

# Nova abordagem para a determinação das forças de reação e requisitos de potência de acionamento de uma aplanadora – uma abordagem numérica

Autores: D. Cachulo, J. Soares, J.C.R Pereira, E. Sousa, J.A.B. Pacheco, C. Fernandes.

## RESUMO

A qualidade dos processos de manipulação de chapa, como o corte por guilhotina, laser ou longitudinal, punçonagem e conformação plástica é muito influenciada pelo estado inicial da chapa. Para melhorar a qualidade da chapa fornecida para os diferentes processos de transformação, corrigindo os seus defeitos geométricos e aliviando os perfis de tensões residuais, utilizam-se aplanadoras. Estas máquinas possuem dois grupos de rolos de trabalho motorizados, um inferior e outro superior, que levam a chapa a passar entre os rolos das duas estruturas, e a ser alternadamente dobrada e progressivamente aplanada.

Neste artigo apresenta-se um modelo representativo do processo de aplanamento pelo método de elementos finitos, em que é tido em conta o comportamento elasto-plástico do material da chapa com alternância no sentido de sollicitação (tração/compressão). O objetivo é comparar e validar os resultados obtidos por este método com os resultados obtidos por um método analítico abordado num trabalho prévio do mesmo grupo de trabalho, publicado na TecnoMetal nº 262.

O modelo do método dos elementos finitos é desenvolvido num ambiente 2D e 3D, e as vantagens e desvantagens de cada um são estudadas. São propostas perspectivas de trabalhos futuros no sentido de desenvolver modelos que representam com mais precisão o processo real de aplanamento.

## 1. INTRODUÇÃO

Como se referiu no resumo, as aplanadoras são máquinas compostas por dois conjuntos de rolos de trabalho – um superior e outro inferior – entre os quais passa uma chapa metálica. Pode-se observar uma ilustração esquemática desta configuração na Figura 1, juntamente com a notação usada neste documento para referir cada rolo de trabalho.

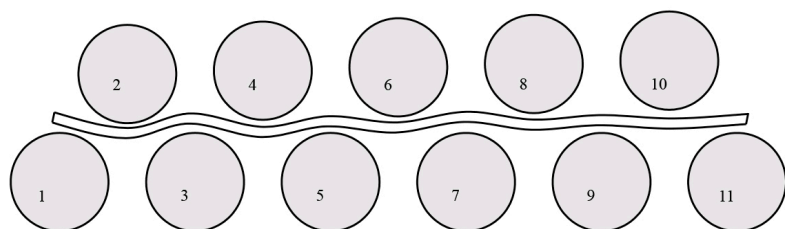


Figura 1: Representação esquemática de uma aplanadora

As estruturas onde são montados os conjuntos de rolos designam-se habitualmente por cassetes, dado formarem um conjunto compacto amovível. A cassete superior tem a capacidade de se mover verticalmente e de se inclinar da entrada para saída da chapa, o que significa que, controlando o posicionamento vertical do lado de entrada e do lado da saída, é possível impor diferentes valores de penetração dos rolos de trabalho na chapa.

De forma a medir a eficácia do processo, o perfil de tensões residuais da chapa é analisado. O objetivo da aplanadora é alterar este perfil, de forma que este passe de um estado com amplitudes de tensão altas para um outro menos acentuado. Esta evolução está esquematicamente representada na Figura 2.

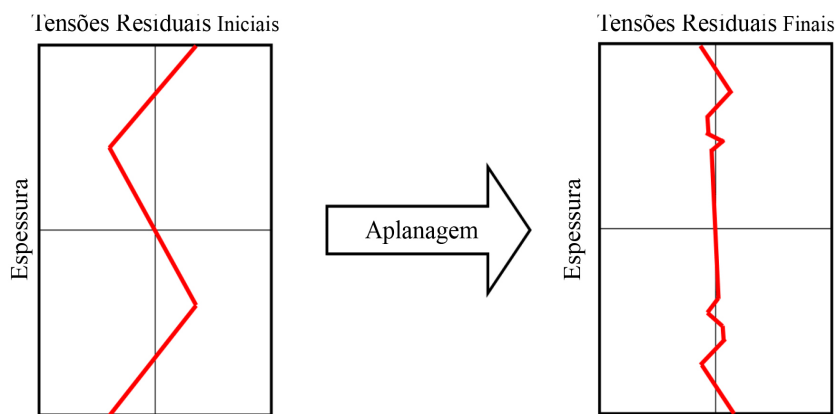


Figura 2: Representação da evolução ideal do perfil de tensões da chapa ao longo do processo

De forma a obter os estados de tensão desejados, os parâmetros da operação devem ser cuidadosamente selecionados.

Nos capítulos seguintes, são definidos os modelos de simulação numérica desenvolvidos para estudar o processo e para perceber a evolução do estado de tensões residuais e deformações da chapa ao longo dele e, também, analisar as forças de reação e taxas de estado plástico envolvidas no processo. São apresentados e comparados os modelos em ambiente 2D e 3D.

## 2. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

### 2.1 Geometria do problema e malha

Existem várias configurações que uma aplanadora pode apresentar, dependendo, por exemplo, do material e espessura da chapa que se pretende manipular [2]. Para o caso em análise, o de uma chapa aço S355JR de 3 mm de espessura e 1500 mm de largura, foi considerada uma aplanadora com 11 rolos de trabalho: 6 rolos inferiores e 5 rolos superiores. A distância entre rolos da mesma cassete é de 48 mm, e a distância horizontal entre pontos de contacto dos rolos com a chapa é de metade desse valor: 24 mm.

