de rotura em lajes mistas

De acordo com a NP EN 1994-1-1, a avaliação da resistência ao esforço de corte longitudinal de uma laje mista pode ser feita por 2 processos: pelo método $m-k$ (o utilizado no âmbito do software H60 Calculator) ou pelo método da conexão parcial. Ambos os métodos requerem a realização de ensaios experimentais para determinação de parâmetros de cálculo, dos quais depende o valor da resistência ao corte longitudinal. As bossas das chapas perfiladas não são suficientes para que as lajes trabalhem em conexão total; em geral as lajes mistas trabalham em conexão parcial, ou seja, os momentos plásticos resistentes não são atingidos.

As lajes mistas estão preparadas para resistir essencialmente a cargas uniformemente distribuídas. A resistência a cargas lineares ou concentradas deve ser verificada de acordo com as condições específicas previstas na cláusula 9.4.3 da NP EN 1994-1-1.

De um modo geral as lajes mistas são dimensionadas como simplesmente apoiadas; contudo, podem também ser dimensionadas como contínuas, sendo para isso necessário prever armadura de continuidade nos apoios intermédios, junto à face superior.

A quantificação e combinação de acções para verificação dos estados limites últimos, tal como para outros tipos de estruturas, devem ser efectuadas de acordo com o Eurocódigo 0 (EN 1990) – Bases para o Projecto de Estruturas e com o Eurocódigo 1 (EN 1991) – Acções em Estruturas. Em alternativa poderá ser utilizada a regulamentação portuguesa RSA – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, enquanto estiver em vigor.

2.3.2. Estados limites de utilização

Em algumas situações, como sejam as lajes de grande vão e/ou de reduzida espessura, o dimensionamento pode ainda ser condicionado pela verificação das condições de serviço - estados limites de utilização. Em lajes mistas em geral o mais condicionante é o estado limite de deformação; adicionalmente poderá ainda ter de ser verificado o estado limite de vibração e o estado limite de fendilhação do betão.

A quantificação e combinação de acções para verificação dos estados limites de serviço, deve ser efectuada de acordo com o Eurocódigo 0 (EN 1990) – Bases para o Projecto de Estruturas e com o Eurocódigo 1 (EN 1991) – Acções em Estruturas. Em alternativa poderá ser utilizada a regulamentação portuguesa RSA – Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, enquanto estiver em vigor.

2.4. Disposições Construtivas

Na NP EN 1994-1-1 (cláusula 9.2) são impostas algumas disposições construtivas para este tipo de elemento estrutural, nomeadamente no que diz respeito à espessura e armadura das lajes, à dimensão dos agregados e às dimensões dos apoios.

De acordo com a Figura 2.4, a espessura total de uma laje mista h_t , não deve ser inferior a 80 mm, enquanto que a espessura da lâmina de betão h_c , situada acima da superfície plana no topo das nervuras das chapas perfiladas, não deve ser inferior a 40 mm. No caso de a laje ser

parte integrante de uma viga mista, o valor mínimo de h_t passa a ser de 90 *mm* e o valor mínimo de h_c passa para os 50 *mm*.

Devem ser colocadas armaduras transversais e longitudinais mínimas, na espessura de betão h_c , com uma área não inferior a 80 mm^2/m e com um espaçamento não superior ao menor dos valores $2h_t$ e 350 *mm*.

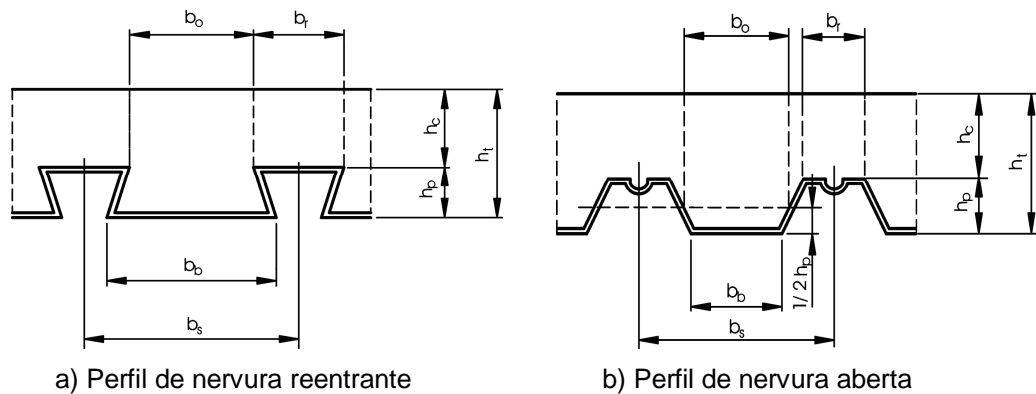


Figura 2.4 – Parâmetros geométricos das chapas e das lajes

A dimensão máxima dos agregados do betão não deve exceder o menor dos seguintes valores: 0.4 h_c , $b_o/3$ e 31.5 *mm*.

Para evitar qualquer danificação das lajes e dos apoios, permitindo que a fixação da chapa seja feita sem problemas e para que não ocorram anomalias estruturais devidas a um deslocamento das lajes ou das chapas durante a construção, os comprimentos dos apoios l_{bc} e l_{bs} , indicados na Figura 2.5, não devem ser inferiores 75 *mm* e 50 *mm*, respectivamente, no caso de lajes mistas apoiadas em vigas de aço ou de betão; em lajes mistas apoiadas sobre outros materiais, os comprimentos mínimos l_{bc} e l_{bs} , são de 100 *mm* e 70 *mm*, respectivamente.

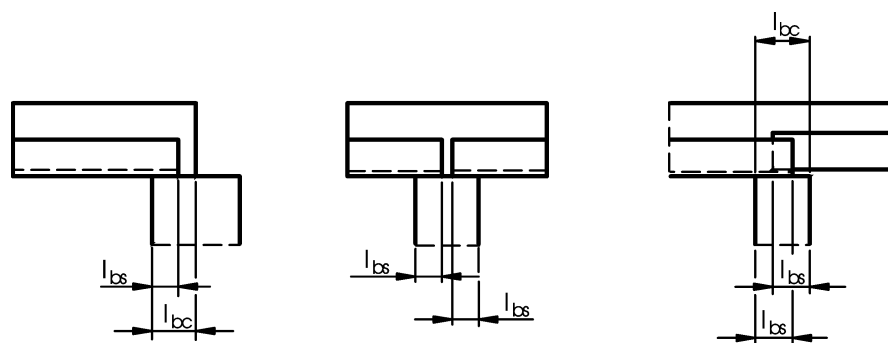


Figura 2.5 – Comprimentos de apoio mínimos

3. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO H60 CALCULATOR

3.1. Introdução

A utilização de um software de cálculo pressupõe que o utilizador conhece e domina os modelos de cálculo e dimensionamento envolvidos. Os dados de entrada e as situações previstas podem ser mais ou menos complexas; a necessidade de considerar muitas situações implica uma maior complexidade em termos de programação e pode tornar o programa menos atractivo para as utilizações correntes. Assim no desenvolvimento do software **H60 Calculator** tentou encontrar-se um equilíbrio entre eficiência e simplicidade de aplicação prática. Por isso algumas situações menos correntes, como seja a aplicação de cargas concentradas importantes, a existência de furos, etc... não são directamente incorporadas, devendo ser tratadas caso a caso de acordo com a regulamentação aplicável (NP EN 1994-1-1).

A seguir apresentam-se os dados de base e todos os pressupostos de cálculo e dimensionamento previstos no software de cálculo, desde a definição dos materiais, modelos estruturais, tipos de carregamento, entre outros.

3.2. Dados da Chapa Perfilada H60

A chapa H60 enformada a frio, com uma forma trapezoidal, é representada na Figura 3.1.

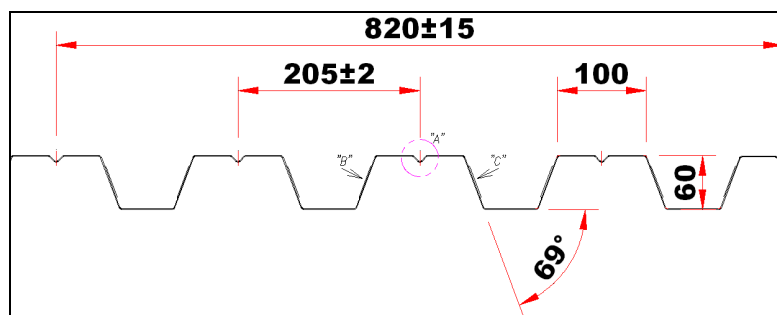


Figura 3.1 – Geometria da chapa H60

O aço da chapa perfilada é da classe S320 GD (segundo a norma EN 10147), com uma tensão nominal de cedência $f_{yp} = 320 \text{ MPa}$. As propriedades geométricas e mecânicas da chapa, mais relevantes para a análise da fase mista são indicadas no Quadro 3.1; as propriedades geométricas e mecânicas da chapa relevantes para a fase de montagem são indicadas no Quadro 3.2.

Quadro 3.1 – Características mecânicas do perfil H60 - secção total

Espessura da chapa mm	Peso Próprio kN/m ²	$A_{nominal}$ cm ² /m	A_{pe} cm ² /m	h mm	y_G mm	I_p cm ⁴ /m
0.7	0.078	9.90	9.17	60	34	56.10
0.8	0.089	11.37	10.59	60	34	64.59
1.0	0.111	14.20	13.34	60	34	81.61
1.2	0.134	17.02	16.15	60	34	98.59

Notas: A_{pe} representa uma área equivalente, reduzindo a espessura das almas para ter em conta a redução da tensão de cedência nessas zonas;

O centro de gravidade (distância y_G) é referenciado à base da chapa perfilada;

h representa a altura do perfil da chapa e I_p o momento de inércia.

Quadro 3.2 – Características mecânicas do perfil H60 – secção efectiva em flexão positiva

Espessura da chapa mm	A_{ef} cm ² /m	$y_{G,ef}$ mm	$V_{Rd,ef}$ kN/m	I_{ef} cm ⁴ /m	$W_{el,ef}$ cm ³ /m	$M_{Rd,ef}$ kNm/m	EI_{ef} kNm ² /m
0.7	7.82	29.8	48.09	45.98	15.2	4.9	96.56
0.8	9.07	30.0	63.77	53.49	17.8	5.7	112.33
1.0	11.59	30.3	101.75	68.60	22.6	7.2	144.06
1.2	14.12	30.6	132.18	83.84	27.4	8.8	176.06

Notas: A_{ef} , $y_{G,ef}$, I_{ef} e $W_{el,ef}$ representam a área, a posição do centro de gravidade, o momento de inércia e o módulo elástico de flexão da secção efectiva em flexão positiva, respectivamente;

$V_{Rd,ef}$ e $M_{Rd,ef}$ representam o esforço transversal e o momento flector resistente da secção efectiva da chapa, respectivamente;

EI_{ef} é a rigidez de flexão da secção efectiva em flexão positiva.

3.3. Dados Referentes à Laje Mista

No Quadro 3.3 são apresentados os volumes e pesos próprios do betão por metro quadrado de laje, para as diferentes espessuras, considerando $\gamma_{betão} = 25 \text{ kN/m}^2$.

Quadro 3.3 – Volume e peso próprio do betão

H (cm)	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Volume (m ³ /m ²)	0.064	0.074	0.084	0.094	0.104	0.114	0.124	0.134	0.144	0.154	0.164	0.174	0.184	0.194	0.204	0.214
Peso (kN/m ²)	1.60	1.85	2.10	2.35	2.60	2.85	3.10	3.35	3.60	3.85	4.10	4.35	4.60	4.85	5.10	5.35

Nos Quadros 3.4 a 3.6 são indicados os valores dos momentos de inércia relevantes para as 3 classes de betão consideradas: C20/25, C25/30 e C30/37. No cálculo da inércia para flexão negativa foi assumida uma armadura de continuidade constituída por varões ϕ 10 mm afastados de 0.15 m, com uma área de $5.24 \text{ cm}^2/\text{m}$; esta área não inclui a armadura de distribuição, pois esta, em particular quando constituída por rede electrossoldada, pode não possuir ductilidade suficiente (cláusula 5.5.1 (6) da NP EN 1994-1-1).

Quadro 3.4 – Momentos de inércia de lajes mistas com chapa H60 e betão C20/25

Betão	Chapa (mm)		Inércia (cm ⁴ /m)	Espessura da laje (cm)															
				10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20	21	22	23	24	25
C20/25	0,70	Flexão +	Fendilhada	239	311	396	495	608	734	875	1030	1199	1383	1581	1795	2023	2266	2525	2798
			Não fendilhada	475	625	805	1020	1273	1568	1908	2297	2739	3237	3795	4416	5105	5863	6696	7606
		Média	357	468	601	757	940	1151	1391	1663	1969	2310	2688	3106	3564	4065	4610	5202	
	0,80	Flexão +	Fendilhada	89	125	169	219	277	343	416	497	586	683	788	901	1022	1152	1290	1436
			Não fendilhada	265	345	439	549	674	815	972	1145	1334	1540	1763	2003	2259	2532	2823	3131
		Média	491	644	829	1049	1308	1610	1958	2356	2807	3315	3883	4515	5215	5986	6832	7757	
	1,00	Flexão +	Fendilhada	378	494	634	799	991	1213	1465	1750	2071	2428	2823	3259	3737	4259	4828	5444
			Não fendilhada	89	125	169	219	277	343	416	497	586	683	788	901	1022	1152	1290	1436
		1,20	Flexão +	Fendilhada	312	405	516	646	794	961	1148	1355	1581	1828	2095	2382	2690	3020	3370
	Não fendilhada			520	681	875	1105	1376	1691	2053	2467	2935	3462	4050	4704	5427	6223	7095	8046
	Média		416	543	696	876	1085	1326	1601	1911	2258	2645	3073	3543	4059	4621	5232	5893	
	1,20	Flexão +	Fendilhada	89	125	169	219	277	343	416	497	586	683	788	901	1022	1152	1290	1436
			Não fendilhada	355	460	586	733	903	1094	1308	1545	1805	2089	2397	2729	3086	3467	3872	4303
		Média	549	716	918	1159	1441	1768	2145	2574	3059	3604	4212	4887	5632	6451	7348	8326	
	1,20	Flexão +	Fendilhada	452	588	752	946	1172	1431	1726	2059	2432	2846	3304	3808	4359	4959	5610	6315
			Não fendilhada	89	125	169	219	277	343	416	497	586	683	788	901	1022	1152	1290	1436
Média		89	125	169	219	277	343	416	497	586	683	788	901	1022	1152	1290	1436		

Quadro 3.5 – Momentos de inércia de lajes mistas com chapa H60 e betão C25/30

Betão	Chapa (mm)		Inércia (cm ⁴ /m)	Espessura da laje (cm)															
				10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20	21	22	23	24	25
C25/30	0,70	Flexão +	Fendilhada	241	314	400	500	613	740	882	1038	1208	1394	1593	1808	2038	2283	2542	2817
			Não fendilhada	488	641	826	1047	1307	1611	1961	2361	2816	3328	3903	4542	5251	6032	6889	7827
		Flexão -	Média	365	478	613	773	960	1176	1421	1700	2012	2361	2748	3175	3644	4157	4716	5322
			Fendilhada	90	127	171	222	280	347	421	502	592	690	795	909	1031	1162	1300	1447
	0,80	Flexão +	Fendilhada	267	348	443	554	680	822	981	1155	1346	1553	1777	2018	2276	2552	2844	3153
			Não fendilhada	503	661	851	1077	1343	1653	2011	2420	2884	3406	3991	4641	5362	6155	7026	7978
		Flexão -	Média	385	504	647	815	1012	1238	1496	1787	2115	2480	2884	3330	3819	4353	4935	5566
			Fendilhada	90	127	171	222	280	347	421	502	592	690	795	909	1031	1162	1300	1447
	1,00	Flexão +	Fendilhada	315	409	522	653	802	971	1159	1368	1596	1844	2114	2403	2714	3045	3398	3771
			Não fendilhada	533	698	897	1133	1411	1735	2107	2532	3013	3554	4159	4831	5575	6393	7290	8268
		Flexão -	Média	424	554	709	893	1107	1353	1633	1950	2304	2699	3136	3617	4144	4719	5344	6020
			Fendilhada	90	127	171	222	280	347	421	502	592	690	795	909	1031	1162	1300	1447
	1,20	Flexão +	Fendilhada	359	465	593	742	912	1106	1322	1561	1824	2110	2421	2755	3114	3498	3907	4341
			Não fendilhada	562	734	941	1187	1476	1812	2199	2639	3137	3697	4321	5015	5781	6623	7545	8550
		Flexão -	Média	460	599	767	964	1194	1459	1760	2100	2480	2903	3371	3885	4448	5061	5726	6446
			Fendilhada	90	127	171	222	280	347	421	502	592	690	795	909	1031	1162	1300	1447

Quadro 3.6 – Momentos de inércia de lajes mistas com chapa H60 e betão C30/37

Betão	Chapa (mm)		Inércia (cm ⁴ /m)	Espessura da laje (cm)																
				10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	20	21	22	23	24	25	
C30/37	0,70	Flexão +	Fendilhada	246	319	407	508	623	752	896	1054	1227	1414	1616	1833	2066	2313	2576	2854	
			Não fendilhada	513	674	869	1102	1376	1696	2066	2489	2969	3510	4117	4793	5542	6368	7276	8268	
		Média	379	497	638	805	1000	1224	1481	1771	2098	2462	2867	3313	3804	4341	4926	5561		
	0,80	Flexão +	Fendilhada	92	130	175	227	286	354	429	512	603	702	809	925	1048	1180	1321	1470	
			Não fendilhada	272	354	451	564	692	836	997	1174	1367	1577	1804	2049	2310	2588	2884	3197	
		Média	528	694	894	1132	1413	1739	2117	2548	3037	3588	4206	4893	5654	6493	7414	8420		
	1,00	Flexão +	Fendilhada	400	524	673	848	1052	1288	1557	1861	2202	2583	3005	3471	3982	4540	5149	5808	
			Não fendilhada	92	130	175	227	286	354	429	512	603	702	809	925	1048	1180	1321	1470	
		1,20	Flexão +	Fendilhada	321	418	532	665	818	989	1181	1392	1624	1876	2149	2443	2758	3093	3450	3829
	Não fendilhada			558	732	940	1189	1482	1822	2214	2661	3168	3738	4376	5085	5869	6733	7679	8713	
	Média		440	575	736	927	1150	1406	1697	2027	2396	2807	3262	3764	4313	4913	5565	6271		
	1,20	Flexão +	Fendilhada	92	130	175	227	286	354	429	512	603	702	809	925	1048	1180	1321	1470	
			Não fendilhada	366	475	605	757	931	1128	1348	1591	1858	2149	2465	2805	3169	3559	3973	4413	
		Média	588	768	985	1244	1548	1901	2307	2770	3294	3882	4540	5270	6077	6965	7937	8997		
	1,20	Flexão -	Fendilhada	477	621	795	1000	1239	1514	1827	2180	2576	3016	3502	4037	4623	5262	5955	6705	
			Não fendilhada	92	130	175	227	286	354	429	512	603	702	809	925	1048	1180	1321	1470	

3.4. Pressupostos de Cálculo e Dimensionamento

O programa de cálculo automático **H60 Calculator** foi desenvolvido em conformidade com as regras previstas no Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1). Contudo, de forma a tornar a sua aplicação simples e prática, foram introduzidas algumas simplificações de cálculo, compatíveis com o que é assumido na prática corrente do projecto de estruturas mistas aço-betão. Algumas situações mais específicas, tais como a verificação de lajes para cargas pontuais ou lineares de valor significativo não foram incluídas no programa. Estas situações, são em geral evitadas na prática, pois os elementos laminares de reduzida espessura não apresentam um bom comportamento em relação a este tipo de cargas.

