

## Simulação dinâmica de um sistema para apoiar o processo de ajuste do molde de injeção

*Batista, F. C.<sup>1,2</sup>, Ribeiro, R.<sup>3</sup>, Martinho, P. G.<sup>1,2</sup> and Sousa, C. C.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Politécnico de Leiria, Leiria, Portugal

<sup>2</sup> Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto, Politécnico de Leiria, Marinha Grande, Portugal

<sup>3</sup> MBM - Metalúrgica Biosa Da Maceira, Lda.

carlos.sousa@ipleiria.pt; fernando.batista@ipleiria.pt; pedro.martinho@ipleiria.pt



### RESUMO

O fabrico de moldes de injeção de plástico inclui uma fase de ajustamento das superfícies de contacto, quando do fecho do molde. O correto ajustamento destas superfícies de contacto depende a boa performance do molde. Dependendo da dimensão do molde, há um processo de ajustamento artesanal de queda que envolve elevadas cargas de impacto. Estas cargas são geradas pela elevada energia cinética da parte do molde em queda na operação de fecho, a qual não pode ser transmitida integralmente ao solo, atendendo aos danos que as vibrações produzidas podem provocar nas estruturas adjacentes.

O presente trabalho visa avaliar o impacto gerado pela força de fecho e estudar o comportamento de uma solução com o objetivo de reduzir as vibrações transmitidas. As principais conclusões mostram que a incorporação de elementos de absorção de energia na estrutura de suporte, permitem amortecer e reduzir substancialmente as cargas transmitidas ao solo.

Palavras-chave: Molde de injeção / fecho / impacto / energia cinética / energia de deformação.

## 1. INTRODUÇÃO

O ajuste que é sempre necessário fazer aos moldes tem uma complexidade crescente que é proporcional ao seu tamanho. Os níveis de acabamento das peças moldadas são dependentes do nível de ajuste conseguido (Josh Kauzlarich, 2020). Este trabalho é atualmente realizado com prensas específicas que permitem simular até uma determinada força de fecho e manipular o molde para ser ajustado. Há várias empresas que fornecem essa solução como a Millutensil (<http://www.millutensil.com>) ou SXKH (<http://www.sxkhglobal.com>). Estas soluções são caras e não permitem a simulação de uma pressão de fecho equivalente ao processo de injeção. Para resolver este problema é por vezes deixado cair o molde sobre o outro sem grande controlo num processo muito artesanal e pouco pratico. O projeto aqui proposto vem tentar resolver esse problema.

O processo de fecho dos moldes presente neste projeto envolve cargas elevadas de choque que se propagam verticalmente na estrutura. Estas cargas são geradas pela elevada energia cinética do molde em queda. Esta energia não pode ser totalmente transmitida para o solo porque as ondas de vibração geradas iriam provocar danos nas estruturas adjacentes.

Para reduzir esta energia transmitida ao pavimento foi encontrado um material elastomérico reforçado com tecido que ao deformar-se absorve a energia cinética do impacto. Este material é colocado sob a estrutura que suporta o molde inferior.

Este material elastomérico, “Fabreeka pad” (placa) é produzido pela empresa FABREEKA (Catálogo Fabrekka, 2020) que comercializa várias placas deste material com espessuras diferentes. Estas placas são utilizadas na construção civil, em equipamentos de testes de vibrações e nas fundações de máquinas ferramentas.

## 2. SIMULAÇÃO DE UM CASO

A máquina projetada é bastante complexa e para validar a utilização das placas com o material da FABREEKA (Catálogo Fabrekka, 2020) recorreu-se ao programa de elementos finitos comercial Ansys (Ansys User's Manual, 2019). Antes de realizar as simulações da máquina foi simulado um caso simples de aplicação das placas que a própria empresa do material dá como exemplo para a seleção das placas. Desta forma poderemos ter mais alguma confiança nos resultados do modelo numérico de toda a máquina.

O processo de choque gerado pela queda do molde é um problema numérico não linear de curta duração, inferior a 0,1 segundos. Estes problemas são resolvidos com métodos numéricos explícitos (Matthew W. Salveson, 1996) que entram em conta com a velocidade da deformação elástica dos materiais na superfície de contacto dos corpos. O processo é de elevada complexidade pelo que só determinados softwares comerciais conseguem gerir de forma autónoma o processo iterativo de resolução das equações não lineares de contacto. Neste

sentido foi usado o módulo “Explicit Dynamics” da Ansys (Ansys Explicit Dynamics Analysis Guide, 2017).

O caso aqui sugerido é de um isolamento de uma fundação. Um bloco de aço cai de uma determinada altura sobre uma base de betão e provoca uma deformação no betão. Pretende-se colocar uma placa isoladora FABREEKA para absorver parte da energia cinética e reduzir a força transmitida ao betão. Dados do problema: A massa do bloco em queda é de 2000 *lbs* (*m*), altura de queda é de 1,27 *m* (*h*), a deformação no betão é de 0,397 *mm* (*D*) e pretende-se que a força transmitida (*F*<sub>2</sub>) ao betão seja 1/4 da força transmitida inicial (*F*<sub>1</sub>) sem a placa isoladora.

