

Integração de Metodologias de Análise do Processo de Quinagem

Bruno Alexandre de Oliveira Ferreira

Orientadores: Prof. Abel Dias dos Santos

Prof. José Bessa Pacheco



Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2015

Integração de Metodologias de Análise do Processo de Quinagem

Bruno Alexandre de Oliveira Ferreira

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho de 2015

Resumo

O processo de conformação plástica de chapas conhecido como quinagem permite a produção de componentes cuja geometria, em termos simples, corresponde a uma dobra linear, que pode ser definida pelo ângulo entre as abas obtidas e o seu raio de concordância. O rigor do controlo da geometria final e do ângulo entre as abas da peça quinada, no entanto, pode tornar-se complexo, devido à interação das diferentes variáveis envolvidas.

A presente dissertação de mestrado pretende caracterizar e analisar o processo de quinagem a partir de diferentes parâmetros, como as características das ferramentas e as propriedades do material, utilizando modelos de cálculo numéricos que possibilitam a obtenção de respostas, como sejam o deslocamento do punção necessária para obtenção do ângulo final desejado, a força do punção ou o retorno elástico.

A utilização de um diagrama Vt proposto, que relaciona a abertura da matriz com a espessura da chapa metálica utilizada, permite a visualização dos limites ótimos de quinabilidade, com base, quer em relações V/t (V -abertura da matriz, t -espessura da chapa), quer também em relações V/t^2 . As curvas de quinabilidade obtidas com as relações V/t^2 têm por base a força de quinagem e a pressão de contacto do punção, sendo apresentada uma nova definição para o cálculo da pressão normalizada do punção que corresponderá a uma melhoria no rigor do cálculo desta variável.

Expressões analíticas de evolução do deslocamento do punção com o ângulo de quinagem anteriormente desenvolvidas para aços foram analisadas para ligas de alumínio o que permitiu verificar as suas limitações e propor as adaptações necessárias para o seu uso com diferentes materiais.

Expõe-se ainda o desenvolvimento de uma interface gráfica utilizando a integração entre Matlab® e Abaqus® que permite a introdução de dados para diferentes casos de quinagem e aquisição dos respetivos resultados.

Por fim, com base no processo de quinagem propõe-se uma metodologia para a caracterização das propriedades dos materiais através da implementação de um algoritmo de otimização e análise inversa. Para a validação da metodologia foram utilizados diferentes materiais com características mecânicas distintas, o que permitiu concluir tratar-se de um método eficiente e com potencialidades para aplicação prática.

Palavras-Chave: Quinagem, Simulação numérica, Interface gráfica, Análise inversa.

Abstract

Press brake bending is a metal forming process, allowing the production of parts with a simple geometric interpretation. However, the accurate control of the final geometry can be complex, due to the interaction of different variables both from the process and the tool geometry.

This master thesis aims to characterize and analyze the bending process through different parameters, including the characteristics of the tools and the material properties, using numerical methods and analytical equations that will give the required answers, such as the penetration of the punch needed to obtain the final desired angle, punch force or springback angle.

By using a proposed Vt diagram, which relates the die opening with the thickness of metal sheet, it is possible to quickly visualize the optimal bending limits, using either a V/t relation (V -die opening, t -thickness) or a V/t^2 relation. Bending limits obtained by V/t^2 relation are based in bending force and punch contact pressure, being presented in this thesis a new definition to calculate normalized punch pressure, which shall correspond a better accuracy when calculating this variable.

Analytical expressions, previously developed for steel, for evolution of punch displacement vs. bending angle, were tested for aluminum alloys, which permitted the verification of corresponding limitations on accuracy. Accordingly, a proposal to modification was defined, in order to generalize its application to different materials.

The development of a graphical interface using the integration between Matlab® and Abaqus® is presented, which enables a user-friendly and flexible data entry for different cases of press-brake bending and corresponding results.

Finally, based on the bending process it is proposed a methodology for characterization of material properties by using an optimization algorithm and an inverse analysis approach. The validation of the methodology uses different materials having distinct mechanical characteristics, thus permitting the understanding of being an efficient method with great potentiality for practical application.

Keywords: Press brake bending, Numerical Simulation, Graphical Interface, Inverse analysis

Agradecimentos

Ao Professor Abel Dias dos Santos, um agradecimento sincero por todo o apoio e motivação, discussão e paciência, neste etapa importante do meu percurso académico. Agradeço a oportunidade de trabalhar nesta área científica, o que me permitiu desenvolver capacidades e preparar para o futuro. Ao longo desta dissertação, o seu espírito crítico e incentivo moldaram a minha visão dos problemas e a procura de soluções para os mesmos.

Ao Professor José Bessa Pacheco agradeço a partilha dos seus vastos conhecimentos, as sugestões e críticas, que foram essenciais na realização desta dissertação.

Ao Engenheiro Rui Amaral quero agradecer a contribuição e auxílio prestado, pelos fins de tarde disponibilizados, e pela partilha dos seus conhecimentos que em muito contribuíram para este trabalho.

Aos meus pais, irmã e amigos que sempre me apoiaram, e ajudaram ao longo dos desafios que enfrentei. É a estes que dedico a minha amizade profunda.

Aos meus pais e irmã

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e objetivos	1
1.2	Estrutura da dissertação	2
2	Quinagem.....	5
2.1	Processo de quinagem	7
2.2	Classificação das técnicas de quinagem	8
2.2.1	Quinagem no ar.....	8
2.2.2	Quinagem a fundo (“ <i>Coining</i> ”).....	9
2.2.3	Quinagem forçada (“ <i>Bottoming</i> ”).....	10
2.2.4	Técnicas alternativas de quinagem	10
2.3	Defeitos de quinagem	11
2.3.1	Efeito de sela.....	11
2.3.2	Efeito de bordo.....	12
2.3.3	Efeito barril (<i>Crowning</i>)	13
2.3.4	Retorno elástico	13
2.4	Efeito de variáveis perturbadoras nos resultados de quinagem	14
2.4.1	Espessura da chapa metálica	14
2.4.2	Resistência do material	15
2.4.3	Retorno elástico	15
2.5	Quinabilidade.....	16
2.5.1	Limites de Quinabilidade.....	18
2.6	Ferramentas e suas variáveis	19
2.7	Determinação analítica do deslocamento do punção.....	21
2.7.1	Expressões analíticas	21
3	Caracterização dos materiais.....	23
3.1	Leis Constitutivas	23
3.1.1	Lei de Swift.....	23
3.1.2	Lei de Voce.....	23

Conteúdo

3.2 Caracterização dos materiais metálicos	24
3.2.1 Mild Steel CQ/CR.....	24
3.2.2 Docol RP300.....	24
3.2.3 S355J2.....	25
3.2.4 Docol DP590 e DP980.....	25
3.2.5 Ligas de alumínio AA5182-O e AA6016-T4	26
3.2.6 Propriedades mecânicas e curvas características dos materiais.....	27
4 Programas de cálculo numérico	29
4.1 Abaqus FEA®	29
4.2 Matlab®.....	30
5 Simulação numérica do processo de quinagem.....	33
5.1 Método dos elementos finitos.....	33
5.2 Bases de análise	34
5.3 Modelo numérico.....	35
5.4 Força do punção.....	37
5.4.2 Análise para o aço RP300	41
5.4.3 Análise para o aço DP590.....	44
5.5 Pressão do punção	47
5.5.1 Teoria do contacto.....	47
5.5.2 Correção da área de contacto entre punção e chapa metálica	49
5.6 Determinação analítica do deslocamento do punção.....	50
5.6.1 Evolução do raio natural de quinagem.....	50
5.6.2 Análise das equações y_{JBP} e y_{JBPext}	53
5.6.3 Comparação das expressões analíticas para raio de punção 1 mm	57
5.6.3.1 Análise para diferentes raios de punção.....	61
5.6.4 Análise do deslocamento de punção para ligas de alumínio.....	62
5.6.4.1 Correção do parâmetro V/kV	66
5.7 Retorno elástico	72
5.7.1 Análise do retorno elástico para diferentes situações de quinagem	73
5.7.1.1 Análise do retorno elástico para diferentes raios de punção.....	75

6	Interface gráfica do utilizador	77
6.1	Bases de desenvolvimento.....	78
6.2	Objectivos da interface gráfica	79
6.3	Elementos da Interface Gráfica	79
6.4	<i>Scripts</i> utilizados.....	79
6.5	Integração entre Matlab® e Abaqus®	80
6.6	Opções disponíveis	81
6.7	Resultados disponíveis	82
6.7.1	Deslocamento do punção	83
6.7.2	Força do punção	83
6.7.3	Pressão do punção.....	84
6.7.4	Diagrama de quinagem <i>Vt</i>	85
7	Caracterização do material por análise inversa.....	87
7.1	Algoritmos de otimização.....	87
7.2	Estratégias para determinação das propriedades dos materiais	88
7.2.1	Determinação das propriedades do material utilizando uma quinadora	88
7.2.2	Algoritmo de previsão do retorno elástico em quinagem no ar	89
7.3	Metodologia proposta	90
7.3.1	Definição da função objetivo	91
7.3.2	Parametrização	91
7.3.3	Estratégia de otimização	92
7.4	Materiais utilizados.....	93
7.5	Análise de sensibilidades.....	94
7.6	Resultados do algoritmo de otimização.....	98
7.6.1	Aco_200_02.....	98
7.6.2	Aco_200_05.....	99
7.6.3	Aco_200_005.....	101
7.6.4	Aco_600_02.....	103
7.7	Validação experimental	104
7.7.1	Resultados obtidos	107
7.7	Discussão dos resultados	110

Conteúdo

8	Considerações finais.....	113
8.1	Conclusão	113
8.2	Trabalhos futuros	114
Anexos	119
Anexo A1	– Definição geométrica das variáveis da matriz	121
Anexo B1	– Pontos experimentais da curva força-deslocamento do aço St37	123

Lista de figuras

Figura 2.1 - Quinadora, modelo PF 'Fast' (Adira 2015).	5
Figura 2.2 - Peças quinadas para diferentes aplicações.	6
Figura 2.3 - Ângulo de quinagem depende da posição relativa dos 3 pontos de contacto, 1, 2 e 3 (Pacheco 2011).	7
Figura 2.4 - Quinagem no ar (Pacheco 1992).	8
Figura 2.5 - Quinagem a fundo (Adaptado de efunda 2015).	9
Figura 2.6 - Quinagem forçada (Adaptado de efunda 2015).	10
Figura 2.7 - Quinagem com matriz em U (Diegel 2002).	10
Figura 2.8 - Quinagem em três pontos (Hämmerle 2008).	11
Figura 2.9 - Efeito de sela (Pacheco 2011).	12
Figura 2.10 - Efeito de bordo (Pacheco 2011).	12
Figura 2.11 - A falta de paralelismo entre as deformadas dos aventais provoca o efeito barril na chapa metálica (Costa 2008).	13
Figura 2.12 - Ângulo antes e após ocorrência do retorno elástico (Adaptado de sheetmetal 2015).	14
Figura 2.13 - Raio interno de dobragem (r) e ângulo de dobragem (α) para uma espessura (t) (DIN6935 1975).	16
Figura 2.14 - Diagrama Vt do processo de quinagem.	17
Figura 2.15 - Zonas do processo de quinagem.	17
Figura 2.16 - Exemplos de deformação: a) Flexão exagerada da chapa, b) Esmagamento.	18
Figura 2.17 - Limite da pressão normalizada para diferentes raios do punção (Miranda 2014).	18
Figura 2.18 - Diagrama Vt com Limite da pressão normalizada para diferentes raios do punção.	19
Figura 2.19 - Variáveis geométricas das ferramentas de quinagem.	20
Figura 2.20 - Representação geométrica do modelo para determinação de $y = f(\alpha)$ (Bastardo 2013).	21
Figura 3.1 – Curvas Tensão-Extensão dos materiais estudados.	28

Lista de figuras

Figura 4.1 - Sequência de processamento do Abaqus®.....	29
Figura 4.2 - Ambiente gráfico do Abaqus®.....	30
Figura 4.3 - Ambiente gráfico do Matlab®.....	31
Figura 5.1 - Exemplos de aplicação do MEF.....	33
Figura 5.2 - Etapas do processo de quinagem (Miranda 2014).....	34
Figura 5.3 - Condições de fronteira aplicadas ao modelo numérico.....	35
Figura 5.4 - Discretização das ferramentas e chapa metálica.....	36
Figura 5.5 - Nomenclatura utilizada para caracterizar o processo de quinagem.....	36
Figura 5.6 - Pontos de quinagem em estudo com base no diagrama Vt	37
Figura 5.7 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um $V=20$ mm e espessuras variáveis, para o aço MS.....	38
Figura 5.8 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V e t variáveis, para o aço MS.....	39
Figura 5.9 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um $V=20$ mm e espessuras variáveis, para o aço RP300.....	41
Figura 5.10 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V e t variáveis, para o aço RP300.....	42
Figura 5.11 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um $V=20$ mm e espessuras variáveis, para o aço DP590.....	44
Figura 5.12 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V e t variáveis, para o aço DP590.....	45
Figura 5.13 Pressão de contacto para diferentes superfícies (Adaptado de Precision Machine Design 2006).....	48
Figura 5.14 - Área de contacto simplificada entre punção e chapa (Miranda 2014).....	48
Figura 5.15 - Contacto existente entre uma superfície cilíndrica e um entalhe côncavo (Adaptado de Precision Machine Design 2006).....	49
Figura 5.16 - Área de contacto entre punção e chapa metálica.....	49
Figura 5.17 - Deformada nas superfícies superior (verde) e inferior (azul) da geometria simulada relativamente à geometria analítica (vermelho).....	50
Figura 5.18 - Evolução do raio natural para diferentes ângulos de quinagem (Miranda 2014).....	51
Figura 5.19 - Evolução do raio de curvatura para diferentes deslocamentos do punção.....	51
Figura 5.20 - Pontos de quinagem em análise.....	52
Figura 5.21 - Comparação das equações y_{JBP} e y_{JBPext} , para V constante e espessuras variáveis, para o aço MS.....	53
Figura 5.22 - Comparação das equações y_{JBP} e y_{JBPext} , para o aço MS.....	54
Figura 5.23 - Comparação das equações y_{JBP} e y_{JBPext} , para os aços RP300 e DP590.....	55

Lista de figuras

Figura 5.24 - Comparação das equações y_{JBP} e y_{JBPExt} , para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para os aços RP300 e DP590.	56
Figura 5.25 - Comparação das equações analíticas, para o aço MS.....	57
Figura 5.26 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para o aço MS.	58
Figura 5.27 - Comparação das equações analíticas, para os aços RP300 e DP590.	59
Figura 5.28 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para os aços RP300 e DP590.	60
Figura 5.29 - Comparação das equações analíticas dos aços MS, RP300 e DP590 para diferentes raios de punção, com $V_e=40$ mm e $t=4$ mm.....	61
Figura 5.30 - Comparação das equações analíticas, para V_e constante e espessuras variáveis, para a liga de alumínio AA5182.	62
Figura 5.31 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para a liga de alumínio AA5182.	63
Figura 5.32 - Comparação entre a liga de alumínio AA5182 e o aço MS para $V=200$ mm e $t=1$ mm, em termos de deslocamento, deformada e distribuição de tensões.	64
Figura 5.33 - Comparação entre a liga de alumínio AA5182 e o aço MS para $V=20$ mm e $t=3$ mm, em termos de deslocamento, deformada e distribuição de tensões.	65
Figura 5.34 - Comparação das equações analíticas, para V constante e espessuras variáveis, para as ligas de alumínio AA5182 e AA6016.....	68
Figura 5.35 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para as ligas de alumínio AA5182 e AA6016.	69
Figura 5.36 - Comparação das equações analíticas das ligas de alumínio AA5182 e AA6016 para diferentes raios de punção, com $V=40$ mm e $t=4$ mm.....	70
Figura 5.37 - Retorno elástico no processo de quinagem no oar (Garcia 2007).....	72
Figura 5.38 - Evolução do retorno elástico para os aços MS, RP300 e DP590, respetivamente, para a mesma abertura de matriz ($V=20$ mm) e espessuras variáveis.....	73
Figura 5.39 - Evolução do retorno elástico para os aços MS, RP300 e DP590, respetivamente, para aberturas de matriz e espessuras variáveis.	74
Figura 5.40 - Evolução do retorno elástico para os aços MS, RP300 e DP590, respetivamente, para diferentes raios de punção.	75
Figura 6.1 - A interface gráfica é o reflexo do código de programação.....	77
Figura 6.2 - A utilização de ferramentas numéricas é vantajosa em termos de custo e eficiência.	78
Figura 6.3 - Ambiente de desenvolvimento da interface gráfica disponível no Matlab.	78
Figura 6.4 - <i>Layout</i> da interface gráfica desenvolvida.	79
Figura 6.5 - Procedimento de integração das ferramentas de cálculo utilizadas.....	80
Figura 6.6 - Definição dos parâmetros do material.....	81

Lista de figuras

Figura 6.7 - Definição dos parâmetros das ferramentas.....	81
Figura 6.8 - Opções adicionais da interface gráfica.....	82
Figura 6.9 - Seleção do tipo de análise desejada.....	82
Figura 6.10 - O utilizador é notificado através de uma caixa de diálogo.....	83
Figura 6.11 - Deslocamento de punção para diferentes ângulos de quinagem.....	83
Figura 6.12 - Força do punção para diferentes deslocamentos.....	84
Figura 6.13 - Pressão do punção e sua posição relativamente ao limite de pressão definido..	84
Figura 6.14 - Diagrama Vt com ponto em análise assinalado.....	85
Figura 7.1 - Pontos característicos do diagrama Força-deslocamento(Mentink 2003).....	88
Figura 7.2 - Diagrama força-deslocamento experimental e modelado (Mentink 2003).....	88
Figura 7.3 - Dependência dos parâmetros C e n da lei de Ludwick-Nadai relativamente ao deslocamento do punção (Mentink 2003).....	89
Figura 7.4 - Procedimento heurístico (Longo 2013).....	89
Figura 7.5 - Diferentes resultados para as avaliações realizadas (Longo 2013).....	90
Figura 7.6 - Procedimento de otimização implementado.....	92
Figura 7.7 - Comportamento mecânico dos materiais.....	93
Figura 7.8 - Discretização da primeira malha utilizada no processo de otimização.....	94
Figura 7.9 - Curva força-deslocamento para a primeira malha, utilizando o <i>Abaqus/Explicit</i> .	94
Figura 7.10 - Curva força-deslocamento para a primeira malha, utilizando o <i>Abaqus/Standard</i>	95
Figura 7.11 - Discretização da segunda malha utilizada no processo de otimização.....	95
Figura 7.12 - Curva força-deslocamento para a segunda malha, utilizando o <i>Abaqus/Standard</i>	96
Figura 7.13 - Discretização da terceira malha utilizada no processo de otimização.....	96
Figura 7.14 - Curva força-deslocamento para a terceira malha, utilizando o <i>Abaqus/Standard</i>	96
Figura 7.15 – Evolução da curva força-deslocamento para o aço 200_02 obtido pela metodologia de otimização.....	98
Figura 7.16 - Curva tensão-extensão obtida para o aço 200-02, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.....	98
Figura 7.17 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 200_02.....	99
Figura 7.18 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço 200_05 obtido pela metodologia de otimização.....	100
Figura 7.19 - Curva tensão-extensão obtida para o aço 200_05, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.....	100

Lista de figuras

Figura 7.20 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 200_05.....	101
Figura 7.21 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço 200_005 obtido pela metodologia de otimização.....	101
Figura 7.22 - Curva tensão-extensão obtida para o aço 200-005, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.	102
Figura 7.23 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 200_005.....	102
Figura 7.24 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço 600_02 obtido pela metodologia de otimização.....	103
Figura 7.25 - Curva tensão-extensão para o aço 600-02, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização..	103
Figura 7.26 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 600_02.....	104
Figura 7.27 - Condições experimentais (<i>set-up</i>) para obtenção do diagrama força-deslocamento (Mentink 2003).....	104
Figura 7.28 - Diagrama força-deslocamento experimental e extrapolado, obtidos a partir da literatura (Mentink 2003).	105
Figura 7.29 - Diagrama força-deslocamento experimental por unidade de comprimento.....	106
Figura 7.30 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço St37 obtido pela metodologia de otimização.....	107
Figura 7.31 - Curva tensão-extensão para o aço St37, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.	107
Figura 7.32 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço St37.	108
Figura 7.33 - Comparação das curvas força-deslocamento para diferentes situações de teste, para o aço St37.	108
Figura 7.34 - Curva tensão-extensão para o aço St37, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.	109
Figura 7.35 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço St37 obtido pela metodologia de otimização.....	109

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Variáveis a considerar no processo de quinagem.	14
Tabela 2.2 - Tensão de rotura das classes de materiais para o raio mínimo de dobragem permitido.	16
Tabela 2.3 - Relação V/t_2 para raios de punção de 1, 2 e 3 mm.....	19
Tabela 2.4 – Dimensões das diferentes geometrias de matrizes em estudo.	20
Tabela 2.5 - Dimensões da diferentes espessuras em estudo.	20
Tabela 2.6 - Relação entre a abertura da matriz e o raio do punção.	21
Tabela 3.1 - Composição química do aço MS CQ/CR (Kuvín 2011).	24
Tabela 3.2 - Composição química do aço Docol RP300 (SSAB 2007).	25
Tabela 3.3 - Composição química do aço S355J2 (Ruukki 2014).	25
Tabela 3.4 - Composição química do aço DP590 (SSAB 2008).	25
Tabela 3.5 - Composição química do aço DP980 (SSAB 2008).	26
Tabela 3.6 - Composição química da liga de alumínio AA5182-O (Abedabbro 2006).	26
Tabela 3.7 - Composição química da liga de alumínio AA6016-T4 (Leitao 2010).	26
Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas dos materiais.	27
Tabela 3.9 - Parâmetros da lei de Swift dos aços utilizados.	27
Tabela 3.10 - Parâmetros da lei de Voce das ligas de alumínio utilizadas.	27
Tabela 5.1 - Propriedades do modelo numérico 2D utilizado.	35
Tabela 5.2 - Pontos de quinagem em análise.	52
Tabela 5.3 – Rácio R_m/R_e para as duas ligas de alumínio analisadas.	67
Tabela 5.4 - Pontos de quinagem em análise com base no diagrama Vt (Figura 2.18).	73
Tabela 5.5 - Diferença de retorno elástico ($\Delta\alpha$ em graus) para diferentes situações de quinagem e materiais com base em pontos definidos no diagrama Vt	74
Tabela 6.1 - <i>Scripts</i> utilizados no desenvolvimento da interface gráfica (Matlab®).	80
Tabela 6.2 - <i>Scripts</i> utilizados no desenvolvimento da interface gráfica (Abaqus®).	80
Tabela 7.1 - Forças definidas para a previsão do comportamento do material.	89

Lista de tabelas

Tabela 7.2 - Propriedades mecânicas dos materiais.	93
Tabela 7.3 - Parâmetros de Swift para os aços analisados.	93
Tabela 7.4 - Tempos de cálculo para diferentes tipos de análise e malhas.	97
Tabela 7.5 - Parâmetros geométricos do caso analisado.	98
Tabela 7.6 - Parâmetros do caso experimental.	105
Tabela 7.7 - Propriedades do material St37.	105
Tabela 7.8 - Resultados obtidos para o algoritmo de otimização utilizado, para os diferentes materiais.	110
Tabela 7.9 - Resultados obtidos para o algoritmo de otimização utilizado, para o aço St37.	110
Tabela 7.10 - Evolução da otimização para diferentes parâmetros iniciais.	111
Tabela A1 - Pontos de deslocamento e força do punção extrapolados da curva disponível na literatura, para o aço St37 (Mentink 2003).	123

Abreviaturas e Símbolos

A_p	Área de contacto do punção
b	Largura da chapa
C_r, R_{sat}, σ_0	Parâmetros de encruamento da lei de Voce
E	Módulo de elasticidade
F	Força do punção
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
K, ε_0, n	Parâmetros de encruamento da lei de Swift
l	Comprimento de quinagem
MEF	Método do elementos finitos
P_p	Pressão do punção
r_{an}	Raio de cálculo analítico
r_{cc}	Raio de curvatura combinado
r_m	Raio da matriz
r_p	Raio do punção
R_e	Tensão de cedência
R_m	Tensão de rotura
t	Espessura da chapa
V_{corr}	Abertura de matriz corrigida
V	Abertura nominal da matriz
y	Deslocamento do punção
α	Ângulo de quinagem
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Massa específica

1 Introdução

1.1 Enquadramento e objetivos

Os processos de conformação plástica permitem a obtenção de variados componentes, com diversas geometrias. Apesar da grande eficiência destes processos, quer em termos de uso de matéria-prima, quer em termos de precisão, a investigação deste tipo de processos é necessária devido à sua grande utilização no fabrico de produtos que estão presentes no quotidiano.