A seguir indicam-se os principais pressupostos de cálculo e dados previstos no âmbito da utilização do software **H60 Calculator**.

i) *Pressupostos relativos à fase mista*

- Betão de classe C20/25, C25/30 e C30/37;
- Espessuras de chapa de 0,7, 0,8, 1,0, e 1,2 mm;
- Espessuras da laje mista entre 100 e 250 mm;
- Cargas uniformemente distribuídas na fase definitiva (fase mista);
- Flecha máxima admissível pode ser escolhida em função do tipo de utilização;
- O nível de vibração admissível introduzido pela movimentação de pessoas pode ser escolhido em função do tipo de utilização;
- O cálculo estrutural é feito admitindo que os apoios da laje permitem rotação livre, mas não permitem afundamento (apoios rígidos);

- A fluência do betão a longo prazo é tida em conta considerando um módulo de elasticidade reduzido dado por $E_c = E_{cm}/2$;
- Armadura mínima de $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ em cada direcção na face superior;
- Nas lajes mistas contínuas é considerada uma redistribuição de momentos flectores negativos de 30% para verificação dos estados limites últimos;
- Na verificação dos estados limites de utilização em lajes de 1 tramo é utilizada a média entre a inércia fissurada e a inércia não fissurada; adicionalmente, em lajes de 2 tramos, com relações entre o tramo menor e o tramo maior não inferior a 0.6, na zona do apoio intermédio, numa extensão igual 15% do vão para cada lado do apoio, é considerada a inércia da secção fendilhada em flexão negativa;
- A armadura de continuidade em lajes mistas contínuas é constituída por varões $\phi 10 \text{ mm} // 0.15 \text{ m}$ em aço A 400 NR ou A 500 NR;
- Parâmetros m e k obtidos para lajes de espessura 0.7 mm : $m = 98.32 \text{ N/mm}^2$ e $k = 0.08 \text{ N/mm}^2$; estes valores foram também usados para as lajes com chapa de espessura 0.8 mm , 1.0 mm e 1.2 mm , tal como previsto na NP EN 1994-1-1;
- Os valores de m e k obtidos nos ensaios realizados com betão C25/30, são válidos para a classe C20/25 e para todas as classes superiores à C25/30;
- No cálculo das áreas A_{pe} , devido ao efeito “harmónica”, na zona das bossas foi considerada uma espessura reduzida.

ii) Pressupostos relativos à fase construtiva

- Na fase construtiva as chapas são sempre consideradas como simplesmente apoiadas entre qualquer apoio ou escoramento;
- As chapas são verificadas para os estados limites últimos de esforço transversal e de flexão e para os estados limites de serviço (deformação); para verificação do estado limite de serviço foi considerada como limite uma flecha máxima de $L/240$, considerando apenas o peso da chapa e do betão fresco, tal como previsto na EN NP 1994-1-1;
- Na fase construtiva foram consideradas as acções indicadas na Figura 3.2; a carga 1 representa o peso próprio da chapa mais o betão fresco, a carga 2 representa uma sobrecarga construtiva com uma largura máxima de actuação de 3 metros e a carga 3 representa também uma sobrecarga construtiva que deve ser aplicada, quando a largura é superior a 3 metros, na área excedente; como simplificação conservativa, a carga 2 foi considerada em toda a área, excluindo por isso a aplicação da carga 3;

- Foi ainda considerado o efeito de poça, traduzido por um aumento da espessura de betão devido à deformação das chapas. Este efeito deve ser incluído sempre que a flecha a meio-vão para condições de serviço seja superior a $1/10$ da espessura total final da laje mista. O acréscimo de espessura foi considerado igual a 0.7 vezes a flecha a meio-vão, para efeitos de cálculo dos esforços actuantes e da flecha máxima.
- A verificação da fase de montagem é efectuada à priori; o programa **H60 Calculator** apenas indica para cada laje dimensionada para a fase definitiva, qual a distância máxima entre linhas de escoramentos para que as condições de resistência e de deformabilidade na fase de montagem sejam verificadas.

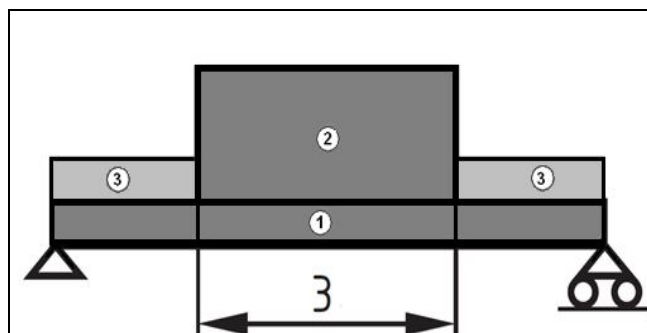


Figura 3.2 – Esquema de cargas para a fase construtiva

3.5. Descrição e aplicação do programa de cálculo automático

i) Instalação

Para instalar o software H60 Calculator deve correr o programa *Setup.exe* que se encontra na raiz do CD ou directório de instalação.

Deve ler o *leame.txt* que também se encontra no CD se tiver dificuldades na instalação.

[Directório INSTALAÇÃO , ou (Drive CD ROM)] : setup.exe

Normalmente, nos computadores que tiverem o sistema operativo Windows XP, Windows Vista ou Windows 7 última versão, o programa de instalação corre automaticamente em "**autorun**" ou seja sozinho na introdução do CD no CD ROM .

Se não possuir um CD ou achar que o que possui está estragado, por favor na hesite, contacte para a morada do OFELIZ, SA ou peça enviando um eMail.

O software **H60 Calculator** só deve ser instalado nos sistemas operativos, Windows XP, Windows Vista ou Windows 7. Não necessita de *Upgrades* nem de *fixPaths* extra para trabalhar. Basta uma versão normal do Windows XP, Vista ou 7. O programa deve ser instalado por um *User* com permissão de instalação de programas. Se não for esse o seu caso deve contactar o administrador do sistema da sua empresa.

O programa de instalação só faz uma pergunta, “Local de Instalação”, por defeito a instalação é feita na [**PERSONAL FOLDER**], pasta pessoal, não no directório de programas, se tiver permissão para isso indique outro local de instalação, caso ache que é importante instalar noutra local.

Normalmente a instalação na pasta pessoal não traz conflitos e é o local mais apropriado para programas técnicos.

Caso a sua pasta pessoal esteja sediada num servidor de rede e a sua rede seja lenta deve instalar numa pasta local.

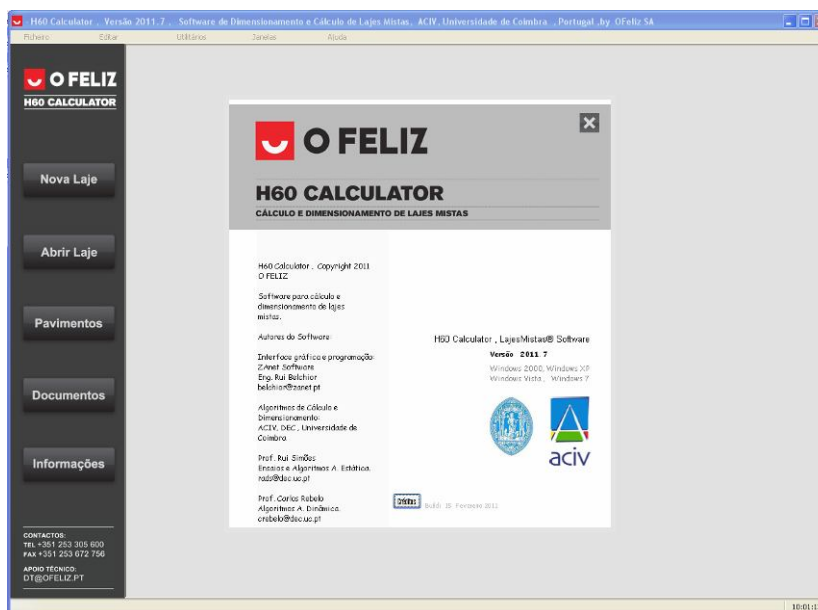
Deve responder ao Instalador no botão seguinte [**Next**], e no final o instalador diz se tudo correu bem.

Para iniciar o seu trabalho basta **clicar** num dos atalhos do software, no ambiente de trabalho ou no menu INICIAR.

ii) Iniciar o trabalho

Após correr o programa vai aparecer o dialogo de **About**, acerca; se isso não acontecer tente outra vez com **duplo click** no atalho .

Esta é a sua primeira imagem do software.



Como pode verificar, o software têm uma interface semelhante a outros programas do Windows, um menu superior que permite gerir os ficheiros e janelas, poderá viajar pelos menus e familiarizar-se com os atalhos dos menus. Os atalhos são os comuns em Windows, ABRIR, GUARDAR, ..AJUDA,..etc,.. AJUDA Etc.

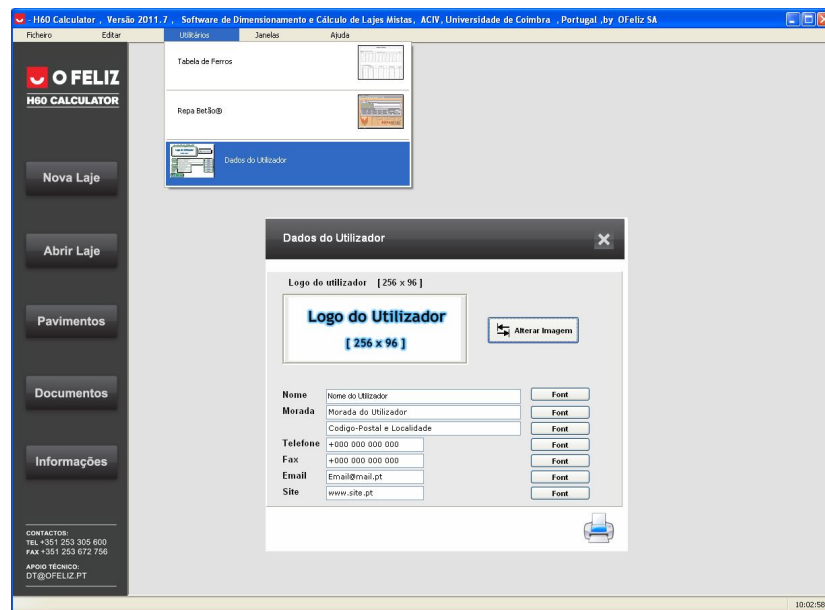
Como pode verificar a interface (ver figura superior), contém botões laterais de acesso rápido a itens mais usuais no programa.

Nova Laje, Abrir Laje, Pavimentos, Documentos, Informações.

Mais à frente neste manual existe uma explicação detalhada sobre a função de cada Botão.

A primeiro passo que deve executar no software (só necessita fazer este passo uma vez, o software guarda para sempre estes dados e para todos os projectos) é preencher os dados do utilizador; caso não faça este passo, nas impressões não vai aparecer o seu logo nem os seus dados de projectista.

1º passo



Pode criar uma imagens no **PAINT** ou outro software com as dimensões indicadas (**256x96 pontos**) e introduzir clicando no botão <Alterar Imagem>.

Deve também alterar os outros dados como **NOME**, **MORADA** etc,,...,etc

Por fim clicar no canto superior da janela **[X]**, na cruz, para sair e o software guardar os **DADOS**; se se enganar ou achar que os dados não estão correctos ou ao seu gosto, volte a este atalho e altere o que está mal.

Pode ter uma ideia de como vai ficar, clicando na impressora e imprimindo uma folha tipo.

Começar a usar o H60 Calculator.

2º passo

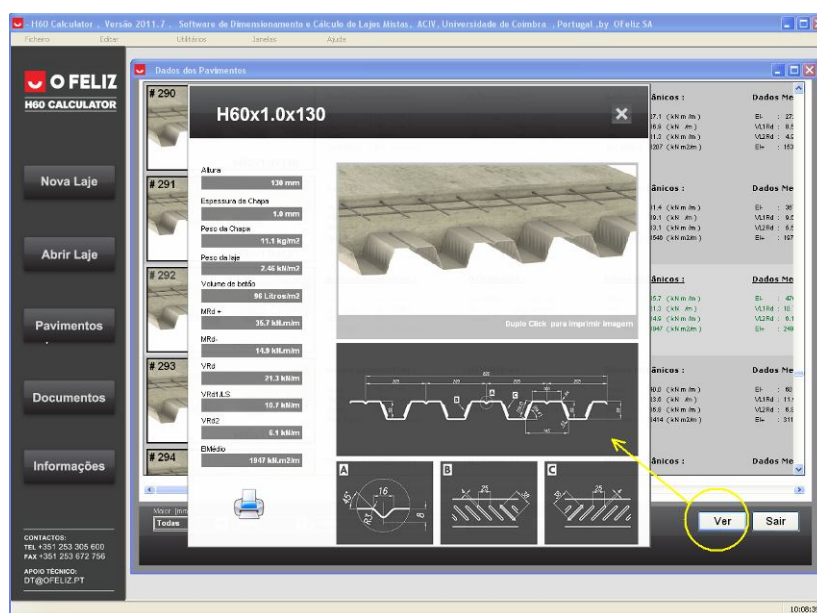


Prima o botão lateral <Pavimentos>; circulo a amarelo; vai aparecer um diálogo como mostra a imagem em cima.

Este diálogo tem como título “**Dados dos Pavimentos**”, através deste diálogo pode ter acesso a toda a informação sobre os pavimentos para laje que se podem construir com as chapas H60 de Ofeliz, SA.; para mais informações pode ler a documentação sobre as lajes mistas e dados das chapas H60.

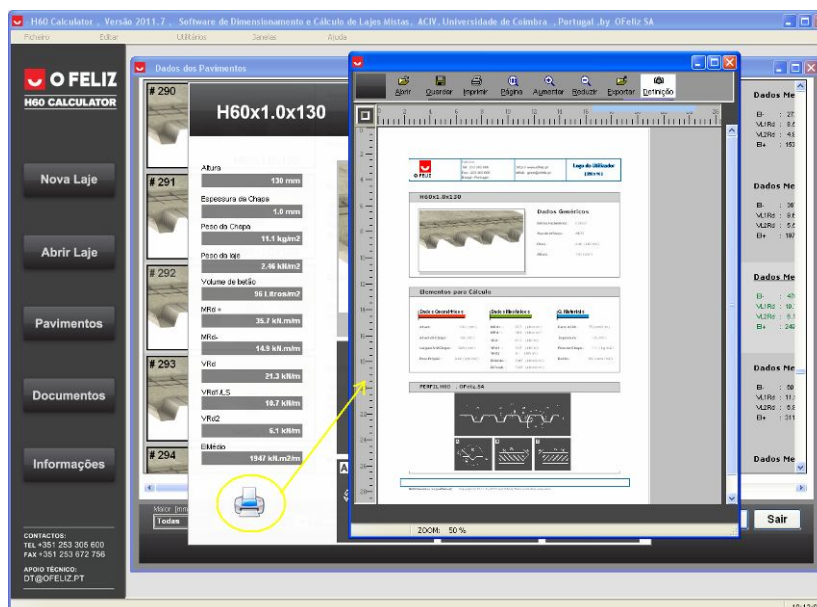
Como pode verificar o diálogo disponibiliza uma colecção de lajes que pode consultar na lista aplicando <**FILTROS**>; opções de escolha; tipo Menor que, Maior que, tipo de betão, Espessura chapa e aço de reforço.

Seleccione uma das lajes da colecção na lista e Prima o botão <Ver>



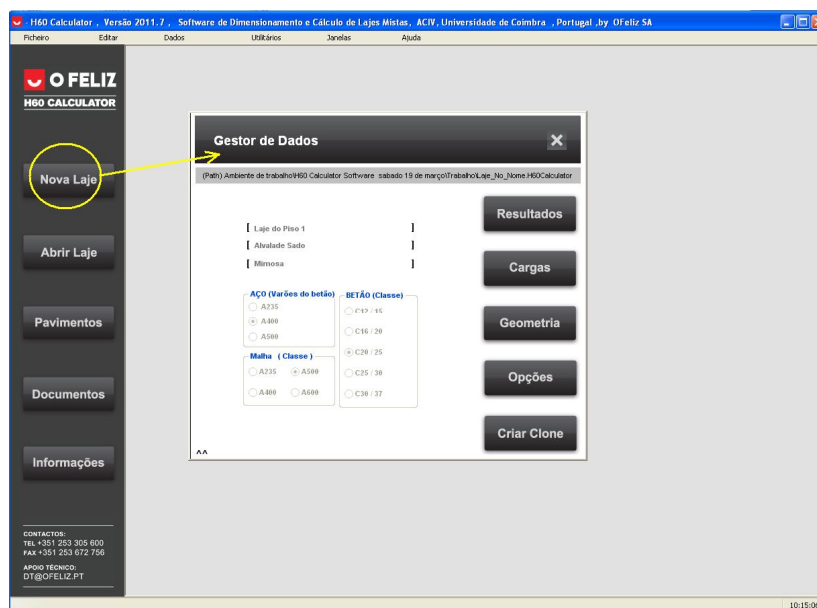
Vai ter acesso aos dados detalhados e em pormenor do pavimento seleccionado através de um novo diálogo. Para imprimir “**Click**” na impressora.

Vai aparecer um novo diálogo <RepView> que é um Pré-visualizador onde finalmente pode imprimir para a impressora ou outro dispositivo disponível.