## 2.1 Resolução analítica sugerida

- Passo 1 - No instante antes do contacto da placa com o betão a energia cinética é igual a energia potencial,

$$E_c = E_p = m \cdot g \cdot h = 11\,300\,J \quad (1)$$

- Passo 2 - Após o choque inicial no betão a energia cinética é transformada em energia de deformação,

$$E_c = E_{\text{deformação}} = \frac{1}{2} \cdot F_1 \cdot D \Rightarrow F_1 = 56\,916\,560\,N \quad (2)$$

- Passo 3 - Pretendemos que a força transmitida, *F*<sub>2</sub>, seja 1/4 da força *F*<sub>1</sub>, ou seja,

$$F_2 = 0,25 \cdot F_1 = 14\,229\,100\,N \quad (3)$$

O que vai reproduzir uma deformação final no betão, *D*<sub>s</sub>, o que corresponde a uma energia de deformação final do betão, *E*<sub>s</sub>,

$$D_s = 0,25 \cdot D = 0,09925\,mm \Rightarrow E_s = \frac{1}{2} \cdot F_2 \cdot D_s = 706\,J \quad (4)$$

- Passo 4 - A energia de deformação que a placa terá de absorver é:

$$E_f = E_c - E_s = 10\,591,8\,J \quad (5)$$

Assim a placa vai absorver 93,7 % da energia cinética.

- Passo 5 - Se limitarmos, por motivos de segurança, a tensão sobre a placa para 6,9 *MPa*, podemos determinar a área da placa,

$$A_f = \frac{F_2}{\sigma} = 2,062\,m^2 \quad (6)$$

- Passo 6 - Com a relação entre a energia cinética por unidade de volume e a tensão gerada na placa, a FABREEKA sugere uma expressão para calcular a espessura da placa:

$$T_f = \frac{985000 \cdot E_f}{A_f \cdot \sigma^{5/3}} = 20,23\,mm, \quad (7)$$

- **Passo 7** - Cálculo da deformação da placa com a Lei de Hooke da FABREEKA:

$$D_f = T_f \cdot \left(\frac{\sigma}{E_{yf}}\right)^{\frac{2}{3}} = 1,8 \text{ mm, com } E_{yf} = 255,2 \text{ MPa} \quad (8)$$

## 2.2 Análise de elementos finitos

- Para simular a base foi escolhido um betão com a mesma rigidez, ou seja,

$$K = \frac{F1}{D} \quad (9)$$

Na Fig. 1 temos o esquema de blocos utilizado no Ansys e Fig. 2 estão indicadas as malhas dos três corpos. A malha do conjunto ficou condicionada pela reduzida espessura da Placa. Após a queda do Bloco a Placa e o Betão deformam-se como é visível nas Fig. 3 e Fig. 5. Esse contacto gera tensões normais representadas nas Fig. 4 e Fig. 6.