Contudo, a obtenção de produtos finais com a geometria desejada está dependente de diversos fatores, entre os quais as propriedades do material e a geometria das ferramentas utilizadas.

A quinagem é um dos processos de conformação plástica mais utilizados na indústria. A sua utilização abrange um vasto número de áreas, incluindo a indústria de maquinaria, iluminação, eletrónica, automóvel, entre outros. No nosso dia a dia é possível encontrarmos diversos produtos obtidos através deste processo, tais como: caixas de computadores, fornos, torres de iluminação, e muitos outros.

Apesar da simplicidade deste processo e dos bons resultados obtidos com este, a evolução natural da indústria tem oferecido novos desafios, nomeadamente a utilização de novos materiais. Desta forma é conveniente e necessário a compreensão da evolução deste processo para que a sua eficiência em termos de repetibilidade e precisão se mantenha.

Atualmente, é frequente a execução de diversas tentativas para obtenção da geometria final desejada, sendo importante o conhecimento do comportamento do material utilizado.

O recurso a métodos numéricos tem sido cada vez mais explorado pois permite uma previsão bastante precisa dos resultados, prevenindo possíveis erros e consequentemente reduzindo o tempo de desenvolvimento de produtos, para além de permitir a introdução de uma gama ampla de materiais.

Como referido anteriormente, este processo possui uma geometria simples e de fácil compreensão, permitindo uma análise simplificada através de uma representação bidimensional. O objetivo desta operação é obter uma dobra linear através do deslocamento de um punção numa matriz com uma determinada abertura. Trata-se de um processo tradicional baseado na flexão plástica de uma viga (Pacheco 2013).

A quinagem permite a obtenção de componentes de maior ou menor complexidade, possuindo a vantagem de ser simples e económico, fatores que levam à sua utilização em diversas indústrias.

À medida que o punção se desloca, este entrará em contacto com a chapa, e ocorre uma deformação da mesma. Quando o material da chapa ultrapassa a tensão limite de elasticidade ocorre uma deformação permanente da mesma, obtendo-se a geometria final pretendida. Quando o punção é removido ocorre um fenómeno conhecido como retorno elástico, originado pela deformação plástica sofrida pela chapa (Pacheco 1992).

Esta dissertação insere-se no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica e tem como objetivo aplicar os conhecimentos adquiridos no desenvolvimento e melhoria da previsão de resultados no processo de conformação plástica conhecido como quinagem. O estudo dos resultados tem como base duas metodologias distintas, expressões analíticas e método numérico, tendo como recurso dois programas: Matlab® e Abaqus®.

Para além disso, apresenta-se o desenvolvimento de uma interface gráfica para análises dos resultados obtidos e também a proposta de uma metodologia de otimização para a caracterização de materiais utilizados no processo.

Desta forma, a presente dissertação incide nos seguintes aspetos:

- Análise do processo de quinagem e sua caracterização usando a modelação numérica por elementos finitos;
- Desenvolvimento de equações analíticas para relacionar ângulo de dobragem com profundidade de quinagem para diferentes combinações de ferramentas utilizadas na indústria;
- Caracterização de retorno elástico;
- Uso de materiais de diferentes classes de resistência e respetiva caracterização mecânica com modelos constitutivos adequados;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica de utilizador para análise dos resultados de quinagem;
- Caracterização dos materiais através de resultados experimentais por engenharia inversa.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação de mestrado utiliza o método dos elementos finitos, através do software de análise Abaqus®, para a simulação numérica do processo de quinagem.

Neste capítulo é apresentada uma breve introdução ao processo de conformação plástica de chapas metálicas, também como a importância da simulação numérica.

O próximo capítulo aborda o estado da arte. São apresentados os princípios fundamentais do processo de quinagem, sendo descritas algumas técnicas de quinagem, defeitos de quinagem e também uma reflexão acerca das variáveis relacionadas com o processo. Adicionalmente são definidas as ferramentas e apresentadas expressões que permitem a determinação necessária do deslocamento do punção para a obtenção de uma geometria final pretendida.

No Capítulo 3 os materiais utilizados ao longo deste estudo serão descritos, sendo apresentada a sua caracterização mecânica.

O Capítulo 4 contém uma breve referência aos programas de cálculo numérico, referindo a sua estrutura e campos de utilização.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados numéricos e analíticos em termos de força, pressão e deslocamento para diferentes casos de quinagem e diferentes materiais. O efeito de

Introdução

retorno elástico é também estudado, comparando os resultados obtidos para diferentes situações de quinagem e materiais.

O Capítulo 6 concerne a interface gráfica de utilizador desenvolvida ao longo deste trabalho, incluindo as opções e resultados disponíveis, também como a descrição da metodologia utilizada.

No Capítulo 7 apresenta-se uma metodologia para previsão das características de diferentes materiais por análise inversa através da curva força-deslocamento, sendo analisados os respetivos resultados.

No Capítulo 8 expõem-se as principais conclusões retiradas deste estudo, deixando sugestões para trabalhos futuros.

2 Quinagem

A quinagem é um processo de deformação plástica de chapa que permite o fabrico de superfícies planificáveis de diversas geometrias. A realização destas operações faz-se em máquinas-ferramentas conhecidas por quinadoras, Figura 2.1. O princípio de funcionamento destas é em tudo semelhante ao de uma prensa. As quinadoras são constituídas por uma mesa comprida estreita, onde se instalam diversos tipos de ferramentas adequadas ao fabrico de uma grande variedade de produtos (Pacheco 1992).



Figura 2.1 - Quinadora, modelo PF 'Fast' (Adira 2015).

A técnica mais generalizada para a obtenção de uma dobragem numa chapa plana é a “quinagem livre”. O valor do ângulo " α " de quinagem é função do deslocamento do punção na matriz.

Como referido anteriormente, as ferramentas são ligadas a dois órgãos resistentes denominados “aventais”, sendo um fixo e outro móvel. Desta forma, as quinadoras podem ser classificadas de acordo com o tipo de acionamento:

- Quinadoras mecânicas – A forma de transmissão de energia ao avental é mecânica. Do volante, através de uma embraiagem, o movimento transmite-se a uma unidade de redução, normalmente de engrenagens e desta a um sistema biela-manivela que produz o movimento alternado do avental, encontrando-se este guiado para assegurar um movimento linear. Estas prensas, aproveitando a energia cinética acumulada no volante, permitem obter cadências elevadas comparativamente às potências instaladas, normalmente reduzidas. Atualmente, são um equipamento pouco corrente devido às suas limitações.

- Quinadoras hidráulicas – O acionamento do órgão móvel utiliza um, dois ou mais cilindros hidráulicos. Os cursos disponíveis das mesmas podem ser elevados, sendo extremamente simples a introdução de ajuste dos pontos. A precisão deste sistema hidráulico está dependente da resposta das válvulas que controlam o mesmo. O valor da capacidade máxima do equipamento é passível de ajustes simples, independentemente do ponto do curso durante uma operação de quinagem. Estas quinadoras são as mais utilizadas atualmente.
- Quinadoras híbridas – Neste sistema, um servomotor está ligado, por meio de um veio, a uma bomba hidráulica de pistão axial, imersa no tanque de óleo. A pressão hidráulica originada pela bomba imprime movimento ao avental. A ausência de válvulas, assim como a ligação direta do servomotor à bomba e o *feedback* fornecido pelas réguas lineares ao controlador, permite que este sistema possua um grau de exatidão superior, em termos de posicionamento do avental. A quantidade de óleo utilizada é cerca de metade da necessária por um sistema hidráulico convencional.
- Quinadoras elétricas - O acionamento elétrico aplicado a quinadoras é um conceito relativamente recente. Este tipo de máquinas surge como resposta dos fabricantes às crescentes preocupações relativamente ao meio ambiente e ao consumo de energia. Vários tipos de quinadoras elétricas têm sido introduzidas no mercado, incluindo as de acionamento por fuso de esferas, por um sistema de correia e polias ou mais recentemente por sistema *direct drive*. O baixo consumo de energia, aliado à ausência de óleo e baixo nível de manutenção, constitui uma vantagem comparativamente aos sistemas hidráulicos convencionais.

Este processo aplica-se, na generalidade, a pequenas séries de fabrico. No entanto, o desenvolvimento de quinadoras industriais, em conjunto com a evolução verificada a nível robótico e utilização de máquinas-ferramentas complementares, tem permitido a sua integração em linhas de produção em série. É importante referir que este processo permite a obtenção de inúmeras geometrias, desde as mais simples até às mais complexas, sendo bastante versátil como processo de fabrico (Figura 2.2). Alguns exemplos de produtos obtidos por este processo podem ser balcões mobiliário metálico, chassis para a indústria automóvel, agrícola ou ferroviária, estruturas metálicas para painéis de casas pré-fabricadas, etc (Rodrigues 2005).



Figura 2.2 - Peças quinadas para diferentes aplicações.

2.1 Processo de quinagem

A quinagem é um processo de flexão elasto-plástico aplicado a uma viga retilínea. Desta forma, enquanto a dobra é realizada o material do lado interior é comprimido e o lado exterior é tracionado, Figura 2.3.

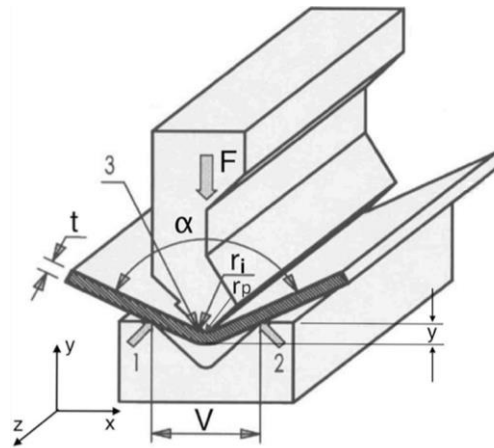


Figura 2.3 - Ângulo de quinagem depende da posição relativa dos 3 pontos de contacto, 1, 2 e 3 (Pacheco 2011).

A força aplicada (F) e o valor do deslocamento (y) criam um gradiente de tensão ao longo da espessura. Os valores de tensão máxima aparecem nas fibras externas da zona de ataque do punção à chapa. Quando se ultrapassa o limite elástico, ocorrem deformações permanentes (plásticas) que produzem a dobra pretendida.

A abertura da matriz, designada por V , corresponde à distância entre apoios durante o processo de flexão afetando assim a força requerida para induzir a flexão plástica e o valor do ângulo de quinagem (α). O raio interior (r_i) da quinagem depende do valor do V da matriz, caso ocorra quinagem livre ou do valor do raio do punção, para a quinagem forçada.

A força de quinagem corresponde à força necessária a aplicar durante a operação de quinagem e a profundidade é definida como o grau de penetração do punção na matriz para se obter o ângulo final de quinagem (Pacheco 1992).

A ótima relação rigidez/peso das peças produzidas tornam o processo de quinagem muito competitivo. A rigidez acrescida deve-se ao facto de existir encruamento da chapa na zona deformada plasticamente devido à alteração da sua geometria. Este fenómeno aumenta a resistência mecânica do material conduzindo a uma maior rigidez da estrutura (Fonseca 2011).

2.2 Classificação das técnicas de quingem

A operação de quingem pode ser realizada de diferentes modos. No entanto, esta caracteriza-se, no essencial, pela geometria das ferramentas e pelo modo como a chapa é solicitada entre o punção e a matriz.

2.2.1 Quingem no ar

Na quingem no ar, também designada por quingem livre, uma chapa metálica é deformada plasticamente devido ao deslocamento do punção, penetrando na matriz, até que a geometria final seja atingida (Figura 2.4). O ângulo entre as abas da chapa a dobrar é estabelecido pelo deslocamento do punção, não sendo necessário substituir ferramentas para a obtenção de diferentes ângulos de quingem. Desta forma o valor do ângulo de quingem é função do grau de deslocamento do punção e do valor de abertura da matriz.

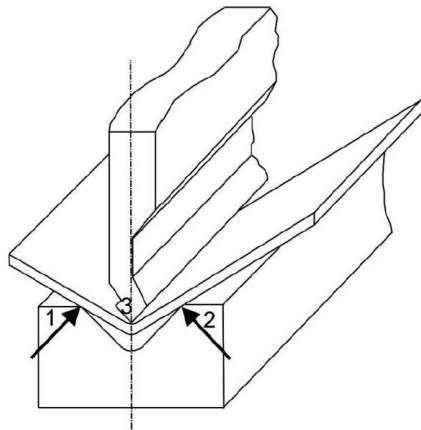


Figura 2.4 - Quingem no ar (Pacheco 1992).

Apesar do baixo valor das forças envolvidas, a precisão dimensional das peças é relativamente limitada, na medida em que o retorno elástico sofrido pelo material após deformação plástica altera a geometria final da peça. Para compensar este efeito é necessário efetuar uma sobrepenetração do punção. Normalmente esse valor é determinado experimentalmente, por tentativas, para cada tipo de material.

A precisão da quingem, sendo limitada, é também condicionada pela qualidade da máquina e das ferramentas. Desta forma apresentam-se as vantagens desta técnica.

Vantagens da quingem no ar:

- Menor força, permitindo a utilização de máquinas com menor capacidade para a execução dos trabalhos;
- Provação de menor desgaste das ferramentas devidas às baixas pressões de contacto;
- Possibilidade de utilização do mesmo conjunto de ferramentas para a obtenção de diferentes ângulos, reduzindo os custos a nível de ferramentas e tempo de preparação e montagem das mesmas.

2.2.2 Quinagem a fundo (“Coining”)

Neste processo, também conhecido como quinagem com quebra de nervo ou quinagem forçada, a chapa é esmagada entre o punção e a matriz, sendo obrigada a moldar-se ao contorno das ferramentas (Figura 2.5). Esta técnica é sobretudo usada para chapas finas (com espessuras inferiores a 3 mm) e permite reduzir, ou até mesmo eliminar, o retorno elástico do material. Para além disto, permite a obtenção de ângulos de quinagem mais agudos que o ângulo nominal das ferramentas.

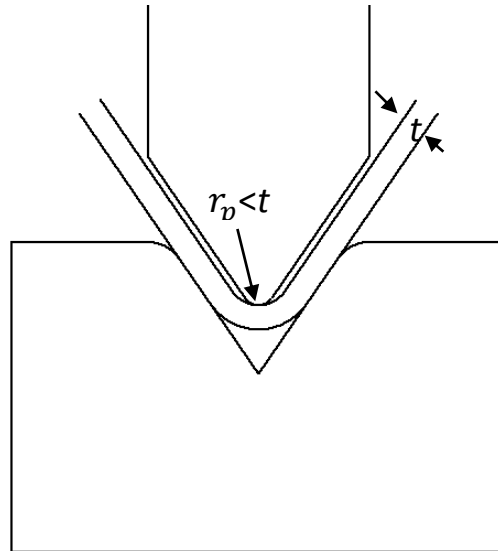


Figura 2.5 - Quinagem a fundo (Adaptado de efunda 2015) .

Relativamente à quinagem no ar, esta operação requer uma força consideravelmente superior, podendo o seu valor triplicar ou mesmo quintuplicar.

Vantagens da quinagem a fundo:

- Mais precisa, permitindo a obtenção de raios interiores mais apertados - dobras mais vincadas;
- Melhor repetibilidade do ângulo de quinagem. O ângulo mantém-se em quinagens sucessivas para chapas idênticas. As irregularidades da espessura são calibradas nesta técnica através da aplicação de um acréscimo de força;
- Aumento da resistência do material por compressão da zona quinada e plasticamente conformada durante a operação.

Desvantagens da quinagem a fundo:

- Exige forças 3 a 5 vezes superiores às requeridas para obter o mesmo ângulo em quinagem no ar. Por esse motivo a sua aplicação reserva-se normalmente a chapas finas (em princípio até 1-2mm de espessura);
- Requer um par de ferramentas para cada ângulo de quinagem;
- Provoca maior desgaste nas ferramentas.

2.2.3 Quingem forçada (“Bottoming”)

Neste processo o punção desce sobre a matriz até que a folga entre os dois seja igual à espessura da chapa, limitando-se a força, Figura 2.6. Este processo apresenta rigor dimensional superior ao obtido por quingem no ar. É utilizado, sobretudo, para quingar chapas com ângulos de 90° ou ligeiramente inferiores, com espessuras de chapa entre os 0,5mm e os 25mm (Rodrigues 2005).

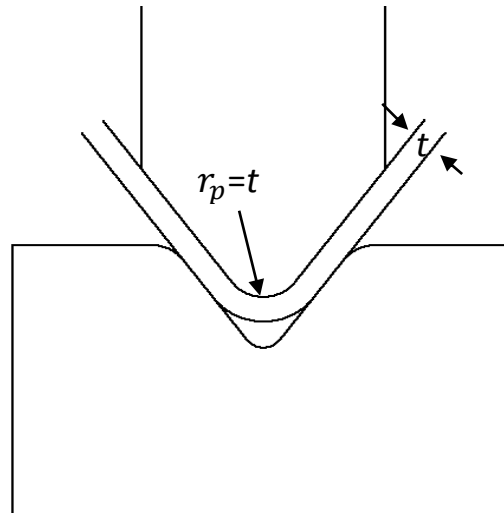


Figura 2.6 - Quingem forçada (Adaptado de efunda 2015).

2.2.4 Técnicas alternativas de quingem

- Quingem em U - O processo de quingem em U caracteriza-se pela existência de dois eixos de dobragem paralelos, permitindo a realização de duas dobragens paralelas em simultâneo (Figura 2.7). Em geral, efectua-se com um encostador que promove o contacto da chapa com a zona do fundo do cunho, evitando, dessa forma, defeitos de forma na peça enformada. Porém este dispositivo exige um acréscimo na força de quingem de cerca de 30 a 40% (Rodrigues 2005).

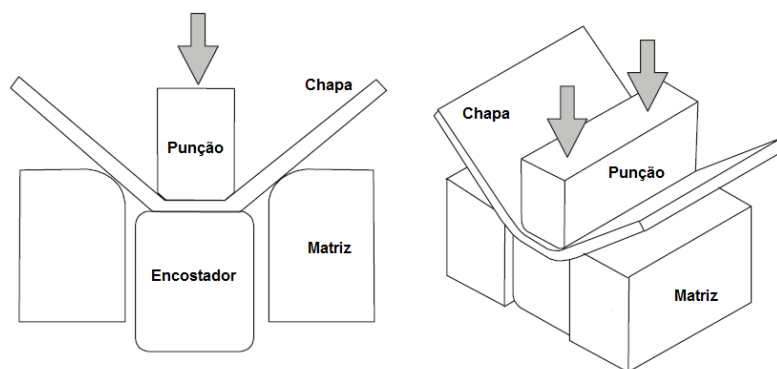


Figura 2.7 - Quingem com matriz em U (Diegel 2002).

- Quingem em três pontos – Método patenteado pela empresa suíça Hämmerle Zofingen. Um punção suspenso por uma almofada hidráulica faz penetrar a chapa a quingar no interior da matriz, apoiando-se nas suas arestas interiores (Figura 2.8). Para determinar o ângulo de quingem, um conjunto de batentes interior à matriz define o

Quinagem

3º ponto de contacto a uma determinada profundidade. Esta técnica permite aplicar à aresta de quinagem uma força uniformemente distribuída. Normalmente é utilizado em casos muito especiais onde sejam exigidas grandes precisões em peças complexas com muitas quinagens (Pacheco 1992).

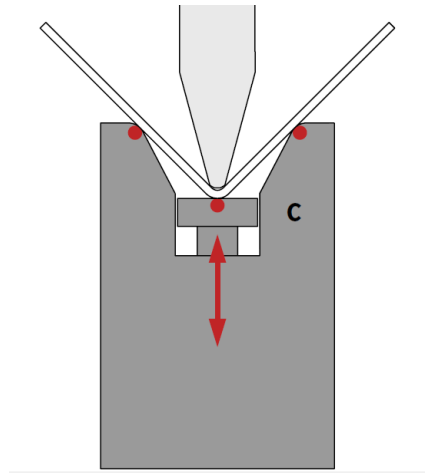


Figura 2.8 - Quinagem em três pontos (Hämmerle 2008).

No contexto desta dissertação, a técnica de quinagem analisada será a quinagem no ar. A este propósito refira-se que a quinagem no ar apresenta algumas vantagens relativamente à quinagem a fundo, destacando-se: o facto de poder ser efectuada em máquinas-ferramentas de menor capacidade, uma vez que a força e energia necessárias são mais reduzidas; o desgaste e o perigo de inutilização das ferramentas ser menor; e o mesmo conjunto cunho/matriz poder ser usado para efetuar dobragens com diferentes ângulos, reduzindo-se desta forma os custos de preparação e de montagem das ferramentas.

2.3 Defeitos de quinagem

O processo de quinagem permite uma interpretação geométrica simples, contudo está sujeito a defeitos geométricos que influenciam a geometria da peça final. A utilização de parâmetros de quinagem desfavoráveis na realização do processo provoca a ocorrência destes defeitos. Em seguida serão descritos os problemas mais comuns ocorridos em quinagem.

2.3.1 Efeito de sela

Este defeito é também conhecido por curvatura longitudinal. Ocorre normalmente na quinagem de chapas em que a largura das abas não é significativamente superior à espessura da mesma. Caracteriza-se pela curvatura da aresta de quinagem, evidenciando-se em chapas mais longas ou espessas. (Figura 2.9)



Figura 2.9 - Efeito de sela (Pacheco 2011).

No processo de quingem ocorre uma deformação por flexão da chapa. Esta flexão leva a que as fibras superiores comprimam transversalmente e a que as inferiores se alonguem transversalmente relativamente ao eixo neutro. Por efeito de Poisson, dá-se um alongamento longitudinal das fibras superiores e uma compressão das fibras inferiores, gerando um desequilíbrio de forças longitudinais que provocam um momento fletor com a direção transversal (Bastardo 2013).

Uma regra prática para atenuar este efeito é quinar chapas em que se verifique uma relação entre a largura das abas (b) e a espessura da chapa (t) dada por:

$$b = 20t \quad (2.1)$$

A aplicação desta regra permite conferir maior rigidez à secção que suportará melhor o momento fletor transversal.

2.3.2 Efeito de bordo

Na face superior da chapa metálica surge um defeito conhecido por efeito de bordo (Figura 2.10). Este defeito caracteriza-se pela deformação desta face diferenciando-se da forma plana original.

Este defeito dá-se pelas mesmas razões que o efeito sela. O efeito de Poisson coloca longitudinalmente as fibras superiores e inferiores, respetivamente, à tração e compressão (Bastardo 2013).

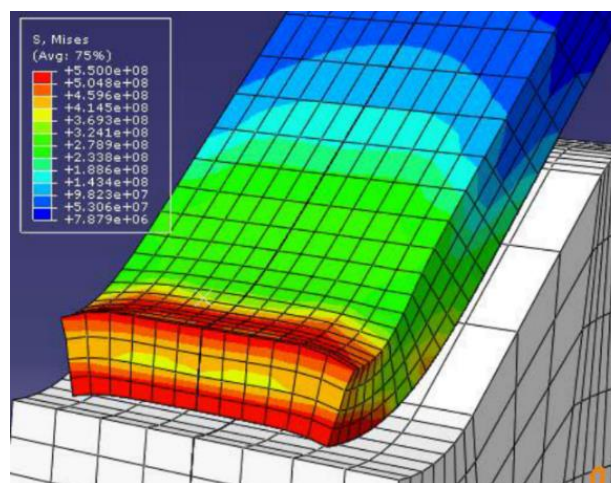


Figura 2.10 - Efeito de bordo (Pacheco 2011).