Foram desenvolvidos 2 modelos idênticos, somente com a diferença de um estudado a 3 dimensões e o outro a 2 dimensões. A chapa foi modelada como um corpo deformável em ambos os casos considerando os rolos de trabalho como corpos rígidos. As dimensões da malha foram definidas de modo a garantir a convergência dos valores de força de reação dos rolos e das taxas de estado plástico.

Para o modelo 2D, foi considerada uma malha de elementos CPE4R – quadriláteros em estado plano de deformação com integração reduzida. Foram considerados 6 elementos ao longo da espessura da chapa e aproximadamente 1 mm de lado por elemento na direção do comprimento da chapa.

No modelo 3D, foram usados na chapa elementos C3D8R, elementos paralelepípedicos de 8 nós com integração reduzida. As dimensões dos elementos mantiveram-se, no entanto, com a dimensão adicional da largura. Uma condição de fronteira de simetria foi adicionada a meio da largura da chapa e 10 elementos foram modelados ao longo de metade da largura da mesma.

Para ambos os casos, foram modeladas zonas de refinamento da malha com 20 elementos ao longo da espessura da chapa e elementos com 0,3 mm de lado na direção do comprimento da chapa.

Os rolos de trabalho possuem a capacidade de deformar a chapa devido ao modelo de contacto implementado, em que se considerou um comportamento tangencial de fricção pela formulação de penalidades com um coeficiente de atrito de 0,15 e um comportamento normal modelado por Hard Contact.

A penetração de cada rolo na chapa foi imposta de acordo com o modelo descrito em [1]. Estes valores podem ser consultados na Tabela 1, juntamente com os valores de taxa de estado plástico da chapa no ponto de contacto com

cada rolo. Taxa de estado plástico é o parâmetro definido como a percentagem de espessura da chapa que sofre deformação plástica, e é analisada na zona de contacto da chapa com cada rolo.

Tabela 1: Valores de penetração e taxa de estado plástico por rolo, calculados segundo o modelo analítico em [1]

Nº Rolo	Penetração [µm]	Taxa de Estado Plástico [%]
1	665	0%
2	603	73%
3	541	80%
4	479	77%
5	418	74%
6	356	70%
7	294	63%
8	232	53%
9	170	36%
10	108	0%
11	46	0%

## 2.2 Propriedades mecânicas da chapa

A definição do comportamento do material apresenta alguns pontos importantes a ter em consideração: a estrutura vai ser plasticamente deformada e vai estar sujeita a flexões cíclicas e alternadas.

Uma chapa de aço S355 é considerada, com um módulo de elasticidade de  $E=210$  GPa, uma tensão de cedência de  $\sigma_y=355$  MPa e um coeficiente de Poisson de  $\nu=0,3$ .

Enquanto no regime elástico os aços apresentam propriedades mecânicas pouco divergentes, no regime plástico o mesmo não ocorre. Desta forma, uma caracterização exata das propriedades mecânicas do aço é necessária. Para além disto, devido ao cenário de plasticidade por flexão alternada, o efeito de *Bauschinger* deve ser considerado [3]. O aumento progressivo da tensão máxima atingida nestas condições torna o

uso de um modelo monotónico menos representativo da realidade, como o modelo cinemático ou isotrópico. Assim, opta-se por um modelo de endurecimento combinado.

O modelo de *Chaboche-Lemaitre* é usado. Este propõe a decomposição do endurecimento não-linear em vários submodelos de endurecimento linear, denominados *backstresses*. Cada *backstress* é identificado por dois parâmetros:  $C_i$  [MPa] e  $\gamma_i$ . Cada *backstress* permite sucessivamente aproximar o modelo ao comportamento real do material [4][5].

De forma a obter a curva cíclica do aço S355JR, que permite o cálculo dos parâmetros definitivos dos *backstresses*, deve-se recorrer a testes de fadiga para diferentes amplitudes de carga. Assim, para a definição do material usado no modelo numérico, recorreu-se aos resultados obtidos por *Krolo* e *Grandic* [6], presentes na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros usados no modelo plástico

$C_1$ [MPa]	$\gamma_1$	$C_2$ [MPa]	$\gamma_2$	$C_3$ [MPa]	$\gamma_3$
5327	75	1725	16	1120	10

## 3. 1º CASO DE ESTUDO

### 3.1 Configuração 2D

O primeiro caso estudado foi um defeito longitudinal da chapa, denominado de arco longitudinal, para poder mostrar as tensões residuais resultantes da diferença de comprimento das fibras exteriores para as interiores da chapa que se apresenta enrolada em bobine. A chapa foi inicialmente modelada num ambiente 2D, como uma casca em estado plano de deformações. O estado inicial de tensões residuais foi obtido impondo um deslocamento vertical da extremidade da chapa e fixando a metade oposta à mesma, deformando plasticamente a chapa. De seguida, a condição de deslocamento foi retirada e ocorreu um relaxamento das tensões da chapa, retendo esta tensões residuais. Desta forma, a deformada e o campo de tensões residuais resultantes são apresentados na Figura 3 como tensão equivalente de Von Mises.