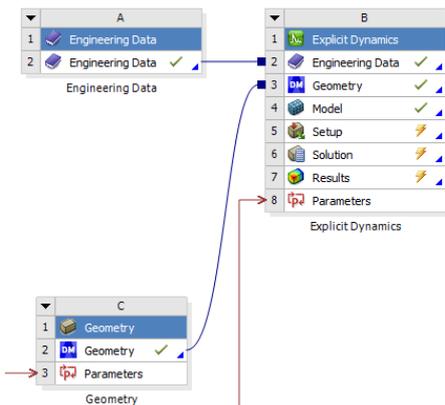


Fig. 1 - Esquema do projeto

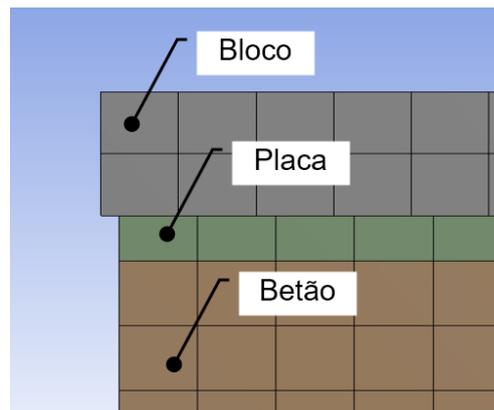


Fig. 2 - Malha do Bloco, Placa e do Betão

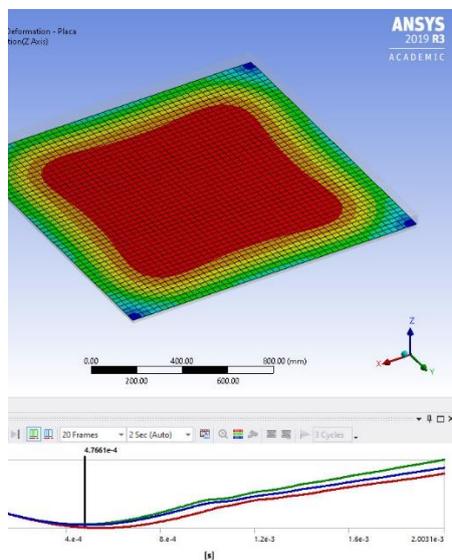


Fig. 3 - Deslocamento da Placa

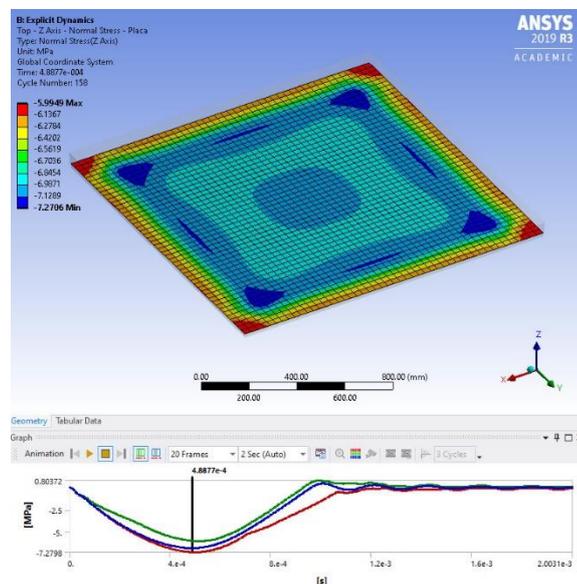


Fig. 4 - Tensões normais na Placa

### 2.3 Conclusão

- Os deslocamentos médios na placa (Fig. 3) estão na ordem de  $1,44\text{ mm}$  o que não é muito diferente do valor  $D_f = 1,8\text{ mm}$ .
- Os deslocamentos médios do Betão (Fig. 5) estão na ordem de  $0,11\text{ mm}$  o que corresponde ao  $D_s = 0,09925\text{ mm}$  calculado analiticamente.
- As tensões normais médias na Placa e no Betão (Fig. 4 e Fig. 6) estão próximas de  $6,9\text{ MPa}$  e que coincide com os resultados analíticos.

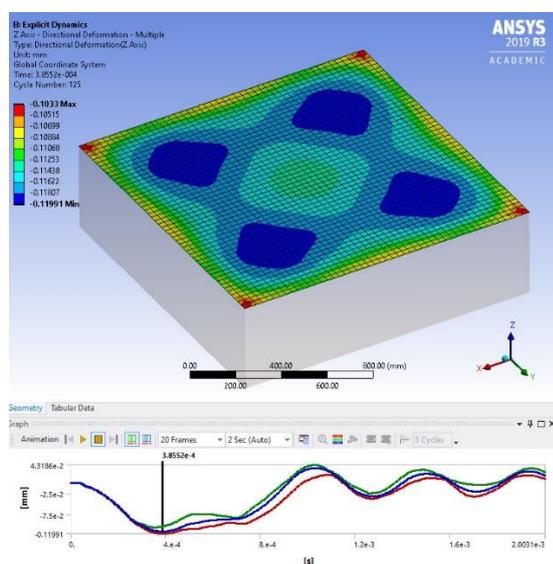


Fig. 5 - Deslocamento do Betão

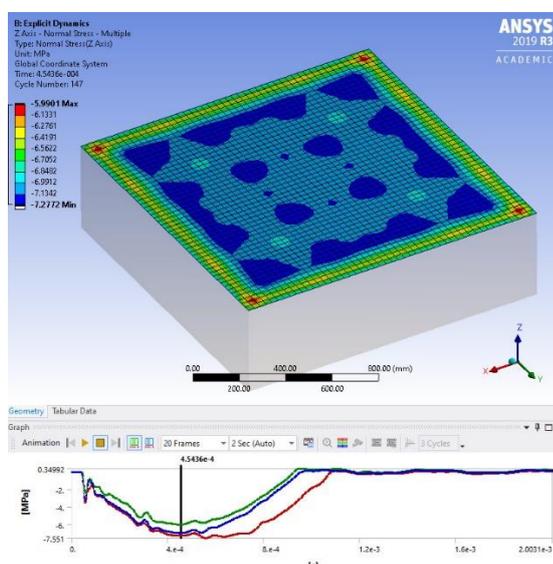


Fig. 6 - Tensões normais no Betão

### 3. SISTEMA ERGOSYSTEM

O equipamento a projetar Fig. 7 destina-se a permitir rentabilizar o trabalho de ajuste de moldes de injeção com as seguintes capacidades:

- Deslocar as duas partes do molde para posição de trabalho dos operadores de bancada.
- Realizar movimentos controlados de ambas as partes.
- Permitir o fecho do molde segundo o eixo vertical.
- Permitir que o molde superior realize, de forma controlada, uma queda sobre a molde inferior para, desta forma, simular a força de fecho e permitir verificar a perfeição de contacto ou não contacto a partir de marcador colorido colocado previamente nas superfícies em causa.