2.3.3 Efeito barril (Crowning)

As quinadoras possuem um defeito que as afeta e é inerente à sua construção. O aparecimento deste defeito prende-se com a deformação dos aventais da quinadora no processo de quinagem, que se afastam dos extremos para o centro da máquina.

Este é caracterizado pela obtenção de diferentes ângulos finais de quinagem ao longo do comprimento longitudinal, como ilustrado na Figura 2.11. Verificam-se ângulos superiores no centro e por isso este defeito tem o nome de efeito barril (Bastardo 2013, Wila 2015).

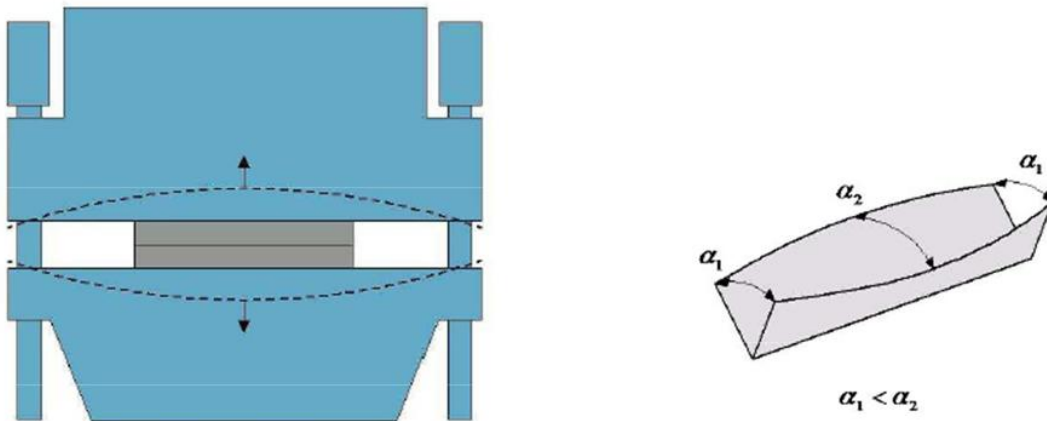


Figura 2.11 - A falta de paralelismo entre as deformadas dos aventais provoca o efeito barril na chapa metálica (Costa 2008).

2.3.4 Retorno elástico

O retorno elástico é um fenómeno explicado pelo desaparecimento das deformações elásticas quando o material deixa de ser solicitado. Quando as deformações se encontram em domínio elástico a recuperação elástica leva a que o material recupere a sua geometria inicial.

Contudo, as deformações ocorridas no processo de quinagem encontram-se no domínio plástico e por isso a recuperação geométrica é apenas parcial. Esta recuperação é denominada retorno elástico. Este fenómeno leva a que o ângulo final de quinagem seja superior após o descarregamento da chapa metálica, relativamente ao ângulo medido quando esta se encontra carregada (Figura 2.12). Este é um problema inevitável no processo de quinagem no ar, governando-se pela forma como as tensões originadas se distribuem ao longo da chapa deformada.

Desta forma, a previsão do retorno elástico assume um papel fundamental para que este possa ser compensado. Isto acontece através da realização de uma quinagem com um ângulo inferior ao desejado para que, com a ocorrência do retorno elástico, o ângulo aumente e atinja o ângulo final desejado.

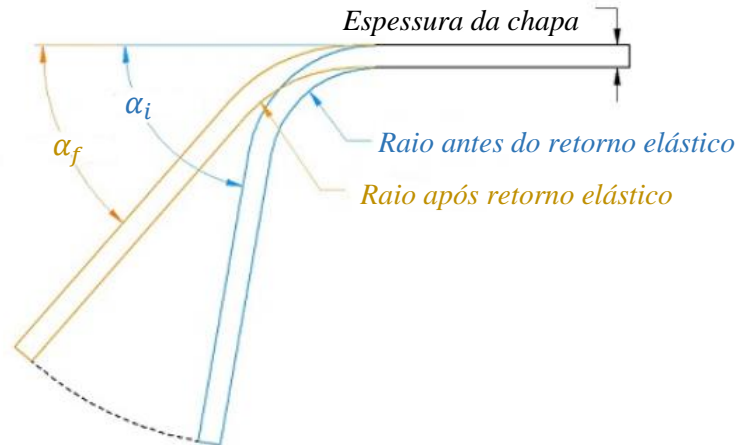


Figura 2.12 - Ângulo antes e após ocorrência do retorno elástico (Adaptado de sheetmetal 2015).

2.4 Efeito de variáveis perturbadoras nos resultados de quingem

Tal como referenciado anteriormente, apesar do processo de quingem ser descrito por uma geometria simples, o controlo da geometria final é complexo. Por esse motivo é necessário ter em conta os parâmetros envolvidos no processo. Com isto procura-se responder a perguntas críticas que permitem a melhoria dos resultados obtidos na quingem. Para um determinado ângulo de quingem:

- Qual a força e deslocamento do punção?
- Como se compensará o retorno elástico sofrido pela chapa?

Para além disto é conveniente e desejável realizar o processo no menor número de tentativas.

Assim, é necessário considerar as variáveis que influenciam os resultados obtidos. Estas podem ser observadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Variáveis a considerar no processo de quingem.

Variáveis			
Processo	Geometria	Material	Quinadora
Abertura e raio da matriz	Comprimento de quingem	Propriedades mecânicas	Precisão e repetibilidade
Raio do punção	Largura das abas da chapa	Espessura da chapa	Sistema de acionamento

Em seguida será discutida a influência das variáveis relacionadas com a chapa metálica.

2.4.1 Espessura da chapa metálica

Sobretudo na quingem no ar, as variações de espessura têm influência direta no ângulo de quingem. Para o mesmo ponto de paragem do punção, relativamente à matriz (mesma profundidade de quingem), uma chapa mais fina que o nominal terá um ângulo maior e uma mais grossa um ângulo menor (quingem mais apertada). Cite-se como referência extrema, que a variação de 0,05 mm na espessura de uma chapa de 1 mm nominal, quingada num “V” de 10 mm, é responsável por desvios de 1 grau no ângulo de quingem.

As tolerâncias de espessura variam com:

- O material – O alumínio apresenta melhor consistência que o aço;
- Técnica de laminagem – As chapas de aço laminado a frio apresentam tolerâncias de espessura mais apertadas que as laminadas a quente. As tolerâncias serão ainda mais apertadas se o material for retirado de banda laminada a frio.

Como regra pode assegurar-se que as tolerâncias serão tanto mais apertadas, quanto mais fino e mais estreito for o material laminado. Assim, sempre que se justifique deve ser determinada a qualidade do material e a forma como ele deve ser fornecido (Pacheco 1992).

2.4.2 Resistência do material

A quinagem torna-se mais difícil quando a resistência do material aumenta. A dificuldade ocorre sobretudo em termos de:

- Maior força de quinagem;
- Maior probabilidade de rotura na aresta de quinagem;
- Maior incidência do retorno elástico.

Por exemplo, a quinagem de chapas em aço inoxidável exige uma força em 50% a 60% superior à de chapas iguais em aço macio. Também o facto do aço inoxidável enrugarem facilmente durante a compressão torna difícil a sua quinagem com precisão. Recorre-se, por vezes, à técnica de distensão do material durante a quinagem através de ferramentas especiais com calcadores.

Os materiais mais resistentes não admitem raios de quinagem muito apertados, pelo que deverão ser utilizadas matrizes mais largas para evitar que o material rompa pela aresta de quinagem. Por outro lado, saindo da quinagem no ar pura, pode adotar-se um raio de punção bastante superior ao raio interior natural da chapa para realizar a dobra (Pacheco 1992).

2.4.3 Retorno elástico

A influência do retorno elástico varia muito com a resistência do material e com o seu módulo de elasticidade. É desprezível em ligas macias de alumínio e aumenta imenso para as ligas duras de alumínio. No aço macio a influência do retorno elástico é maior comparativamente a ligas macias de alumínio ou de cobre, mas menos significativa quando comparada aos aços inoxidáveis.

Uma técnica corrente associada à quinagem no ar consiste em penetrar mais o punção relativamente à matriz. Quando o ângulo de quinagem for próximo do ângulo do punção e da matriz, poderá ser necessário conferir às ferramentas um ângulo mais agudo que o nominal.

A compensação por sobrepenetração terá de ser feita por tentativas. Como referência podem avançar-se os seguintes valores (Pacheco 1992):

- Aços macios: 0,5° a 1,5°;
- Aços inoxidáveis: 2° a 4°;
- Ligas de alumínio: 0 a 12° (em ligas duras pode chegar a 33°).

Por vezes o retorno elástico de uma quinagem pode compensar o retorno elástico de outras quinagens, através de, por exemplo, quinagens múltiplas.

Outra técnica de compensar o retorno elástico consiste no uso de ferramentas especiais para quinagem a fundo, provocando-se um forte esmagamento na zona do raio de quinagem.

A permanência em carga, quer em profundidade de quinagem (quinagem no ar), quer a fundo, durante um pequeno espaço de tempo (0,5 a 2 segundos), exerce um certo controlo sobre o retorno elástico, pois permite a adaptação do material por transferência das tensões de compressão. Uma 2ª operação na quinagem crítica, com recurso a ferramentas especiais, pode ser outra técnica (Pacheco 1992).

2.5 Quinabilidade

O sucesso da operação de quinagem está dependente da escolha correta das ferramentas para a realização da operação de dobragem em função das características do material a utilizar.

O raio mínimo de quinagem, r_{min} , é um dos fatores a ter em conta, definindo-se como o raio mínimo que permite a dobragem da chapa metálica sem a ocorrência de fissuras na sua superfície exterior durante a operação de quinagem (Figura 2.13).

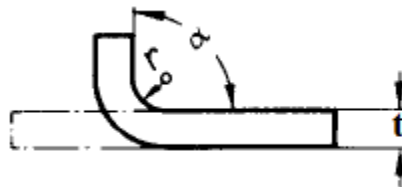


Figura 2.13 - Raio interno de dobragem (r) e ângulo de dobragem (α) para uma espessura (t) (DIN6935 1975).

Estudos realizados sugerem que o raio mínimo está relacionado com o coeficiente de estrição, permitindo concluir que apenas materiais com coeficiente de extensão após rotura superiores a 50% podem ser dobrados sobre si próprios. De acordo com a norma DIN 6935 existem 3 classes de tensão de rotura mínima, Tabela 2.2 (DIN6935 1975; Rodrigues 2005).

Tabela 2.2 - Tensão de rotura das classes de materiais para o raio mínimo de dobragem permitido.

Tensão de rotura (MPa)	
	Até 390
Classe	De 390 a 490
	De 490 a 640

Por norma os fabricantes de quinadoras costumam relacionar o raio mínimo de dobragem com a abertura de matriz através da condição:

$$r_{min} \leq \frac{5V}{32} \quad (2.1)$$

A definição dos parâmetros mais adequados a uma determinada operação de quinagem, é conseguida através da utilização do diagrama Vt (Figura 2.14). Esta ferramenta de análise relaciona a abertura da matriz em função da espessura da chapa utilizada no processo.

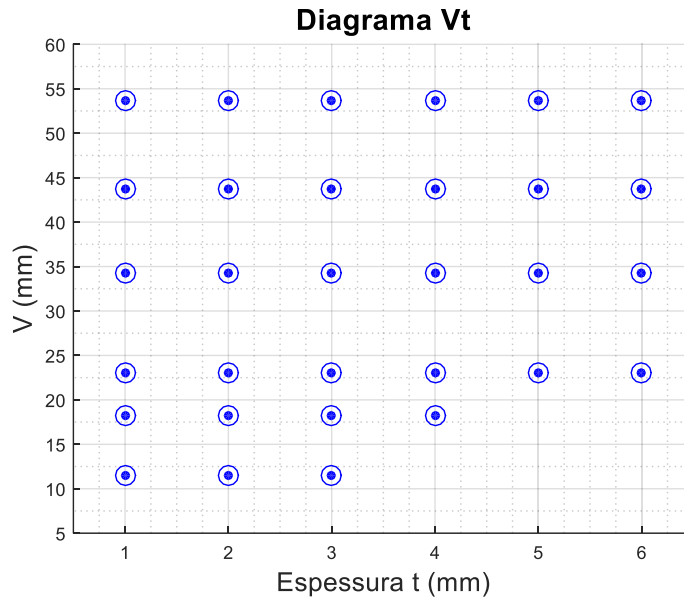


Figura 2.14 - Diagrama Vt do processo de quinagem.

Contudo certas combinações de parâmetros podem originar defeitos, como a obtenção de abas com demasiada flexão ou deformação localizada por esmagamento do punção. Estas situações podem ser controladas através da utilização de regras heurísticas que permitem a definição de uma zona óptima de quinagem através de relações entre V e t , tal como se observa na Figura 2.15.

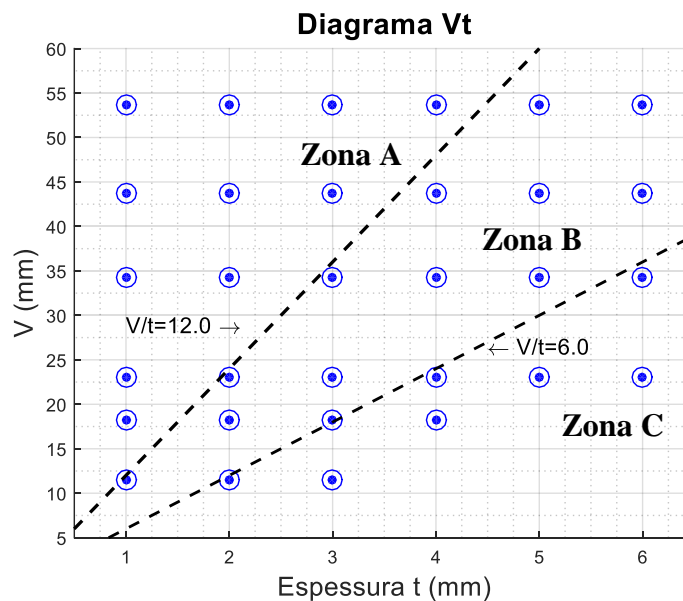


Figura 2.15 - Zonas do processo de quinagem.

A zona à esquerda de $V=12t$ (relações $V/t > 12$) tem como característica o facto de corresponder a situações em que existe tendência para as abas dobradas terem demasiada flexão, dificultando a previsão do retorno elástico. A zona à direita de $V=6t$ (relações $V/t < 6$) corresponde a componentes em que existe tendência para apresentar deformação localizada (esmagamento) no contacto com o punção e/ou com a matriz e perigo de romper a aresta pelo lado exterior. A aplicação destas regras permite a definição de três zonas de trabalho distintas.

Apresenta-se em seguida dois exemplos, um de demasiada flexão enfatizando a zona A, Figura 2.16 a) e o esmagamento que ocorre do contacto do punção com a chapa, zona C, na Figura 2.16 b).

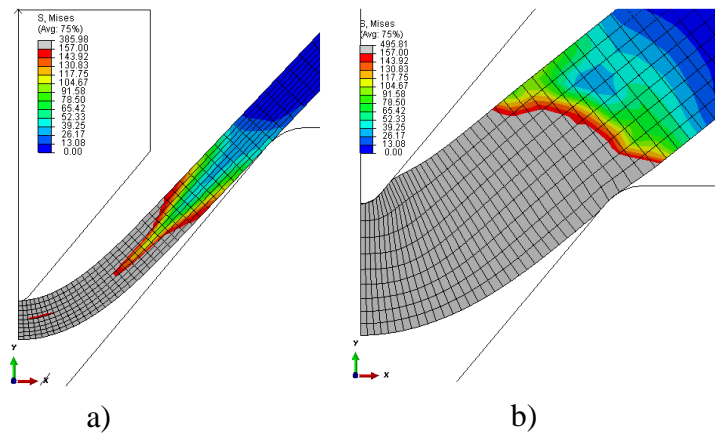


Figura 2.16 - Exemplos de deformação: a) Flexão exagerada da chapa, b) Esmagamento.

2.5.1 Limites de Quinabilidade

Em estudos anteriores foi realizada uma análise da pressão normalizada do punção exercida na chapa quinada. Com esta análise foi possível ter uma referência para as tensões exercidas pelo punção no material e, desta forma analisar a possibilidade de deformação localizada na chapa metálica (Miranda 2014).

Relacionando a pressão normalizada com uma relação quadrática (V/t^2), e com o auxílio da geometria da chapa obtida por simulação numérica é possível definir um valor limite de pressão normalizada do punção de 0.42 para um valor de raio de punção de 1 mm e diferentes materiais. Uma vez que a pressão normalizada do punção é independente do material, esta diminui com o aumento do raio do punção. Como o valor limite para ocorrer esmagamento da chapa é de 0.42, o aumento do raio do punção permite a utilização de relações V/t^2 mais baixas, como se observa na Figura 2.17 (Miranda 2014).

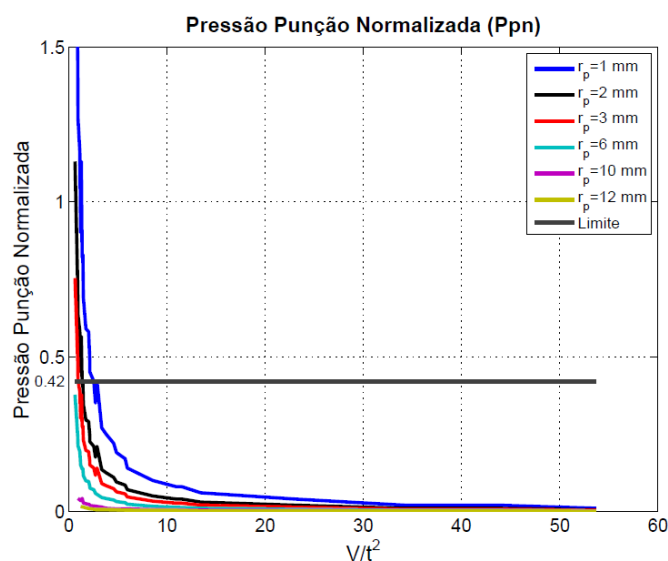


Figura 2.17 - Limite da pressão normalizada para diferentes raios do punção (Miranda 2014).

A incorporação deste limite de quinabilidade no diagrama Vt (Figura 2.18) permitiu encontrar o valor da relação V/t^2 correspondente ao limite de pressão normalizada do punção. Os valores obtidos para diferentes raios de punção podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Relação V/t^2 para raios de punção de 1, 2 e 3 mm.

Raio do punção (mm)	Relação V/t^2
1	2.9
2	1.5
3	0.95

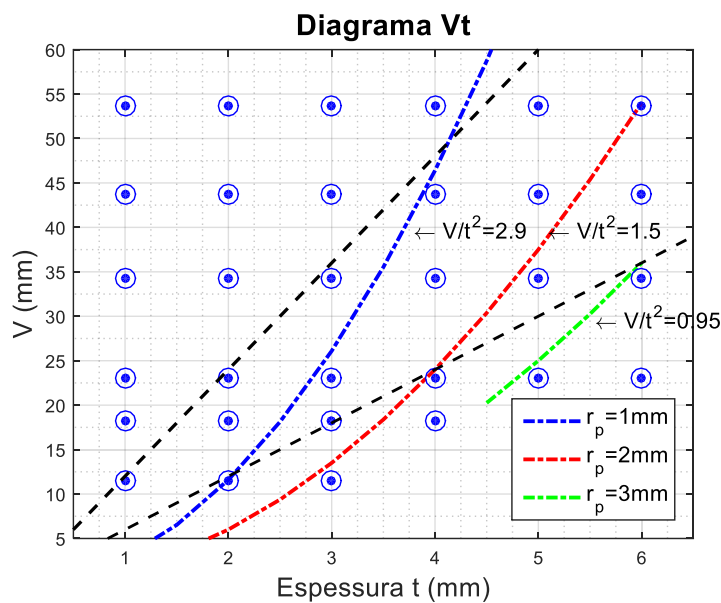


Figura 2.18 - Diagrama Vt com Limite da pressão normalizada para diferentes raios do punção.

Os pontos situados à direita das curvas limite correspondem a situações de esmagamento. Contudo, para o raio de punção igual a 3 mm (curva $V/t^2 = 0.95$) concluiu-se que para aberturas inferiores a 18.3 mm (inclusive) não se observa melhoria relativamente ao esmagamento com o aumento do raio. Isto significa que deixamos de estar numa situação de quinagem, passando a ocorrer o fenómeno de estampagem. Este comportamento verificou-se para raios de punção superiores (Miranda 2014).

2.6 Ferramentas e suas variáveis

A análise do deslocamento do punção realizada em estudos anteriores utilizava o valor real de abertura de matriz nas diversas abordagens analíticas. Contudo as diferentes expressões estudadas utilizam diferentes valores de abertura da matriz. Por esse motivo serão definidos dois parâmetros para representação deste valor. Os parâmetros geométricos da matriz podem ser observados na Figura 2.19.

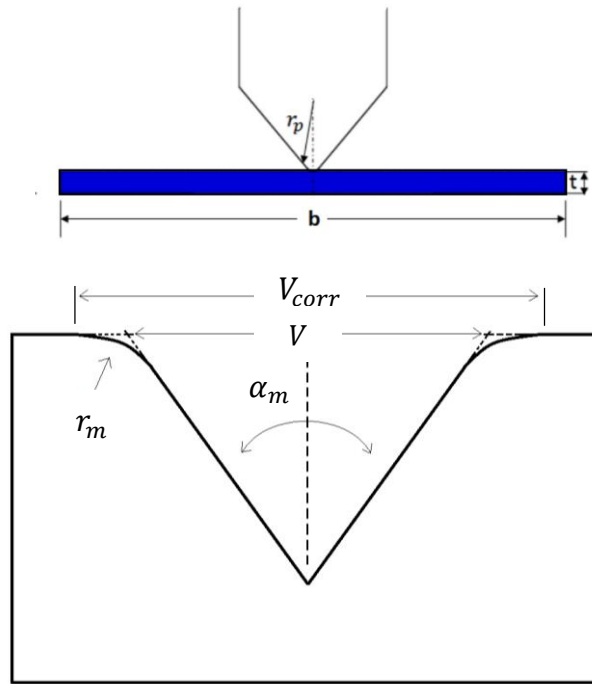


Figura 2.19 - Variáveis geométricas das ferramentas de quingem.

Pelo motivo referido anteriormente foi necessário diferenciar estes parâmetros em que V_{corr} corresponde ao valor real da abertura da matriz e calcula-se a partir da seguinte expressão:

$$V_{corr} = V + 2 \times r_m \times \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)} - \tan\left(\frac{\alpha_m}{2}\right) \right) \quad (2.2)$$

Na Tabela 2.4 apresenta-se os valores para o conjunto de matrizes estudadas:

Tabela 2.4 – Dimensões das diferentes geometrias de matrizes em estudo.

V (mm)	V_{corr} (mm)	r_m (mm)	α_m (°)
10	11.53	1.0	30
16	18.30	1.5	30
20	23.06	2.0	30
30	34.21	3.0	40
40	43.73	4.0	80
50	53.73	4.0	80

Para cada abertura de matriz, a chapa a ser deformada plasticamente tem diferentes larguras (b), apresentando-se de seguida, Tabela 2.5, as dimensões da chapa e a sua relação com a abertura da matriz.

Tabela 2.5 - Dimensões da diferentes espessuras em estudo.

V (mm)	$b/2$ (mm)	Espessura t (mm)					
		1	2	3	4	5	6
10	15	X	X	X			
16	25	X	X	X	X		
20	35	X	X	X	X	X	X
30	50	X	X	X	X	X	X
40	50	X	X	X	X	X	X
50	35	X	X	X	X	X	X

Quinagem

Tal como a matriz, também o punção tem várias dimensões. Na Tabela 2.6 são apresentados os diferentes raios do punção considerados, bem como a sua aplicabilidade para as diferentes aberturas de matriz.

Tabela 2.6 - Relação entre a abertura da matriz e o raio do punção.

V (mm)	r_p (mm)					
	1	2	3	6	10	12
10	X	X	X			
16	X	X	X	X		
20	X	X	X	X		
30	X	X	X	X	X	
40	X	X	X	X	X	X
50	X	X	X	X	X	X

2.7 Determinação analítica do deslocamento do punção

A análise da geometria do modelo de quinagem permite definir o deslocamento do punção necessário para obter um determinado ângulo de quinagem.