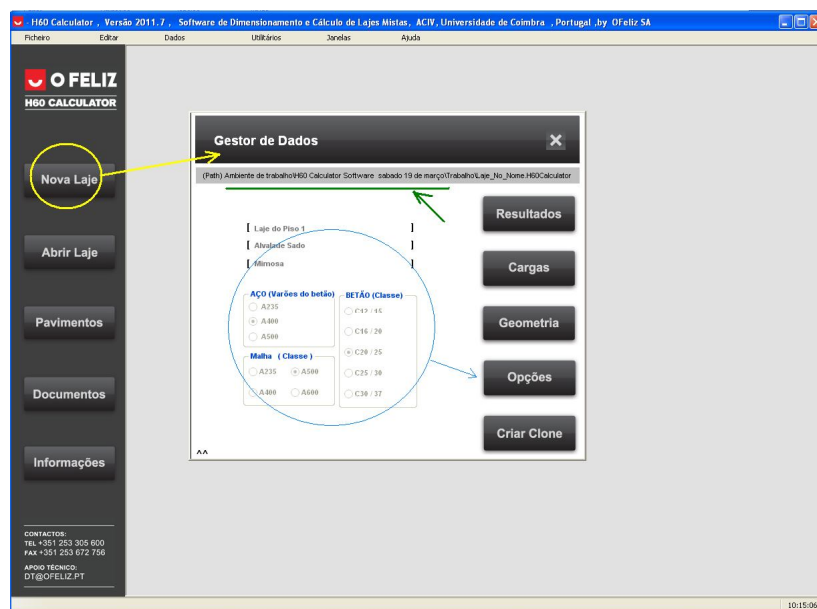
Para começar um novo projecto a que chamamos “Nova Laje”

Prima botão <Nova Laje>; circulo amarelo.



O software vai “lançar” uma janela para o “desktop” a cinza como mostra a figura acima.

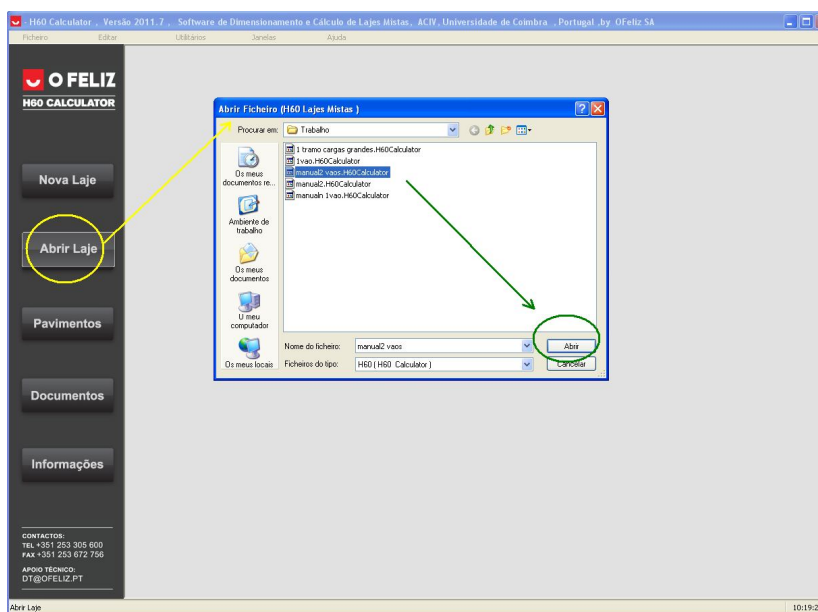
Esta janela têm o nome de Gestor de Dados.



Sublinhado no manual “não aparece no software”, o caminho de arquivo dos dados do projeto. O círculo azul são os dados referente ao botão do gestor activo, (**Opções, Geometria, Cargas, Resultados**).

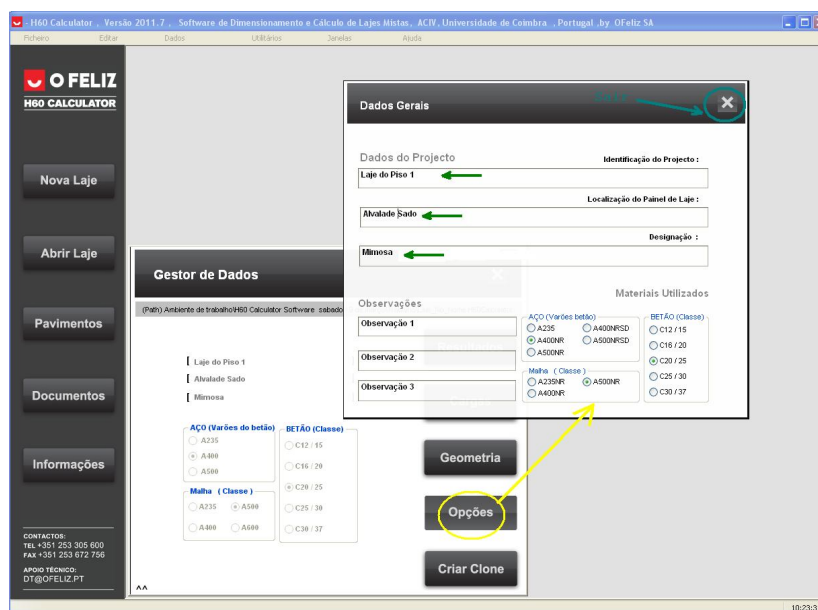
Para Abrir um projecto existente

Prima botão <Abrir Laje>; circulo amarelo



A utilização é semelhante a qualquer programa corrente do Windows.

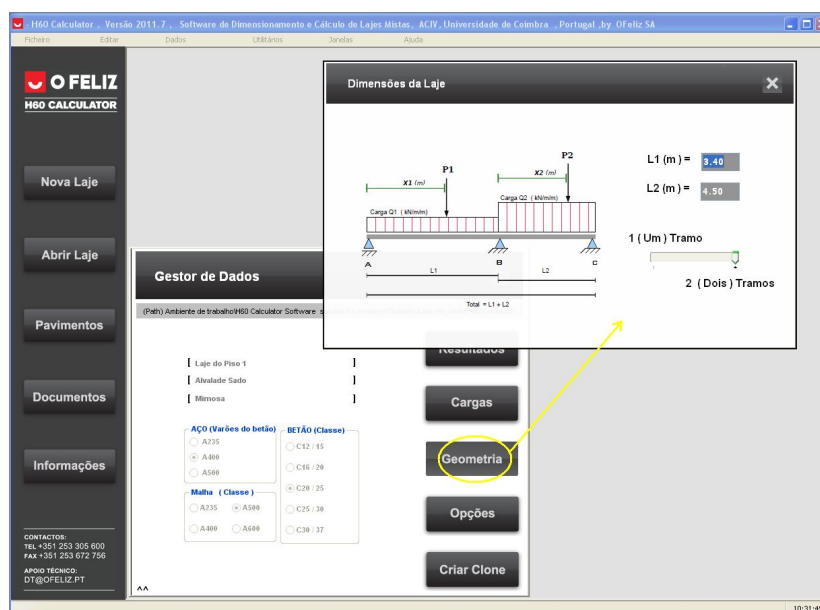
*No gestor de Dados; Circulo Amarelo em baixo; têm acesso aos dados do projecto. “**DADOS GERAIS**”.*



Nos dados gerais deve indicar os dados do projecto assim como os tipos de materiais que quer usar.

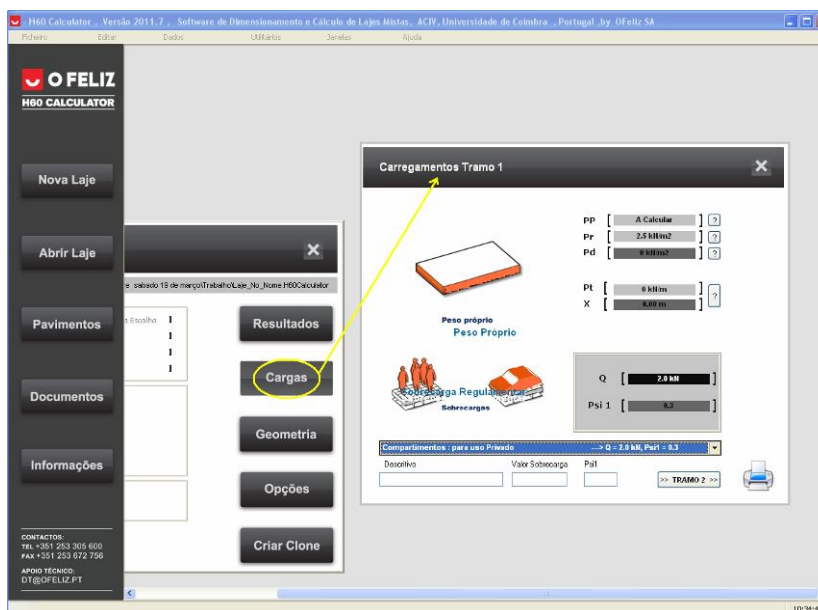
Prima [X] a verde para Sair (o software Guarda automaticamente as modificações efectuadas).

No Gestor de Dados; Circulo Amarelo em baixo; têm acesso aos dados do tipo de geometria. “**Dimensões da Laje**”.



Deve escolher se pretende fazer um cálculo de uma laje com 1 tramo ou dois tramos e indicar as respectivas distâncias entre eixos de apoio (L1 ou L2).

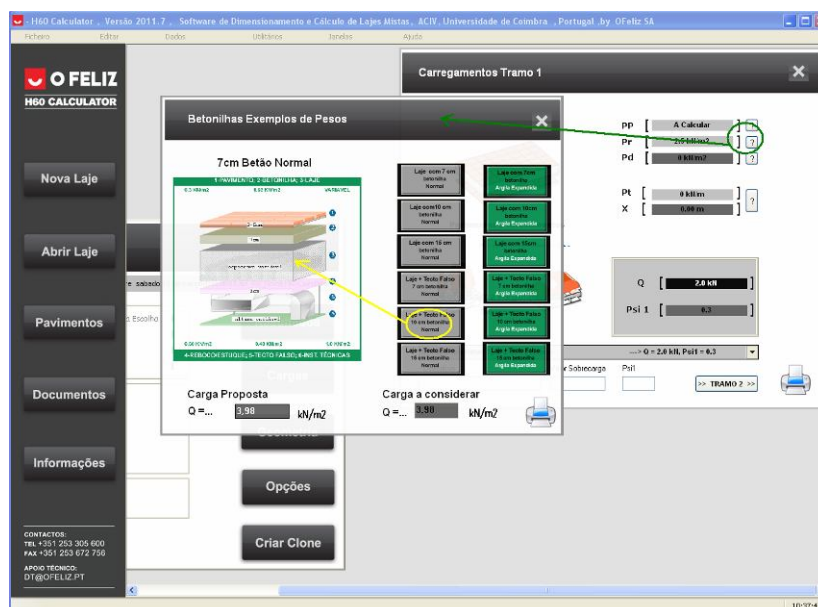
No Gestor de Dados; Circulo Amarelo em baixo; têm acesso aos dados das Cargas “**Carregamentos Tramo 1**”.



Neste diálogo introduza os dados do tramo 1 ou passe para o tramo 2, no caso de ter 2 tramos. Pode também imprimir todas as cargas introduzidas.

No diálogo “Carregamentos Tramo 1”, imagem anterior, pode verificar que a introdução das cargas está dividida em vários carregamentos, PP (peso Próprio, Pr (Pavimentos Revestimentos), Pd (Paredes Divisórias), Pt (Paredes Transversais), Q e Psi1 (Parâmetros da Sobrecarga).

*Clicando no Botão <?> frente a **Pr** passamos a outro Diálogo como mostra a imagem abaixo.*



Aparece um diálogo com título “**Betonilhas Exemplos de Pesos**”, imagem anterior, podemos questionar o software clicando num dos botões que indicam as hipóteses disponíveis.

Ex: clicando (a Amarelo) altera a figura e o valor proposto.

Pode imprimir todas as opções disponíveis no software.

(Click na impressora)

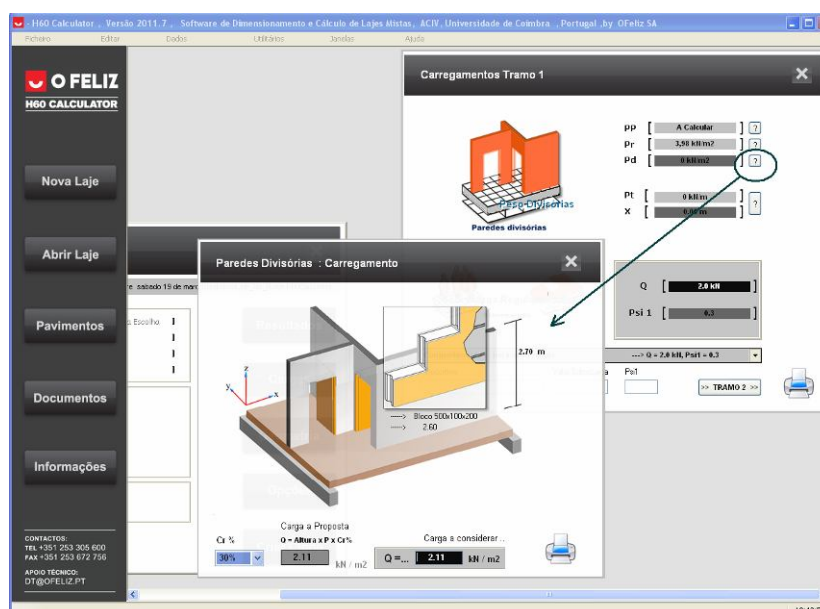
O valor que vai considerar no cálculo é o que colocar em “Carga a Considerar”.

Para voltar ao diálogo anterior .

(Click [X])

O valor fica arquivado e vai ser considerado o que colocou ou escolheu.

*Clicando no Botão <?> frente a **Pd** passamos a outro Diálogo como mostra a imagem abaixo.*



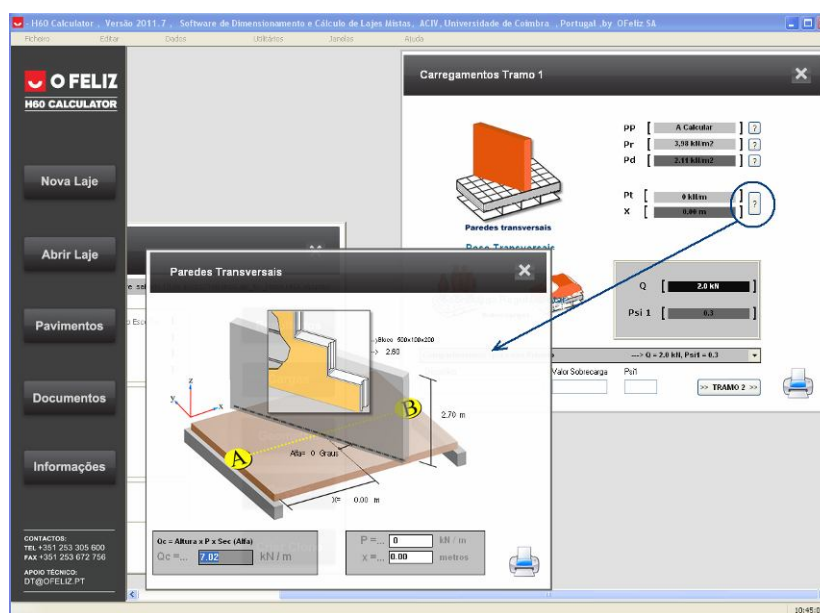
Aparece um diálogo com título “**Paredes divisórias: Carregamentos**”, imagem anterior, podemos alterar o coeficiente “**Cr%**” (Valor em percentagem do efeito a distribuir. Clicando no

valor da altura (2,70 m) podemos indicar a altura desejada. Clicando na imagem (parede com Duplo Click) podemos alterar o tipo de parede.

Pode imprimir todas as opções disponíveis no software .

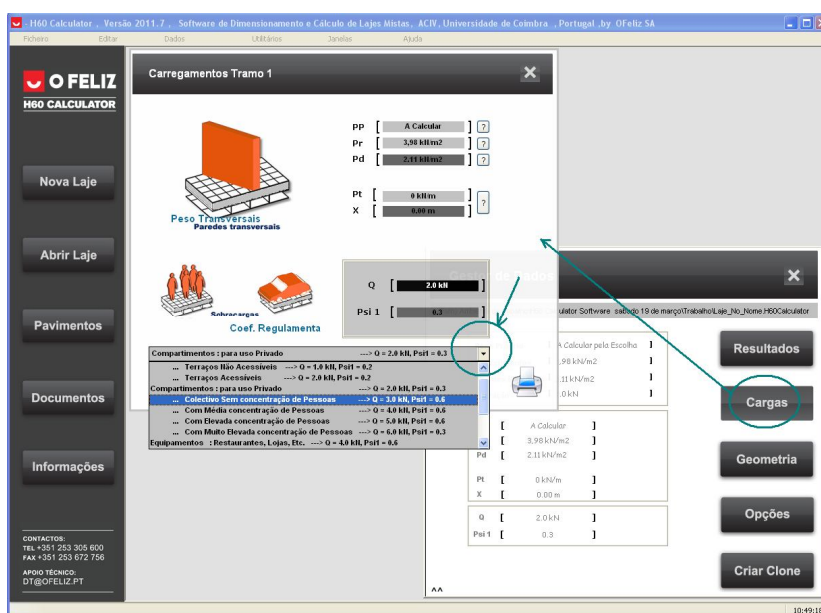
(Click na impressora)

Clicando no Botão <?> frente a Ptpassamos a outro Diálogo como mostra a imagem abaixo.



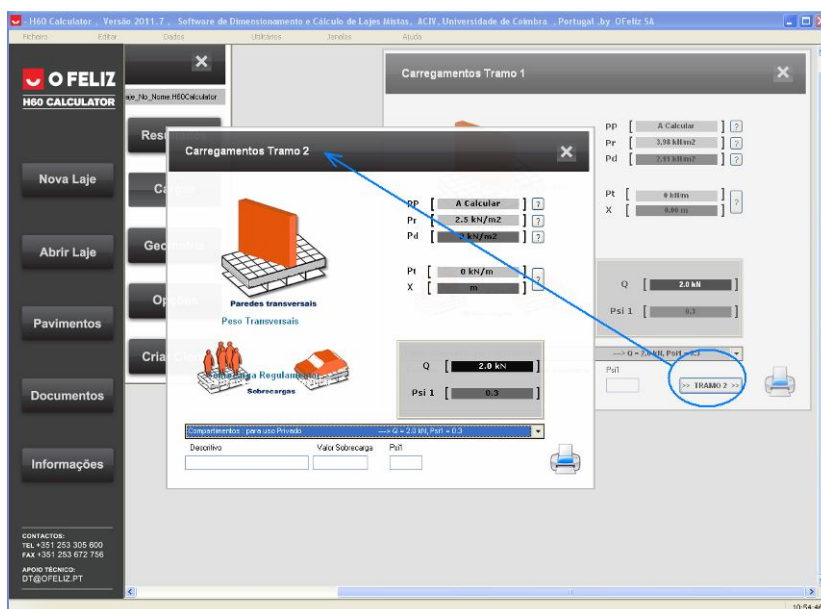
Este diálogo tem a mesma metodologia de utilizados dos anteriores.