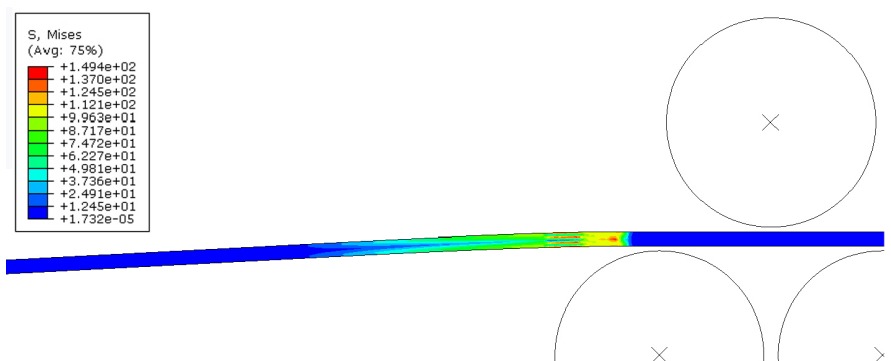


Figura 3: Chapa arqueada e campo de tensões equivalentes de Von Mises [MPa] da chapa pré-deformada, 1º caso de estudo

Na zona mais severamente afetada por tensões residuais foi feito um refinamento da malha. No centro da zona refinada, foram considerados 20 elementos ao longo da espessura da chapa, e comprimentos de elemento de aproximadamente 0,3 mm. A zona refinada da malha pode ser observada na Figura 4.

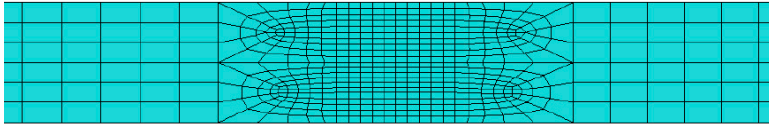


Figura 4: Refinamento da malha no modelo 2D

De seguida, os rolos de trabalho penetraram na chapa e começaram o movimento rotacional. Considerou-se um processo quase-estático sem efeitos de inércia dinâmicos. A Figura 5 é representativa da simulação.

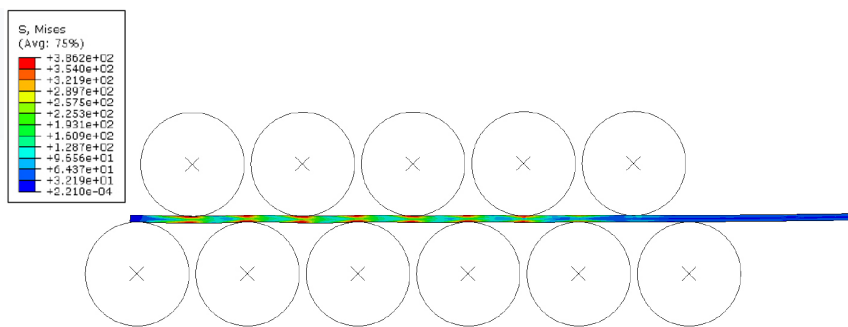


Figura 5: Campo de tensões equivalentes de Von Mises [MPa] da chapa ao longo do aplanamento, 1º caso de estudo

### 3.2 Resultados numéricos – 2D

Considere-se uma secção da chapa na zona mais severamente afetada por tensões residuais. Aí o perfil de tensões normais  $\sigma_{xx}$  na direção do comprimento da chapa antes e após o processo de aplanamento simulado numericamente podem ser observados na Figura 6. Estes perfis foram retirados da zona de malha refinada, que no final do processo já se encontra fora da zona de influência dos rolos de trabalho.

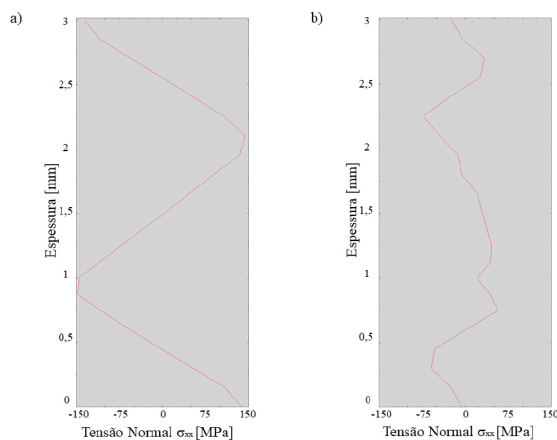


Figura 6: Perfil de tensões normais  $\sigma_{xx}$  ao longo da espessura na zona de refinamento de malha: a) antes do aplanamento; b) após o aplanamento

Note-se que o processo de aplanamento tem dois efeitos no perfil de tensões residuais: por um lado, diminui a amplitude máxima das tensões normais atingidas; por outro, aproxima as tensões ao eixo dos 0 MPa ao longo do perfil, criando um estado de tensões menos uniforme, mas mais suave no geral.

Para além de aliviar o perfil de tensões residuais, o processo de aplanamento também tem como objetivo remover eventuais defeitos geométricos que afetam a planeza da chapa. Assim, na Figura 7 pode-se observar a evolução do deslocamento vertical de um segmento de chapa na zona mais afetada por tensões residuais ao longo da direção do comprimento, que, no final do processo de aplanamento, se encontra totalmente fora da zona de influência dos rolos de trabalho.