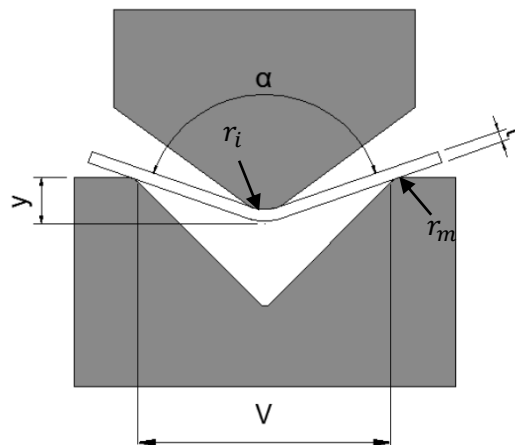


Figura 2.20 - Representação geométrica do modelo para determinação de $y = f(\alpha)$ (Bastardo 2013).

Partindo de um modelo bidimensional (Figura 2.20) e através de triangulação geométrica é possível estabelecer uma relação entre os parâmetros envolvidos. A equação 2.3 é um exemplo de uma relação típica:

$$y = \frac{V}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_i + t) \frac{\left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.3)$$

2.7.1 Expressões analíticas

Tal como foi referido, existem diversas abordagens para a previsão do deslocamento sofrido pelo punção. Em 1994 De Vin propôs um modelo conhecido como *Wrap-Around*, que considera que a deformada da chapa envolve o raio do punção sendo, por isso, igual ao raio

no centro (De Vin 1994). Desta forma, o deslocamento do punção, y , pode definir-se em função do ângulo de quingem através da seguinte expressão:

$$y = \frac{V}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_p + t) \frac{\left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.4)$$

Outra abordagem é proposta por Jorge Rodrigues e Paulo Martins em que r_i corresponde ao raio de quingem dado por $V/6.4$ (Rodrigues 2005):

$$y = \frac{V}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_i + t) \frac{\left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.5)$$

Finalmente, J. Bessa Pacheco propõe uma expressão, que considera o valor real de abertura da matriz e o seu raio, tornando assim a equação 2.3 na equação 2.6 (Pacheco 2011).

$$y = \frac{V_{corr}}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_i + t + r_m) \frac{\left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (2.6)$$

É importante ter em consideração o raio do punção, r_p , utilizando-se o seguinte critério no cálculo do raio natural de quingem:

$$r_i = \frac{V}{6.4}, \quad r_p < \frac{V}{6.4} \quad (2.7)$$

$$r_i = r_p, \quad r_p \geq \frac{V}{6.4} \quad (2.8)$$

3 Caracterização dos materiais

A modelação do comportamento plástico dos materiais é fundamental na análise de processos de conformação plástica. Desta forma recorre-se a modelos constitutivos para reprodução destes comportamentos.

As equações constitutivas permitem obter a tensão em função da deformação do material. Existem diferentes modelos constitutivos que permitem a distinção entre vários tipos de materiais.

Nos processos de conformação plástica, os materiais apresentam, geralmente, um comportamento linear no início da deformação. Nestes casos, considera-se que a relação tensão-extensão é elástica, sendo calculada pela lei de Hooke. Contudo quando se atinge um certo limite de tensão, o material passa a sofrer deformações permanentes. Nestes casos, considera-se que o material sofreu uma deformação plástica, não sendo capaz de recuperar a sua forma inicial. A transição entre regime elástico e plástico é determinada pela tensão de cedência.

3.1 Leis Constitutivas

O encruamento pode ser definido como a expansão da superfície de plasticidade do material. As leis de encruamento baseiam-se na evolução da dimensão da superfície de plasticidade, em função das variáveis internas do material.

Existem diferentes leis de encruamento para a caracterização plástica de materiais isotrópicos. As leis de Ludwick (1909), Prager (1938), Hollomon (1944), Swift (1947) e Voce (1948) são alguns exemplos de formulações normalmente utilizadas.

3.1.1 Lei de Swift

A lei de Swift é a mais adequada para descrever o comportamento dos materiais que exibam encruamento isotrópico sem saturação, pré-deformados ou laminados a frio. O crescimento rápido inicial da tensão está deslocado e a curva inicia-se na tensão de cedência.

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (3.1)$$

Os valores de K , n e ε_0 representam constantes do material enquanto que σ e ε são os valores representativos da tensão e deformação, respetivamente.

Baseado em resultados experimentais conclui-se que a lei de Swift descreve melhor o comportamento mecânico para aços do que para as ligas de alumínio (Alves 2003).

3.1.2 Lei de Voce

A lei de Voce é mais apropriada para descrever o comportamento de materiais que exibam encruamento isotrópico com saturação. A equação 3.2 traduz a lei de Voce:

$$\sigma = \sigma_0 + R_{sat} \cdot (1 - e^{-C_r \varepsilon}) \quad (3.2)$$

As constantes do material, σ_0 , R_{sat} e C_r , são identificadas pelo ajuste da curva tensão/deformação dos dados experimentais, obtidos no ensaio de tração uniaxial.

A nível do comportamento mecânico experimental, a lei de Voce adapta-se melhor para as ligas de alumínio do que para o aço (Alves 2003).

3.2 Caracterização dos materiais metálicos

Tal como mencionado anteriormente, o processo de quinagem envolve diversas variáveis. O material constitui uma destas variáveis, assumindo um papel importante na qualidade do produto final. No âmbito desta dissertação serão estudados diferentes materiais, incluindo aço macio, estrutural e de elevada resistência, para além de alumínio.

Materiais com baixa tensão de cedência têm comportamentos mais regulares e adequam-se melhor às regras de quinagem existentes, no entanto materiais com elevada tensão de cedência têm menor capacidade de deformação plástica, ficando mais vulneráveis à rutura (Santos 2005).

Nas secções seguintes será feita uma pequena introdução aos materiais alvo de estudo.

3.2.1 Mild Steel CQ/CR

O aço MS, obtido por laminagem a frio, é produzido a partir de uma chapa laminada a quente a qual é, em seguida, reduzida a frio para se obter a espessura desejada. Essas chapas são enroladas para uma tolerância apertada e acabamentos de superfície finos.

Os produtos resultantes deste tipo de liga têm um número ilimitado de usos e aplicações, tais como peças de automóveis, partes de eletrodomésticos, peças altamente moldáveis e em peças que exigem um acabamento de superfície elevado. Na Tabela 3.1 encontra-se descrita a composição química deste tipo de aço (Kuvín 2011).

Tabela 3.1 - Composição química do aço MS CQ/CR (Kuvín 2011).

Material	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
MS CQ/CR	0.15	0.6	0.03	0.035	0.20

3.2.2 Docol RP300

O aço Docol RP é uma liga de aço fosfórica de elevada resistência destinada a conformação plástica.

Caracteriza-se por apresentar excelente formabilidade. A deformação a que o material é sujeito durante o processo de conformação provoca o seu endurecimento, traduzindo-se na resistência da peça final. Em muitos casos, o aço Docol RP substitui os aços macios tendo como aplicações típicas a indústria automóvel, nomeadamente em peças de veículos. A composição química deste aço pode ser observada na Tabela 3.2 (SSAB, 2007).

Tabela 3.2 - Composição química do aço Docol RP300 (SSAB 2007).

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N (%)	Al (%)
Docol 300RP	0.05	0.20	0.60	0.11	0.01	0.003	0.04

3.2.3 S355J2

O aço S355J2 é um aço estrutural usado em múltiplas aplicações de construção metálica, com a garantia de um valor mínimo para a tensão de cedência. Este tipo de material é ideal para estruturas de construção soldada, uma vez que solda facilmente pelos processos convencionais. Além de possuir boas características mecânicas, tem também uma boa tenacidade. A nomenclatura dada a este material está relacionada com a sua tensão de cedência.

Alguns exemplos de aplicação de tipo de aço são guias, pontes, torres eólicas, depósitos, carroçarias, entre muitos outros (Ruukki 2014).

Na Tabela 3.3 encontra-se descrita a composição química deste aço.

Tabela 3.3 - Composição química do aço S355J2 (Ruukki 2014).

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
S355J2	0.22	0.55	1.60	0.03	0.03

3.2.4 Docol DP590 e DP980

Os aços dual-phase são constituídos por uma matriz ferrítica contendo um disco e uma fase martensítica na forma de ilhas. O limite elástico deste material é função crescente da fração volumétrica da martensite e depende do tamanho das ilhas desta e dos grãos ferríticos.

A ferrite, que é um componente macio, contribui para a boa formabilidade, já a martensite confere resistência mecânica ao material (Shaeffler 2004).

Globalmente os aços dual-phase são caracterizados por um valor elevado de coeficiente de encruamento n . A microestrutura dos aços dual-phase produz uma diferença entre a tensão de cedência e a tensão de rotura, o que resulta numa maior absorção de energia e menor retorno elástico após a conformação a frio. Os aços dual-phase podem ser utilizados em qualquer indústria que requer alta resistência e boa formabilidade, tais como recipientes de retenção de alta pressão, móveis e bicicletas (SSAB 2008).

Apresentam-se de seguida as composições químicas dos aços DP590 e do DP980, na Tabela 3.4 e Tabela 3.5 respetivamente.

Tabela 3.4 - Composição química do aço DP590 (SSAB 2008).

Material	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Al_{Sol} (%)
DP590	0.06	1.6	0.02	0.003	0.28	0.10	0.01

Tabela 3.5 - Composição química do aço DP980 (SSAB 2008).

Material	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Al_{Sol} (%)
DP980	0.1	2.4	0.02	0.01	0.05	0.50	0.01

3.2.5 Ligas de alumínio AA5182-O e AA6016-T4

Cada vez mais se utilizam materiais alternativos em todos os ramos industriais. As ligas de alumínio são criadas pela adição de diversos elementos químicos ao alumínio. As diferentes combinações possíveis entre o alumínio e os elementos de liga têm permitido o desenvolvimento de novas ligas, direcionadas para aplicações finais específicas.

Uma das mais valias das ligas de alumínio, centra-se na possibilidade de obtenção de uma grande variedade de características mecânicas, através de tratamentos térmicos ou mecânicos, e tendo como linha orientadora a aplicação final.

O desenvolvimento das ligas de alumínio associado aos avanços tecnológicos dos processos de conformação plástica, possibilitam a produção de uma grande diversidade de perfis, que abrangem praticamente todas as áreas de aplicação no campo da indústria.

As composições químicas das ligas de alumínio AA5182-O e AA6016-T4 podem ser observadas na Tabela 3.6 e Tabela 3.7 (Abedabbro 2006; Leitao 2010).

Tabela 3.6 - Composição química da liga de alumínio AA5182-O (Abedabbro 2006).

Material	Mg (%)	Fe(%)	Ni (%)	Mn (%)	Si (%)	Cu (%)	Ti (%)	Zn
AA5182	4.3	0.21	0.01	0.34	0.03	0.01	0.01	0.01

Tabela 3.7 - Composição química da liga de alumínio AA6016-T4 (Leitao 2010).

Material	Mg (%)	Fe(%)	Cr (%)	Mn (%)	Si (%)	Cu (%)	Ti (%)	Zn
AA6016	0.4	0.5	0.1	0.2	1.25	0.2	0.15	0.2

3.2.6 Propriedades mecânicas e curvas características dos materiais

Na tabela seguinte apresentam-se as propriedades dos diferentes materiais utilizados.

Tabela 3.8 - Propriedades mecânicas dos materiais.

Propriedades	MS	RP300	S355J2	DP590	DP980	AA5182	AA6016
Módulo de Elasticidade E [GPa]	210	210	210	210	210	70	70
Coefficiente de Poisson ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.33	0.33
Massa específica ρ [kg/m^3]	7800	7800	7800	7800	7800	2570	2570
Tensão de Cedência R_e [MPa]	157	309	391	393	816	143	110
Tensão de Rotura R_m [MPa]	294	441	591	641	1016	300	210
Extensão após rotura %	48	31	30	26	11	24	24

Na Tabela 3.9 e Tabela 3.10 encontram-se os parâmetros das leis constitutivas utilizadas, para a caracterização dos diferentes aços e ligas de alumínio estudados nesta dissertação.

Tabela 3.9 - Parâmetros da lei de Swift dos aços utilizados.

Propriedades	MS	RP300	S355J2	DP590	DP980
K [MPa]	610	711.3	891.8	1000	1265
ϵ_0	0.0133	0.0216	0.0186	0.0024	0.00030
n	0.31	0.1694	0.209	0.1550	0.0550

Tabela 3.10 - Parâmetros da lei de Voce das ligas de alumínio utilizadas.

Propriedades	AA5182	AA6014
σ_0 [MPa]	145.1	124.9
C_R	7.7	10.1
R_{Sat} [MPa]	277.9	181.3

Para uma melhor percepção do comportamento dos materiais em estudo, a Figura 3.1 representa as curvas tensão-extensão caracterizadas pela lei de Swift para os aços e lei de Voce para as ligas de alumínio, fazendo uso dos parâmetros anteriormente referidos.

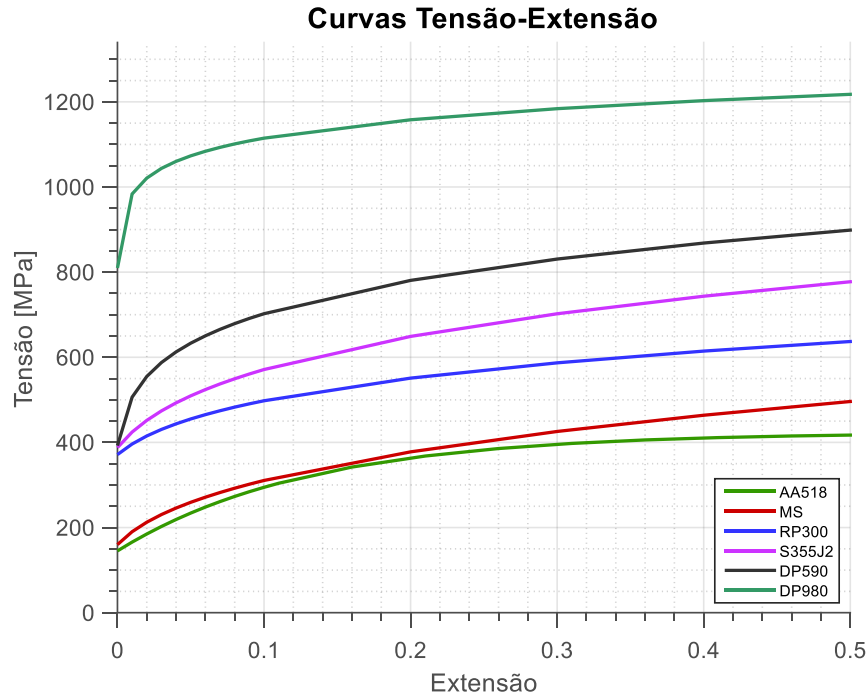


Figura 3.1 – Curvas Tensão-Extensão dos materiais estudados.

4 Programas de cálculo numérico

A engenharia apoia-se cada vez mais na utilização de ferramentas computacionais para a resolução de problemas. Estas ferramentas permitem a obtenção de soluções de forma simples e expedita, sendo largamente utilizadas em problemas estruturais e de conformação plástica no ramo da Engenharia Mecânica. Nesta dissertação recorreu-se a dois programas que permitiram a obtenção dos resultados apresentados ao longo deste trabalho.

4.1 Abaqus FEA®

O *Abaqus FEA®* é um *software* que utiliza o método dos elementos finitos para obter o comportamento de sólidos sujeitos a solicitações. Esta ferramenta é considerada uma das melhores soluções para análise de elementos finitos, permitindo a consolidação de processos e ferramentas, redução de custos e aumento da eficiência.

O *Abaqus®* divide cada simulação completa em três estágios distintos (Figura 4.1):

- Pré-processamento (Modelação)– Este estágio envolve a criação de um ficheiro *input* que contém todas as definições, tais como: geometria das partes, propriedades do material e condições de fronteira. Para além disso, definem-se as interações entre as diferentes partes e gera-se a malha de elementos finitos.
- Processamento (Análise de elementos finitos)– Nesta fase verifica-se a integridade do modelo gerado. Em seguida, são realizados os cálculos para a obtenção da solução.
- Pós-processamento – Esta fase disponibiliza os resultados obtidos na fase de processamento. Permite a obtenção de relatórios, imagens e animações para um grande número de informações (tensões, deformações, forças, deslocamentos, etc.). As informações obtidas estão guardadas num ficheiro de saída com extensão “.odb”.

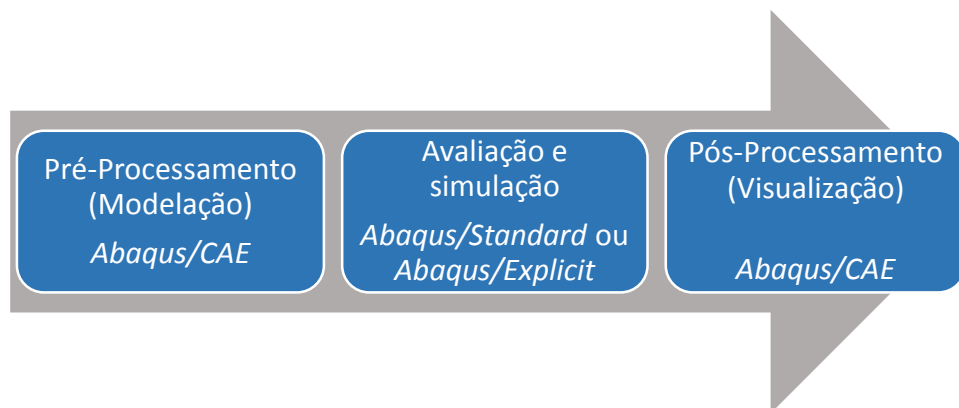


Figura 4.1 - Sequência de processamento do Abaqus®.

O *Abaqus*® possui um ambiente gráfico (Figura 4.2) que permite a realização dos vários estágios de análise, sendo também possível programar estes através do uso de linguagem *Python*. O recurso ao método de programação possui a vantagem de permitir a simulação de várias situações alterando determinados parâmetros do caso em estudo. Esta característica adequa-se ao processo de quingem, em que as variáveis são: espessura da chapa metálica, abertura da matriz e raio do punção.

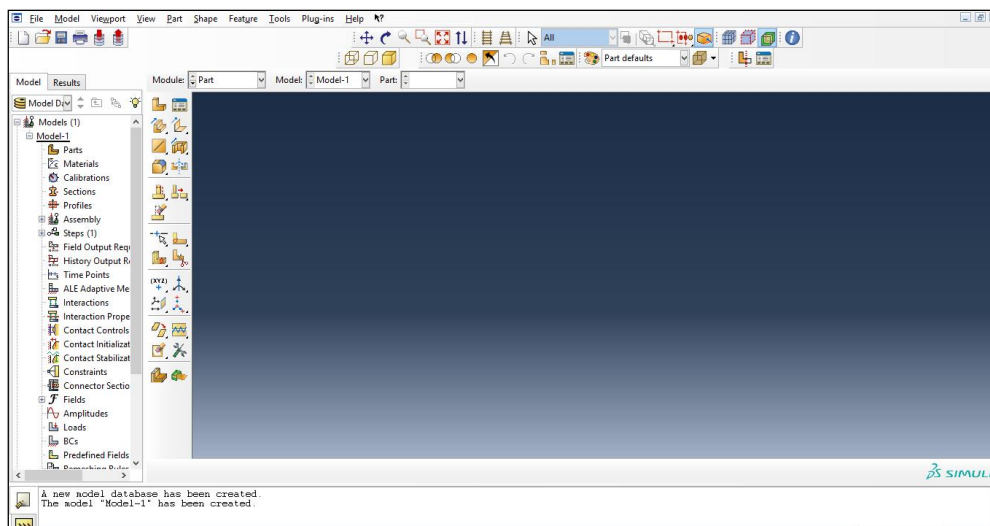


Figura 4.2 - Ambiente gráfico do *Abaqus*®.

O *Abaqus*® pode também ser dividido em dois tipos diferentes de análise:

- *Abaqus/Standard* – Utilizado para resolver análises de elementos finitos por integração implícita, tais como, análises estáticas, dinâmicas e térmicas. Possui uma gama extensa em termos de opções de contactos e materiais não-lineares.
- *Abaqus/Explicit* – Baseia-se em análises explícitas e adequa-se à solução de problemas dinâmicos e quase-estáticos. Constitui uma alternativa mais robusta quando o método implícito tem problemas de convergência. É necessário ter em atenção a influência dos efeitos de inércia, pois podem levar a resultados que não correspondem à realidade física do problema em estudo. É utilizado em variadas aplicações como testes de queda, esmagamento e processos de fabrico.

4.2 Matlab®

O Matlab® é uma linguagem complexa que possui um ambiente gráfico para computação numérica, visualização e programação, Figura 4.3. Através deste programa é possível analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicações.

Esta ferramenta é amplamente usada em problemas de Engenharia permitindo a exploração de diversas abordagens para a obtenção de soluções de forma mais expedita.

O Matlab® possui dois tipos de ambiente:

- Introdução direta de comandos para realização de operações simples;
- Ambiente de programação que permite a programação de rotinas, que são armazenadas em *scripts*. Desta forma, é possível solucionar problemas matemáticos com maior rapidez relativamente a outras linguagens de programação.

Programas de cálculo numérico

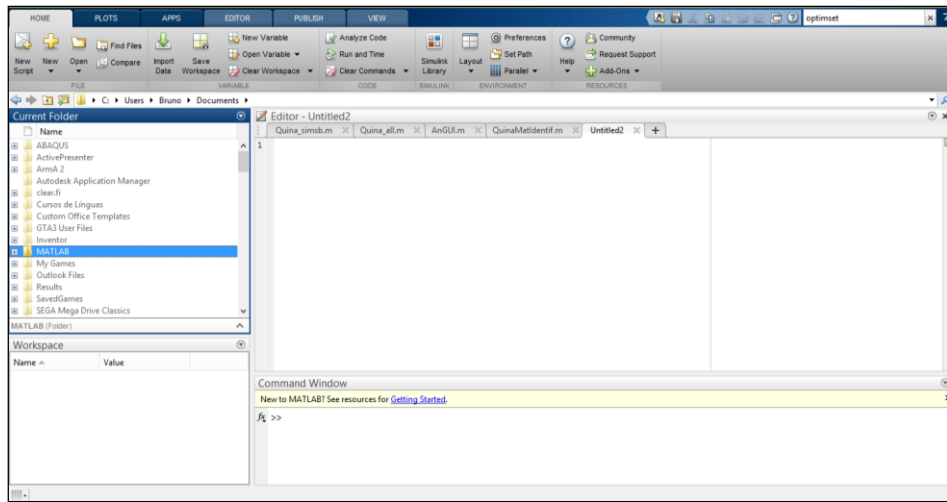


Figura 4.3 - Ambiente gráfico do Matlab®.

O Matlab® é utilizado por milhões de engenheiros e cientistas, tanto na indústria como no campo académico, sendo considerada a linguagem da computação técnica.

Ao longo deste trabalho foram utilizados *scripts* e ficheiros *input* para a definição geométrica e atribuição de condições de análise, leitura e escrita dos resultados obtidos por simulação.

5 Simulação numérica do processo de quinagem

Na presente dissertação o processo de quinagem será analisado utilizando um modelo numérico, previamente validado experimentalmente. Esta análise será realizada em termos de força e deslocamento do punção e, também, retorno elástico. Simultaneamente, serão comparados os resultados numéricos com diversas abordagens analíticas.

5.1 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) surgiu no início dos anos 60 e atualmente é uma das ferramentas mais utilizadas na análise de problemas de engenharia. Este método possibilita a modelação e simulação de processos em todos os ramos de engenharia (Figura 5.1). A utilização desta tecnologia e a sua constante evolução é essencial para a obtenção de produtos de grande qualidade associados a um custo reduzido em diversas áreas, como por exemplo, a indústria automóvel, comunicações, energias, entre outras.