*Clicando (com **Duplo Click**) na zona a Cinza de " Q e Psi 1 " ou no botão da lista como indica o circulo a (verde) , pode escolher uma sobrecarga e um Psi 1 associado.*



Após ter colocado a informação de todas as cargas nos diálogos anteriores.

Click no botão < " >> **Tramo 2** >> " >, como indica a seta a azul , imagem seguinte, e aparece um novo diálogo " Carregamentos Tramo 2" , Esta opção só vai existir se estiver a introduzir dados numa laje com 2 tramos .

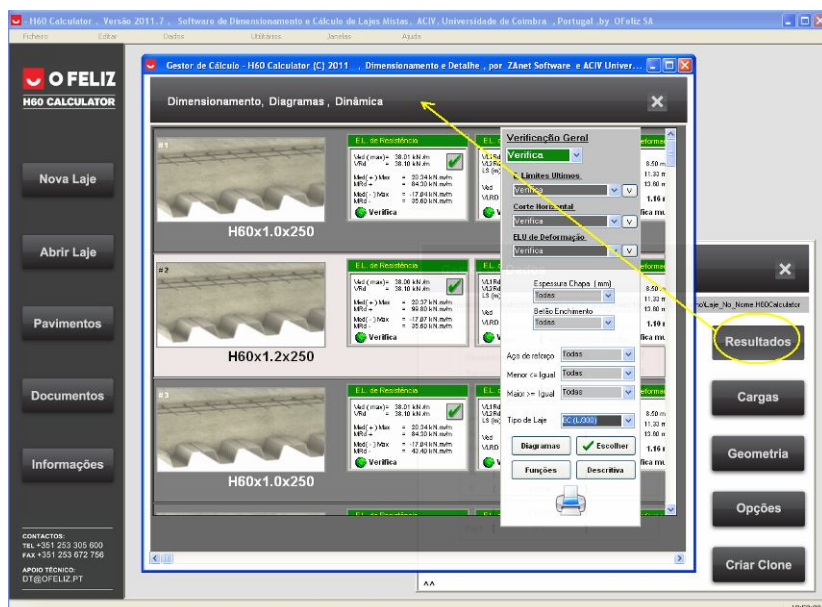


Repita todos os passos que foram explicados para os carregamentos do tramo 1, e Para voltar ao diálogo anterior .

(Click [X])

Dimensionamento :

No Gestor de Dados ; Circulo Amarelo em baixo; têm acesso aos resultados “**Dimensionamento, Diagramas, Dinâmica**”, como pode ver imagem seguinte.



Este diálogo é um diálogo que permite através de filtros seleccionar as informações das lajes que verificam assim como as que não verificam e obter informação sobre os valores de dimensionamento e valores resistentes.

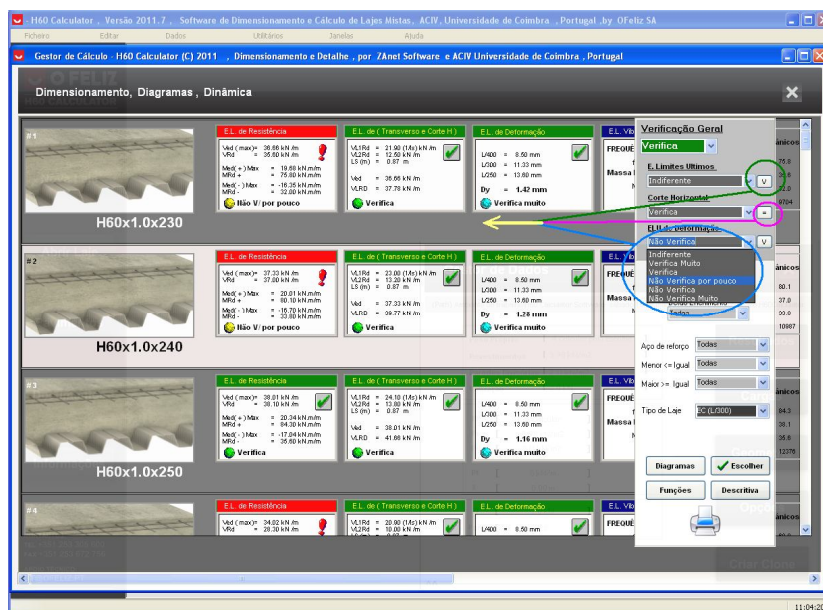
Na utilização dos filtros deve-se levar em conta que os filtros têm um comportamento exclusivo e solidário ou seja uns afectam todos e todos se ligam em somatório de efeito.

Teste algumas combinações de forma a ver o efeito de interacção.

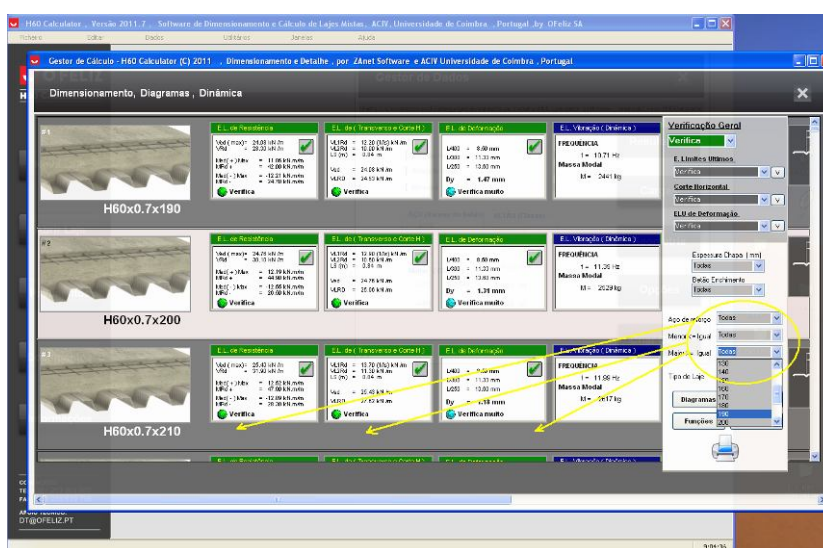
Sempre que não lhe apareça uma lista de opções (Pavimentos no ecran), altere a combinação de filtros, ou coloque os filtros em posição “**Todos**”.

Como pode verificar clicando nos botões <“V”> ou <“=”>, há uma diferente aplicação do critério de escolha, a opção ‘V’ quer dizer que a lista é válida para uma opção “Vertical” o que significa na prática o Seguinte “ Se escolher “Verifica” e o botão estiver na posição “V” (Vertical) vai aparecer todos os resultados que **Verificam** e os **Verificam Muito** se estiver na posição “=” só aparecem os que **Verificam** (não aparecem os que **Verificam Muito**) .

Ver imagem seguinte.



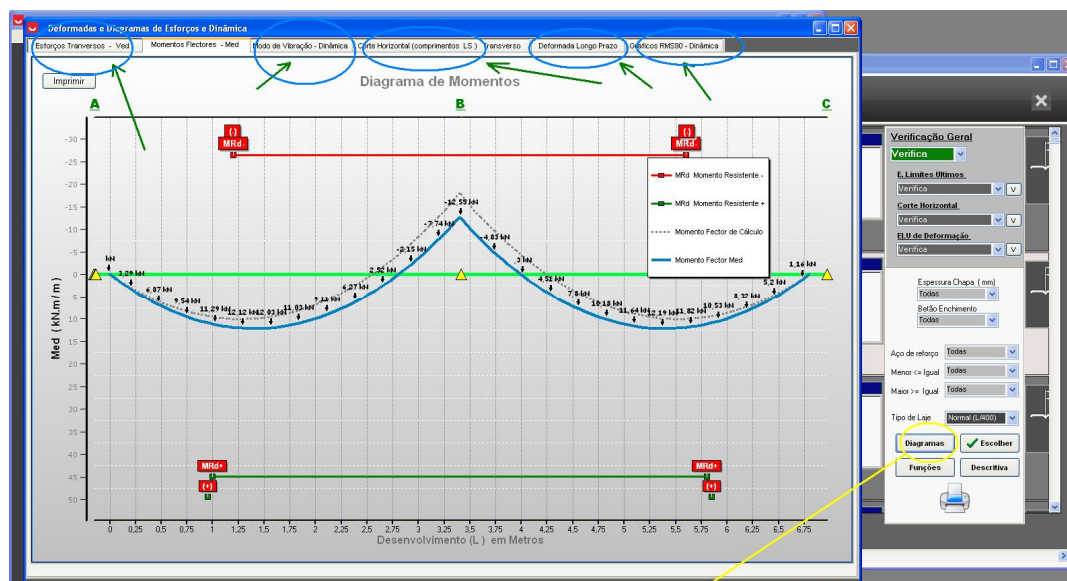
Pode usar em condição de solidária as opções Dimensionais e tipos de matérias.



Nota " Se a combinação que escolher for muito restritiva é natural que não lhe aparece nenhum resultado de conjunto ", procure alargar o teor de pesquisa libertando algumas opções - Escolha <"Todas"> .

Pode no "**Gestor de Cálculo**", ver os diagramas e resultados graficamente:

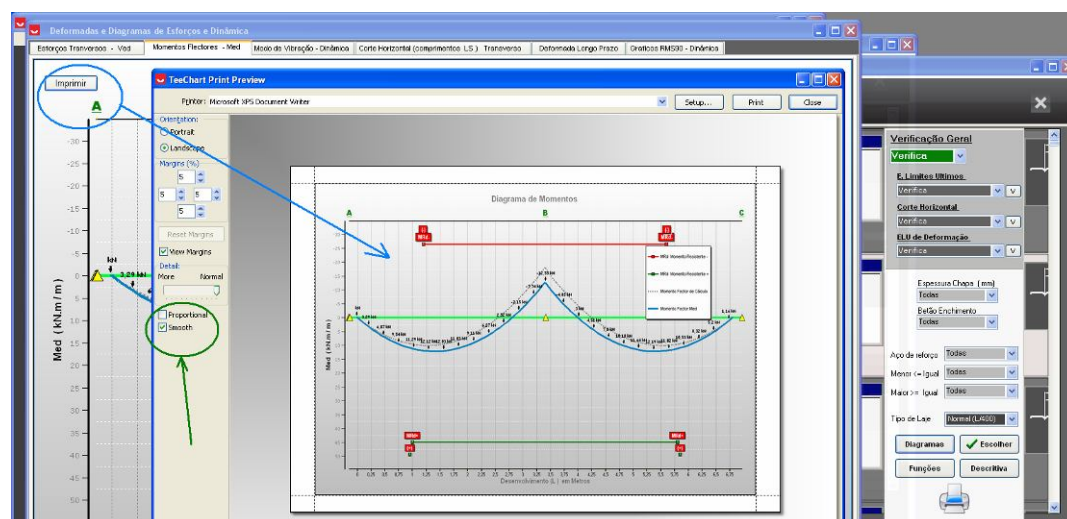
Click botão <" Diagramas"> , como mostra a imagem seguinte.



Como pode verificar os diagramas de Momentos Flectores , Esforço Transverso e Deformadas podem ser facilmente consultados.

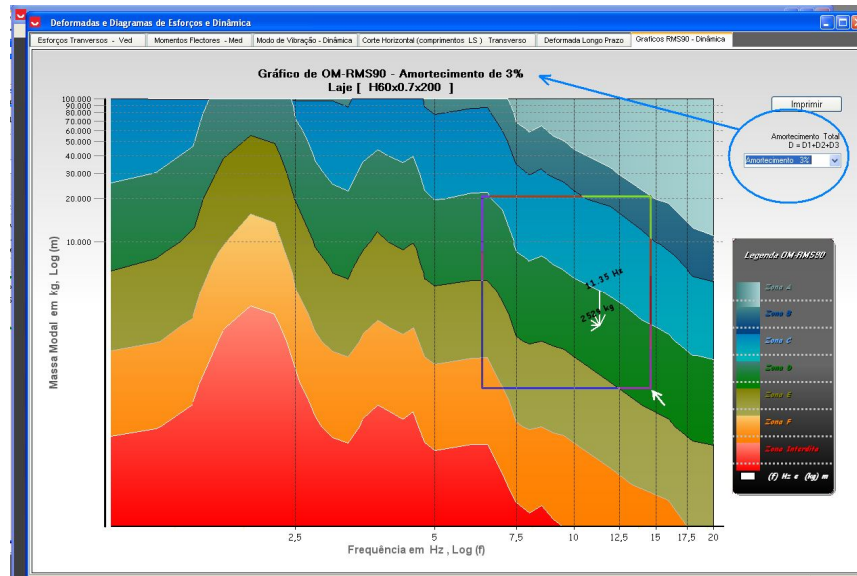
Para imprimir qualquer um destes diagramas, Click no botão < Imprimir >:

Ver figura seguinte:



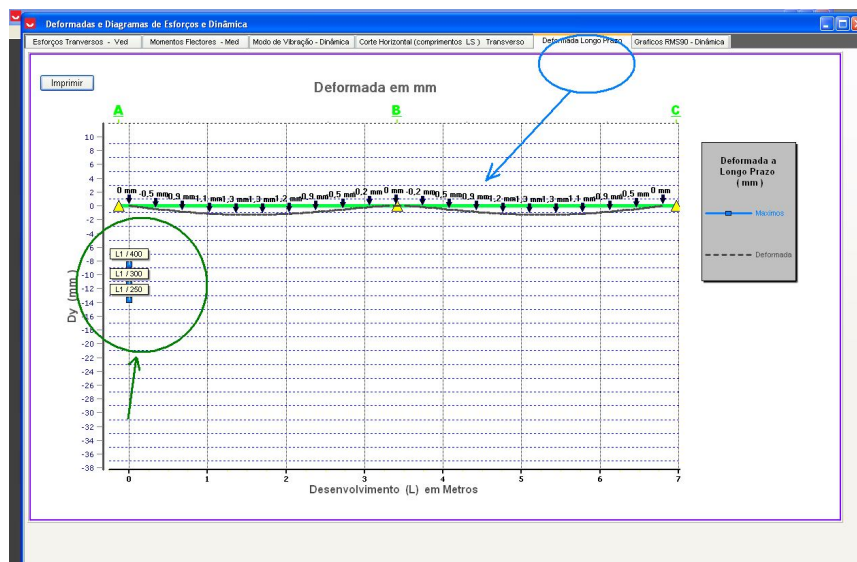
Pode melhorar o aspecto de "**Smooth**" (Contorno) escolhendo a opção Smooth .

Pode também consultar graficamente os gráficos de interacção **OM-RMS90**, pode escolher o factor de amortecimento, como mostra a figura seguinte.

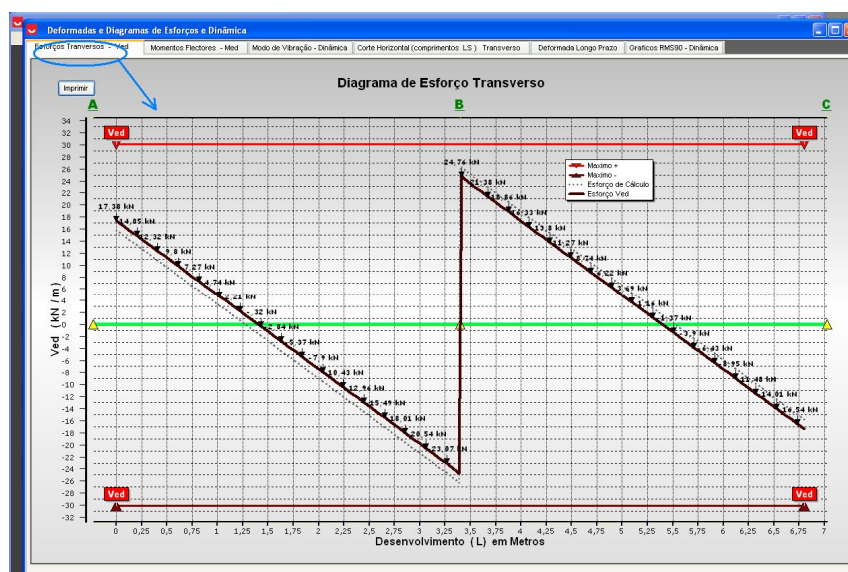


Em todos estes gráfico tem disponível a opção de imprimir:

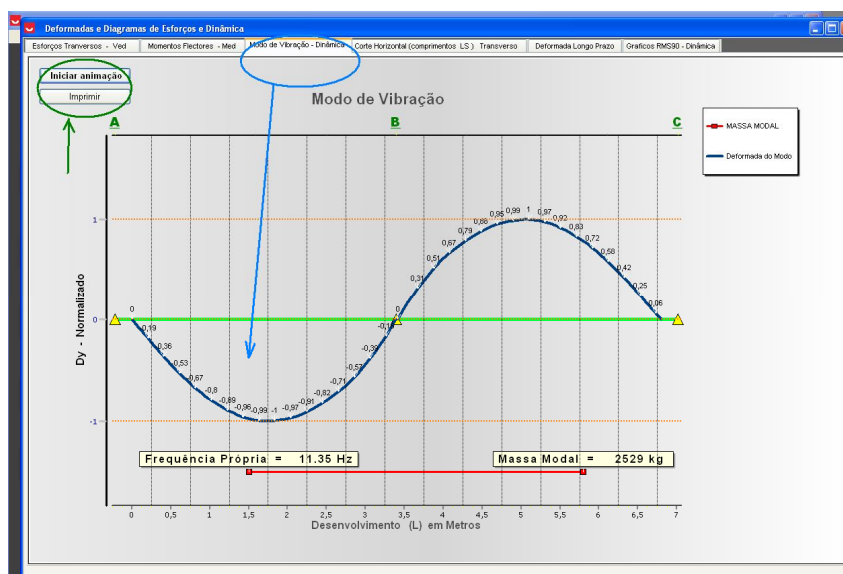
Pode ver a deformada em critério de longo prazo:



Qualquer um dos gráfico que estão interligados com o dimensionamento e como pode reparar no caso do diagrama (imagem seguinte), no gráfico aparece a tons vivos , caso da imagem “vermelho” os limites Máximos admissíveis.



Pode ver uma animação do 1 modo de vibração, click como mostra na figura seguinte.