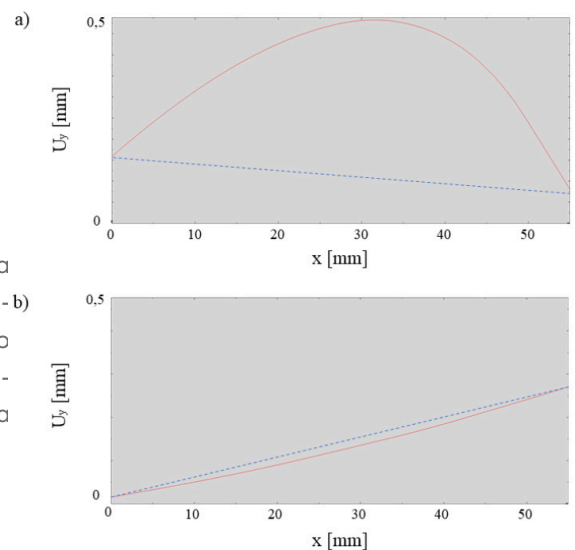


Figura 7: Deslocamento vertical  $U_y$  ao longo do comprimento da chapa: a) antes do aplanamento; b) após o aplanamento

Na figura observa-se que a deformada inicial apresenta curvatura e uma maior amplitude de valores de deslocamento. Após o processo, a curvatura da chapa é consideravelmente reduzida e a geometria da mesma está mais reta e próxima do desejável. Note-se

que a figura apresenta uma reta tracejada azul representativa da inclinação da chapa. Esta inclinação deve-se somente a questões geométricas do processo e não tem influência nefasta nas propriedades mecânicas da estrutura. A partir de uma aproximação geométrica, conclui-se que a porção de chapa representada está confinada entre duas retas paralelas distanciadas entre aproximadamente 0,36 mm antes do aplanamento e 0,04 mm após o aplanamento, o que serve como modo de quantificar a planeza da mesma.

A Tabela 3 apresenta uma comparação dos resultados obtidos recorrendo ao método analítico explicado no artigo [1] e ao modelo numérico do método dos elementos finitos. As forças de reação e as taxas de estado plástico foram alvo de análise. Observa-se que os valores de força de reação são superiores aos do modelo analítico.

Apesar de apresentarem diferenças relativas a rondar os 20%, o comportamento da distribuição de forças por rolos está de acordo com o que o modelo analítico prevê. Já os valores de taxa de estado plástico apresentam valores com menor diferença relativa, sendo a maior observada no 3º rolo. Prevê-se pelo modelo analítico que o 3º rolo será mais carregado e o que terá maior valor de taxa de estado plástico, sendo este um parâmetro definitivo na qualidade da estrutura no final do processo. Já os resultados numéricos mostram que o rolo com maior valor de taxa de estado plástico é o 4º. Ainda assim, a diferença de taxas de estado plástico entre o 4º e o 3º rolo é baixa. Os valores obtidos pelo modelo analítico, diferentes do expectável, podem ser consequência de erros devido a fatores que serão discutidos posteriormente neste artigo.

Tabela 3: Comparação de forças de reação e taxas de estado plástico obtidas pelo modelo analítico e pelo método dos elementos finitos (MEF) em 2D

Nº Rolo	Força de Reação [kN] Analítico	Força de Reação [kN] MEF 2D	Diferença Relativa das Forças de Reação	Taxa de Estado Plástico Analítico	Taxa de Estado Plástico MEF 2D	Diferença Relativa das Taxas de Estado Plástico
1	52	69	24%	0%	0%	---
2	160	209	23%	73%	70%	5%
3	217	279	22%	80%	73%	9%
4	216	275	21%	77%	75%	2%
5	211	265	20%	74%	73%	1%
6	206	250	18%	70%	71%	1%
7	199	223	11%	63%	64%	2%
8	189	181	4%	53%	54%	1%
9	168	128	31%	36%	24%	33%
10	110	73	51%	0%	0%	---
11	33	23	44%	0%	0%	---

### 3.3 Configuração 3D

Para compreender a melhor forma de representar o processo por métodos numéricos, replicou-se a simulação num ambiente 3D. As condições de fronteira, geometria e ordem de acontecimentos da simulação mantiveram-se semelhantes. Novamente, uma zona de refinamento da malha foi modelada com 20 elementos ao longo da espessura e pode ser observada na Figura 8.

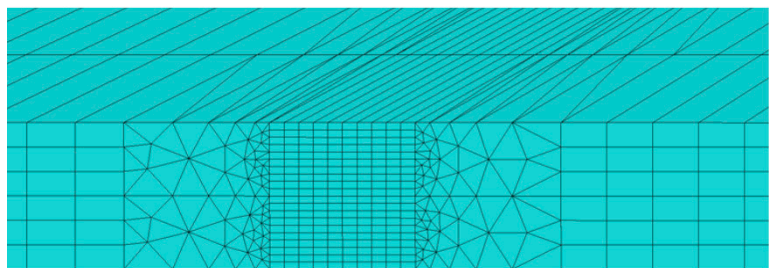


Figura 8: Refinamento da malha no modelo 3D

Por um processo semelhante ao considerado no modelo 2D, o campo de tensões residuais observado na Figura 9 foi obtido. A Figura 10 é representativa da simulação.