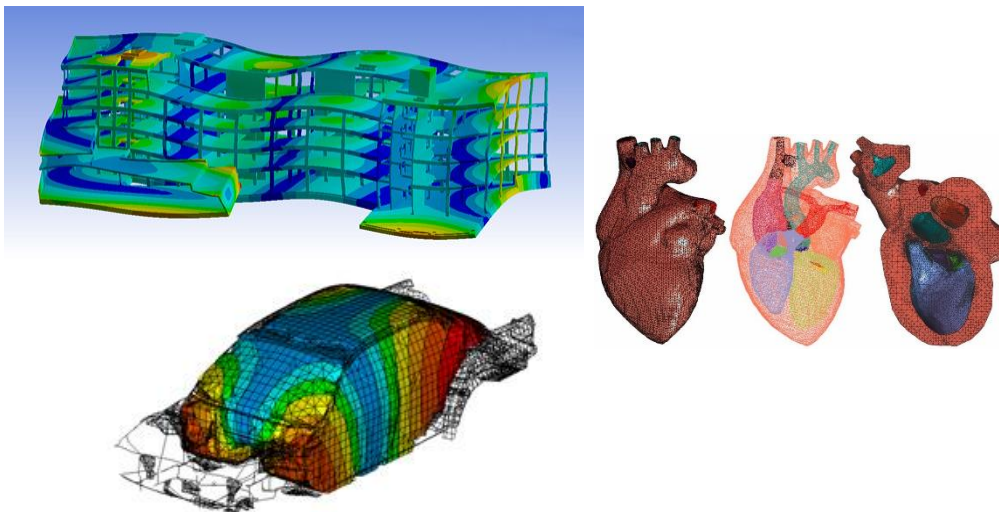


Figura 5.1 - Exemplos de aplicação do MEF.

No entanto é importante não esquecer que o MEF é um método numérico, constituindo desta forma um método de aproximação. É possível resolver problemas de grande complexidade, contudo a solução obtida é aproximada.

O comportamento específico de um sistema depende da geometria ou do domínio deste, das propriedades do material, condições iniciais e de fronteira e esforços existentes.

Do ponto de vista do utilizador, a aplicação computacional do MEF consiste em quatro etapas:

- Modelação da geometria;
- Definição da malha;
- Definição das propriedades do material;
- Aplicação das condições iniciais, de fronteira e esforços.

Existem diversos programas de Conceção Assistida por Computador, (CAD - Computer Aided Design) que possuem interfaces gráficas que tornam simples a definição e representação da geometria, o que por sua vez possibilita uma análise expedita e simples dos problemas através deste método. O MEF continua em crescimento, acompanhando a evolução dos computadores que cada vez possuem maior capacidade de processamento.

5.2 Bases de análise

Um aspeto fundamental do processo de quingem é a flexibilidade na realização de componentes quingados.

O processo consiste na deformação plástica de uma chapa metálica causada por um deslocamento do punção, conferindo-lhe a geometria desejada. Ao atingir o deslocamento do punção necessário para obter o ângulo pretendido, este retorna à posição original permitindo o retorno elástico da chapa quingada.

Algumas etapas do processo de quingem no ar encontram-se representadas na Figura 5.2.

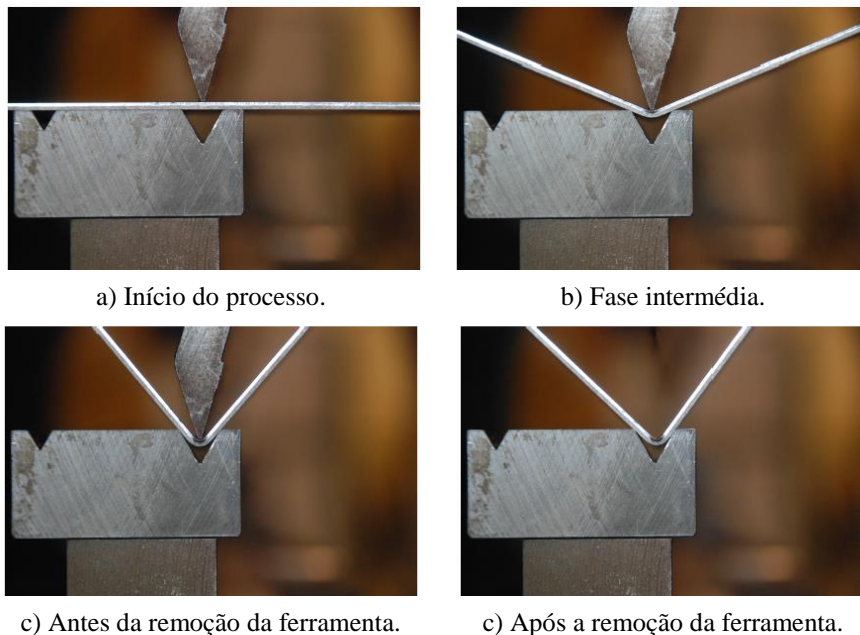


Figura 5.2 - Etapas do processo de quingem (Miranda 2014).

5.3 Modelo numérico

O modelo numérico utilizado na análise das várias situações de quinagem estudadas foi construído a partir do *software Abaqus®*. Dada a simetria da geometria, considera-se apenas metade do modelo real, simplificando a representação e análise do problema, Figura 5.3.

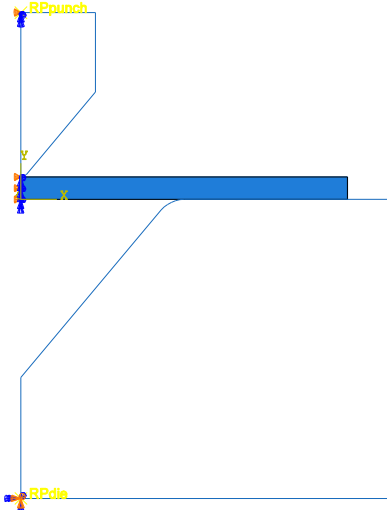


Figura 5.3 - Condições de fronteira aplicadas ao modelo numérico.

Na Tabela 5.1 encontram-se as propriedades atribuídas para a definição do modelo numérico.

Tabela 5.1 - Propriedades do modelo numérico 2D utilizado.

Propriedades	Chapa metálica	Matriz	Punção
Tipo de análise	Dinâmica-Explícita (<i>Abaqus/Explicit</i>)		
Tipo de superfície	Sólida deformável	Analítica rígida	Analítica rígida
Condição de fronteira	Simetria no plano yOz	Simetria no plano yOz; Encastramento	Simetria no plano yOz
Velocidade (mm/s)	-	-	-1000 (Vertical)
Coefficiente de atrito	0.15		
Tipo de elemento	CPE4R	-	-
Nº de nós	510	-	-
Nº de elementos	450	-	-

A discretização das ferramentas e da chapa metálica pode ser observada na Figura 5.4.

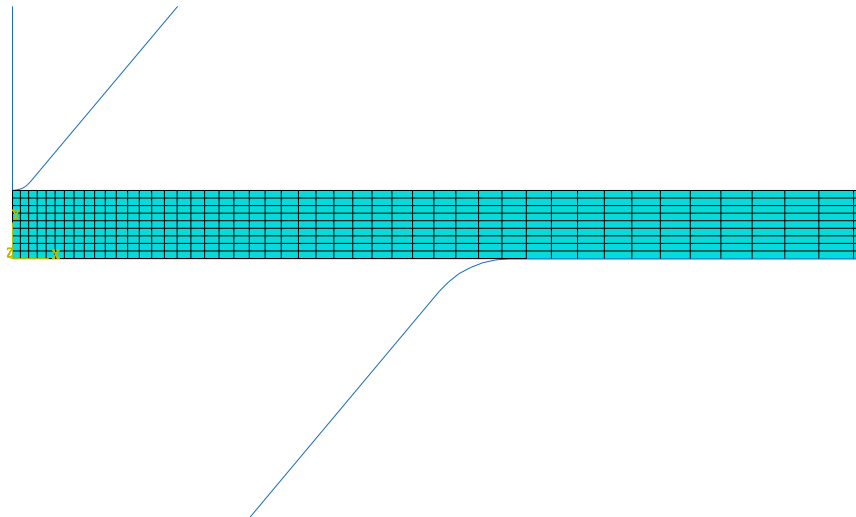


Figura 5.4 - Discretização das ferramentas e chapa metálica.

O computador utilizado nas análises possui um processador Intel® Core™ i5-4210U a 1.7 GHz com 6 GB de RAM.

Devido ao elevado número de combinações entre os diferentes parâmetros do processo de quingem, Tabela 2.5 e Tabela 2.6, será utilizada uma nomenclatura que facilita a leitura da abertura da matriz, espessura da chapa e raio de punção em estudo. Na Figura 5.5 apresenta-se um exemplo da designação utilizada para caracterizar o processo.

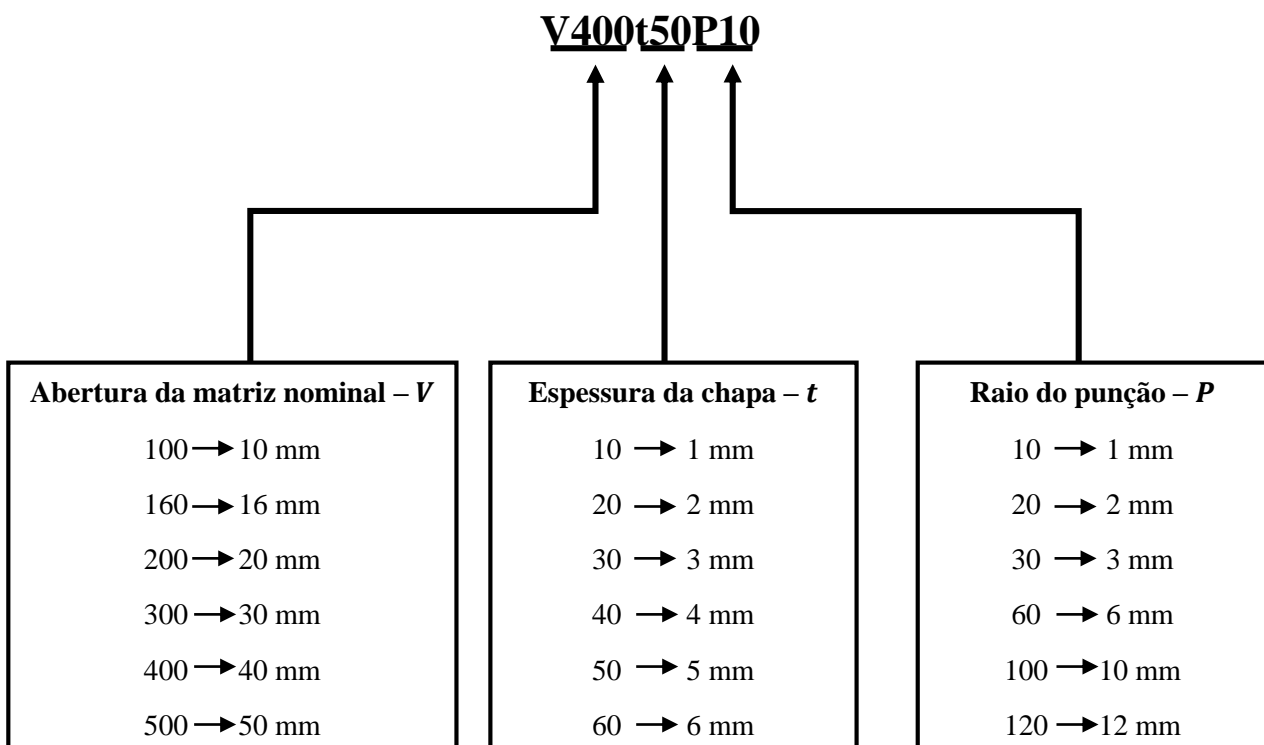


Figura 5.5 - Nomenclatura utilizada para caracterizar o processo de quingem.

5.4 Força do punção

Existem várias expressões analíticas que permitem o cálculo da força máxima do punção. Em estudos anteriores analisou-se a força do punção, comparando os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos e as seguintes expressões provenientes da SSAB (SSAB 2006) e da norma DIN 6935 (DIN6935 1975, Rodrigues 2005):

$$F_{SSAB1} = \frac{1.6 \cdot t^2 \cdot l \cdot R_m}{V_{corr}} \quad (5.1)$$

$$F_{DIN6935} = \left(1 + 4 \cdot \frac{t}{V_{corr}}\right) \cdot l \cdot R_m \cdot \frac{t^2}{V_{corr}} \quad (5.2)$$

Verificou-se que a expressão proposta pela norma DIN 6935 foi a que melhor aproximou a força máxima do punção comparativamente aos resultados numéricos. Contudo encontra-se disponibilizada pela SSAB uma expressão alternativa para o cálculo da força máxima do punção (SSAB 2007), dada pela equação 5.3:

$$F_{SSAB2} = \frac{t^2 \cdot l \cdot R_m}{V_{corr} - r_m - r_p} \quad (5.3)$$

onde R_m corresponde a tensão de rotura do material, l o comprimento de quinagem, t a espessura da chapa e V_{corr} a abertura da matriz.

Assim, utilizando o diagrama Vt , serão analisados diferentes pontos de quinagem, como ilustrado na Figura 5.6.

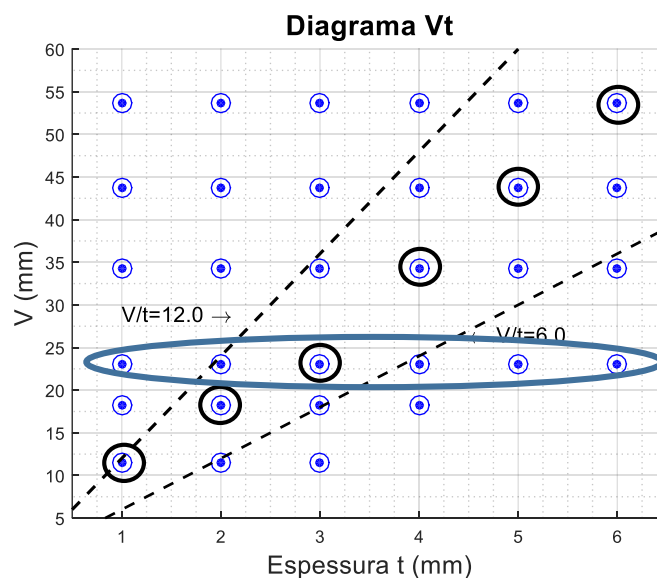


Figura 5.6 - Pontos de quinagem em estudo com base no diagrama Vt .

5.4.1 Análise para o aço MS

Nesta secção será estudado o aço MS, que corresponde à primeira classe de materiais proposta pela norma DIN 6935. Os resultados obtidos, em termos de comparação da força calculada usando a norma DIN 6935, a da SSAB e a resultante da modelação numérica, encontram-se representados na Figura 5.7.

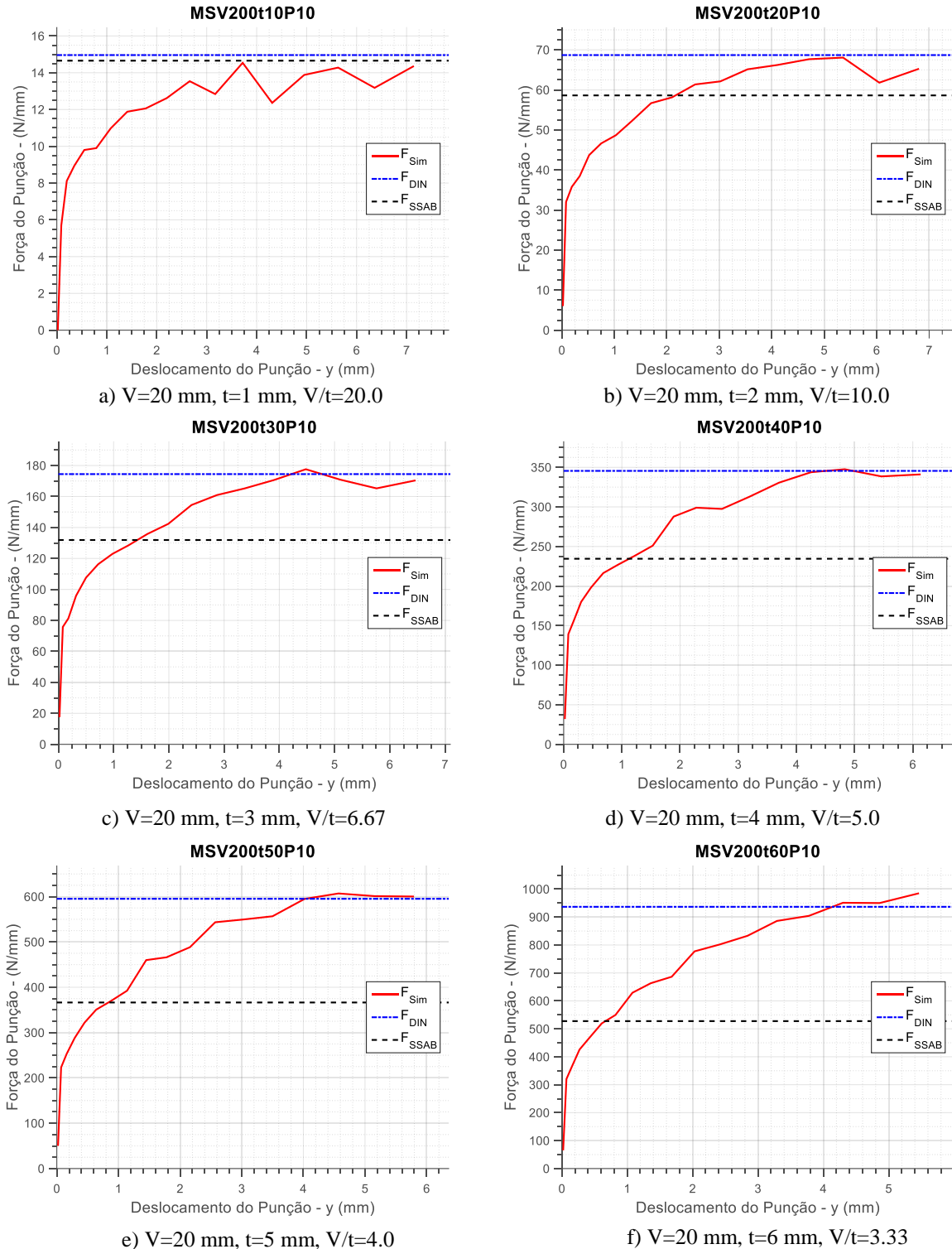


Figura 5.7 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V=20 mm e espessuras variáveis, para o aço MS.

Fazendo a mesma análise segundo uma linha diagonal de pontos, obtêm-se os seguintes resultados, Figura 5.8.

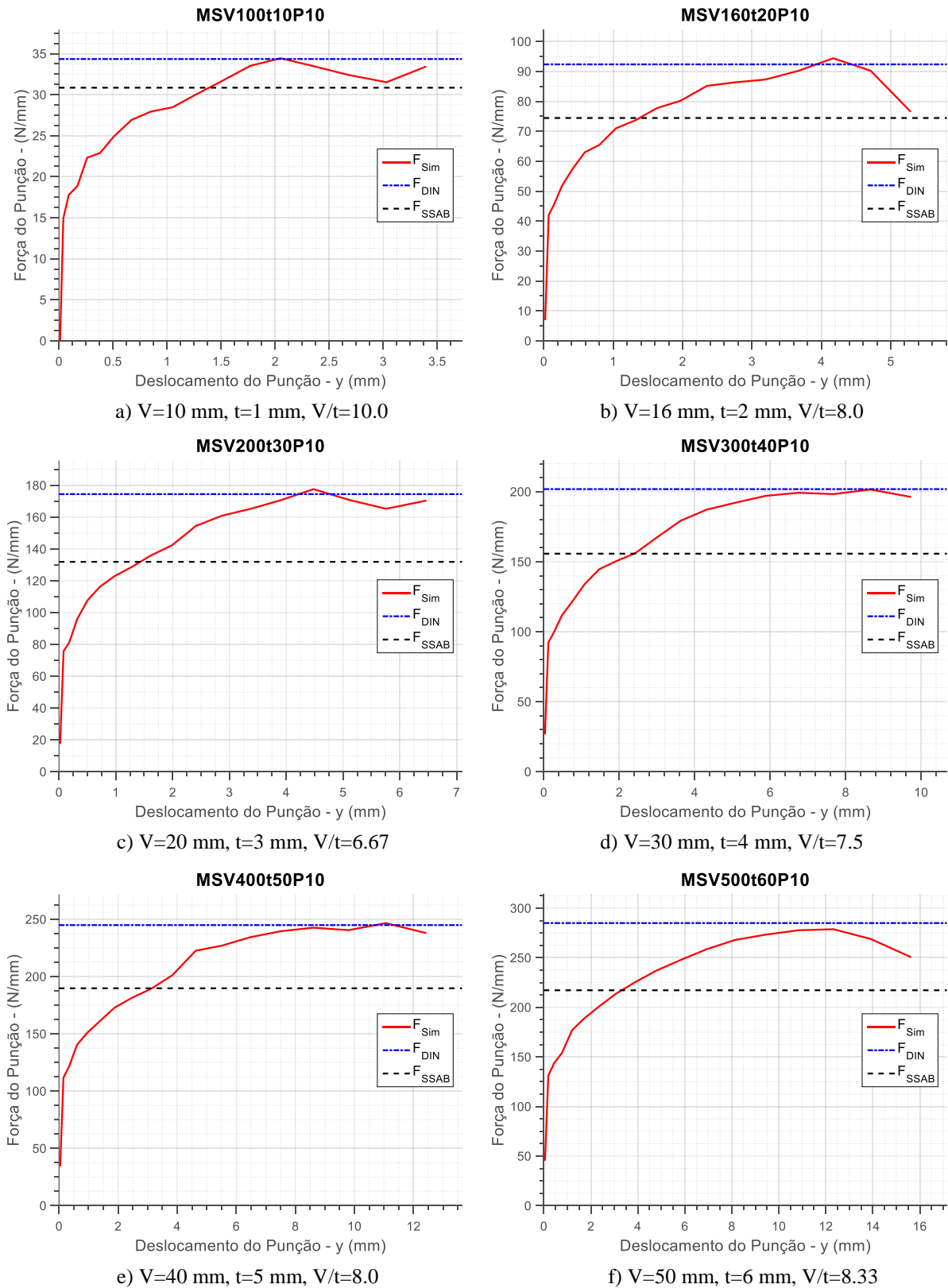


Figura 5.8 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V e t variáveis, para o aço MS.

A análise dos resultados segundo a linha horizontal permite concluir que quanto menor a relação V/t , maior é o valor da força de punção, verificando-se a passagem desde uma zona caracterizada pela flexão (Zona A) até uma zona que se caracteriza pelo esmagamento da chapa, isto é, ocorre deformação localizada, zona C.

Relativamente aos resultados obtidos segundo a diagonal do diagrama V/t , verificam-se valores de força crescentes para os casos analisados. Contudo, para as várias espessuras analisadas, os valores são inferiores relativamente aos primeiros. Em suma, constata-se que quanto maior o valor da espessura da chapa metálica, maior será a força do punção necessária, já que essa força aumenta com t^2 .

Adicionalmente, conclui-se que para os resultados para os dois tipos de evolução analisados a expressão proposta pela DIN 6935 é a que mais se aproxima dos resultados numéricos em termos de força máxima do punção.

Por outro lado, os valores de força calculados a partir da expressão SSAB são muito díspares em comparação aos valores obtidos por simulação numérica. Em todos os casos estudados, os valores calculados a partir desta expressão são inferiores aos restantes.

5.4.2 Análise para o aço RP300

Nesta secção será analisado o aço RP300. A Figura 5.9 demonstra a comparação da força calculada usando a norma DIN 6935, a da SSAB e a resultante da simulação numérica.