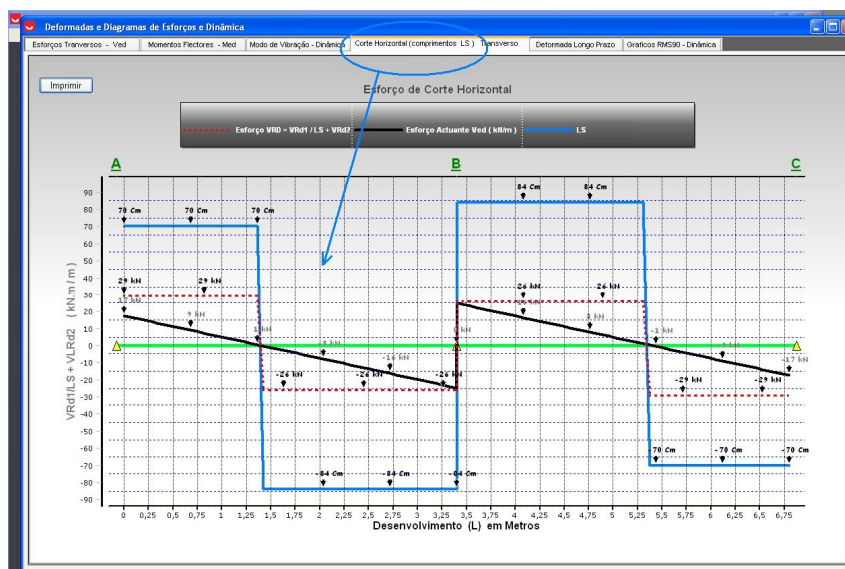


A informação que aparece neste gráfico é usada no estudo do comportamento dinâmico.

O cálculo e verificação do esforço de corte horizontal é um dos diferenciadores deste tipo de pavimentos para laje.

Pode Consultar graficamente este diagrama e ver os limites.

Imagem seguinte:

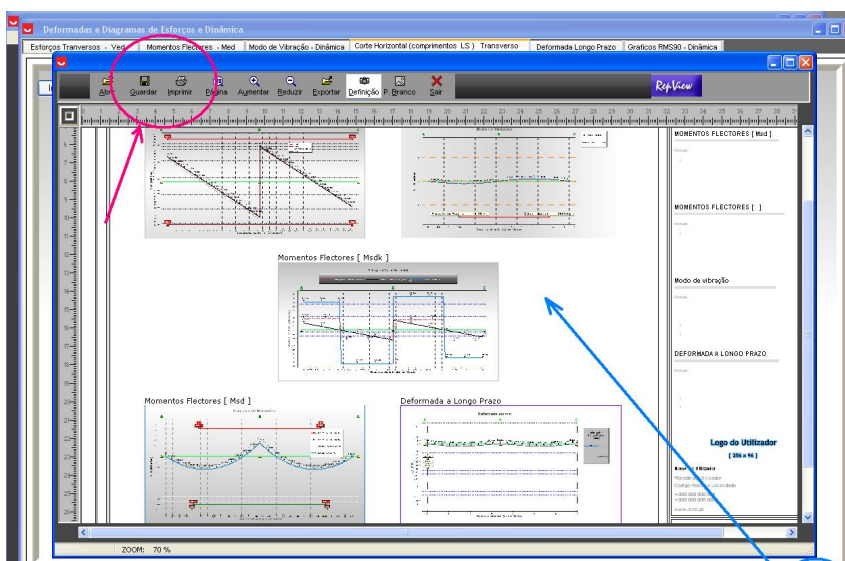


É um diagrama combinado onde se pode observar o comprimento LS (em cm) em metros na mesma escala de esforço (em kN).

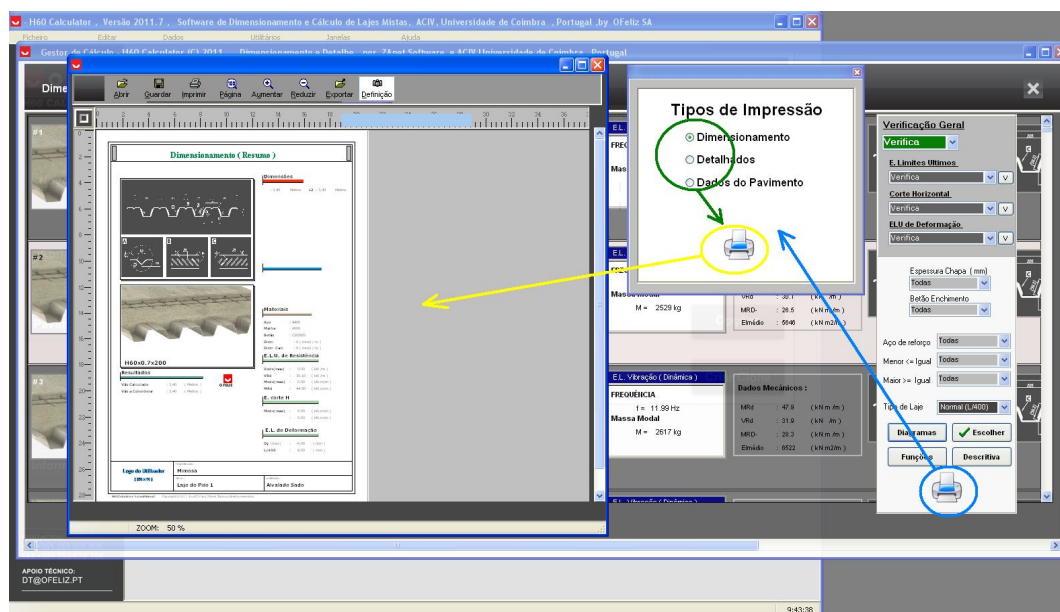
A curva a vermelho é a resultante $VRd1/LS + VRd2$ e preto o Ved instalado.

Pode e deve imprimir sempre este gráfico (Diagrama) e colocar como justificativo de cálculo e Dimensionamento).

Pode imprimir todos os diagramas na mesma folha clicando como indica o círculo (a azul):



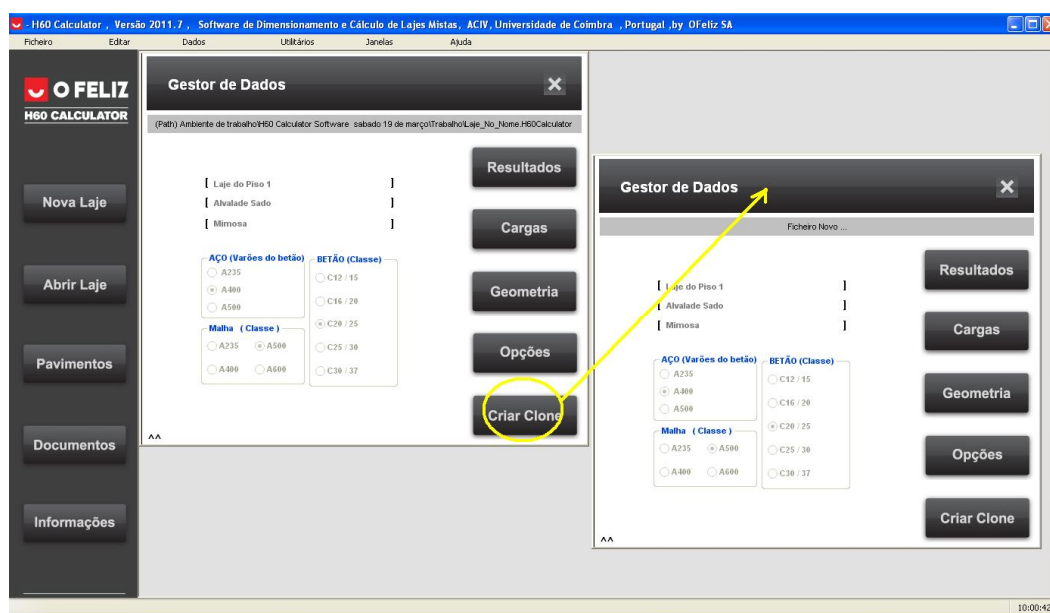
Para imprimir os dados e resultados do dimensionamento click na impressora e escolha (circulo a verde) o tipo de impressão:



Pode optar por imprimir a (Preto e branco) ou a cores. Lembre-se que se não preencheu os Dados do Utilizador estas impressões vão ficar com os valores por defeito.

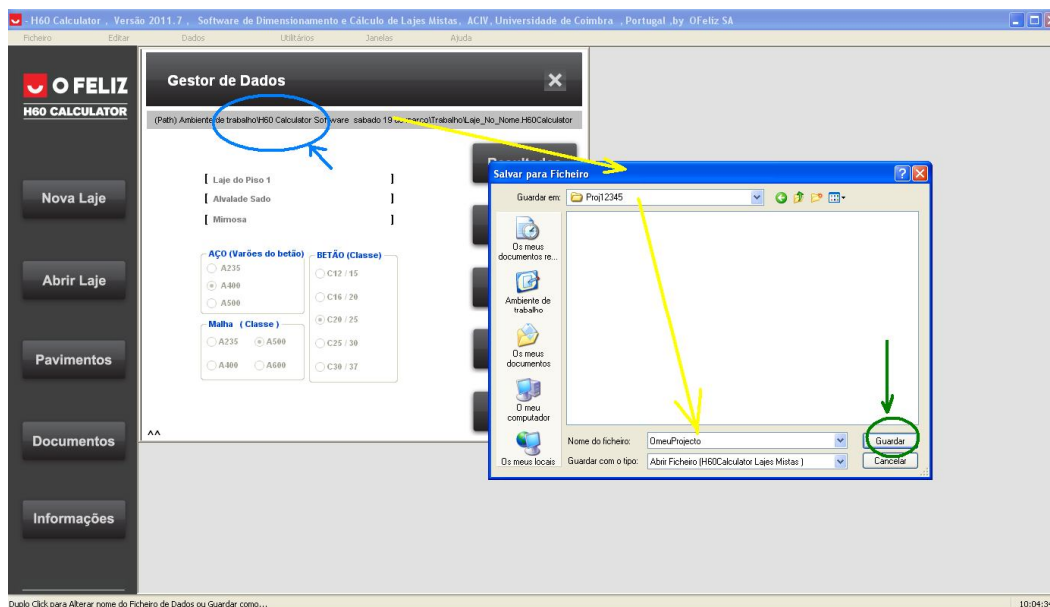
Por ultimo se está a calcular uma série de lajes com os mesmos dados de cargas gerais , pode utilizar a particularidade no "Gestor de Dados " de criar um Clone.

Prima como indica a imagem seguinte:



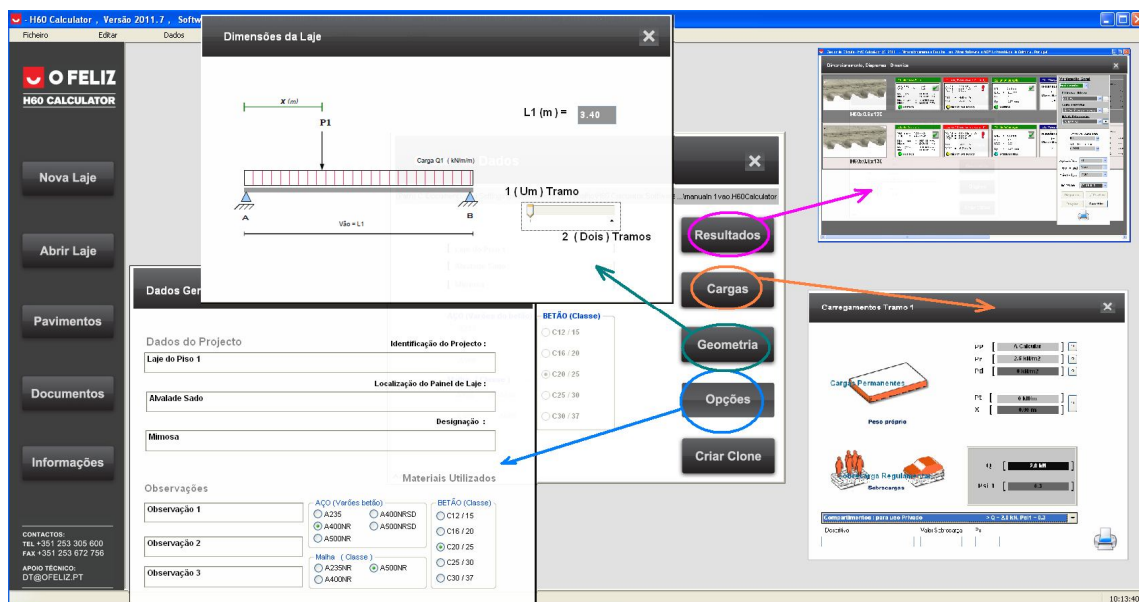
Vai aparecer no Desktop do Software um novo “Dialogo”, “Gestor de Dados”, mas como é natural é um clone do anterior

Click com DuploClick no texto como mostra a imagem seguinte (a azul), desta forma pode indicar ao software o nome e directório onde quer arquivar o novo clonado.



Pode agora alterar os dados (ex.: vão) e com os dados das cargas do arquivo origem pode executar o dimensionamento.

Se “viajar” pelos diálogos do clone poderá verificar que todas opções e dados do projecto anterior estão guardados.



Caso tenha dúvidas técnicas ou de utilização do software por favor não hesite, contacte o departamento técnico do OFELIZ , através de e-mail, Fax ou telefone .

4. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

4.1. Introdução

De forma a dar a conhecer ao utilizador os modelos de cálculo envolvidos no software de cálculo **H60 Calculator** são apresentados a seguir dois exemplos de aplicação.

No primeiro é calculada e dimensionada uma laje mista simplesmente apoiada, incluindo a fase de montagem, admitindo que a laje leva apenas uma linha de escoramento a 1/2 vão.

No segundo exemplo é calculada e dimensionada uma laje mista contínua com 2 vãos; neste exemplo considera-se que a laje é escorada de uma forma contínua na fase de montagem, de forma a dispensar a verificação da chapa perfilada isoladamente.

4.2. Exemplo 1

Considere-se uma laje mista simplesmente apoiada, com um vão de cálculo de 3.40 m e uma espessura total de 160 mm utilizando uma chapa perfilada H60 com 1.00 mm de espessura, conforme se ilustra na Figura 4.1. A laje pertence a um edifício comercial. Na fase de montagem é prevista uma linha de escoramentos a meio vão.

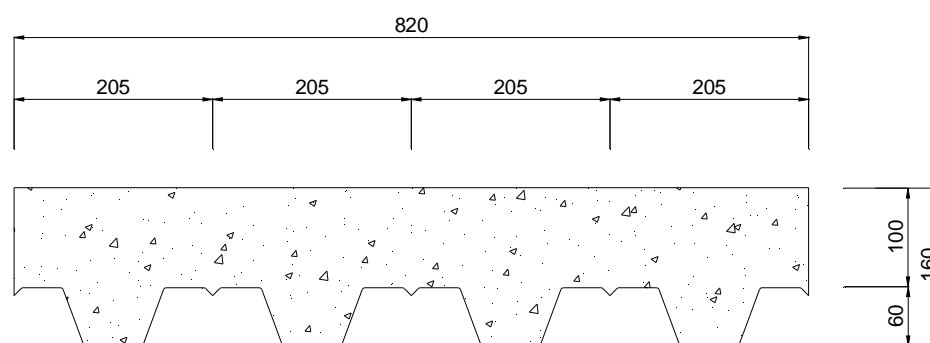


Figura 4.1 – Secção transversal da laje

Considere ainda os seguintes dados adicionais:

Materiais:

Betão C25/30 $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$; $E_{cm} = 31 \text{ GPa}$

Chapa perfilada S320 GD $f_{yp} = 320 \text{ MPa}$; $E_a = 210 \text{ GPa}$

Características geométricas da chapa H60:

Altura	$h_p = 60 \text{ mm}$
Espessura	$t = 1.00 \text{ mm}$
Área bruta	$A_p = 14.20 \text{ cm}^2/\text{m}$
Área resistente	$A_{pe} = 13.34 \text{ cm}^2/\text{m}$
Centro de gravidade	$e_p = 3.40 \text{ cm}$
Largura média da nervura	$b_0 = 84 \text{ mm}$
Parâmetros m - k	$m = 98.32 \text{ N/mm}^2$; $k = 0.080 \text{ N/mm}^2$

Características geométricas da laje mista:

Altura	$h = 160 \text{ mm}$
Área da secção de betão	$A_b = 1241.5 \text{ cm}^2/\text{m}$

Acções:

Peso próprio da chapa	$pp_{chapa} = 0.111 \text{ kN/m}^2$; $\gamma_g = 1.35$.
Peso próprio do betão	$pp_{betão} = 3.10 \text{ kN/m}^2$ ($\gamma_{betão} = 25 \text{ kN/m}^3$); $\gamma_g = 1.35$.
Revestimentos + paredes	$pp_{rev+par} = 2.5 \text{ kN/m}^2$; $\gamma_g = 1.50$.
Sobrecarga de utilização	$Q = 4.0 \text{ kN/m}^2$ (Quadro 6.1 – EN 1991-1-1); $\gamma_Q = 1.50$; $\psi_1 = 0.70$.
Sobrecarga de construção	$Q_c = 1.0 \text{ kN/m}^2$ (EN 1991-1-6, 4.11.2); $\gamma_Q = 1.50$.

I. Verificação da fase de montagem

Na fase de montagem adopta-se o modelo de chapa perfilada simplesmente apoiada entre apoios. Como é previsto um apoio provisório a 1/2 vão, o vão de cálculo é dado por $L = 1.70 \text{ m}$.

Na fase de montagem, de acordo com a cláusula 9.3.2 (1) da NP EN 1994-1-1, as cargas a considerar são o peso próprio da chapa, o peso próprio do betão fresco ($\gamma_{betão} = 26 \text{ kN/m}^3$), uma sobrecarga de construção (1.0 kN/m^2 segundo a EN 1991-1-6, 4.11.2) e um acréscimo de peso devido ao efeito de “poça” (cláusula 9.3.2 (2) da NP EN 1994-1-1). Como o escoramento reduz significativamente o vão de cálculo, na verificação do estado limite último não se considera o efeito de poça; esta hipótese é confirmada posteriormente ao efectuar a verificação do estado limite de deformação.

A carga actuante de cálculo para verificação dos estados limites últimos é dada por:

$$p_{Ed} = 1.35 \times (0.111 + 3.10 \times 26/25) + 1.50 \times 1.0 = 6.00 \text{ kN/m}^2.$$

Para um vão $L = 1.70 \text{ m}$ são obtidos os seguintes esforços de cálculo:

$$M_{Ed} = \frac{6.00 \times 1.70^2}{8} = 2.17 \text{ kNm/m};$$

$$V_{Ed} = \frac{6.00 \times 1.70}{2} = 5.10 \text{ kN/m}.$$

Os valores do momento flector positivo resistente e do esforço transversal resistente, previamente calculados de acordo com a norma EN 1993-1-3, são indicados no Quadro 3.2. Assim tem-se:

- na secção de momento máximo (meio vão) - $M_{Ed} = 2.17 \text{ kNm/m} < M_{Rd,ef} = 7.2 \text{ kNm/m}$;

- na secção de esforço transversal máximo (apoios) - $V_{Ed} = 5.10 \text{ kN/m} < V_{Rd,ef} = 101.75 \text{ kN/m}$,

o que permite concluir que a chapa perfilada, com um apoio provisório a meio vão verifica os estados limites últimos de resistência aplicáveis.