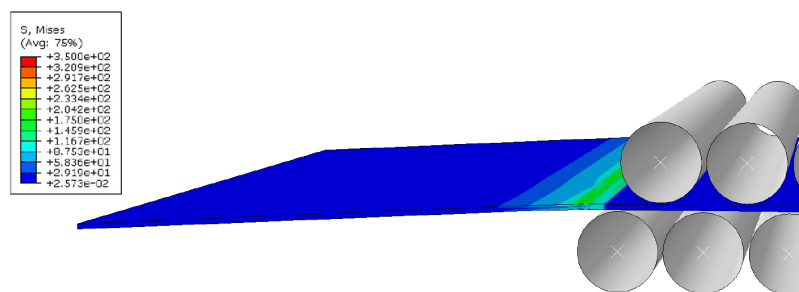


Figura 9: Campo de tensões equivalentes de Von Mises [MPa] da chapa antes do aplanamento (2º caso do estudo)

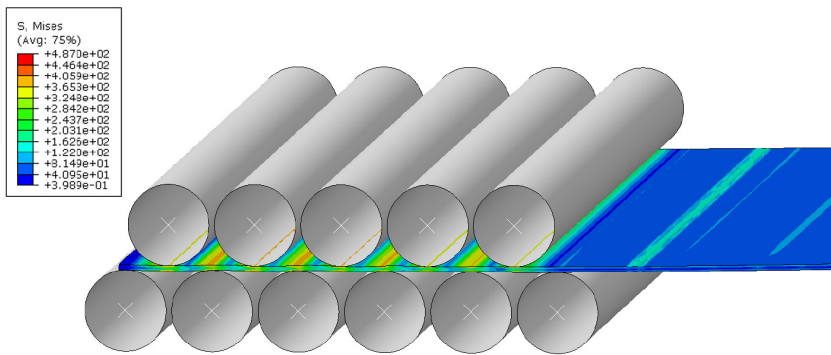


Figura 10: Campo de tensões equivalentes de Von Mises [MPa] da chapa ao longo do aplanamento (2º caso do estudo)

### 3.4 Resultados numéricos – 3D

Considerou-se para análise uma secção na zona mais severamente afetada por tensões residuais no centro da largura da chapa. O perfil das tensões normais  $\sigma_{xx}$ , ao longo da espessura, antes e após o processo obtidos pela simulação numérica podem ser observados na Figura 11.

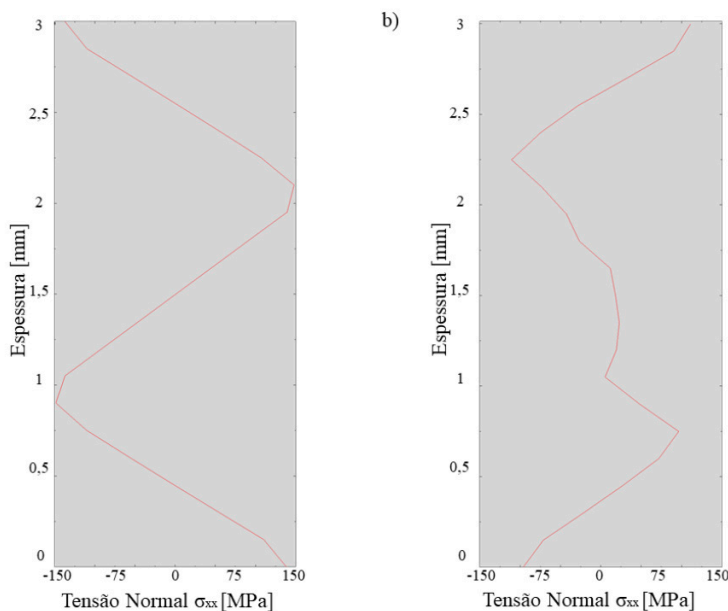


Figura 11: Perfil de tensões normais  $\sigma_{xx}$  obtidas ao longo da espessura na zona de refino de malha pelo modelo 3D: a) antes do processo de aplanamento; b) após o aplanamento

O perfil de tensões obtido antes do processo de aplanamento está de acordo com o expectável e é bastante semelhante ao obtido recorrendo ao modelo 2D. Já o perfil após o processo está mais severo, sendo alvo de discussão na próxima secção deste documento.

Na Figura 12 pode-se observar a evolução da deformada vertical de um dado segmento de chapa ao longo da direcção do comprimento.

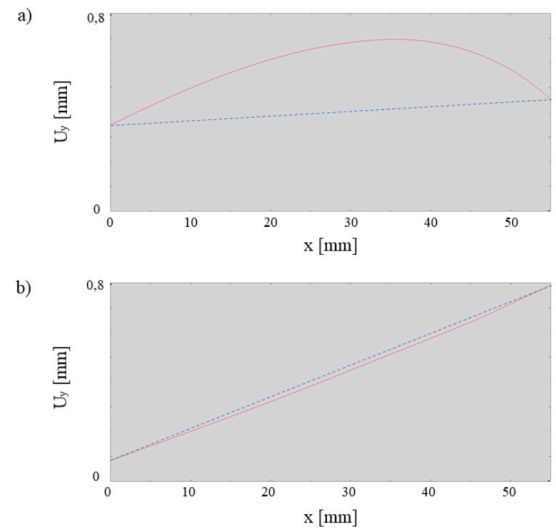


Figura 12: Deformada vertical  $U_y$  obtida ao longo do comprimento da chapa pelo modelo 3D: a) antes do aplanamento; b) após o aplanamento

Novamente, a curvatura que se observava no estado inicial da chapa foi consideravelmente reduzida, obtendo-se uma chapa mais plana e com a geometria mais próxima ao desejável. Recorrendo à mesma aproximação geométrica usada anteriormente, conclui-se que a porção de chapa representada está confinada entre duas retas paralelas distanciadas de aproximadamente 0,21 mm antes do processo de aplanamento e 0,06 mm após o processo, o que é ilustrativo da evolução da planeza da mesma.