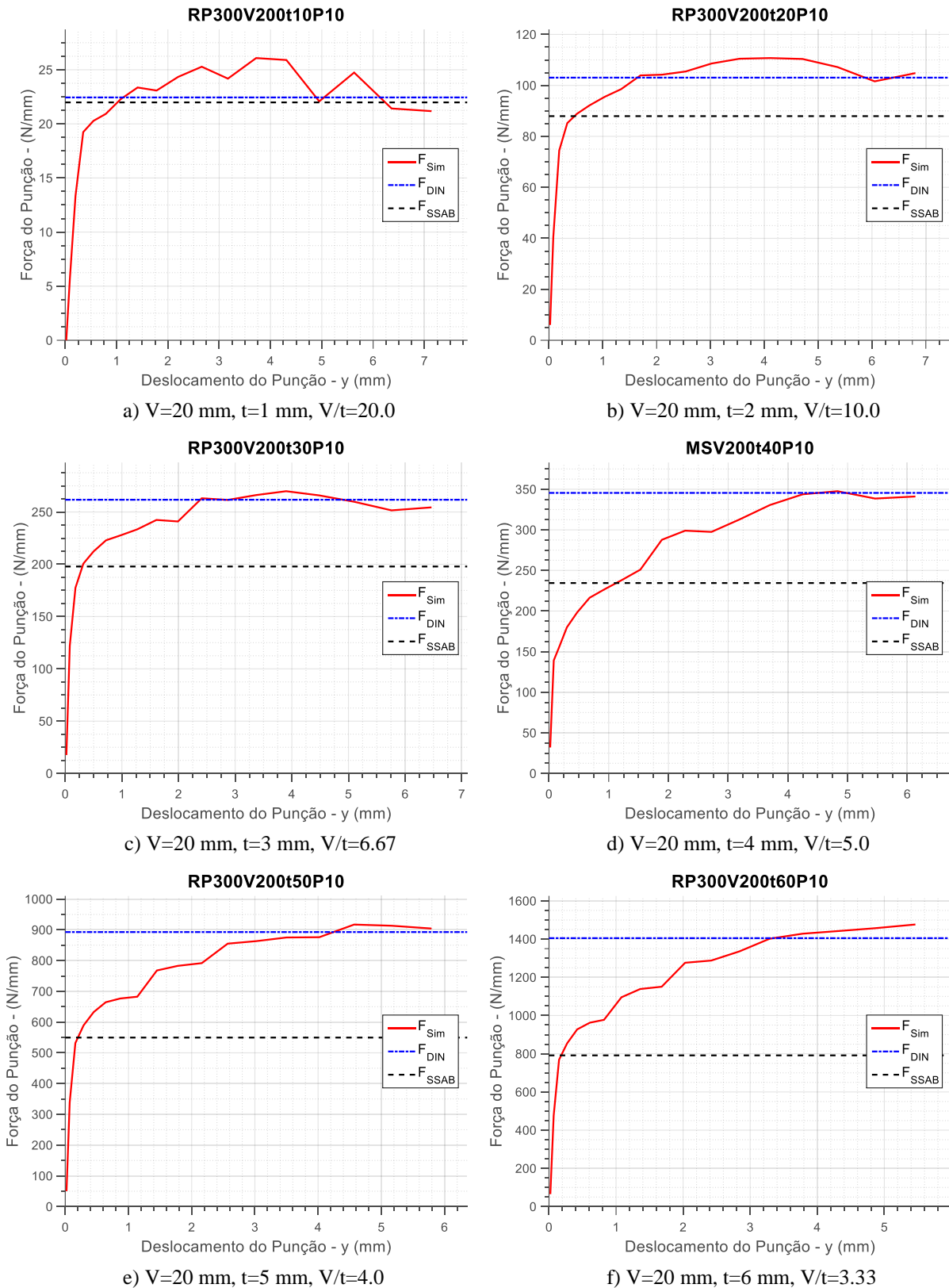


Figura 5.9 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um $V=20$ mm e espessuras variáveis, para o aço RP300.

Fazendo a mesma análise segundo uma linha diagonal de pontos obtêm-se os seguintes resultados, Figura 5.10.

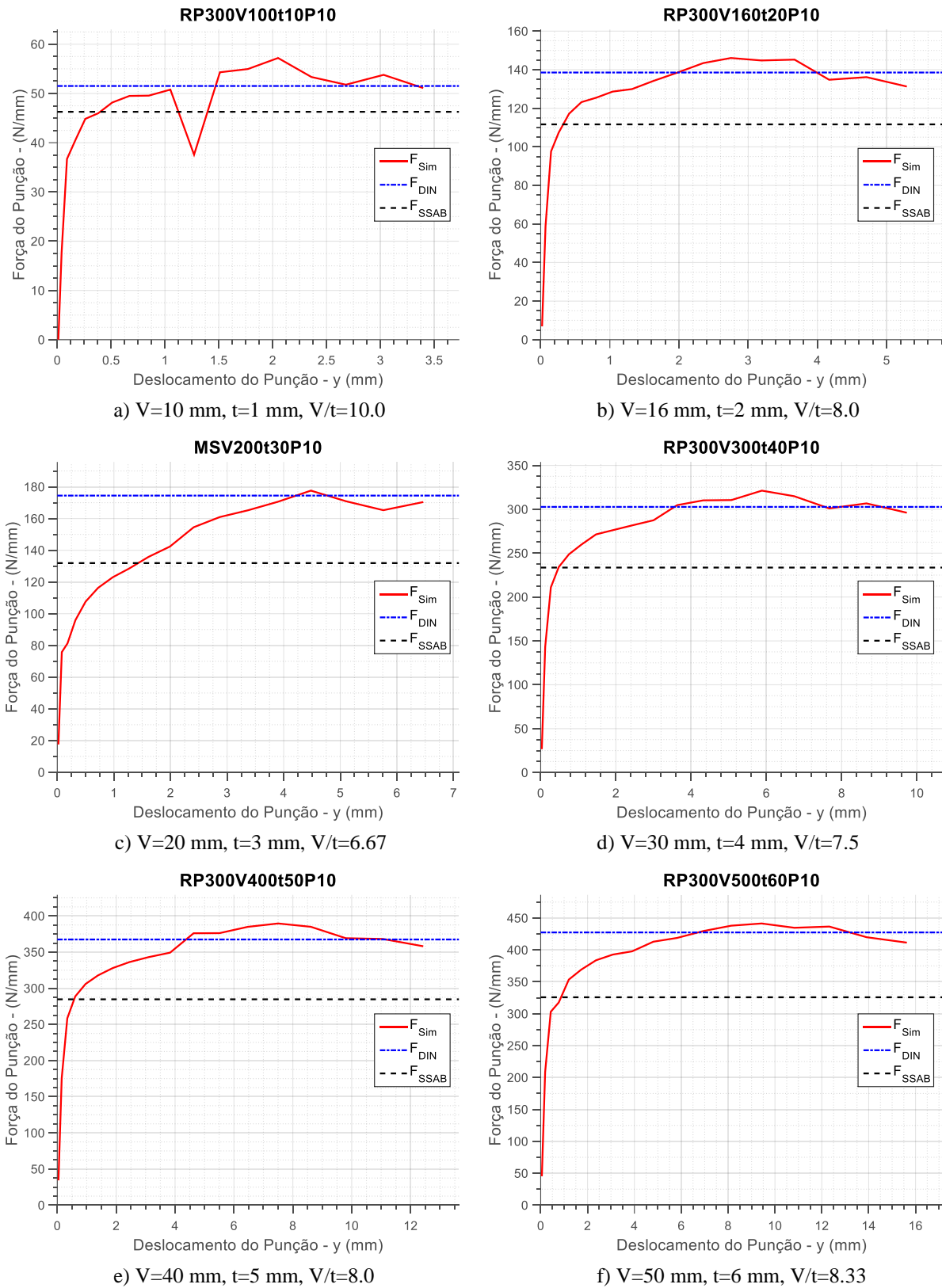


Figura 5.10 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V e t variáveis, para o aço RP300.

Novamente, verificam-se forças crescentes com o aumento da espessura da chapa, como observado na Figura 5.9 e Figura 5.10. A análise dos resultados evidencia que para relações V/t elevadas, correspondentes à zona A, reconhece-se o fenómeno de flexão, com valores de força reduzidos. Por outro lado, o aumento da espessura leva a um aumento da força do punção, passando pela zona B, ideal para o processo, até à zona C onde ocorre esmagamento da chapa metálica.

Comparativamente ao aço MS constata-se um aumento do valor da força do punção para os casos estudados. Isto deve-se ao facto da força ser dependente das características do material, nomeadamente, o grau de encruamento do mesmo.

Tal como se verificou anteriormente, os resultados para os dois tipos de evolução analisados são descritos com melhor aproximação, comparativamente aos resultados numéricos, pela expressão proposta pela DIN 6935. A expressão dada pela SSAB continua a apresentar valores bastante diferentes dos restantes.

5.4.3 Análise para o aço DP590

Nesta secção será analisado o aço DP590. Na Figura 5.11 observa-se a comparação da força calculada usando a norma DIN 6935, a da SSAB e a resultante da simulação numérica.

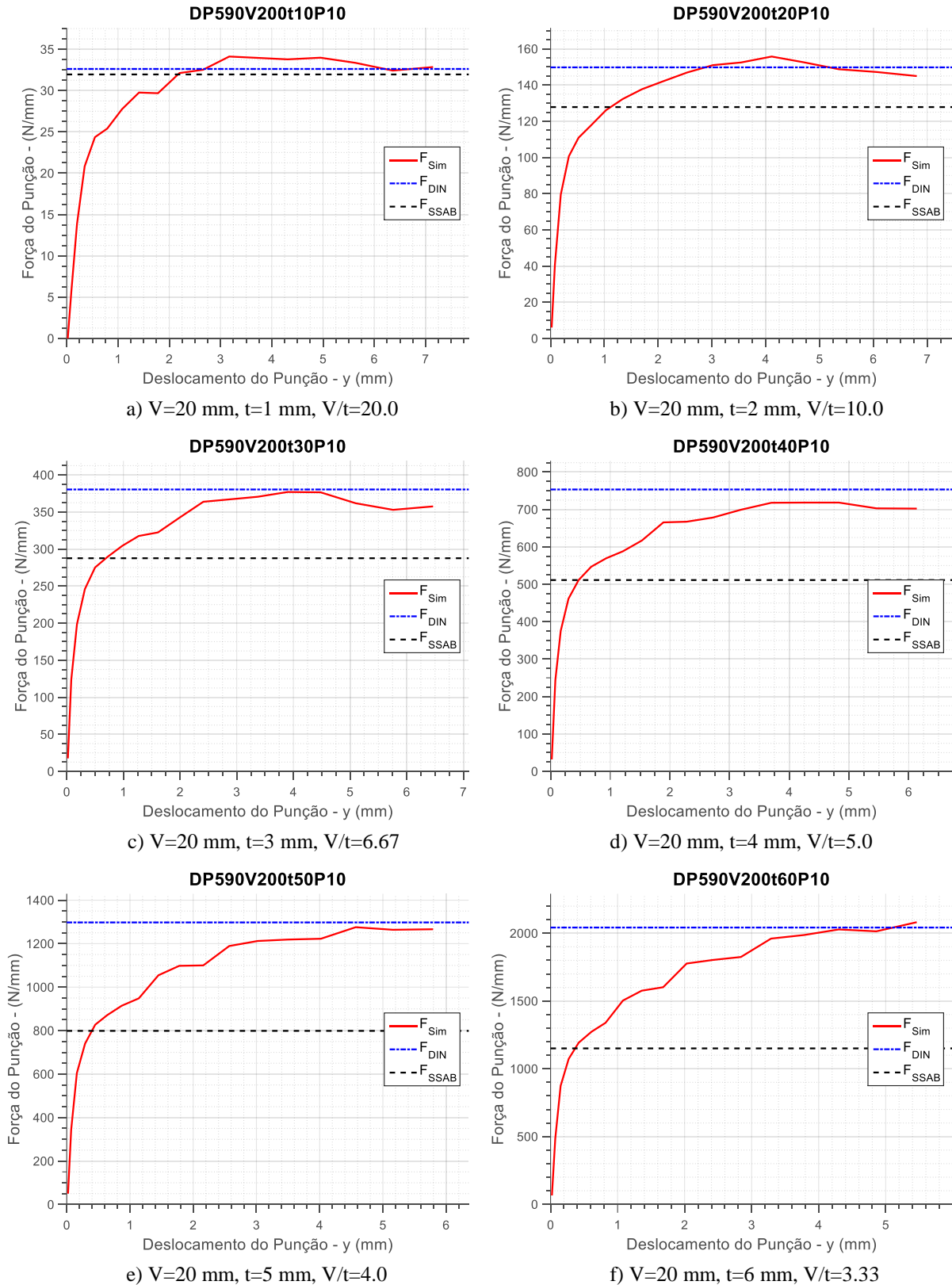


Figura 5.11 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um $V_e=20$ mm e espessuras variáveis, para o aço DP590.

Fazendo a mesma análise segundo uma linha diagonal de pontos obtêm-se os seguintes resultados, Figura 5.12.

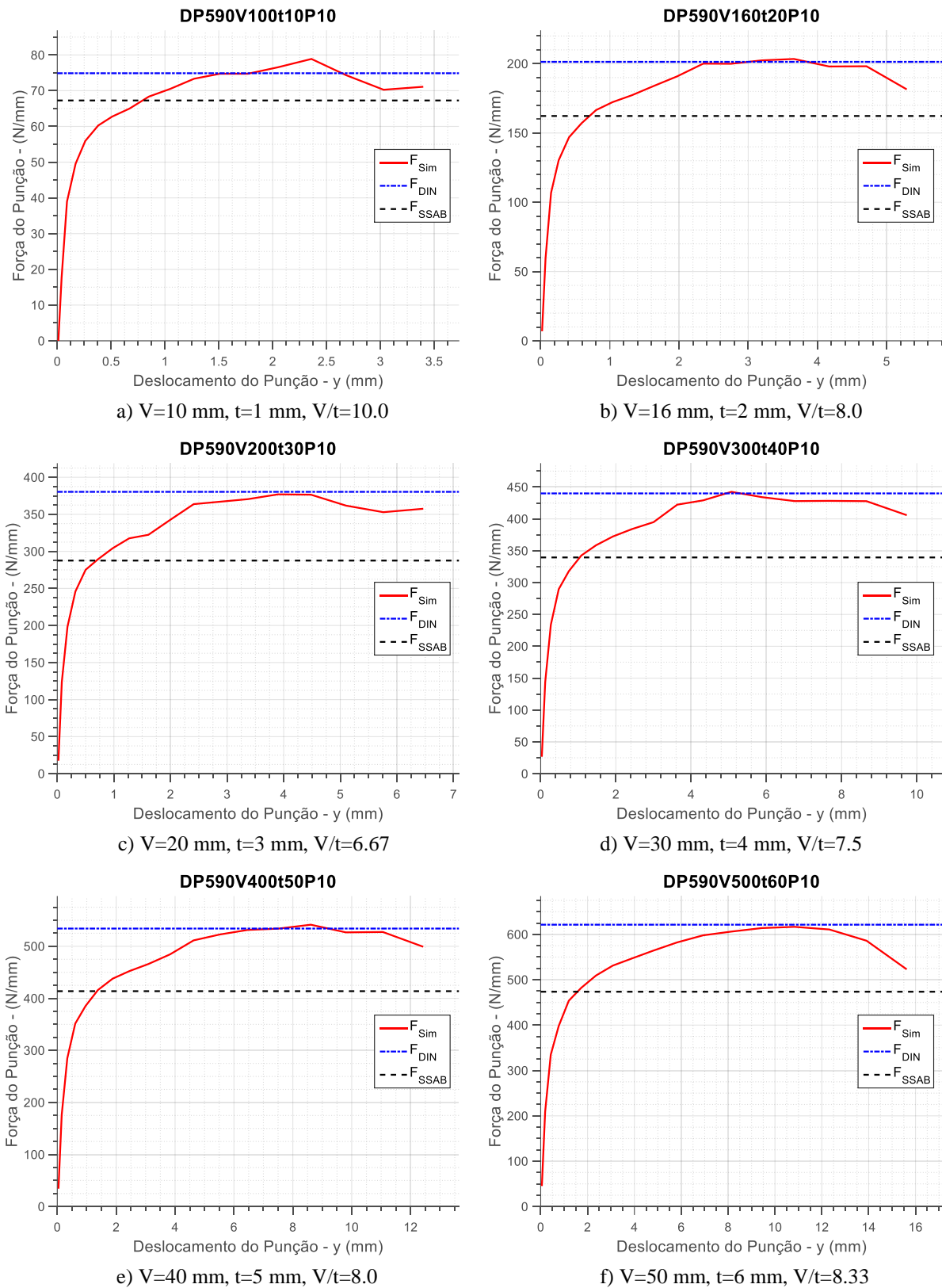


Figura 5.12 - Evolução da força obtida por simulação numérica com a calculada pelas expressões analíticas para um V e t variáveis, para o aço DP590.

O aço DP590 apresenta valores de força crescentes, tanto para abertura de matriz fixa e aumento de espessura (linha horizontal), como para V e t crescentes.

Como seria expetável, este material regista os valores mais elevados em termos de força do punção. Isto deve-se ao facto da força ser dependente do material a quinar, o que significa que quanto maior o valor das propriedades mecânicas mais difícil será a ocorrência de deformações. No fundo, trata-se da força que o punção necessitará de ultrapassar para realizar o deslocamento pretendido, de forma a superar o limite elástico e provocar uma deformação permanente na chapa. Com isto, conclui-se que quanto maior a resistência do material, maior será a força do punção.

A análise destes resultados mostra ainda que, tal como para os aços MS e RP300, a curva proposta pela DIN 6935 é a que mais se aproxima dos resultados numéricos, contrariamente à expressão proposta pela SSAB. Desta forma, conclui-se que esta deverá ser a abordagem a ter em conta no cálculo analítico da força do punção.

5.5 Pressão do punção

Nesta secção será apresentada uma breve introdução à teoria do contacto. O objetivo será analisar em maior detalhe a área de contacto entre punção e chapa metálica permitindo definir com maior exatidão o valor da pressão para a força máxima do punção.

5.5.1 Teoria do contacto

As tensões de contacto causam deformações, plásticas ou elásticas. A área de contacto altera-se de acordo com a magnitude da força aplicada. Desta forma, é de grande importância o cálculo da tensão efetiva no ponto de contacto, a chamada tensão de contacto (Timoshenko 1940).

Teoricamente a área de contacto é assumida como um ponto (duas esferas) ou uma linha (dois cilindros paralelos) o que significaria pressões infinitas. Contudo, na realidade dá-se a formação de uma pequena área de contacto devido à deformação elástica ocorrida, limitando o valor das tensões ocorridas.

O modelo proposto por Hertz assenta nas seguintes suposições:

- Os materiais em contacto são homogéneos e a tensão de cedência não é ultrapassada;
- A tensão de contacto é provocada por uma força aplicada numa direção normal ao plano de contacto;
- A área de contacto é muito pequena em comparação com as dimensões dos sólidos em contacto;
- Os sólidos em contacto encontram-se em repouso e equilíbrio;
- O atrito entre as superfícies é negligível.

Na literatura que aborda a teoria do contacto são apresentados diversos exemplos que resumem, em geral, os tipos de contacto mais comuns. Entre os vários casos abordados, destacam-se (Figura 5.13):

- Contacto entre duas esferas;
- Contacto entre uma esfera e uma superfície plana;
- Contacto entre uma esfera e uma superfície côncava;
- Contacto entre dois cilindros paralelos;
- Contacto entre dois cilindros perpendiculares.

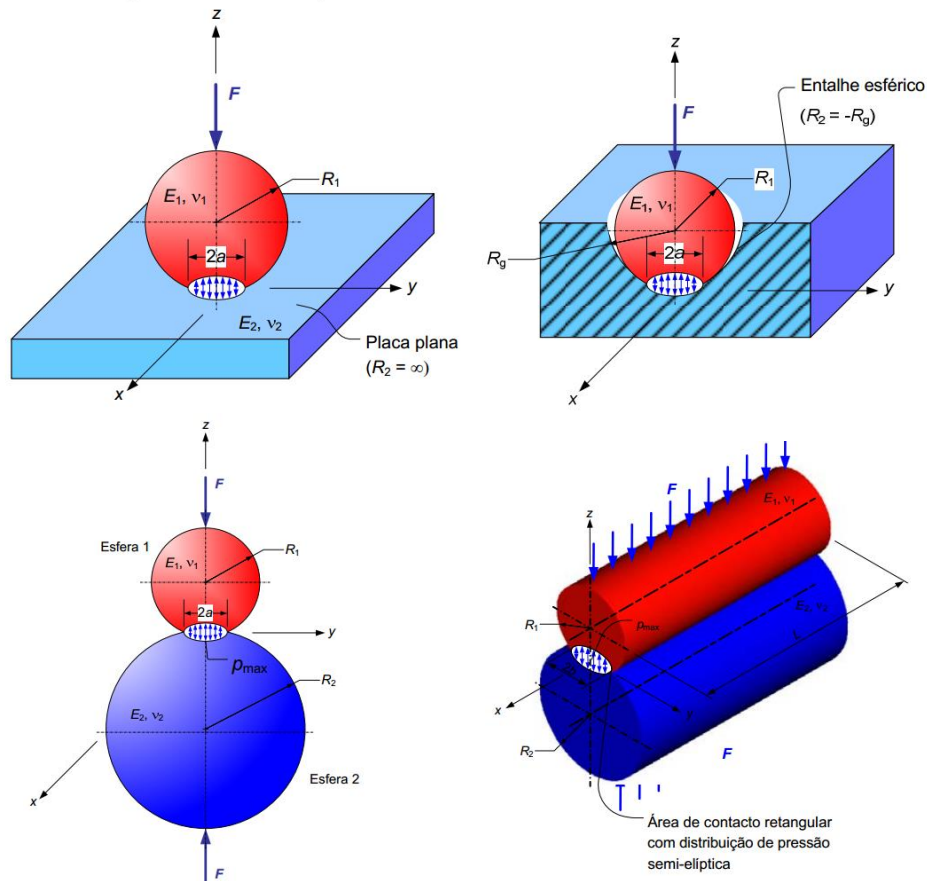


Figura 5.13 Pressão de contacto para diferentes superfícies (Adaptado de Precision Machine Design 2006).

Em estudos anteriores, o cálculo da pressão foi realizado assumindo uma área de contacto entre punção e chapa simplificada, para um ângulo de 90° , permitindo obter os valores de pressão ocorridas, Figura 5.14.

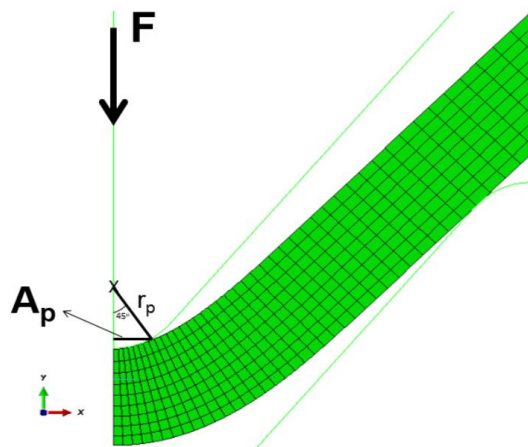


Figura 5.14 - Área de contacto simplificada entre punção e chapa (Miranda 2014).

$$A_p = r_p \cdot \sin(45^\circ) \quad (5.4)$$

Contudo esta simplificação é bastante grosseira, levando à obtenção de níveis de pressão bastante diferentes dos valores efetivos.

Posto isto, será apresentada uma abordagem que assenta na teoria do contacto de Hertz, propondo-se uma expressão para o cálculo da pressão de contacto entre punção e chapa.

5.5.2 Correção da área de contacto entre punção e chapa metálica

Fazendo uma analogia entre o processo de quinagem e os casos apresentados em cima, aquele que melhor traduz o contacto entre punção e chapa metálica é o contacto entre um cilindro e uma superfície côncava (Figura 5.15).

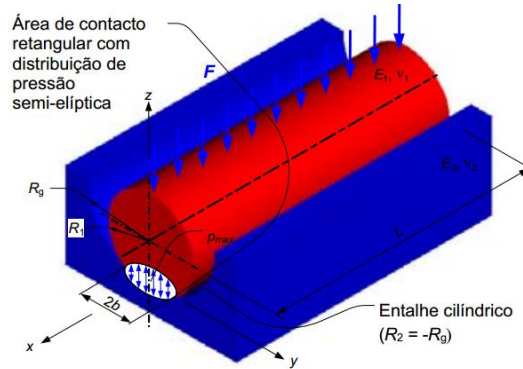


Figura 5.15 - Contacto existente entre uma superfície cilíndrica e um entalhe côncavo (Adaptado de Precision Machine Design 2006).

Como se observa, este caso é facilmente adaptado à situação verificada no processo em estudo, Figura 5.16.