Para verificação do estado limite de deformação na fase de montagem, segundo a cláusula 9.6 (2) da NP EN 1994-1-1, a flecha devido ao peso próprio da chapa mais o betão fresco, excluindo sobrecargas de construção não deve exceder $L/180$; neste caso L é o vão entre os escoramentos provisórios. Por conseguinte a carga de cálculo actuante (combinação característica) é dada por:

$$p_{Ed} = 0.111 + 3.10 \times 26/25 = 3.34 \text{ kN/m}^2.$$

Tendo em conta o momento de inércia da secção efectiva da chapa perfilada, calculada de acordo com a norma EN 1993-1-3 e indicada no Quadro 3.2, obtém-se:

$$\delta_a = \frac{5}{384} \times \frac{3.34 \times 1.70^4}{210 \times 10^6 \times 68.60 \times 10^{-8}} = 2.52 \times 10^{-3} \text{ m} = 2.52 \text{ mm}.$$

Como $\delta_a = 2.52 \text{ mm} < \frac{1700}{240} = 7.08 \text{ mm}$, é verificado o estado limite de deformação.

A deformação $\delta_a = 2.52 \text{ mm} < 0.10 \times 160 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$, logo não é necessário considerar o efeito de poça, quer na verificação do estado limite de deformação, quer na verificação dos estados limites últimos de resistência.

Conforme referido no sub-capítulo 3.4, o programa **H60 Calculator** não efectua directamente este cálculo, mas apenas indica para a laje em causa a distância máxima entre escoramentos; numa laje com 160 mm de altura com chapa H60 essa distância máxima é de 2.60 m, o que permitia concluir que o espaçamento de 1.70 m entre linhas de escoramento seria suficiente.

II. Verificação da fase definitiva

Na fase definitiva, após a cura do betão, a laje funciona como uma laje mista, desempenhando a chapa perfilada as funções de armadura de tracção.

Estados limites últimos

Para um cenário de cargas distribuídas, terão de ser verificados os estados limites últimos de:

- i) Flexão;
- ii) Esforço transversal vertical;
- iii) Esforço de corte longitudinal.

Para a verificação dos estados limites últimos, a combinação fundamental de acções é dada por:

$$p_{Ed} = 1.35 \times (0.111 + 3.10) + 1.50 \times 2.5 + 1.50 \times 4.0 = 14.08 \text{ kN} / \text{m}^2.$$

O momento flector de cálculo a meio vão é dado por:

$$M_{Ed} = \frac{14.08 \times 3.40^2}{8} = 20.35 \text{ kNm} / \text{m}.$$

O esforço transversal de cálculo junto aos apoios é dado por:

$$V_{Ed} = \frac{14.08 \times 3.40}{2} = 23.94 \text{ kN} / \text{m}.$$

i) Flexão

A secção transversal da laje mista em flexão positiva é de classe 1 (todo o aço em tracção), logo o momento flector resistente é o momento plástico.

A força máxima de compressão no betão acima das nervuras, por metro de largura, é dada por:

$$N_{cf} = 1.00 \times 0.10 \times \frac{0.85 \times 25 \times 10^3}{1.50} = 1416.7 \text{ kN}.$$

A força máxima de tracção na chapa perfilada (desprezando a contribuição do betão em tracção), por metro de largura de laje, é dada por:

$$N_p = 13.34 \times 10^{-4} \times \frac{320 \times 10^3}{1.00} = 426.88 \text{ kN}.$$

Como $N_{cf} > N_p$, o eixo neutro plástico localiza-se no betão (ver Figura 4.2), a uma distância da face superior x_{pl} dada por:

$$N_c = 1.00 \times x_{pl} \times \frac{0.85 \times 25 \times 10^3}{1.50} = N_p = 426.88 \Rightarrow x_{pl} = 3.01 \times 10^{-2} m = 3.01 cm.$$

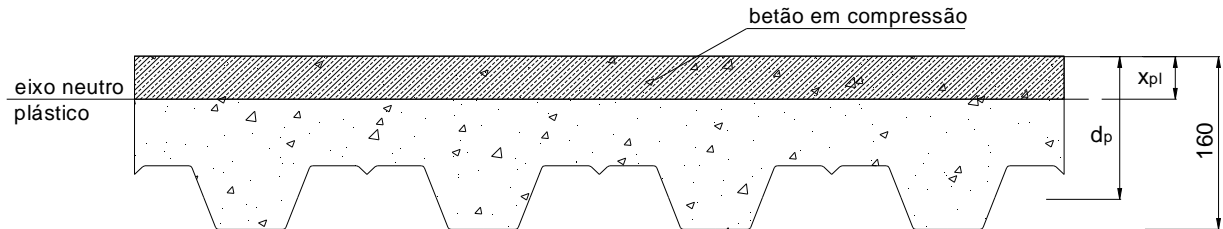


Figura 4.2 – Secção transversal da laje

O momento plástico resistente é dado por:

$$M_{pl+} = 426.88 \times (0.160 - 0.034 - 0.0301/2) = 47.36 kNm / m.$$

Como $M_{Ed} = 20.35 kNm / m < M_{pl+} = 47.36 kNm / m$, a laje apresenta resistência à flexão suficiente.

ii) esforço transversal vertical

O esforço transversal vertical resistente, por nervura, é obtido através da seguinte expressão:

$$V_{v,Rd} = v_{min} b_0 d_p,$$

sendo $b_0 = 84 mm$ a largura média da nervura e $d_p = 160 - 34 = 126 mm$ a distância da face superior da laje ao centro de gravidade da chapa perfilada (ver Figura 4.2);

$v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$, sendo $k = 1 + \sqrt{200/d_p} \leq 2.0$, com d_p em mm ; neste caso tem-se

$$k = 1 + \sqrt{200/126} = 2.26, \text{ logo } k = 2.0 \text{ e } v_{min} = 0.035 \times 2.0^{3/2} \times 25^{1/2} = 0.495 N / mm^2.$$

Com os valores anteriores obtém-se:

$$V_{v,Rd,nervura} = 0.495 \times 10^{-3} \times 84 \times 126 = 5.24 kN / nervura.$$

O esforço transversal resistente por metro de laje é dado por:

$$V_{v,Rd} = V_{v,Rd,nervura} / 0.205 = 25.6 kN / m.$$

Como $V_{Ed} = 23.94 kN / m < V_{v,Rd} = 25.6 kN / m$, a laje apresenta resistência suficiente ao esforço transversal vertical.

iii) Esforço de corte longitudinal

Para o cálculo da resistência ao corte longitudinal, o comprimento de corte L_s é dado por $L/4$ ou seja, $L_s = 3.4/4 = 0.85 \text{ m}$. A resistência ao corte longitudinal, por metro de largura, é dada por:

$$V_{l,Rd} = \frac{b d_p}{\gamma_{vs}} \left(\frac{m A_p}{b L_s} + k \right) = \frac{1000 \times 126}{1.25} \left(\frac{98.32 \times 1420}{1000 \times 850} + 0.080 \right) \times 10^{-3} = 24.62 \text{ kN/m}.$$

Como $V_{Ed} = 23.94 \text{ kN/m} < V_{l,Rd} = 24.62 \text{ kN/m}$, a laje apresenta resistência ao esforço de corte longitudinal suficiente, segundo o método $m-k$.

Estado limites de serviço

i) Estado limite de deformação

Na verificação do estado limite de deformação na fase definitiva despreza-se a deformação da fase de construção, pois como a laje é escorada a meio vão, estes valores são muito reduzidos. Pela mesma razão, na verificação da flecha na fase definitiva considera-se a totalidade das cargas actuates.

Para a verificação do estado limite de deformação na fase definitiva, segundo a cláusula 6.5.3 (2) da EN 1990, deve ser considerada a combinação frequente de acções, dada por:

$$p_{Ed} = (pp_{chapa} + pp_{betão} + pp_{rev+par}) + \psi_1 \times Q = (0.111 + 3.10 + 2.5) + 0.70 \times 4.0 = 8.51 \text{ kN/m}^2.$$

Segundo a cláusula 9.8.2 (5) da NP EN 1994-1-1, no cálculo da flecha pode ser usado um momento de inércia equivalente (I_{eq}) igual à média dos valores dos momentos de inércia relativos à secção fendilhada e não fendilhada.

O coeficiente de homogeneização para efeitos de longa duração é dado por:

$$n = \frac{E_a}{E_{cm}/2} = \frac{210}{31/2} = 13.55.$$

O momento de inércia da secção fendilhada em flexão positiva, obtido a partir do Quadro 3.5, é dado por: $I_{eq,2} = 11.59 \times 10^{-6} \text{ m}^4/\text{m}$.

O momento de inércia da secção não fendilhada em flexão positiva, obtido a partir do Quadro 3.5, é dado por: $I_{eq,1} = 21.07 \times 10^{-6} \text{ m}^4/\text{m}$.

O valor médio do momento de inércia é dado por: $I_{eq} = \frac{I_{eq,1} + I_{eq,2}}{2} = 16.33 \times 10^{-6} \text{ m}^4/\text{m}$.

A rigidez de flexão média é dada por: $EI_{eq} = 210 \times 10^6 \times 16.33 \times 10^{-6} = 3429.3 \text{ kNm}^2 / \text{m}$.

A flecha máxima é dada por: $\delta_a = \frac{5}{384} \times \frac{8.51 \times 3.40^4}{3429.3} = 4.32 \times 10^{-3} \text{ m} = 4.32 \text{ mm}$.

Considerando que o limite de flecha admissível é dado por $L/300$, tem-se:

$\delta_a = 4.32 \text{ mm} < 3400/300 = 11.33 \text{ mm}$, logo a laje com a chapa H60 de 1.0 mm de espessura e altura total 160 mm é suficiente.

ii) Estado limite de fendilhação

Para uma laje de um tramo, o estado limite de fendilhação é automaticamente verificado. Na face superior, tal como previsto na cláusula 9.2.1 (4) da NP EN 1994-1-1 deve ser colocada uma armadura construtiva não inferior a $80 \text{ mm}^2/\text{m}$. Admitindo tratar-se de uma laje mista contínua, embora calculada como simplesmente apoiada, segundo a cláusula 9.8.1 (2) da NP EN 1994-1-1 deve ser colocada na face superior, sobre os apoios intermédios e prolongada $0.25 L$ para cada lado, uma armadura mínima dada por 0.4% (laje escorada) da área de betão acima das nervuras, neste caso dada por $0.004 \times 1.00 \times 0.10 = 0.04 \text{ m}^2 / \text{m} = 400 \text{ mm}^2 / \text{m}$, que poderia ser constituída por $\phi 8 \text{ mm}$ af. 0.125 m (a armadura construtiva de $80 \text{ mm}^2/\text{m}$ referida acima poderia ser incluída nesta armadura).

iii) Estado limite de vibração

Por estado limite de vibração entende-se a garantia de níveis de conforto compatíveis com o tipo de utilização do piso. Este compreende a própria laje e toda a estrutura de apoio que poderá ser formada por elementos com grau variável de rigidez. O tipo de análise permitido pelo software de cálculo considera apoios rígidos (sem afundamento), pelo que a verificação do estado limite de vibração é válido apenas nos casos em que a estrutura de apoio da laje é suficientemente rígida para validar este pressuposto.

As acções dinâmicas consideradas nesta verificação são exclusivamente as acções resultantes da movimentação de pessoas durante o uso normal do pavimento. Exclui-se, portanto, situações de excitação dinâmica devido a quaisquer outras acções, as quais devem ser analisadas caso a caso tendo em conta as condições específicas de excitação.

Na verificação do estado limite de vibração segue-se a metodologia preconizada em 'Design Guide for Floor Vibrations'. Nesta metodologia é definido o parâmetro $OS\text{-}RMS_{90}$ (*One Step Root Mean Square*) correspondente à vibração harmónica induzida no pavimento pelo passo

representativo da circulação de pessoas. O índice 90 indica que 90% dos passos dados sobre o pavimento estão cobertos pelo valor usado para o parâmetro.

Dependendo do tipo de utilização do pavimento, determinado nível de vibração definido pelo parâmetro $OS-RMS_{90}$ pode ser considerado aceitável, crítico (*border-line*) ou não recomendado. O Quadro 4.1 estabelece seis classes de conforto dependentes do valor do parâmetro e assinala a classe considerada crítica (X) para vários tipos de utilização. Do ponto de vista prático, as classes abaixo da crítica são consideradas aceitáveis e as acima da crítica são consideradas não recomendadas.

Quadro 4.1 – Classes de conforto para estados limites de vibração e classes críticas para vários tipos de utilização

		Classe					
		A	B	C	D	E	F
$OS-RMS_{90}$	Limite inf	0.0	0.1	0.2	0.8	3.2	12.8
	Limite sup	0.1	0.2	0.8	3.2	12.8	51.2
Tipo de Utilização do pavimento	Desporto						X
	Industria						X
	Hotel					X	
	Comercio					X	
	Reuniões					X	
	Escritório					X	
	Residência					X	
	Educação				X		
	Saúde				X		
	(Sensível)		X				

O valor do parâmetro $OS-RMS_{90}$ é obtido de gráficos em anexo. Estes gráficos são construídos de forma a obter a classe do pavimento em função do valor amortecimento modal, do valor da frequência própria de vibração do piso e do valor de massa modal associada ao modo de vibração em análise. O software de cálculo fornece os valores de frequência própria fundamental do piso e respectiva massa modal. Fornece ainda a classe do piso para o valor de amortecimento escolhido pelo utilizador.

O valor de amortecimento D a usar pode ser estimado pela soma de três componentes, $D = D_1 + D_2 + D_3$. No caso da estrutura mista em análise (laje mista aço-betão) $D_1 = 1\%$. Os valores a adoptar para D_2 e D_3 podem ser estimados a partir do Quadro 4.2. É sempre mais desfavorável considerar menor amortecimento.

Quadro 4.2 – Valores indicativos para componente de amortecimento proveniente do mobiliário/utilização (D_2) e do acabamento da superfície do piso (D_3)

Tipo de equipamento	D_2	Tipo de acabamento	D_3
Escritório tradicional para 1 a 3 pessoas com paredes divisórias	2%	Tecto falso sob o piso	1%
Escritório 'sem papel'	0%	Pavimento flutuante	0%
Piso 'open space'	1%		
Biblioteca	1%		
Habitação	1%		
Escolas	0%		
ginásios	0%		

No cálculo da rigidez de flexão do caso em estudo considera-se o valor médio da rigidez por metro de largura para momentos positivos ($EI_{eq} = 3429.3 \text{ kNm}^2/m$) e o valor de massa correspondente aos pesos próprios da laje mista, dos revestimentos e das paredes divisórias, bem como o valor frequente da sobrecarga ($m = 0.851 \text{ ton/m}^2$). Considerando que os apoios da laje são rígidos permitindo rotação livre a frequência própria vem dada por:

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_{eq}}{mL^4}} = \frac{\pi}{2} \times \sqrt{\frac{3429.3}{0.851 \times 3.4^4}} = 8.62 \text{ Hz},$$

e a massa modal vem dada por:

$$M = \frac{mL}{2} = \frac{0.851 \times 3.40}{2} = 1.447 \text{ ton}$$

O resultado obtido encontra-se representado por um círculo nos gráficos do Anexo A. O pavimento é classificado como Classe E. Para amortecimento $D = 5\%$ a classificação aproxima-se da Classe D. De acordo com a classificação do Quadro 4.1, o piso é desaconselhável em utilização de, por exemplo, escolas, unidades de saúde ou para equipamentos sensíveis à vibração.

4.3. Exemplo 2

Considere-se uma laje mista contínua com 2 tramos de 3.00 m cada, escorada na fase de montagem, com uma espessura total de 140 mm utilizando uma chapa perfilada H60 com 0.80 mm de espessura, conforme se ilustra na Figura 4.3. A armadura de continuidade colocada a 30 mm da face superior, na zona do apoio intermédio, é constituída por varões ϕ 10 mm afastados de 0.15 m em aço A500 NR. A laje pertence a um edifício de habitação.

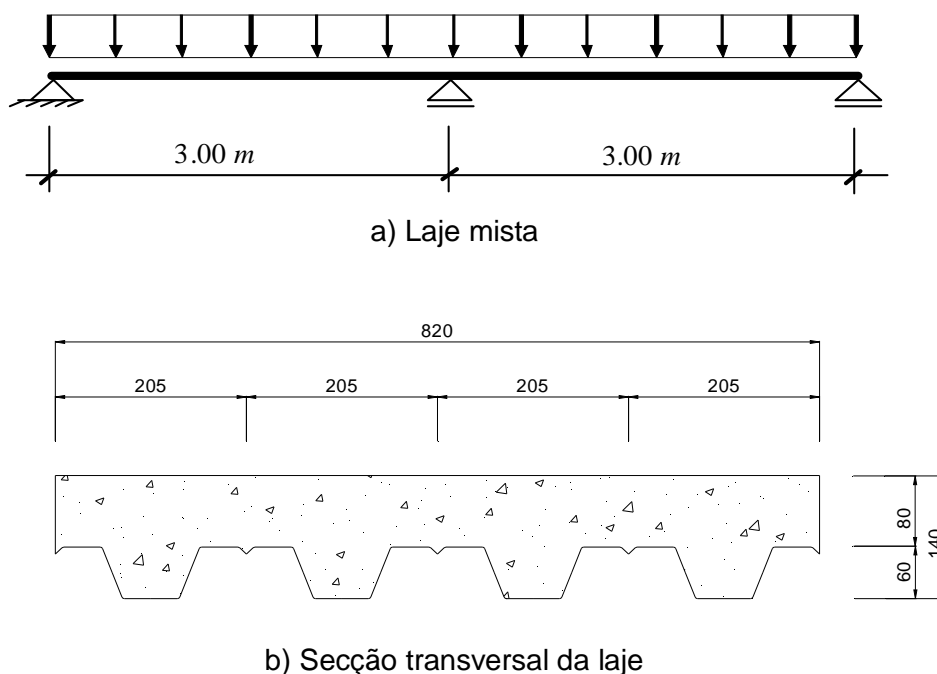


Figura 4.3 – Laje mista com 2 tramos

Considere ainda os seguintes dados adicionais:

Materiais:

Betão C25/30 $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$; $E_{cm} = 31 \text{ GPa}$

Chapa perfilada S 320 GD $f_{yp} = 320 \text{ MPa}$; $E_a = 210 \text{ GPa}$

Características geométricas da chapa H60:

Altura $h_p = 60 \text{ mm}$

Espessura $t = 0.80 \text{ mm}$

Área bruta	$A_p = 11.37 \text{ cm}^2/m$
Área resistente	$A_{pe} = 10.59 \text{ cm}^2/m$
Centro de gravidade	$e_p = 3.40 \text{ cm}$
Parâmetros $m-k$	$m = 98.32 \text{ N/mm}^2$; $k = 0.080 \text{ N/mm}^2$

Características geométricas da laje mista:

Altura	$h = 140 \text{ mm}$
Área da secção de betão	$A_b = 1041.6 \text{ cm}^2/m$

Acções:

Peso próprio da chapa	$pp_{chapa} = 0.089 \text{ kN/m}^2$; $\gamma_g = 1.35$.
Peso próprio do betão	$pp_{betão} = 2.60 \text{ kN/m}^2$ ($\gamma_{betão} = 25 \text{ kN/m}^3$); $\gamma_g = 1.35$.
Revestimentos + paredes	$pp_{rev+par} = 2.5 \text{ kN/m}^2$; $\gamma_g = 1.50$.
Sobrecarga de utilização	$Q = 2.0 \text{ kN/m}^2$ (Quadro 6.1 – EN 1991-1-1); $\gamma_Q = 1.50$; $\psi_1 = 0.50$.