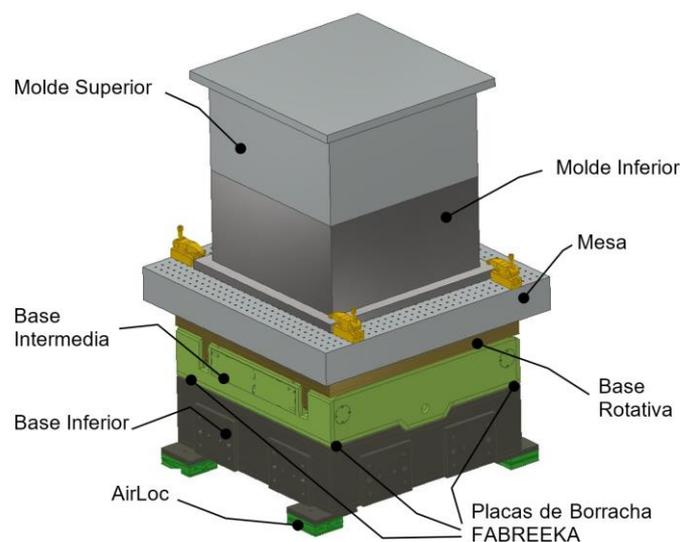
O impacto do molde superior sobre o molde inferior na queda gera um conjunto de esforços de impacto elevados sobre toda a estrutura que suporta o molde inferior, que iremos tentar aqui quantificar.

A energia cinética do molde superior terá de ser absorvida pela estrutura inferior de suporte, levando a que haja momentaneamente uma carga vertical na estrutura inferior, muito superior ao valor de carga estática que corresponde ao peso do molde superior.

Estas estruturas terão de suportar/absorver as cargas transmitidas sem sofrer qualquer deformação plástica. Os apoios da estrutura inferior (AirLoc) serão os principais pontos críticos, e terão de ter uma atenção redobrada.

A introdução de sistemas de absorção de energia (amortecimento), sem perturbação do rigor posicional da estrutura irá reduzir a energia transmitida às máquinas vizinhas.

Na Fig. 7 estão identificadas as partes mais importantes da estrutura de suporte do molde inferior que será fixado na Mesa. De forma simples, temos dois blocos que representam o Molde Inferior que é fixo a uma mesa e o Molde Superior que irá sofrer uma queda controlada por guias que não estão indicadas na Fig. 7.



**Fig. 7 - Modelo CAD da estrutura de suporte do ErgoSystem**

### 3.1 Análise de elementos finitos

A simulação computacional da estrutura de forma completa é um processo demasiado pesado e bastante moroso em termos computacionais.

Para simplificar, foram identificados os vários corpos que compõe a estrutura e em função do seu papel no movimento de fecho dos moldes realizou-se uma simplificação dessas geometrias.

Para além desta aproximação foi assumido que o problema tem dois planos de simetria verticais o que nos permite analisar apenas 1/4 da estrutura e tornar assim o problema computacional mais leve e com as condições de simetria o cálculo é mais estável no processo de queda (Yeh and Huang, 2014).

Foram assumidas as dimensões principais da estrutura da Fig. 7 e assumiu-se que o Molde Superior e o Molde Inferior terão uma massa de 6 toneladas cada um e com dimensões gerais de  $1200 \times 1200 \times 600\text{mm}$  (base x altura). Cada uma das 4 placas Fabreeka tem uma área de  $590\text{ cm}^2$  e uma espessura de  $13\text{ mm}$ .

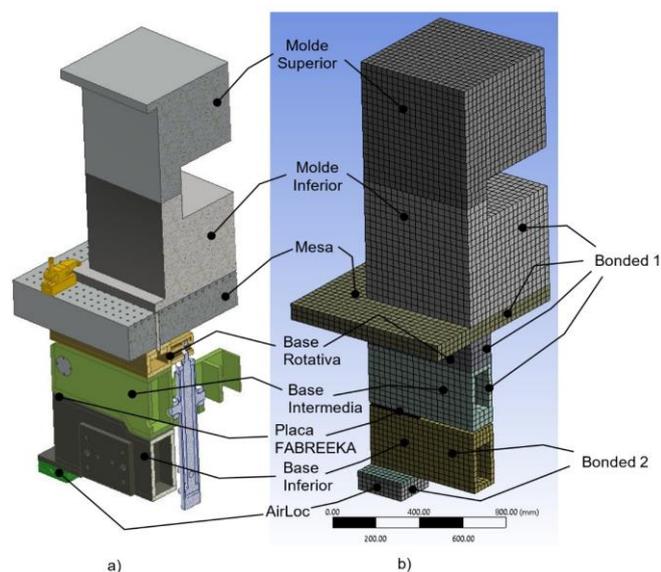
Foram atribuídas as características de um aço de construção a todos os corpos excepto as 4 placas, Tabela 1.

Na Fig. 8 a) e Fig. 9 a). temos o modelo CAD que representa 1/4 do modelo CAD, Fig. 7.