A Tabela 4 (ver pág. 10) apresenta a comparação das forças de reacção dos rolos e das taxas de estado plástico entre os valores obtidos pelo modelo analítico e pelo modelo numérico 3D. Quanto às forças de reacção manteve-se o mesmo panorama que se observou com os valores obtidos na simulação 2D, visto que as forças apresentam a distribuição expectável, no entanto, com valores consideravelmente superiores. O mesmo acontece com as taxas de estado plástico, mas, como esperado, o 3º rolo é o que apresenta o maior valor de taxa de estado plástico.



### 3.5 Discussão de resultados

Os resultados obtidos pelos modelos desenvolvidos do método dos elementos finitos apresentam o comportamento expectável, no entanto, com algumas divergências entre a versão 2D e a versão 3D. Nesta secção, faz-se uma comparação entre os resultados obtidos entre estes 2 modelos e o modelo analítico.

Em ambos modelos do método dos elementos finitos, o processo de aplanamento permitiu uma redução considerável da curvatura da geometria inicial da chapa, como se pode observar na Figura 7 e na Figura 12. Os perfis de tensões residuais iniciais obtidos são extremamente semelhantes nos dois modelos. No entanto, o mesmo não acontece no perfil de tensões finais. Uma comparação destes pode ser observada na Figura 13.

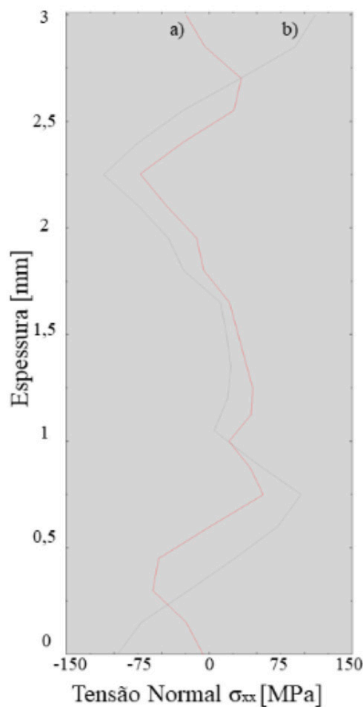


Figura 13: Perfil de tensões normais  $\sigma_{xx}$  ao longo da espessura na zona de refinamento de malha obtidas após o aplanamento pelos modelos: a) 2D; b) 3D.

Na zona central da espessura, os perfis apresentam-se com semelhanças, no entanto divergem junto às superfícies. O

perfil obtido pelo modelo 2D é suave e com amplitudes baixas, já o perfil obtido pelo modelo 3D é mais severo. Não só este apresenta maiores valores de tensões residuais, como estes valores estão mais distantes do eixo dos 0 MPa junto à superfície.

Tabela 4: Comparação de forças de reação e taxas de estado plástico obtidos pelo modelo analítico e pelo método dos elementos finitos (MEF) em 3D

Nº Rolo	Força de Reação [kN] Analítico	Força de Reação [kN] MEF 3D	Diferença Relativa das Forças de Reação	Taxa de Estado Plástico Analítico	Taxa de Estado Plástico MEF 3D	Diferença Relativa das Taxas de Estado Plástico
1	52	71	26%	0%	0%	---
2	160	212	24%	73%	82%	12%
3	217	283	23%	80%	85%	7%
4	216	282	24%	77%	84%	8%
5	211	276	24%	74%	81%	9%
6	206	267	23%	70%	77%	10%
7	199	254	22%	63%	70%	11%
8	189	230	18%	53%	57%	7%
9	168	186	10%	36%	30%	17%
10	110	117	6%	0%	0%	---
11	33	39	14%	0%	0%	---

A Tabela 5, a Figura 14 e a Figura 15 apresentam uma comparação direta das forças de reação e das taxas de estado plástico obtidas nos dois modelos numéricos 2D-3D e analítico.