Como se admite que a laje é escorada, neste exemplo não se efectua a verificação da chapa perfilada para a fase de construção.

Na fase definitiva, após a cura do betão, a laje trabalha como laje mista, desempenhando a chapa perfilada as funções de armadura de tracção.

Estados limites últimos

Para um cenário de cargas distribuídas, terão de ser verificados os estados limites últimos de:

- i) Flexão;
- ii) Esforço transversal vertical;
- iii) Esforço de corte longitudinal.

Para os estados limites últimos, a combinação fundamental de acções é dada por:

$$p_{Ed} = 1.35 \times (0.089 + 2.60) + 1.50 \times 2.5 + 1.50 \times 2.0 = 10.38 \text{ kN/m}^2.$$

Tratando-se de uma laje contínua com 2 tramos, os esforços de cálculo, segundo a cláusula 9.4.2 (3) da NP EN 1994-1-1 podem ser obtidos considerando uma rigidez constante ao longo dos tramos (não considerando a fendilhação) e posteriormente aplicando uma redistribuição de 30% nos momentos flectores negativos sobre o apoio intermédio e consequente aumento dos momentos positivos. Por simplicidade optou-se por não fazer variação de sobrecarga. Assim o momento flector negativo actuante no apoio intermédio (após redistribuição) é dado por:

$$M_{Ed} = \frac{10.38 \times 3.00^2}{8} \times 0.70 = 8.17 \text{ kNm/m}.$$

O momento máximo positivo no tramo, após redistribuição é dado por:

$$M_{Ed} = 7.95 \text{ kNm} / m.$$

A reacção nos apoios extremos, igual ao esforço transversal nessas secções, considerando a redistribuição de 30 %, é dada por:

$$R_A = R_B = \frac{10.38 \times 3.00 \times 3.00 / 2 - 8.17}{3} = 12.85 \text{ kN} / m.$$

O esforço transversal de cálculo junto ao apoio central é dado por:

$$V_{Ed} = 10.38 \times 3 - 12.85 = 18.29 \text{ kN} / m.$$

Na Figura 4.4 são ilustrados os diagramas de esforços de cálculo da laje mista contínua.

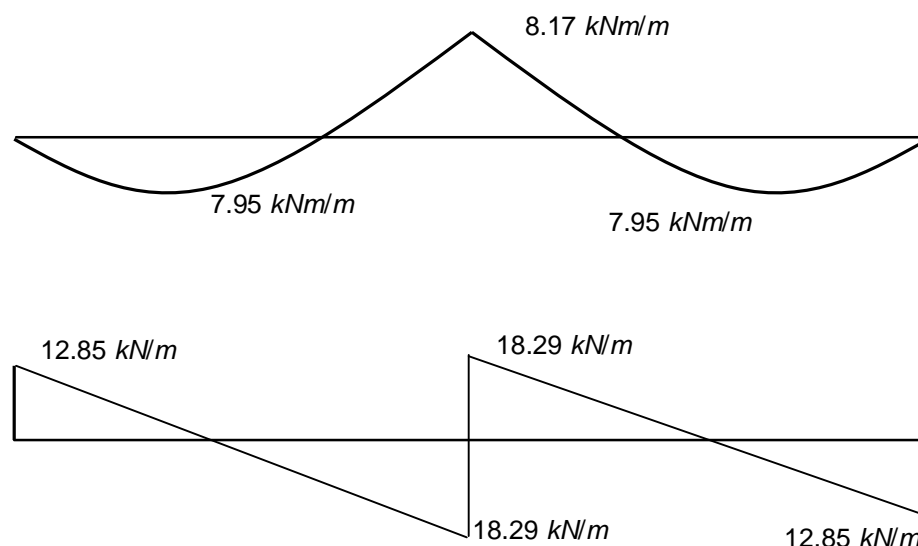


Figura 4.4 – Diagramas de esforços de cálculo

i) Flexão

A secção transversal da laje mista em flexão positiva é de classe 1 (aço todo em tracção), logo o momento flector resistente é o momento plástico.

A força máxima de compressão no betão acima das nervuras, por metro de largura, é dada por:

$$N_{cf} = 1.00 \times 0.08 \times \frac{0.85 \times 25 \times 10^3}{1.50} = 1133.33 \text{ kN}.$$

A força máxima de tracção na chapa perfilada (desprezando a contribuição do betão), por metro de largura, é dada por:

$$N_p = 10.59 \times 10^{-4} \times \frac{320 \times 10^3}{1.00} = 338.88 \text{ kN}.$$

Como $N_{cf} > N_p$, o eixo neutro plástico localiza-se no betão (Figura 4.5), a uma distância da face superior x_{pl} dada por:

$$N_c = 1.00 \times x_{pl} \times \frac{0.85 \times 25 \times 10^3}{1.50} = N_p = 338.88 \Rightarrow x_{pl} = 2.39 \times 10^{-2} \text{ m} = 2.39 \text{ cm}.$$

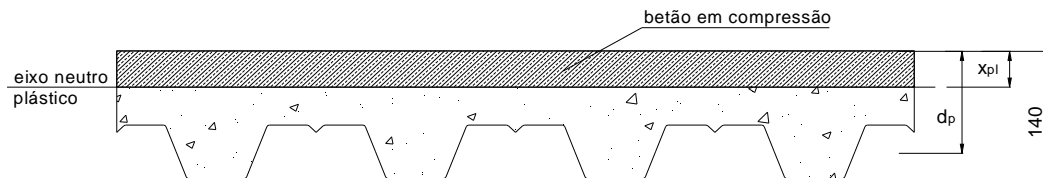


Figura 4.5 – Secção transversal da laje

O momento plástico resistente é dado por:

$$M_{pl+} = 338.88 \times (0.140 - 0.034 - 0.0239/2) = 31.87 \text{ kNm/m}.$$

Como $M_{Ed}^+ = 7.95 \text{ kNm/m} < M_{pl+} = 31.87 \text{ kNm/m}$, a laje apresenta resistência à flexão suficiente ao longo dos tramos.

Na avaliação da resistência da secção transversal da laje em flexão negativa despreza-se a contribuição da chapa em compressão, logo o momento flector resistente pode ser tomado como o momento plástico. A armadura de tracção sobre o apoio, colocada a 30 mm da face superior é dada por $A_s = 524 \text{ mm}^2 / \text{m}$ (varões $\phi 10 \text{ mm}$ afastados de 0.15 m) em aço A500 NR.

A força máxima de tracção na armadura, por metro de largura, é dada por:

$$N_s = 524 \times 10^{-6} \times \frac{500 \times 10^3}{1.15} = 227.83 \text{ kN}.$$

Esta força é equilibrada com a força de compressão no betão das nervuras (na situação em análise o eixo neutro plástico vai localizar-se na chapa perfilada), que por simplificação se considera com uma largura média $b_0 = 84 \text{ mm}$. A posição do eixo neutro, em relação à base da laje, é obtida através da seguinte expressão:

$$x_{pl} = \frac{0.205 \times 227.83}{84 \times 10^{-3} \times 0.85 \times 25 \times 10^3 / 1.50} = 3.92 \times 10^{-2} \text{ m} = 3.92 \text{ cm}.$$

O momento plástico resistente negativo é dado por:

$$M_{pl-} = 227.83 \times (0.140 - 0.030 - 0.010/2 - 0.0392/2) = 19.46 \text{ kNm} / \text{m}.$$

Como $M_{Ed}^- = 8.17 \text{ kNm} / \text{m} < M_{pl-} = 19.46 \text{ kNm} / \text{m}$, a laje apresenta resistência à flexão suficiente sobre os apoios intermédios.

ii) esforço transversal vertical

O esforço transversal vertical resistente, por nervura, é obtido através da seguinte expressão:

$$V_{v,Rd} = v_{\min} b_0 d_p,$$

sendo $b_0 = 84 \text{ mm}$ é a largura média da nervura e $d_p = 140 - 34 = 106 \text{ mm}$ a distância da face superior da laje ao centro de gravidade da chapa perfilada (ver Figura 4.5);

$v_{\min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$, sendo $k = 1 + \sqrt{200/d_p} \leq 2.0$, com d_p em mm ; neste caso tem-se $k = 1 + \sqrt{200/106} = 2.37$, logo $k = 2.0$ e $v_{\min} = 0.035 \times 2.0^{3/2} \times 25^{1/2} = 0.495 \text{ N} / \text{mm}^2$.

Com os valores anteriores obtém-se:

$$V_{v,Rd,nervura} = 0.495 \times 10^{-3} \times 84 \times 106 = 4.41 \text{ kN} / \text{nervura}.$$

O esforço transversal resistente por metro é dado por:

$$V_{v,Rd} = V_{v,Rd,nervura} / 0.205 = 21.50 \text{ kN} / \text{m}.$$

Como $V_{Ed} = 18.29 \text{ kN} / \text{m} < V_{v,Rd} = 21.50 \text{ kN} / \text{m}$, a laje apresenta resistência suficiente ao esforço transversal vertical.

iii) Esforço de corte longitudinal

Para o cálculo da resistência ao corte longitudinal, em lajes contínuas a NP EN 1994-1-1 (cláusula 9.7.3 (6)) permite calcular o comprimento de corte a partir de um vão isostático equivalente igual a $0.90 L$ para vãos de extremidade, embora outras aproximações também são admissíveis. Sendo assim o comprimento de corte L_s é dado por $L_s = 0.9 \times 3.0 / 4 = 0.675 \text{ m}$. A resistência ao corte longitudinal, por metro de largura, é dada por:

$$V_{l,Rd} = \frac{b d_p}{\gamma_{vs}} \left(\frac{m A_p}{b L_s} + k \right) = \frac{1000 \times 106}{1.25} \times \left(\frac{98.32 \times 1137}{1000 \times 675} + 0.080 \right) \times 10^{-3} = 20.83 \text{ kN} / \text{m}.$$

Como $V_{Ed} = 18.29 \text{ kN/m} < V_{i,Rd} = 20.83 \text{ kN/m}$, a laje apresenta resistência ao esforço de corte longitudinal suficiente, segundo o método $m-k$.

Estado limite de deformação

i) Estado limite de deformação

Na verificação do estado limite de deformação na fase definitiva despreza-se a deformação da fase de construção, pois a laje é escorada; pela mesma razão, na verificação da flecha na fase definitiva considera-se a totalidade das cargas actuantes (opção assumida normalmente).

Para a verificação do estado limite de deformação na fase definitiva, segundo a cláusula 6.5.3 (2) da EN 1990, deve ser considerada a combinação frequente de acções, dada por:

$$p_{Ed} = (pp_{chapa} + pp_{betão} + pp_{rev+par}) + \psi_1 \times Q = (0.089 + 2.60 + 2.5) + 0.5 \times 2.0 = 6.19 \text{ kN/m}^2.$$

Segundo a cláusula 9.8.2 (5) da NP EN 1994-1-1, no cálculo da flecha pode ser usado um momento de inércia equivalente I_{eq} igual à média dos valores do momento de inércia relativos à secção fendilhada e não fendilhada (zonas com momento flector positivo).

O coeficiente de homogeneização para efeitos de longa duração é dado por:

$$n = \frac{E_a}{E_{cm}/2} = \frac{210}{31/2} = 13.55.$$

O momento de inércia médio entre a inércia não fendilhada e a inércia fendilhada em flexão positiva, obtido a partir do Quadro 3.5, é dado por: $I_{eq} = 1012 \times 10^{-8} \text{ m}^4/\text{m}$.

A rigidez de flexão média, a considerar em 85% ($0.85 \times 3.00 = 2.55 \text{ m}$) dos vãos a partir dos apoios de extremidade, é dada por:

$$EI_{eq} = 210 \times 10^6 \times 1012 \times 10^{-8} = 2125.2 \text{ kNm}^2/\text{m}.$$

O momento de inércia da secção fendilhada em flexão negativa, obtido a partir do Quadro 3.5, é dado por: $I_{eq} = 280 \times 10^{-8} \text{ m}^4/\text{m}$.

A rigidez de flexão fendilhada sob a acção de flexão negativa, considerada num comprimento igual a $0.15 \times 3.00 = 0.45 \text{ m}$ para cada lado do apoio intermédio, é dada por:

$$EI_{eq} = 210 \times 10^6 \times 280 \times 10^{-8} = 588.0 \text{ kNm}^2/\text{m}.$$

Efectuando o cálculo da deformada, com as cargas e valores de rigidez anteriores, obtém-se:

$$\delta_a = 1.86 \text{ mm}.$$

Considerando que o limite de flecha admissível é dado por $L/300$, tem-se:

$\delta_a = 1.86 \text{ mm} < 3000/300 = 10.0 \text{ mm}$, logo a laje com a chapa H60 de 0.8 mm de espessura e altura total 140 mm é suficiente.

ii) Estado limite de fendilhação

Tratando-se de uma laje contínua a armadura mínima sobre o apoio intermédio pode ser obtida a partir da cláusula 7.4.2 da NP EN 1994-1-1, usando espaçamentos e diâmetros de varões que não excedam os limites estabelecidos na cláusula 7.4.3 da mesma norma.

Em lajes mistas de edifícios a classe de exposição geralmente utilizada é a XC3 à qual corresponde um limite para a largura de fendas de 0.3 mm (EN 1992-1-1).

Segundo a cláusula 7.4.2 da NP EN 1994-1-1, a armadura mínima sobre o apoio intermédio é dada por:

$$A_s \geq k_s k_c k \frac{f_{ct,eff} A_{ct}}{\sigma_s},$$

com $k_s = 0.90$ (efeito da fendilhação inicial e escorregamento local da conexão), $k = 0.80$ (efeito de tensões não uniformes auto-equilibradas) e

$$k_c = \frac{1}{1 + \frac{h_c}{2z_0}} + 0.30 \leq 1.0,$$

sendo $h_c = 0.08 \text{ m}$ (espessura de betão acima das nervuras) e $z_0 = 58.75 - 40 = 18.75 \text{ mm}$, igual à distância entre o centro de gravidade do banzo de betão não fendilhado (linha média do banzo de betão acima das nervuras localizada a 40 mm da face superior) e o centro de gravidade da secção mista da laje não fendilhada, calculado considerando um coeficiente de homogeneização para efeitos de curta duração (localizado a 58.75 mm da face superior); por conseguinte tem-se:

$$k_c = \frac{1}{1 + \frac{0.08}{2 \times 0.01875}} + 0.30 = 0.619.$$

Para o valor médio da resistência do betão à tracção, à data das primeiras fendas, pode ser adoptado o valor $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2.6 \text{ MPa}$ (betão C25/30 aos 28 dias).

A área de betão à tracção pode simplificar-se considerar-se igual à área de betão acima das nervuras, ou seja, $A_{ct} = 1.0 \times 0.08 = 0.080 \text{ m}^2/\text{m}$.

A tensão máxima admissível na armadura imediatamente após a fendilhação, considerando varões de diâmetro 10 mm, segundo o Quadro 7.1 da NP EN 1994-1-1, para uma largura de fendas de 0.3 mm, é dada por $\sigma_s = 320 \text{ MPa}$.

Com os valores anteriores obtém-se:

$$A_s \geq 0.90 \times 0.619 \times 0.80 \times \frac{2.6 \times 10^3 \times 0.080}{320 \times 10^3} = 2.89 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{m} = 2.89 \text{ cm}^2 / \text{m}$$

Como a armadura existente, $\phi 10 \text{ mm}$ af. 150 mm ($A_s = 5.24 \text{ cm}^2/\text{m}$) é superior à armadura mínima calculada, à partida não é necessário colocar mais armadura para controlo de fendilhação. Segundo o Quadro 7.2 da NP EN 1994-1-1, para varões $\phi 10 \text{ mm}$ e $\sigma_s = 320 \text{ MPa}$, o espaçamento máximo entre varões é de 100 mm, inferior ao valor utilizado. Contudo a área de armadura utilizada ($\phi 10 \text{ mm}$ af. 150 mm) ainda é superior à área mínima, se calculada com $\sigma_s = 280 \text{ MPa}$ (ver Quadro 7.1 da NP EN 1994-1-1); nestas condições, segundo o Quadro 7.2 da NP EN 1994-1-1, o espaçamento máximo entre varões já é de 150 mm (igual ao valor utilizado); desta forma conclui-se que não é necessária armadura adicional para controlo de fendilhação.

iii) Estado limite de vibração

Este estado limite é verificado com a metodologia descrita para o exemplo anterior. O valor para a rigidez de flexão considera-se $EI_{eq} = 2125.2 \text{ kNm}^2 / \text{m}$ e para a massa $m = 0.607 \text{ Ton} / \text{m}^2$

Dada a simetria relativamente ao apoio central, o primeiro modo de vibração corresponde a uma deformada anti-simétrica. O cálculo da frequência própria e massa modal pode ser feito manualmente considerando um vão simplesmente apoiado com 3.0 m. Assim, considerando que os apoios da laje são rígidos permitindo rotação livre, a frequência própria vem dada por:

$$f = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_{eq}}{mL^4}} = \frac{\pi}{2} \times \sqrt{\frac{2125.2}{0.607 \times 3.0^4}} = 10.3 \text{ Hz},$$

e a massa modal vem dada por:

$$M = 2 \times \frac{mL}{2} = 2 \times \frac{0.607 \times 3.0}{2} = 1.821 \text{ ton}$$

O resultado obtido encontra-se representado por um quadrado nos gráficos do Anexo A. Para amortecimento baixo, por exemplo $D=1\%$ e $D=2\%$, o pavimento é classificado como Classe F.