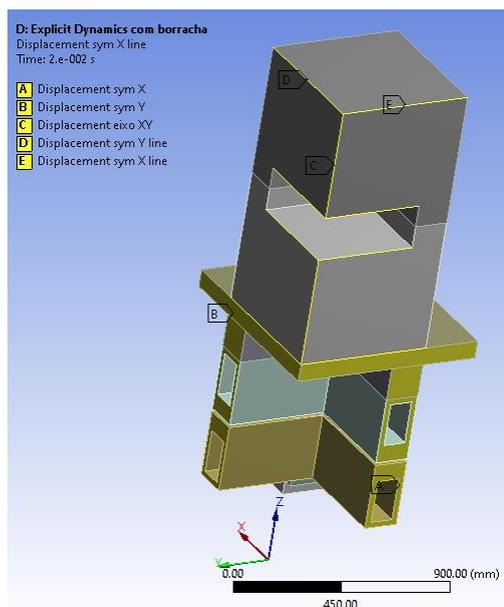
**Tabela 1 - Características dos materiais**

Material	Modulo de Elasticidade (E)	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Densidade ( $\rho$ )
Aço dos corpos	200 GPa	0,3	7850 kg/m <sup>3</sup>
Placas	70 GPa	0,3	1185 kg/m <sup>3</sup>

Na Fig. 8 b) podemos ver o modelo de elementos finitos de cada um dos corpos que constitui a estrutura. O conjunto tem 22380 elementos finitos hexaédricos e elementos de contacto. Estes elementos de contacto foram estabelecidos entre os dois Moldes, entre a Placa e a Base Intermedia e entre a Placa e a Base Inferior. Os outros corpos foram ligados rigidamente (Bonded 1 e Bonded 2), Fig. 8 b). Desta forma é possível obter as tensões de contacto entre os dois moldes e entre a Placa e as Bases respectivas.



**Fig. 8 - Malha de elementos finitos de 1/4 do conjunto.**



**Fig. 9 - Condições de fronteira - planos de simetria**

Na Fig. 9 estão indicadas as condições de fronteira de simetria. Para não influenciar a superfície de contacto entre os dois moldes foram apenas impostas restrições de movimento às arestas indicadas.

### 3.2 Condições iniciais

No processo de afinação do molde, o Molde Superior é deixado cair de várias alturas para induzir forças de choque nas superfícies da junta. Na presente simulação foi elevado o Molde Superior a uma altura de 5 mm e foi deixado cair sobre o Molde Inferior. Foi imposto que a

base inferior do AirLoc é fixa, pois será por aqui que irá haver transmissão de esforços para o pavimento com as respetivas vibrações.

Foi utilizado o modulo “Explicit Dynamics” do Ansys para realizar a simulação de queda. Todo o processo energético de deformação no choque e na queda que acontece ao longo do tempo da simulação é gerido pelo próprio modulo. Apenas precisamos de indicar a altura de queda (o que se traduz numa velocidade inicial) e o sentido da aceleração da gravidade.

A condição inicial de queda de 5 mm,  $h$ , corresponde a uma velocidade inicial,  $v_0$ , ou seja, uma condição inicial do problema dinâmico, Eq. (10).

$$v_0 = \sqrt{2gh} = 313,155 \text{ mm/s, com } g = 9806,6 \text{ mm/s}^2 \quad (10)$$

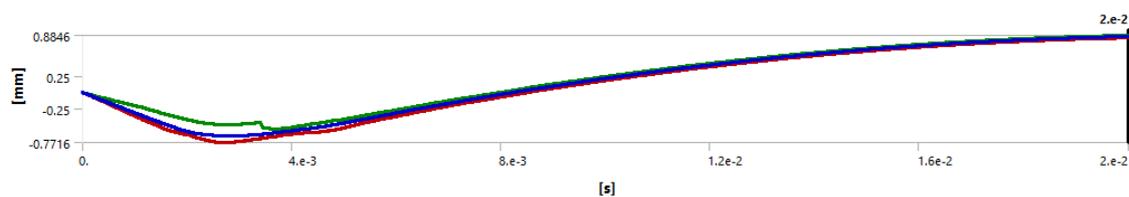
Desta forma a simulação é realizada com os dois moldes em contacto, mas com a imposição de uma velocidade inicial,  $v_0$ , ao Molde Superior. O choque entre os moldes é feito num instante de tempo muito pequeno. Após algumas simulações definiu-se o tempo de simulação entre 0s e 0.02s. O tempo de integração no processo de calculo é gerido pelo próprio modulo “Explicit Dynamics”. No output dos resultados escolheu-se uma resolução de 1000 pontos.

Para demonstrar as vantagens da colocação da Placa FABREKKA realizaram-se dois simulações, um modelo sem as Placas e outro modelo com Placas. Desta forma vamos analisar o quanto é importante a colocação das Placa FABREKKA na transmissão de esforços entre os corpos e o esforço transmitido diretamente para o pavimento.