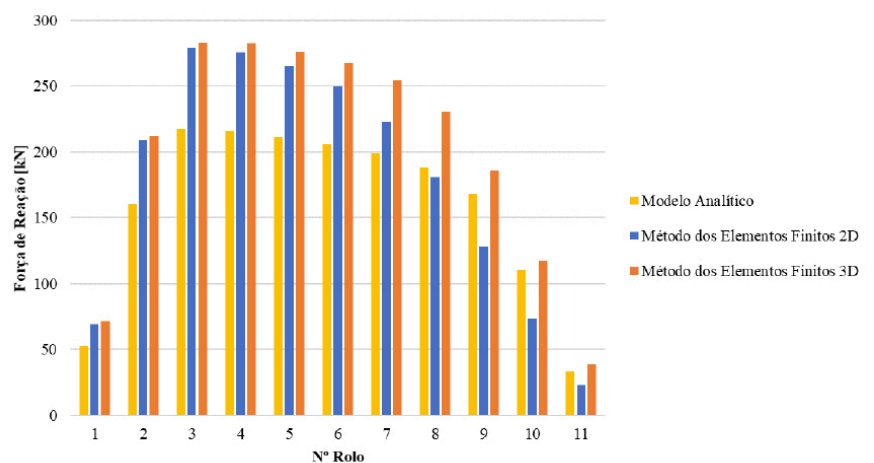


Figura 14: Comparação de forças de reação obtidas pelos 3 modelos

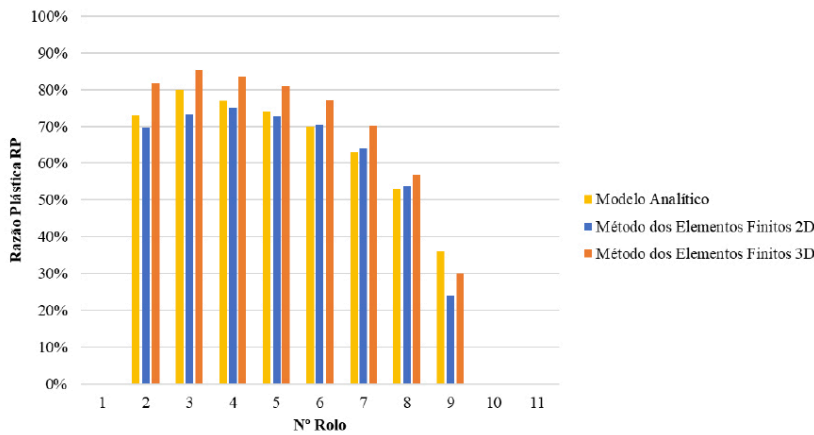


Figura 15: Comparação de taxas de estado plástico obtidas pelos 3 modelos

Tabela 5: Comparação de forças de reação e taxas de estado plástico obtidos pelo modelo analítico e pelo pelos modelos MEF 2D-3D

Nº Rolo	Força de Reação [kN]			Taxa de Estado Plástico		
	Analítico	MEF 2D	MEF 3D	Analítico	MEF 2D	MEF 3D
1	52	69	71	0%	0%	0%
2	160	209	212	73%	70%	82%
3	217	279	283	80%	73%	85%
4	216	275	282	77%	75%	84%
5	211	265	276	74%	73%	81%
6	206	250	267	70%	71%	77%
7	199	223	254	63%	64%	70%
8	189	181	230	53%	54%	57%
9	168	128	186	36%	24%	30%
10	110	73	117	0%	0%	0%
11	33	23	39	0%	0%	0%

As forças de reação apresentam uma diferença reduzida entre os modelos numéricos. No entanto, estes valores apresentam uma maior diferença para os valores obtidos pelo modelo analítico, apesar de apresentarem uma distribuição de acordo com o que é expectável. Vários fatores podem explicar esta diferença:

- O modelo analítico é baseado em aproximações geométricas, nomeadamente na configuração geométrica adotada pela chapa nas zonas de contacto com rolos. Desta forma, o raio de curvatura da chapa, e o ângulo de contacto, por exemplo, são sujeitos a aproximações que induzem erro no resultado final. O raio de curvatura influencia consideravelmente as forças de reação na zona de contacto com cada rolo. Observe-se a zona de contacto da chapa com o 3º rolo na Figura 16. O valor de raio de curvatura para um arco que passe pelos 3 nós destacados na Figura 16 a) é de 101,6 mm, e

o valor para os pontos destacados na Figura 16 b) é de 124,7 mm. Este valor apresenta algumas flutuações consoante os nós escolhidos para a análise. De qualquer forma, o valor está relativamente distante do valor de raio de curvatura previsto de 177,5 mm previsto pelo modelo analítico. Este fenómeno observa-se em todos os rolos, e o momento fletor experienciado pela chapa está diretamente relacionado com o raio de curvatura que, por sua vez, influencia diretamente os valores de força de reação. Usando os novos valores de curvatura calculados a partir de 3 nós adjacentes na zona de contacto no método analítico usado em [1] (em que se recorre às expressões de *Shinkin* [7] para o cálculo da curvatura), é possível reduzir as diferenças relativas das forças de reação entre o modelo analítico e o modelo de elementos finitos em 2D. Por exemplo, esta diferença passa de 21%, 20% e 18%, nos rolos 4, 5 e 6, respetivamente, para 13% nos três rolos.

- O modelo analítico não considera que a chapa calcada apresenta uma deformação inicial que contribui para um aumento da inércia de rotação da mesma, influenciado assim o processo de flexão da mesma;
- O modelo analítico e o modelo numérico recorrem a diferentes modelos para a descrição do material. Em detalhe, o modelo analítico apenas considera o parâmetro, designado por módulo tangente, que apenas permite definir o endurecimento linear do material;
- O modelo numérico desenvolvido é computacionalmente pesado e complexo, e, desta forma, a simulação apresenta “ruídos” que influenciam os valores finais obtidos.



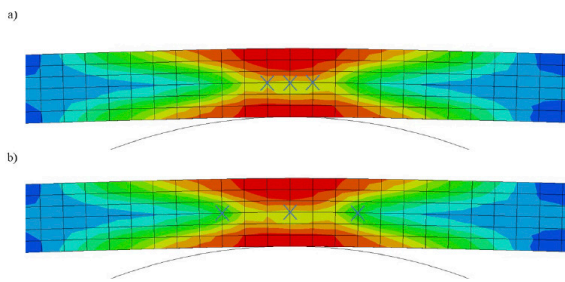


Figura 16: Zona de contacto da chapa com o 3º rolo. Os raios de curvatura dos arcos definidos pelos 3 pontos sinalizados na zona de contacto da chapa com o 3º rolo são em a) 101,6 mm; b) 124,7mm.

Passando a uma análise dos valores de taxa de estado plástico, os valores obtidos pelos métodos numéricos estão mais próximos dos obtidos pelo método analítico do que o que se observou com as forças de reação. Observa-se que o modelo numérico 3D forneceu valores de taxa de estado plástico superiores aos que se definem no modelo analítico, enquanto o modelo 2D obtém valores mais próximos.