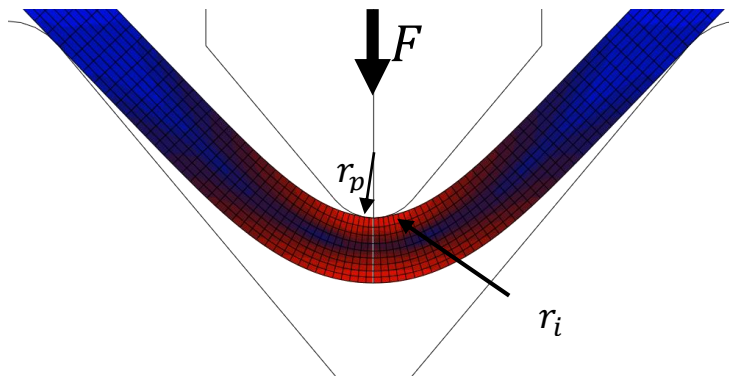


Figura 5.16 - Área de contacto entre punção e chapa metálica.

Desta forma a área de contacto por unidade de comprimento, entre punção e chapa metálica, pode ser expressa por:

$$A_p = \sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot r_{cc} \cdot \left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \right)}{\pi}} \quad (5.5)$$

em que r_{cc} representa o raio de curvatura combinado das duas superfícies em contacto e é dado por:

$$\frac{1}{r_{cc}} = \frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_i} \quad (5.6)$$

Definida a área, a pressão é expressa a partir da Equação 5.7:

$$P_p = \frac{F}{A_p} \quad (5.7)$$

resultando em:

$$P_p = \frac{F}{\sqrt{\frac{4 \cdot F \cdot r_{cc} \cdot \left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}\right)}{\pi}}} \quad (5.8)$$

Apresentadas estas expressões, sugere-se que em trabalhos futuros o conceito de pressão seja estudado com maior rigor, partindo dos conceitos apresentados anteriormente. Concluindo, a partir da abordagem proposta espera-se obter uma aproximação mais realista em termos de valor de pressão do punção.

5.6 Determinação analítica do deslocamento do punção

Neste capítulo estuda-se a evolução do raio natural de quingem. Em seguida, três equações analíticas são utilizadas para representar a evolução do deslocamento do punção com o ângulo de quingem e posteriormente comparadas com os resultados obtidos por simulação numérica para diferentes casos de quingem e diferentes materiais. Finalmente, será estudada a validade das expressões analíticas na análise de ligas de alumínio.

5.6.1 Evolução do raio natural de quingem

Como visto no Capítulo 2, as abordagens analíticas para previsão do deslocamento do punção utilizam um raio natural de valor constante. Na equação proposta por JBP o raio natural de quingem assume um valor de $V_{corr}/6.4$.

Em estudos anteriores verificou-se que essa simplificação apenas se adequa para ângulos de quingem em torno de 90°. Para além disso, essa aproximação não produzia os mesmos resultados quando diferentes parâmetros eram utilizados. Na Figura 5.17 observa-se que para diferentes situações de quingem o raio natural utilizado ($V_{corr}/6.4$) produz diferentes resultados em termos de deslocamento, comprovando que este depende dos parâmetros de quingem.

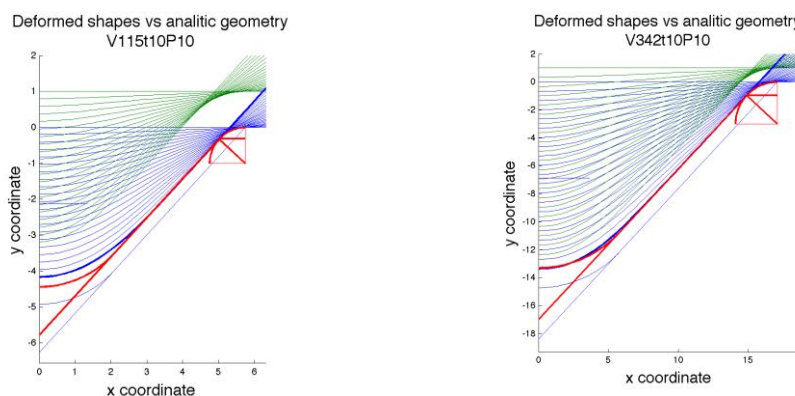


Figura 5.17 - Deformada nas superfícies superior (verde) e inferior (azul) da geometria simulada relativamente à geometria analítica (vermelho).

Nesta perspectiva é importante a análise da evolução do raio natural de quinagem. Como se pode observar na Figura 5.18, o valor desta variável evolui de forma exponencial de acordo com o ângulo de quinagem. Esta figura contém a evolução do raio natural obtido por simulação numérica em três zonas da chapa metálica, interior, exterior e linha média.

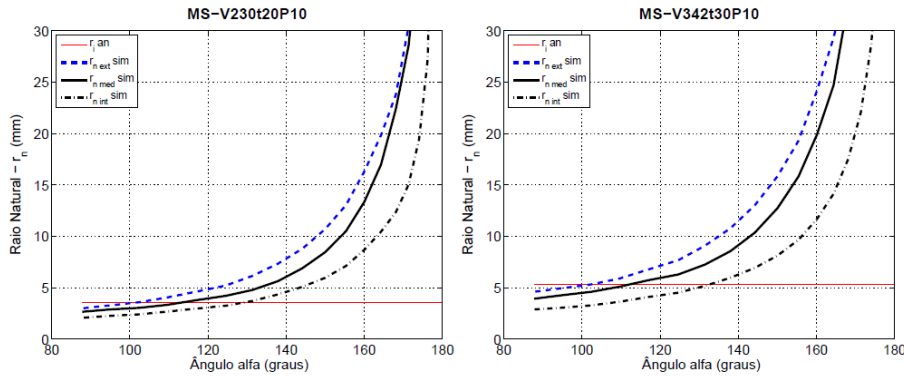


Figura 5.18 - Evolução do raio natural para diferentes ângulos de quinagem (Miranda 2014).

Desta forma, o comportamento do raio natural de quinagem apresenta um padrão particular. Na Figura 5.19 observa-se que o centro da circunferência do raio natural não se mantém no eixo das ordenadas, dificultando a previsão da evolução deste parâmetro.

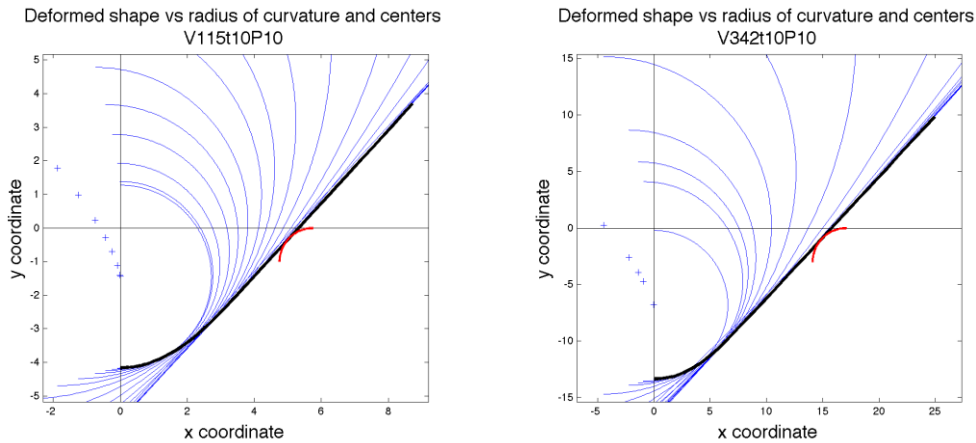


Figura 5.19 - Evolução do raio de curvatura para diferentes deslocamentos do punção.

Esta análise permitiu definir um novo raio natural analítico que tem em consideração as propriedades mecânicas do material utilizado, assim como a evolução do ângulo de quinagem. Este parâmetro é definido em seguida:

$$r_{ac} = \frac{V}{k_V} + k\alpha \quad (5.8)$$

Em que V/k_V e corresponde à correção do raio natural para um ângulo de quinagem de 90° , dependendo da relação R_m/R_e do material e $k\alpha$ permite o ajustamento para toda a gama de ângulos de quinagem (Miranda 2014, Pacheco 2011). Desta forma a expressão corrigida é a seguinte:

$$y = \frac{V_{corr}}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - (r_{ac} + t + r_m) \frac{\left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (5.9)$$

Desta forma serão analisadas as curvas de deslocamento do punção, utilizando a correção proposta, o raio de cálculo analítico, sendo esta designada por y_{JPext} , comparando com a curva obtida por simulação numérica e com a equação yJPB com raio natural de valor $V_{corr}/6.4$.

A partir do diagrama Vt (Figura 5.20), mencionado anteriormente, vão ser alvo de análise duas direções, horizontal e diagonal. Os pontos em análise são apresentados na

Tabela 5.2.

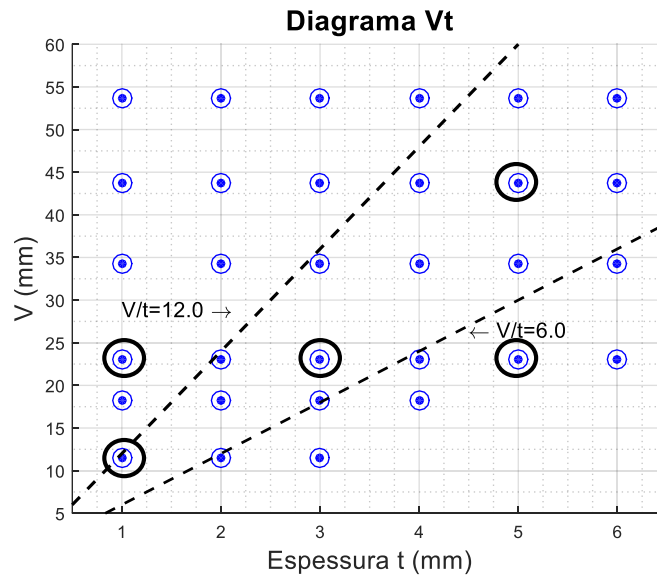


Figura 5.20 - Pontos de quingem em análise.

Tabela 5.2 - Pontos de quingem em análise.

Horizontal	Diagonal
V200t10P10	V100t10P10
V200t30P10	V200t30P10
V200t50P10	V400t50P10

5.6.2 Análise das equações yJBP e yJBPExt

Na Figura 5.21 e Figura 5.22 ilustram-se os resultados da comparação da evolução do deslocamento do punção com o ângulo de quinagem para o aço MS.

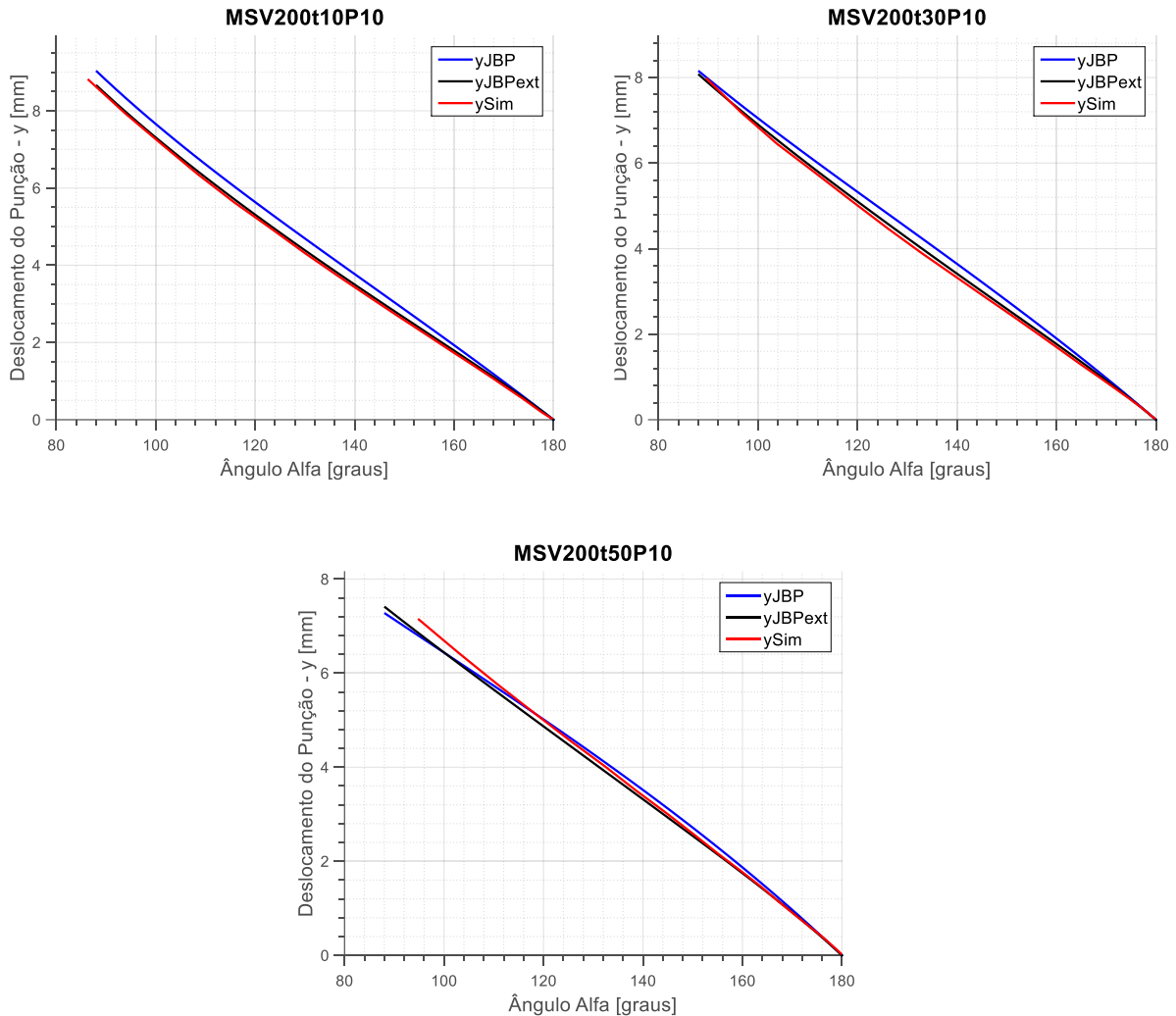


Figura 5.21 – Comparação das equações yJBP e yJBPExt, para V constante e espessuras variáveis, para o aço MS.

Observando a Figura 5.21, é visível que a equação JBPext é a que melhor se aproxima do comportamento descrito pela curva de simulação para o aço em análise. Contudo para pontos onde ocorre esmagamento, V200t50P10, conclui-se que a correção proposta não apresenta o rigor verificado para os restantes pontos.

Apresenta-se, na Figura 5.22, uma análise para espessuras e aberturas de matriz variáveis.

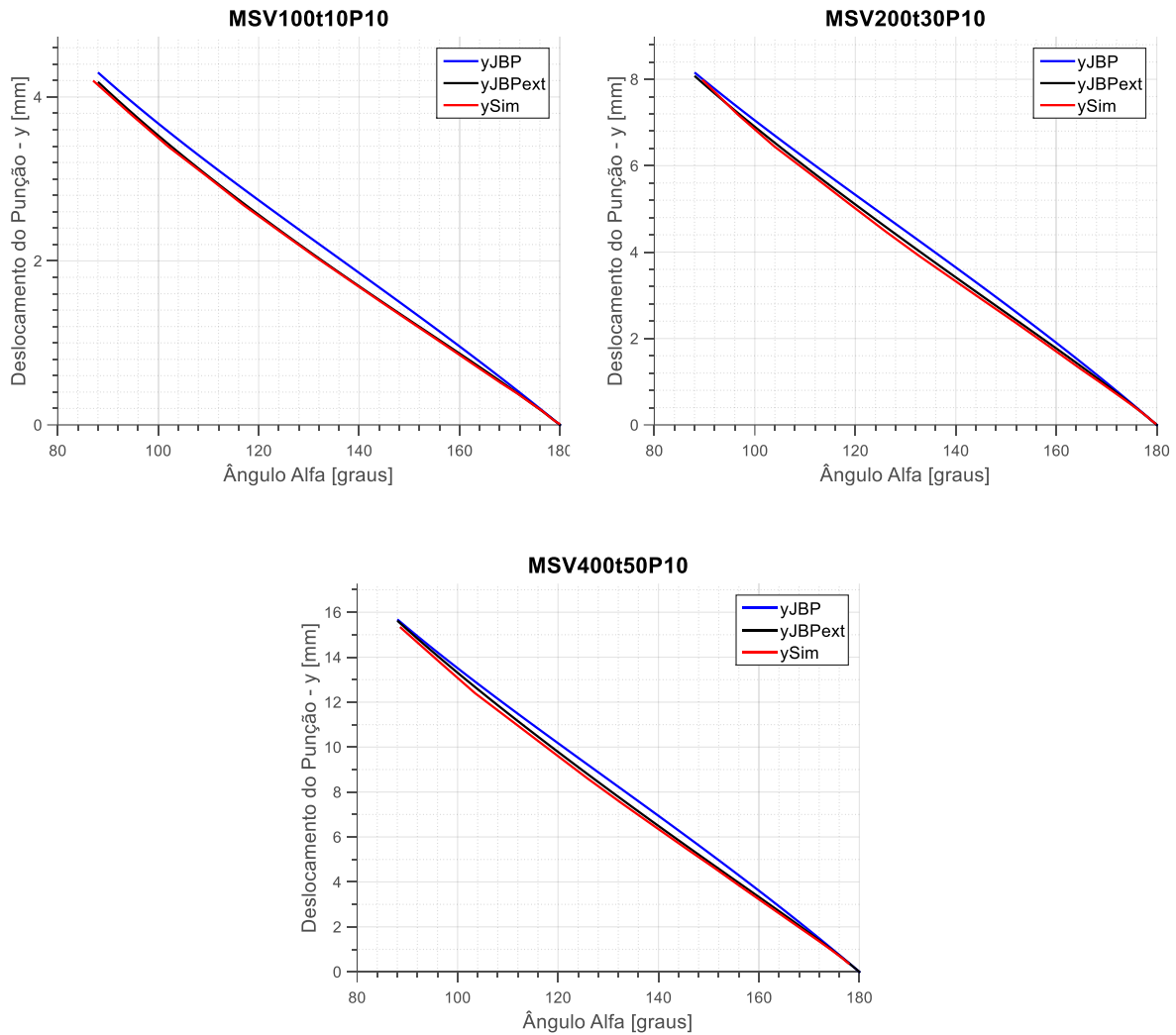


Figura 5.22 - Comparação das equações yJBP e yJBPExt, para o aço MS.

Tal como observado anteriormente, a curva que melhor se aproxima é a JBPExt.

Analisando estes resultados, conclui-se que a correção proposta não apresenta resultados satisfatórios em situações de esmagamento (V200t50P10), no caso do aço MS. Contudo para situações que se encontrem na zona de flexão e na zona ótima de quinabilidade os resultados obtidos são bastante próximos da curva de simulação numérica.

Em seguida, na Figura 5.23 e Figura 5.24, será realizada a mesma análise para diferentes materiais, RP300 e DP590.

Simulação numérica do processo de quinagem

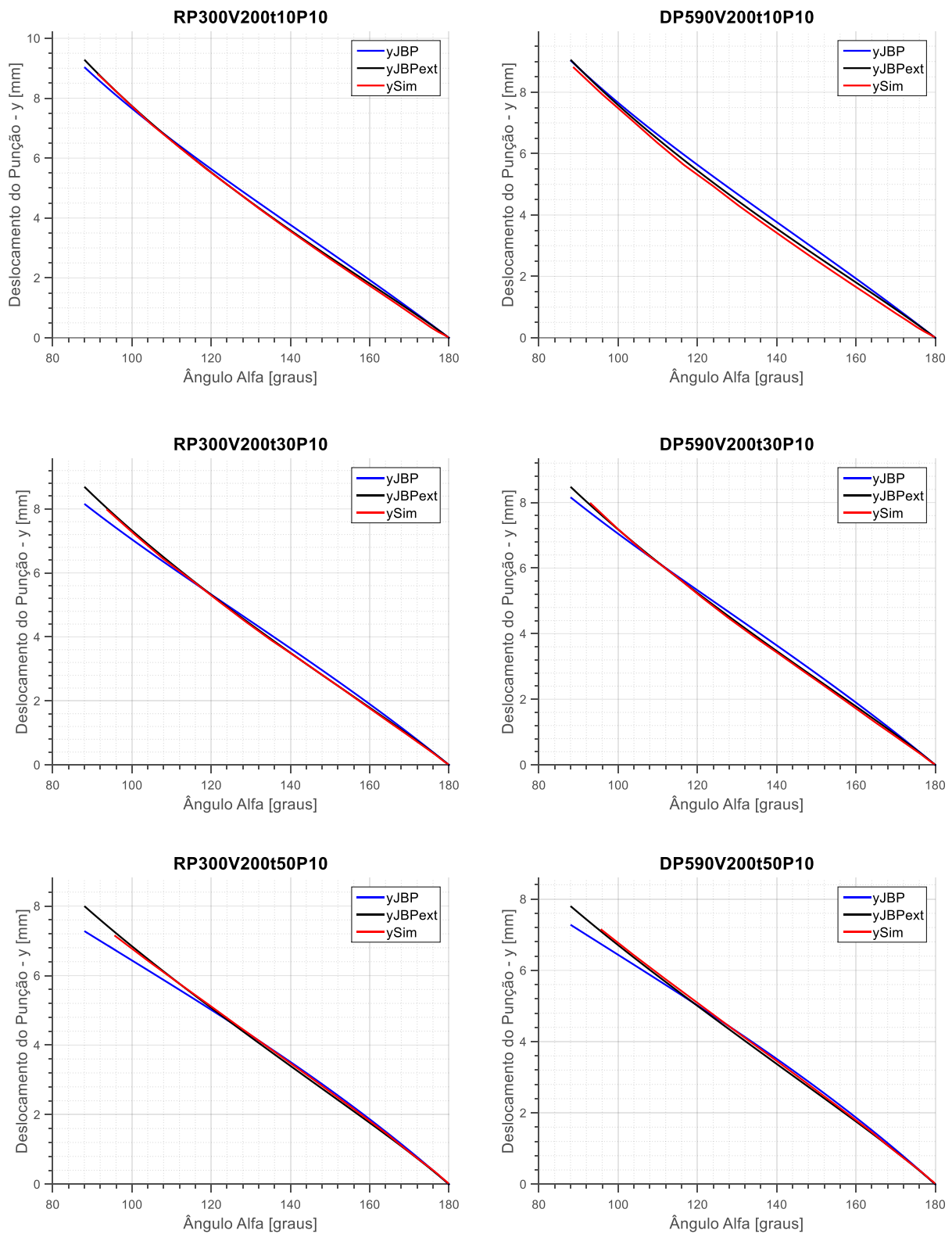


Figura 5.23 - Comparação das equações yJBP e yJBPExt, para os aços RP300 e DP590.