### 3.3 Resultados do modelo sem Placa

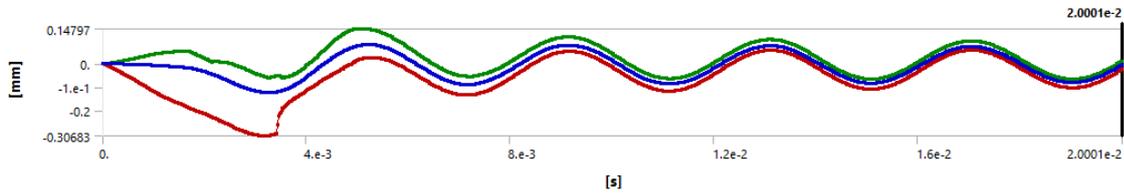
Neste modelo foi usada a malha de elementos finitos presentes na Fig. 8 b) sem a Placa, assim a Base Inferior e a Base Intermédia foram ligadas rigidamente. Ficando assim o modelo com todos os corpos ligados rigidamente (Bonded 1 + Bonded 2) expeto o Molde Superior. Os outputs respeitantes às superfícies são apresentados ao longo do tempo com 3 curvas, valores máximos a verde, valores mínimos a vermelho e valores médios a azul. Todos os gráficos dos resultados têm estas 3 curvas.

O Molde Superior ao chocar no Molde inferior sofre, após um pequeno deslocamento vertical para baixo, uma resposta vertical ascendente como se pode ver na Fig. 10.



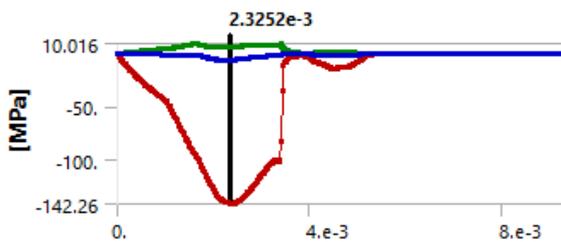
**Fig. 10 - Deslocamento vertical do Molde Superior do modelo sem placa**

O Molde Inferior recebe essa energia de choque e fica a vibrar segundo uma curva harmónica, Fig. 11.

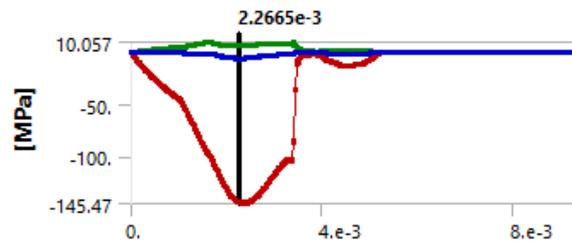


**Fig. 11 - Deslocamento vertical do Molde Inferior do modelo sem placa**

O choque entre os dois moldes vão gerar Tensões Normais de Contacto nas duas superfícies. Podemos observar na Fig. 12 e Fig. 13 o instante do choque e os valores de tensão. Pelo facto de termos uma densidade de malha algo grosseira nas superfícies de contacto entre os moldes, encontramos alguns picos de tensão nalguns elementos finitos e estão representados no gráfico pela curva vermelha. Fomos olhar apenas para a tensão média, linha a azul. O valor mínimo encontrado na curva a azul foi de  $-5,6 MPa$ , o que corresponde a uma força de choque de 1449 toneladas.

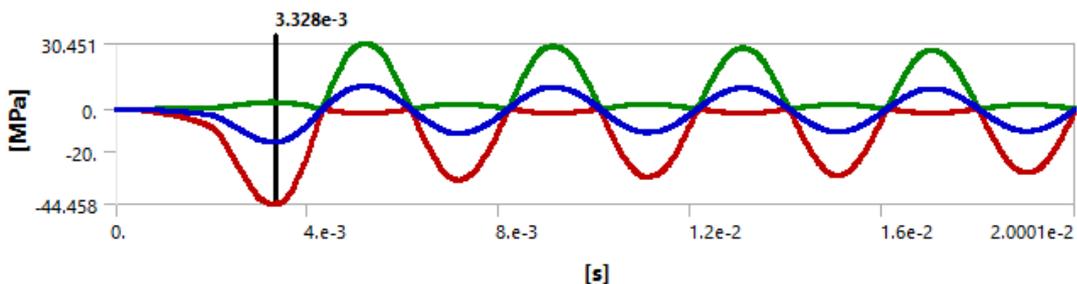


**Fig. 12 - Tensão Normal de Contacto no Molde Superior do modelo sem placa**



**Fig. 13 - Tensão Normal de Contacto no Molde Inferior do modelo sem placa**

Ao HairLoc é transmitido toda a energia dos corpos e o nível de tensão também tem uma evolução sinusoidal pois irá acompanhar o movimento vertical sinusoidal da estrutura como é visível esse movimento do Molde Inferior na Fig. 11. Na Fig. 14, a Tensão Normal média mínima encontrada na base do HairLoc é de  $-15,3 MPa$ , o que corresponde a uma força de 315 toneladas que será transmitida ao pavimento.