Tendo isto em conta, pode-se concluir que o modelo numérico em 2D obtém valores mais próximos dos propostos pelo modelo analítico. Uma das maiores vantagens desta abordagem é que, em comparação com o modelo 3D, este apresenta custos computacionais e tempos de cálculo consideravelmente inferiores.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste artigo, o processo de aplanamento foi simulado recorrendo ao método dos elementos finitos, tendo sido usado o *software* comercial *Abaqus* para realizar os cálculos requeridos. O processo foi modelado tanto num ambiente 2D como num ambiente 3D e os resultados foram comparados com os obtidos por um modelo analítico.

Tanto na simulação 2D como na simulação 3D observou-se a planeza de chapa antes e após o processo.

Quanto aos perfis de tensões residuais, em ambos os casos ficaram mais suave. No entanto, o perfil final obtido pela simulação 2D é mais próximo ao que era previamente expectável.

Na análise das forças de reação dos rolos obtidas, obteve-se concordância entre o modelo 2D e o modelo 3D. No entanto, estes valores apresentam uma considerável diferença relativa em comparação com os valores obtidos pelo método analítico. As aproximações geométricas consideradas no modelo analítico e a diferença nos materiais usados nos modelos analítico e numérico são fatores que determinam a diferença nos resultados obtidos.

Finalmente, os valores de taxa de estado plástico obtidos numericamente são semelhantes aos obtidos analiticamente, sendo que o modelo 2D obteve valores ligeiramente inferiores ao analítico e o modelo 3D obteve valores superiores ao analítico. Na generalidade dos casos, recomendar-se-ia o uso do modelo 2D do método dos elementos finitos para o estudo deste processo, visto que resulta em valores relativamente conservadores e tem baixos custos de tempos e computacionais. Ainda assim, tanto o modelo analítico como o modelo 3D de métodos dos elementos finitos revelaram a sua utilidade. O modelo analítico permite uma previsão rápida dos valores de forças envolvidas no sistema e o modelo numérico 3D apresenta a capacidade de estudar defeitos ao longo da largura da chapa. Realça-se, no entanto, que usando o modelo analítico para fins de dimensionamento mecânico, devem ser considerados coeficientes de segurança para compensar as diferenças observadas entre este modelo e os modelos de elementos finitos, nomeadamente nas forças de reação experienciadas pelos rolos.

Não existindo a necessidade de estudar defeitos e perfis de tensão e deformação ao longo da largura da chapa, conclui-se que o uso do modelo 2D é, geralmente, preferível ao modelo 3D. As diferenças de valores observadas entre os dois modelos não são significativas o suficiente para compensar o aumento considerável de custo de tempo de computação exigido pelo método 3D.

Em trabalhos futuros, será relevante o ajuste do método analítico de forma a poder reduzir a diferença de resultados observados entre o modelo analítico e o modelo numérico. Para este fim, as aproximações geométricas consideradas poderiam ser revistas e ajustadas de forma a calibrar a curvatura do segmento deformado. Esta análise deve ser complementada com trabalhos experimentais para reforçar a validação dos métodos desenvolvidos.

Outro trabalho relevante será o estudo da influência que o uso de outros materiais no modelo analítico terá nos valores e erros obtidos. Para além disso, o estudo do ajuste de parâmetros para a correção de outros defeitos específicos de chapa será também relevante. Por exemplo, as chapas frequentemente possuem defeitos geométricos ao longo da sua largura e, na indústria, estes efeitos são corrigidos deformando os rolos de trabalho com uma forma convexa, impondo uma penetração extra numa seleção de rolos de suporte.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Soares, D. Cachulo, J.C.R. Pereira, E. Sousa, J.A.B Pacheco, C. Fernandes. Nova abordagem para a determinação das forças de reação e requisitos de potência de acionamento de uma aplanadora – uma abordagem analítica, Tecnometal, 2023.
- [2] J. Soares, Design and pre-dimensioning of the upper cassette of an intelligent roller leveler. Master's thesis, Universidade do Porto, 2022.
- [3] Wole Soboyejo. Mechanical properties of engineered materials. CRC press, 2002.
- [4] M. Wójcik and A. Skrzat, "Identification of chaboche–lemaitre combined isotropic–kinematic hardening model parameters assisted by the fuzzy logic analysis", Acta Mechanica, vol. 232, no. 2, pp. 685–708, 2021.
- [5] E. Silvestre, J. Mendiguren, E. S. de Argandoña, and L. Galdos, "Roll levelling numerical simulation using a nonlinear mixed hardening material model," in 14th International Metal Forming Conference, Krakow, Poland, pp. 1295–1298, 2012.
- [6] P. Krolo and D. Grandic. Hysteresis envelope model of double extended end-plate bolted beam-to-column joint. Buildings, 11(11):517, 2021.
- [7] V. Shinkin, "Simplified calculation of the bending torques of steel sheet and the roller reaction in a straightening machine," Steel in Translation, vol. 47, no. 10, pp. 639–644, 2017.

## ERRATA

No artigo "Nova abordagem para a determinação das forças de reação e requisitos de potência de acionamento de uma aplanadora – uma abordagem analítica", publicado na edição nº 163 – julho/agosto/setembro de 2023, desta revista, na página 12:

Onde se lê:

$$y = \frac{F}{EI} \left( -\frac{1}{12} x^3 + \frac{1}{16} x \right) \left( \frac{1}{16} \right) \cdot x \cdot (L^2)$$

Leia-se:

$$y = \frac{F}{EI} \left( -\frac{1}{12} x^3 + \frac{1}{16} xL^2 \right)$$