Para amortecimento $D=5\%$ a classificação é Classe E. No primeiro caso, de acordo com a classificação do Quadro 4.1, o piso é desaconselhável para utilização na maior parte das situações, sendo apenas aconselhável para equipamentos desportivos ou industriais onde a exigência em termos de vibração deverá ser menor. No segundo caso, em que o amortecimento considerado é maior, o piso só seria desaconselhável para utilização em, por exemplo, escolas, unidades de saúde ou para suportar equipamentos sensíveis à vibração..

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O programa **H60 Calculator** permite o cálculo e dimensionamento de lajes mistas com o perfil H60 fabricado por “O Feliz – Metalomecânica S. A.” para carregamentos que possam ser tratados como cargas distribuídas. Permite o dimensionamento de lajes com um ou dois tramos, sempre de acordo com o Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1).

Situações não abrangidas pelo software, tais como as resultantes da aplicação de cargas pontuais ou da existência de furos devem ser tratadas de acordo com a regulamentação aplicável, nomeadamente o Eurocódigo 4 (NP EN 1994-1-1).

No cálculo estrutural elaborado pelo software assume-se implicitamente que os apoios da laje não permitem afundamentos (apoios rígidos). A existência de apoios flexíveis (vigas com rigidez baixa) implica cuidados adicionais na realização do cálculo estrutural, os quais saem fora do âmbito dos objectivos deste manual.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEN (2002). EN 1990:2002 - Eurocode, Basis of Structural Design, European Committee for Standardization, Brussels.
- [2] CEN (2002). Eurocode 1, EN-1991-1-1:2002 - Actions on Structures – Part 1-1: General Actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings, European Committee for Standardization, Brussels.
- [3] CEN (2007). Eurocode 3 - Design of steel structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, EN 1993-1-1, European Committee for Standardization, Brussels.
- [4] CEN (2004). Eurocode 3 - Design of steel structures, Part 1-3: General rules Supplementary rules for cold-formed members and sheeting, EN 1993-1-3, European Committee for Standardization, Brussels.
- [5] CEN (2004). Eurocode 3 - Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements, EN 1993-1-5, European Committee for Standardization, Brussels.
- [6] CEN (2007). Eurocode 4 - Design of composite steel and concrete structures, Part 1-1: General rules and rules for buildings, ENV 1994-1-1, European Committee for Standardization, Brussels.
- [7] Design Guide for Floor vibrations, ArcelorMittal , RFCS report EUR 21972 EN, ISBN 92-79 01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>.
- [8] Johnson, R. P., Composite structures of steel and concrete: Vol 1: Beams, slabs, columns, and frames for buildings, 2nd ed., Blackwell, Oxford, 1994.
- [9] Johnson, R. P. and Anderson, D., Designer's Guide to EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings, Thomas Telford, 2004.
- [10] Calado, L. e Santos, J., Estruturas Mistas de Aço e Betão, IST Press, Lisboa, 2009.

ANEXO A – Gráficos para obtenção da classe de vibração

O gráficos seguintes permitem classificar o pavimento segundo as classes de vibração definidas no texto.

Gráfico A-1: Amortecimento modal 1%

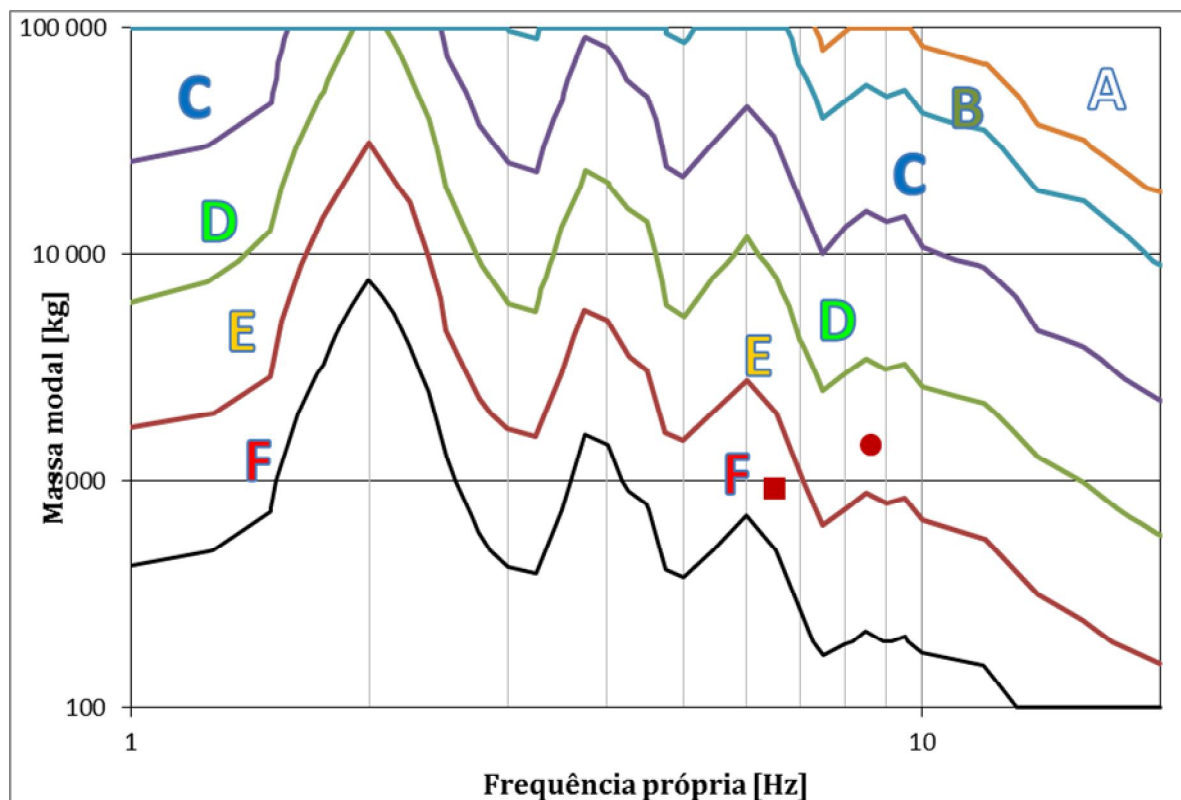


Gráfico A-2: Amortecimento modal 2%

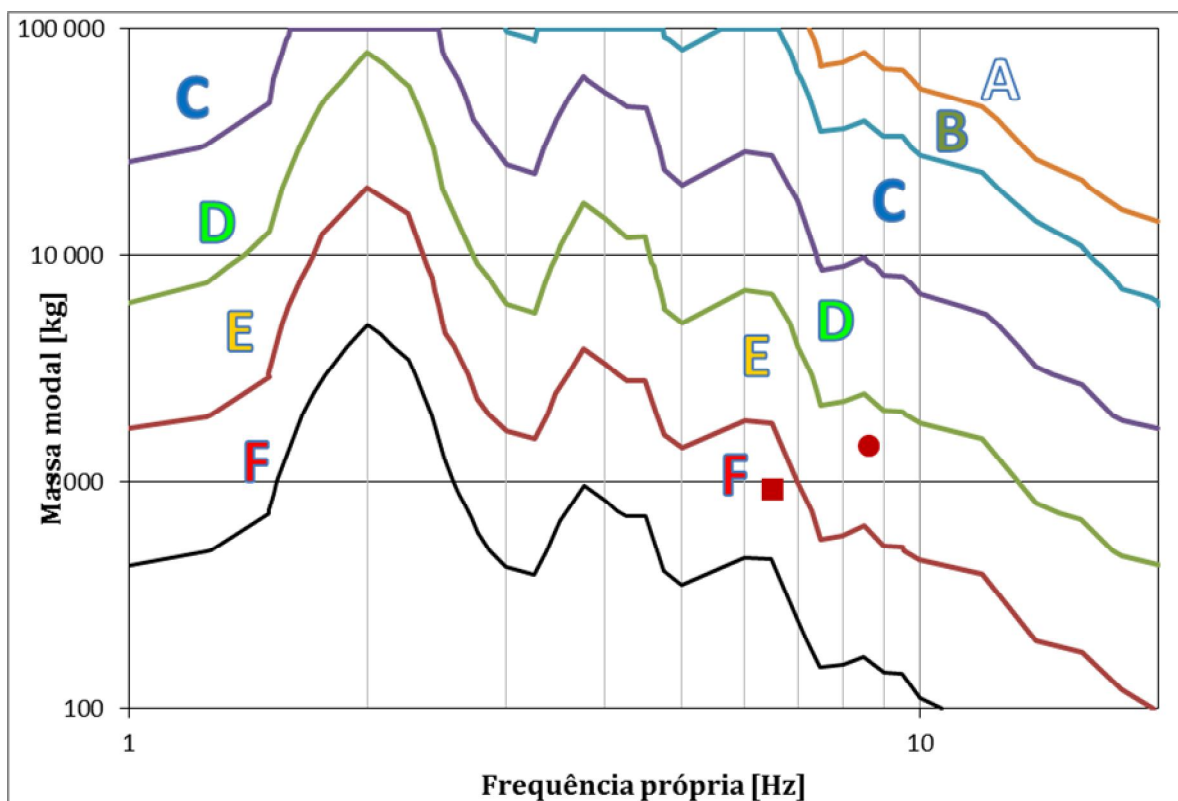


Gráfico A-3: Amortecimento modal 3%

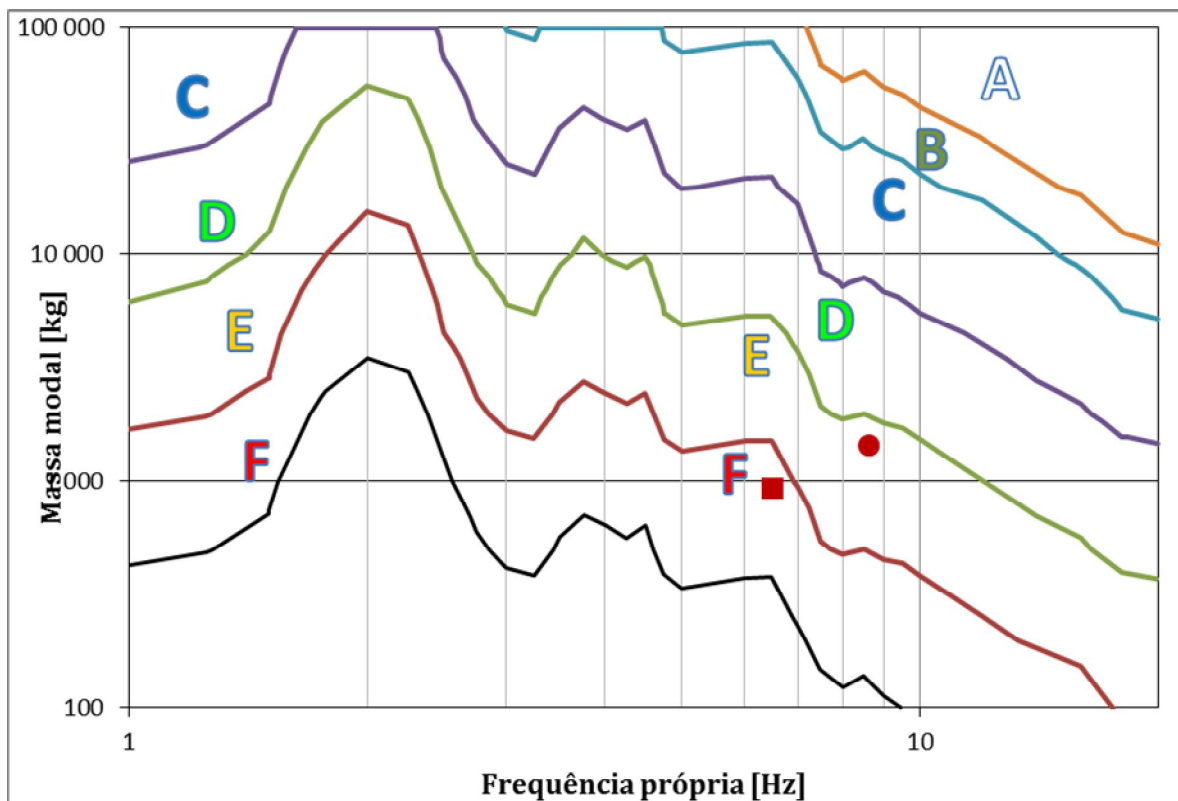


Gráfico A-4: Amortecimento modal 4%

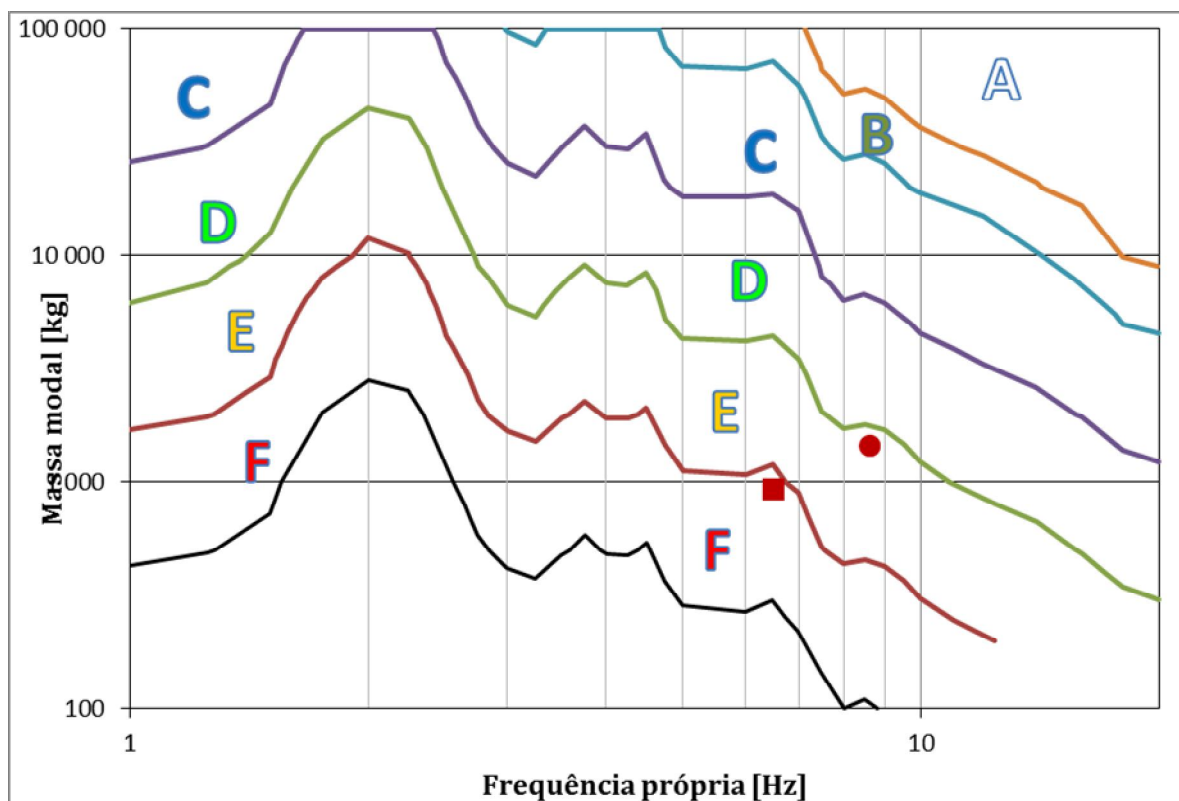
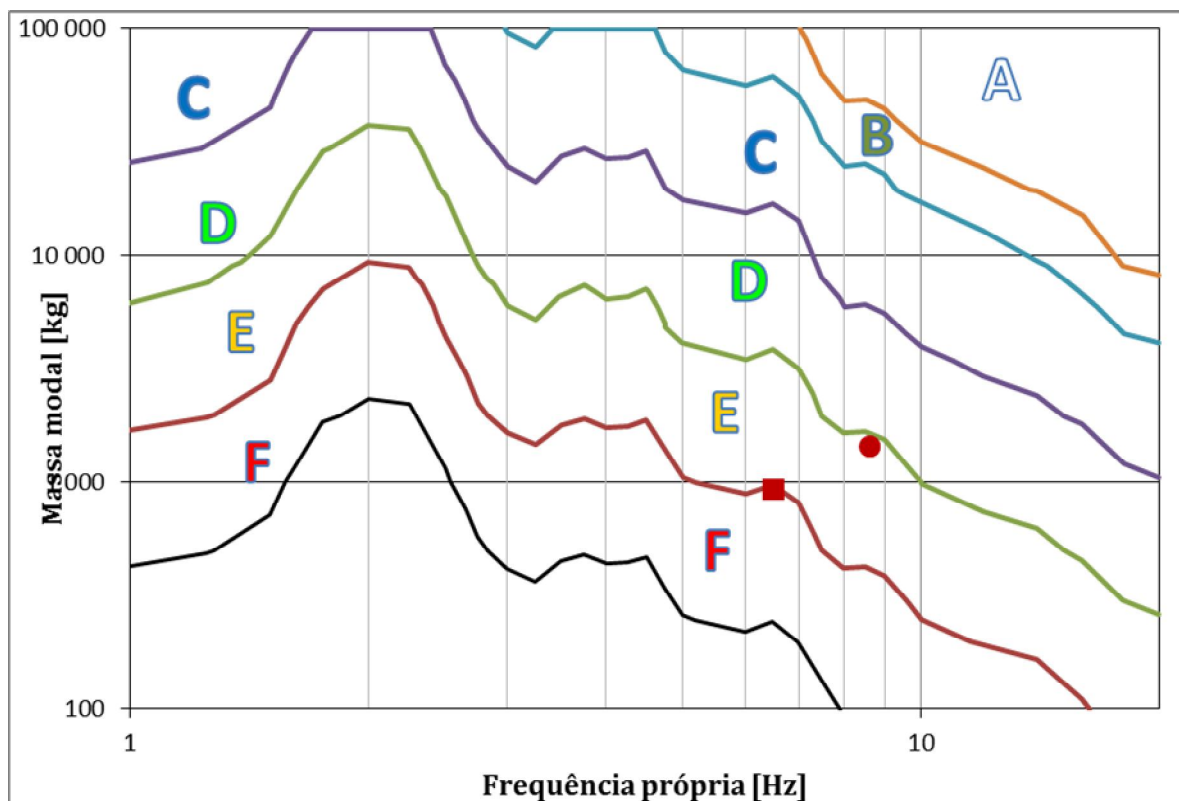


Gráfico A-5: Amortecimento modal 5%



Coimbra, 30 de Setembro de 2011

Rui Simões
(Prof. Auxiliar)

Carlos Rebelo
(Prof. Auxiliar)

Rui Belchior
(Engenheiro Civil)