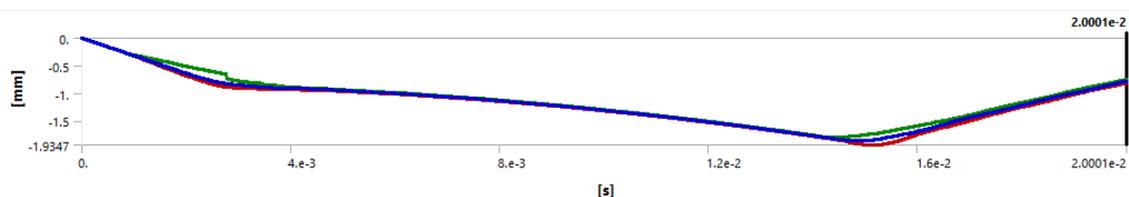


**Fig. 14 - Tensão Normal na base do HairLoc do modelo sem placa**

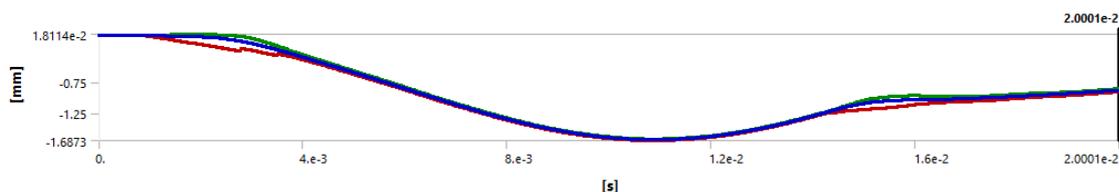
### 3.4 Resultados do modelo com Placa

A inserção das Placas entre a Base inferior e a Base intermédia teve como objetivo absorver a energia cinética dos corpos após o choque entre os dois Moldes. Neste modelo foi usada toda a malha de elementos finitos presentes na Fig. 8 b), assim Bonded 1 tem elementos de finitos de contacto com o Molde Superior e com a placa, o Bonded 2 apenas tem elementos finitos de contacto com a placa.

O Molde Superior ao chocar no Molde inferior sofre, não sofre uma repulsão suficiente no primeiro instante e tem um segundo choque mais ligeiro nos instantes seguintes, podemos ver esse comportamento das Fig. 15 e Fig. 16 e efeito das Tensões Normais de contacto nas Fig. 17 e Fig. 18.

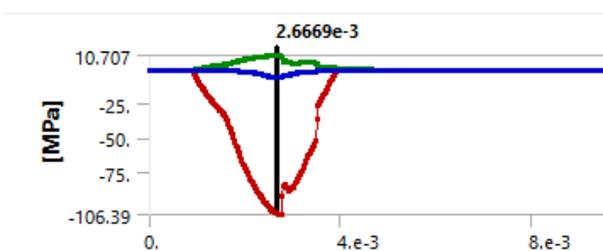


**Fig. 15 - Deslocamento vertical do Molde Superior do modelo com placa**

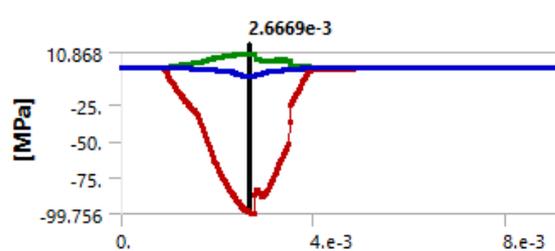


**Fig. 16 - Deslocamento vertical do Molde Inferior do modelo com placa**

Olhando apenas para o nível de Tensões Normais de Contacto do primeiro choque, Fig. 17 e Fig. 18, o nível de tensões de contacto não sofre grandes alterações em relação ao caso do modelo sem placa. Temos assim uma Tensão Média mínima de  $-5,54MPa$ , o que corresponde a uma força de choque de 1423 toneladas.

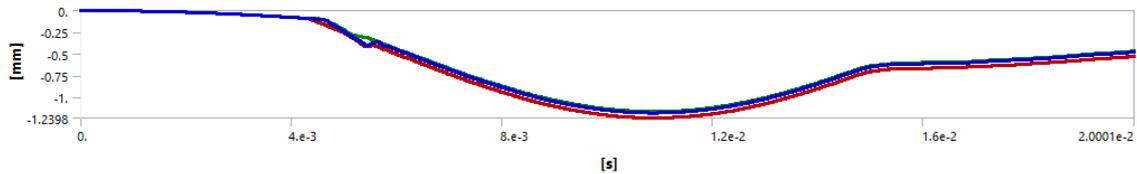


**Fig. 17 – Tensão Normal de Contacto no Molde Superior do modelo com placa**

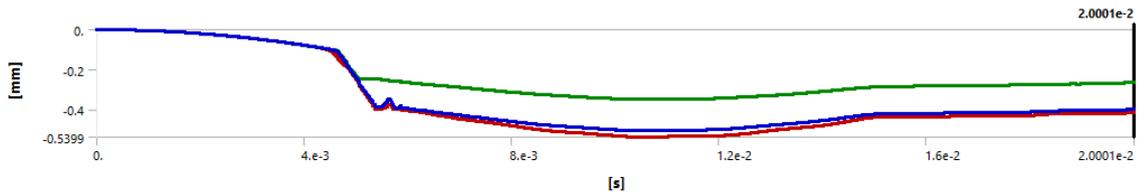


**Fig. 18 – Tensão Normal de Contacto no Molde Inferior do modelo com placa**

A Placa Fabreeka sofre uma deformação no instante depois do primeiro choque como podemos ver na comparação entre as Fig. 19 e Fig. 20.

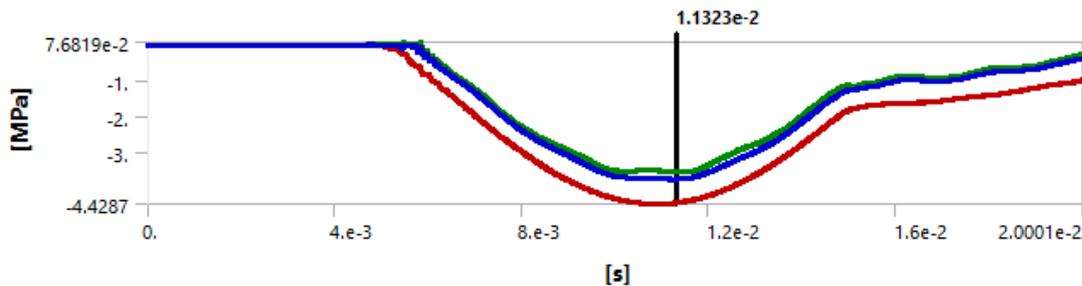


**Fig. 19 - Deslocamento vertical da superfície superior da placa do modelo com placa**



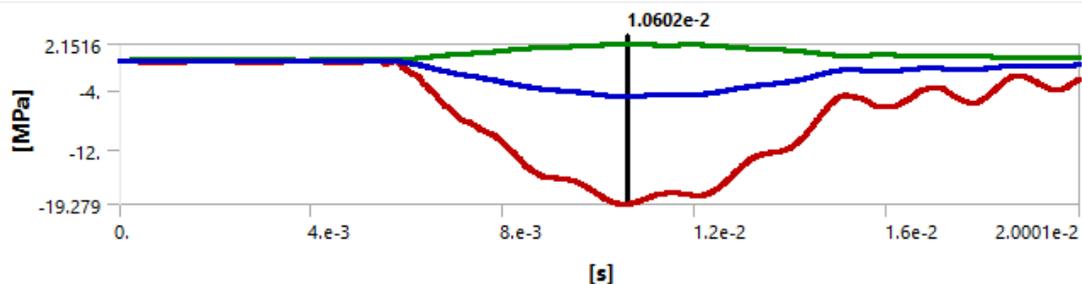
**Fig. 20 - Deslocamento vertical da superfície inferior da placa do modelo com placa**

Os corpos acima da Placa vão impor uma tensão de compressão na Placa de  $-3,74 \text{ MPa}$ , Fig. 21, que é perfeitamente admissível para as placas que o fabricante tem disponível.



**Fig. 21 - Tensão Normal de Contacto sobre a placa do modelo com placa**

A Tensão Normal média mínima encontrada na base do HairLoc é de  $-4,84 \text{ MPa}$ , o que corresponde a uma força de 99,7 toneladas que será transmitida ao solo, Fig. 22.



**Fig. 22 - Tensão Normal de Contacto na base do HairLoc do modelo com placa**

#### 4. CONCLUSÕES

Pelos valores da Tabela 2 fica claro a vantagem de utilização das placas FABREKKA, que têm a função de transformar a energia cinética em energia de deformação e assim reduzir as cargas transmitidas ao solo.

As forças de choque entre os dois moldes, como era de esperar, são semelhantes para os dois modelos. No entanto a força transmitida ao solo é reduzida para menos de 1/3, e a

vibração é muito dissipada (comparar a Fig. 14 com a Fig. 22), o que está de acordo com os objetivos da solução estudada.

A correta caracterização do material da placa no modelo numérico deverá reduzir ainda mais um pouco a força transmitida ao solo, pois foi assumido para a placa um módulo de elasticidade linear um pouco mais rígido.

**Tabela 2 - Cargas na estrutura**

	Estrutura com Placa	Estrutura sem Placa
Força de choque entre os dois moldes	1423 toneladas	1449 toneladas
Força transmitida a base dos 4 HairLoc	99,7 toneladas	315 toneladas

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo Portugal 2020 - bolsa CENTRO-01-0247-FEDER-038487.

## REFERÊNCIAS

- Catalogo Fabreka, Available online: <https://www.fabreka.com/> (accedido em 23/09/2020).
- Ansys User's Manual, Ansys Inc, 2019 R3
- Ansys Explicit Dynamics Analysis Guide, Ansys Inc, 2017
- Yeh M., Huang T., Drop Test and Finite Element Analysis of Test Board, *Procedia Engineering*, 2014, Volume 79, Pages 238-243,
- Matthew W. Salveson, Solution of Dynamic Contact Problems by Implicit/Explicit Methods, Lawrence Livermore National Laboratory, 1996
- Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr., *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics*, 8 ed.; Publisher: Mary Finch, Belmont, USA, 2010; Volume 1, pp. 165–276.
- Josh Kauzlarich, The Hidden Value of a Spotting Press. Available online: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/the-hidden-value-of-a-spotting-press> (accessed on 28 December 2020).