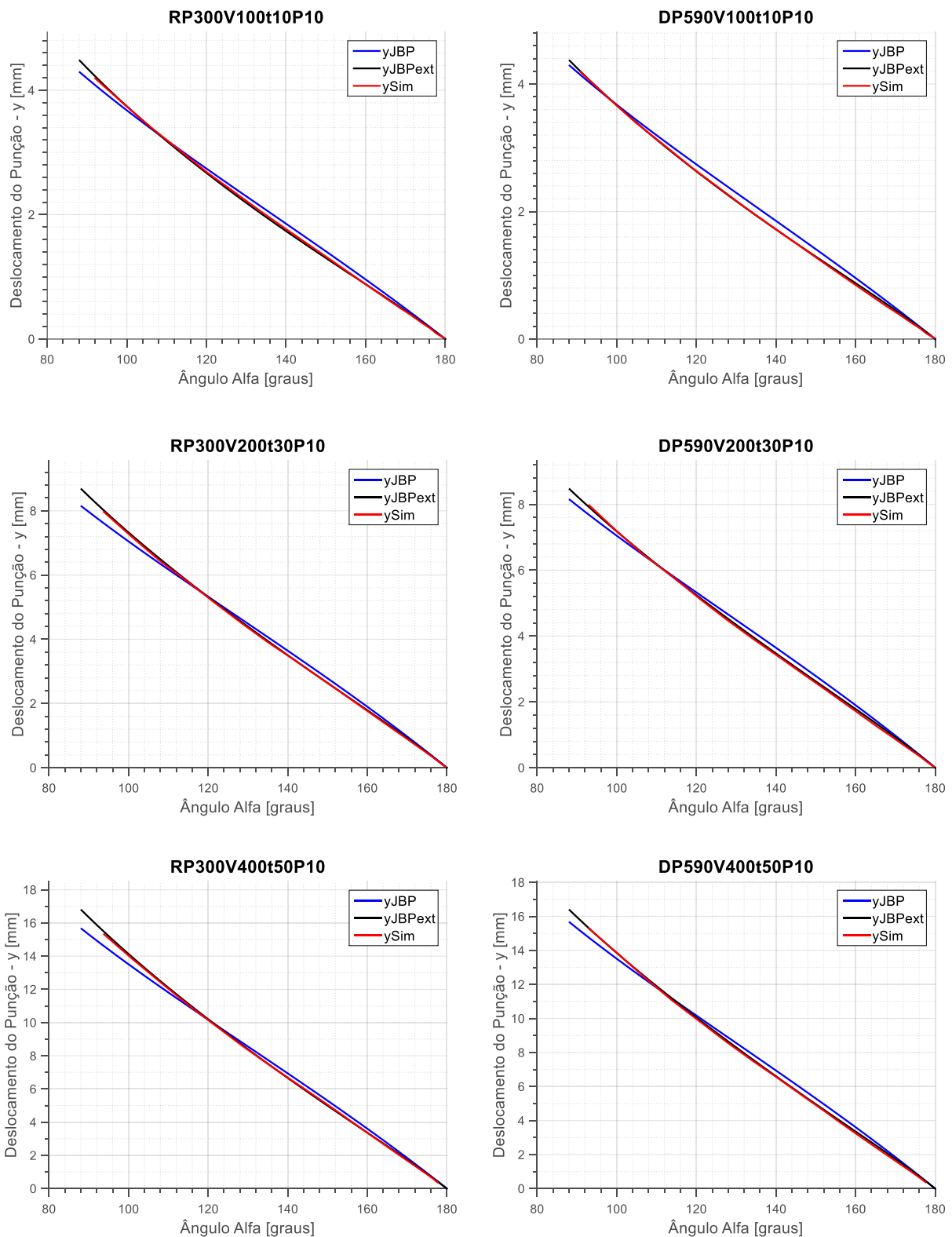


Figura 5.24 - Comparação das equações yJBP e yJBPExt, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para os aços RP300 e DP590.

Para os aços RP300 e DP590 a equação que melhor se ajusta é a JBPext. No entanto, contrariamente ao verificado no aço MS, para pontos onde ocorre esmagamento, $V/t = 4.0$, verifica-se uma correta previsão do deslocamento do punção.

Desta forma a equação que servirá para comparação com as restantes expressões analíticas será a JBPext.

5.6.3 Comparação das expressões analíticas para raio de punção 1 mm

O objectivo deste capítulo é comparar as diferentes equações e analisar qual a mais adequada para representação do deslocamento do punção.

Os pontos estudados serão os definidos na análise anterior (Tabela 5.2).

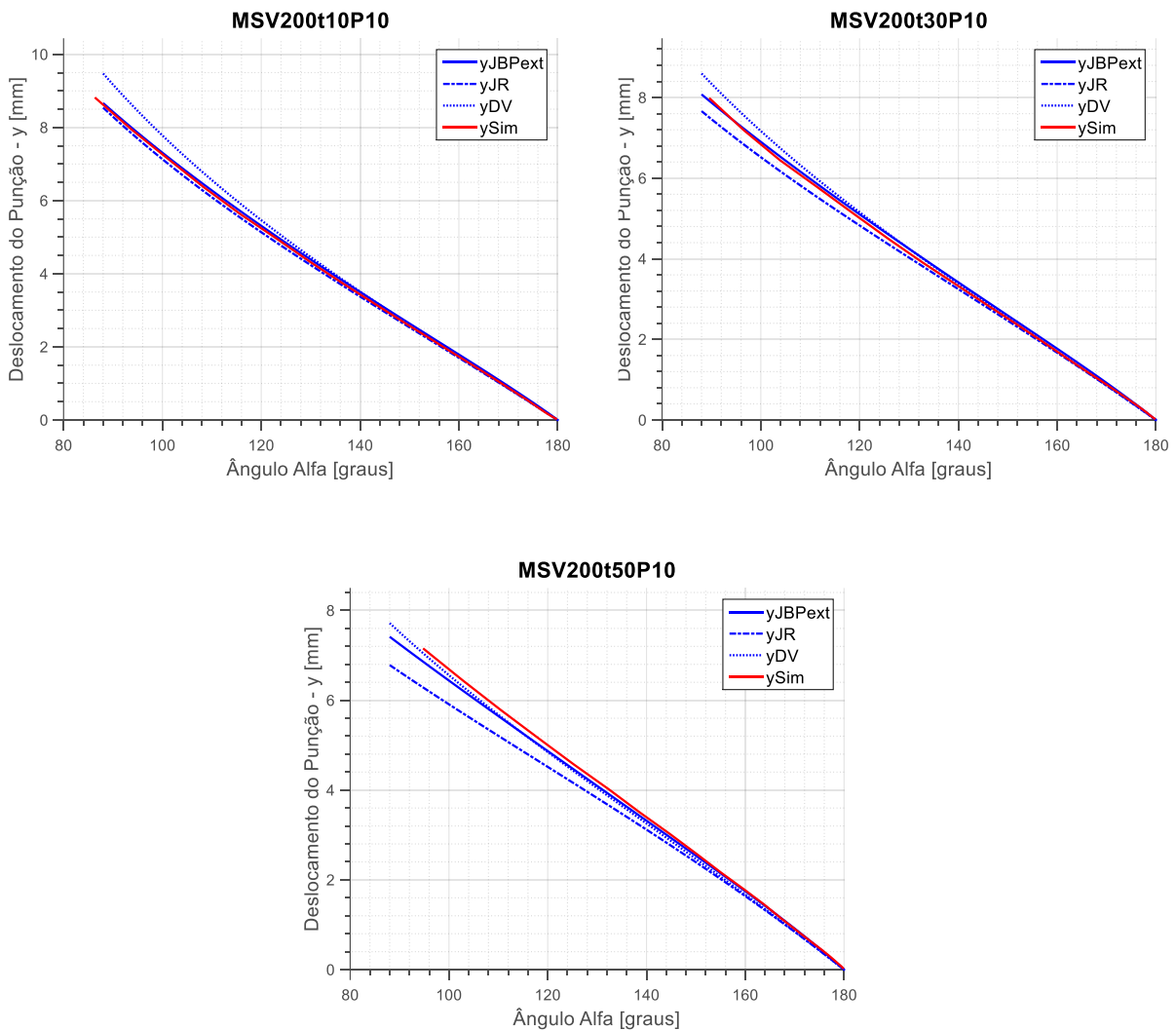


Figura 5.25 - Comparação das equações analíticas, para o aço MS.

Observado a Figura 5.25, é possível concluir que a equação JBPext é a que mais se aproxima da curva obtida por simulação numérica na previsão do deslocamento do punção para o aço em análise. Contudo, para pontos de esmagamento, nomeadamente $V/t=4.0$, a expressão proposta por De Vin (De Vin 1994), em que $r_i = r_p$, é a que apresenta os melhores resultados.

Na Figura 5.26 serão analisados os resultados para matrizes e espessuras crescentes.

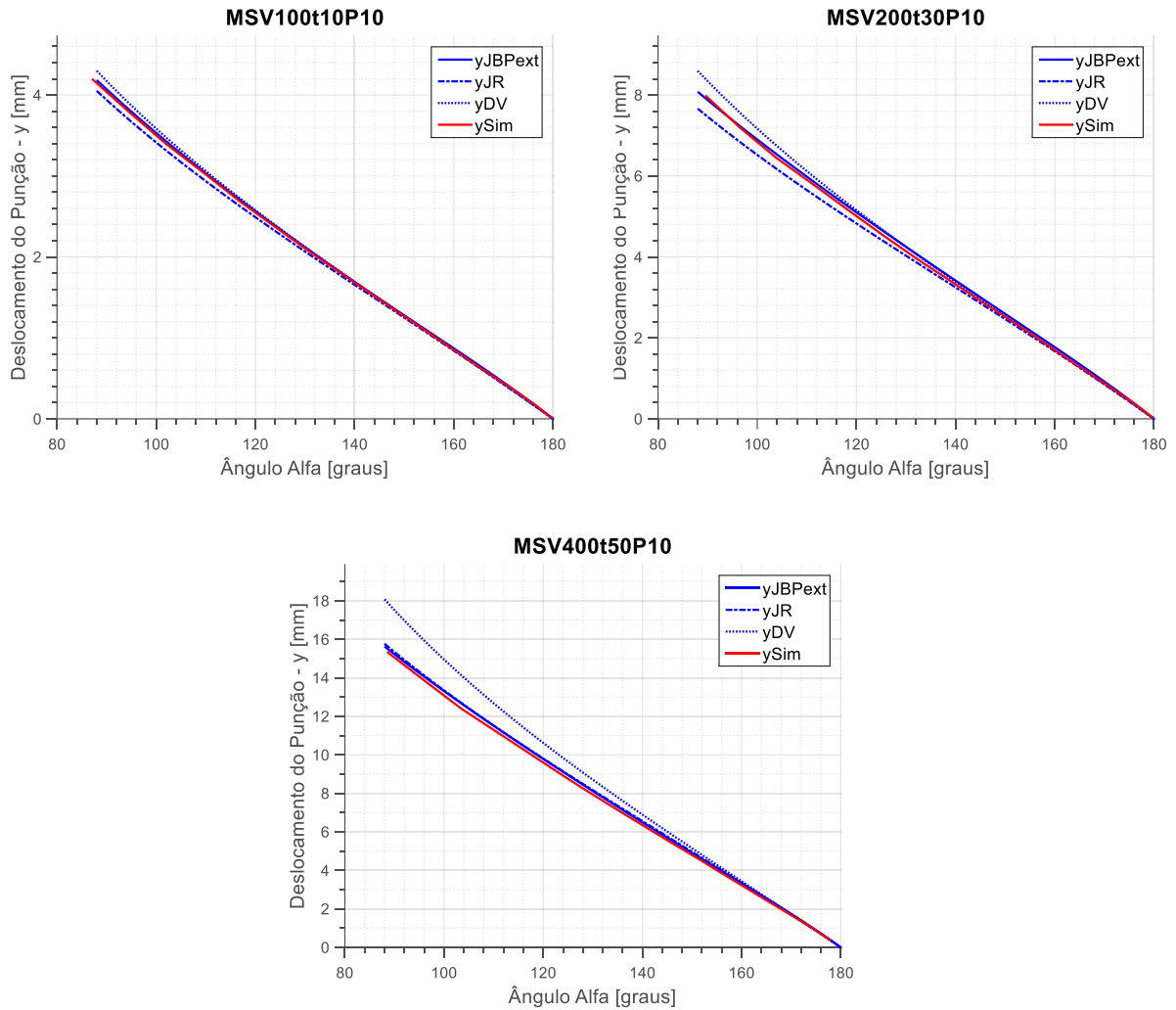


Figura 5.26 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para o aço MS.

Verifica-se que para os casos estudados a expressão que melhor traduz a evolução do deslocamento do punção é a proposta por JBPext com raio natural corrigido. Conclui-se que para casos situados na zona de flexão e na zona ótima de quinabilidade esta expressão apresenta a melhor aproximação relativamente à curva obtida por simulação numérica.

Para validar as conclusões anteriores, são efetuadas as análises para diferentes classes de materiais propostos pela DIN 6935.

Simulação numérica do processo de quinagem

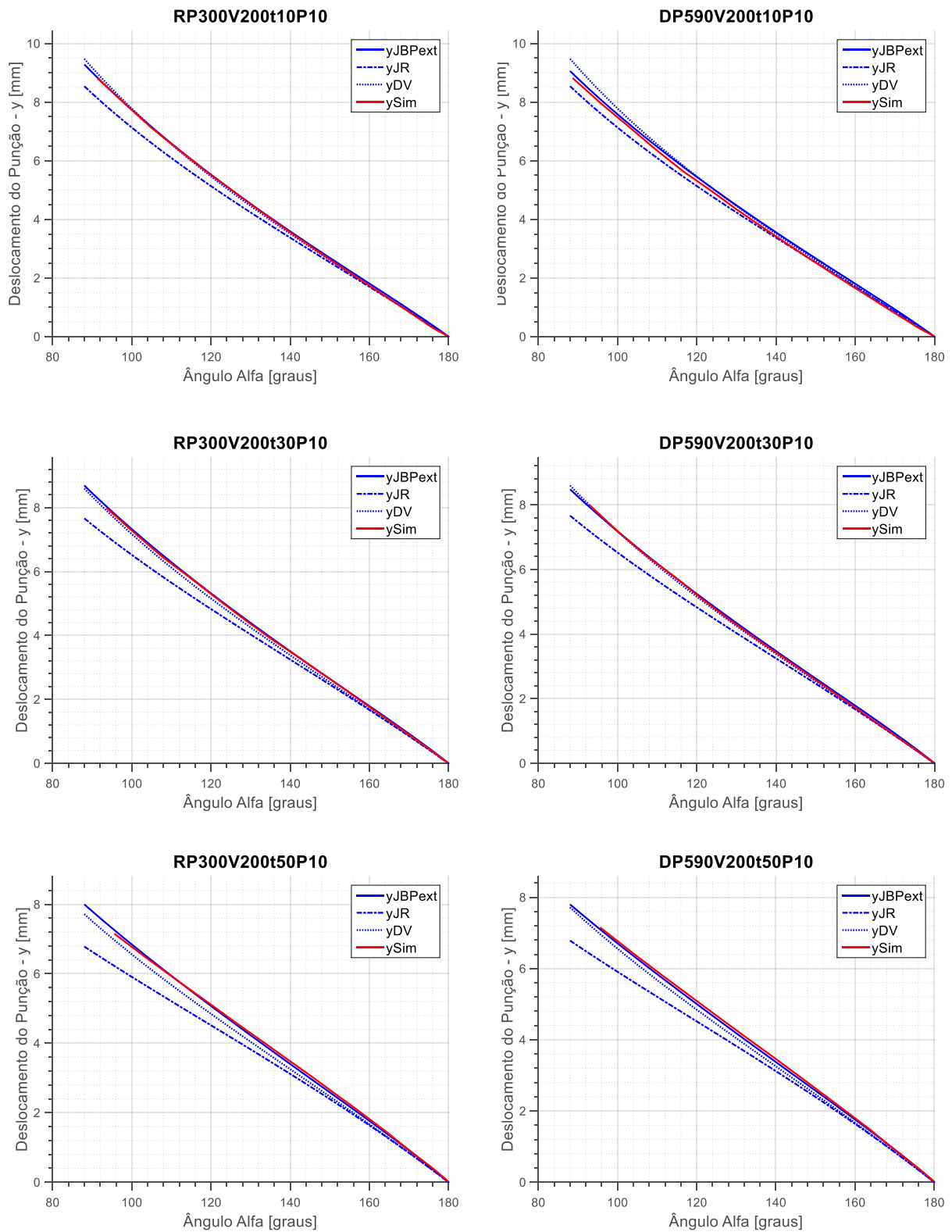


Figura 5.27 - Comparação das equações analíticas, para os aços RP300 e DP590.

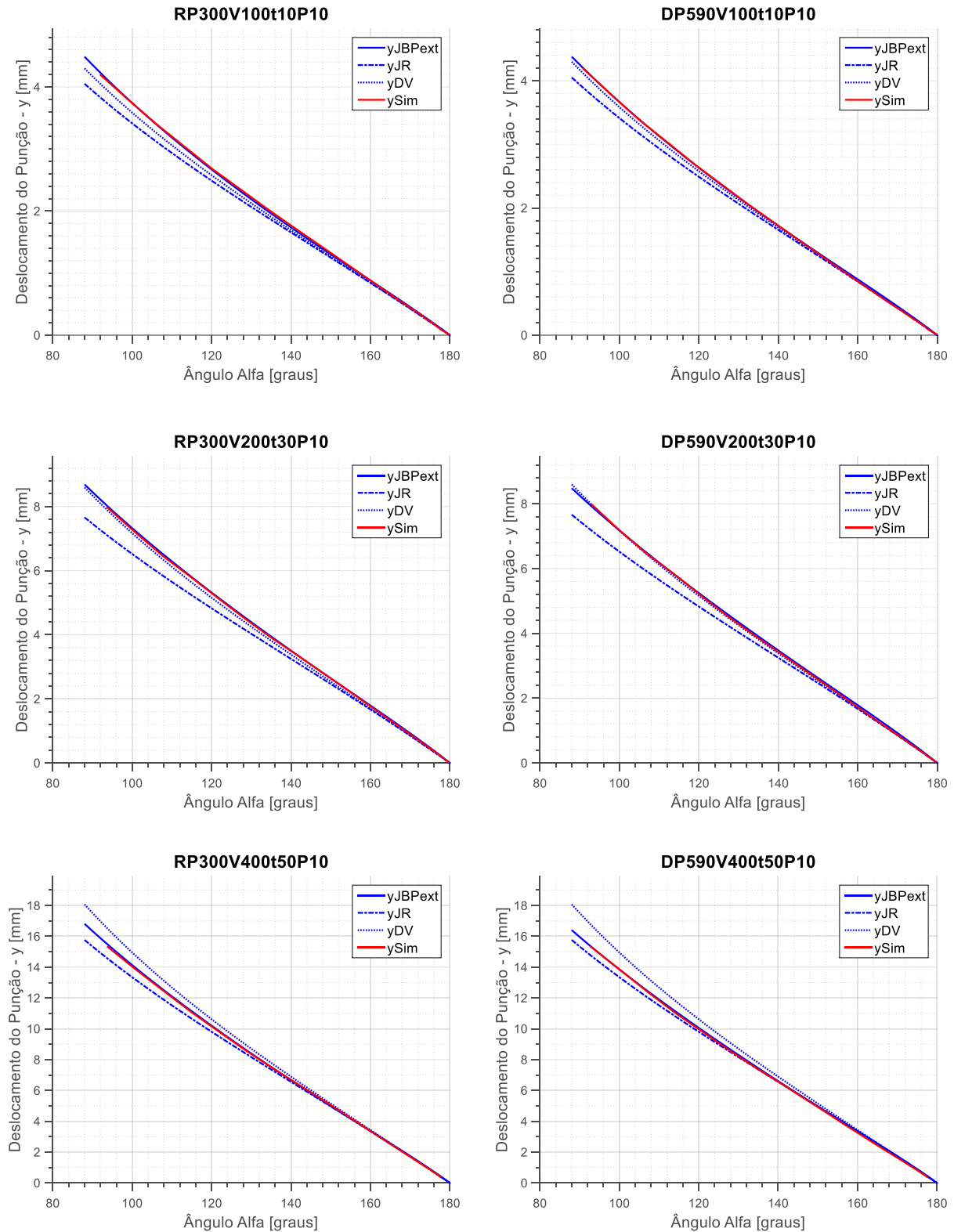


Figura 5.28 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para os aços RP300 e DP590.

Para os aços RP300 e DP590 a equação que melhor se ajusta é a proposta por JBPext com raio natural corrigido. Desta forma atinge-se o objetivo de encontrar a expressão que melhor reproduz a evolução obtida por simulação numérica para pontos de quingem válidos.

Assim sendo a equação que servirá de comparação para estudos futuros será a proposta por JBPext.

5.6.3.1 Análise para diferentes raios de punção

Procede-se agora ao estudo para diferentes raios de punção, fazendo uso de um ponto do diagrama ($V=43.7$ mm e $t=4$ mm). Os resultados desta comparação apresentam-se em seguida.

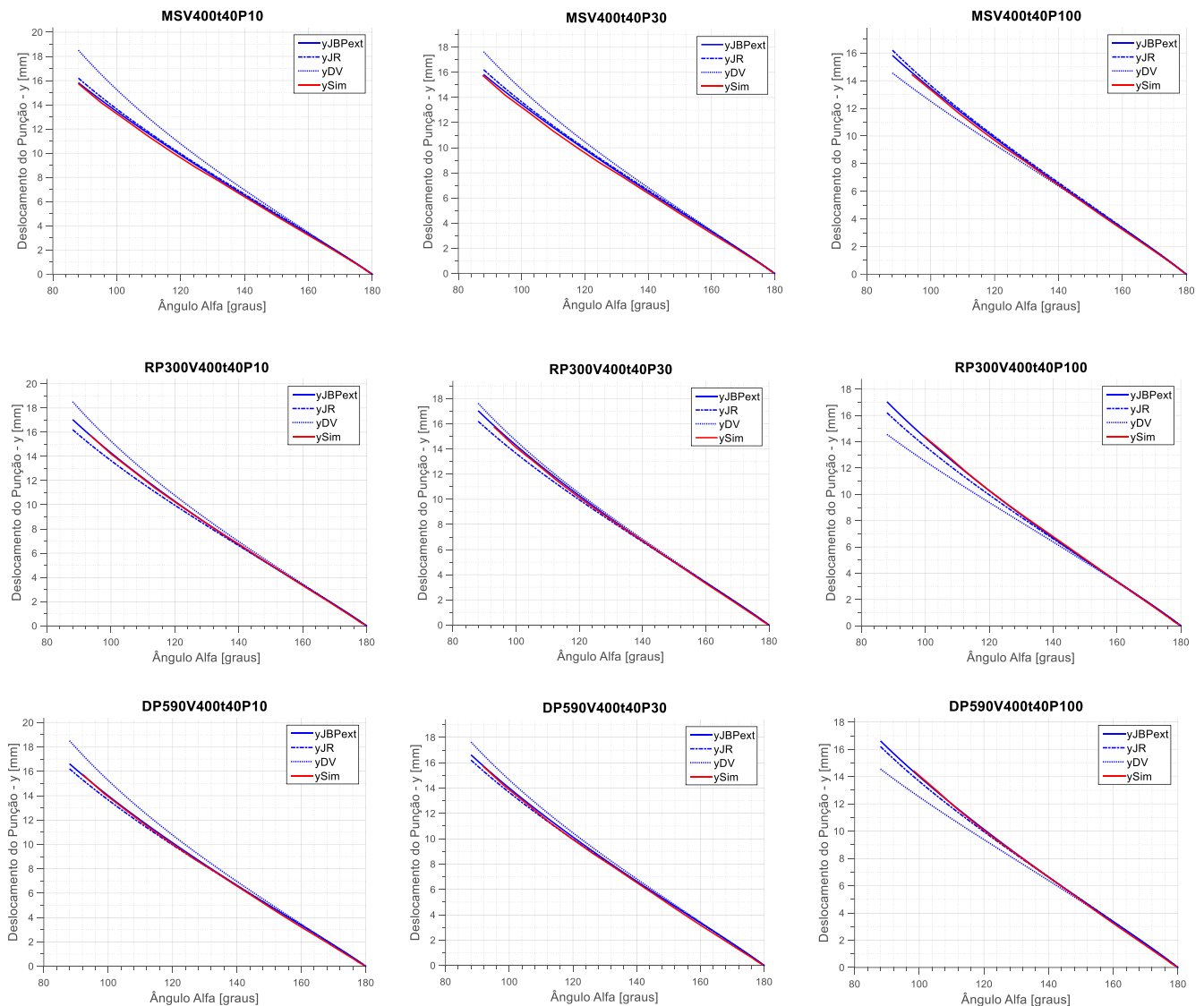


Figura 5.29 - Comparação das equações analíticas dos aços MS, RP300 e DP590 para diferentes raios de punção, com $V=40$ mm e $t=4$ mm.

Visualizando os resultados presentes na Figura 5.29, para diferentes raios do punção obtém-se a mesma conclusão de qual a curva que mais se adequa. Desta forma conclui-se que a equação JBP com raio natural corrigido é a que melhor se ajusta aos resultados numéricos.

5.6.4 Análise do deslocamento de punção para ligas de alumínio

Nos resultados observados anteriormente foram comparados diferentes materiais, contudo todos pertencem à classe dos aços. Cada vez mais se utilizam materiais alternativos nos processos de conformação plástica e a quingem não é exceção. Tendo isto em consideração foi analisada a evolução do deslocamento do punção para diferentes casos de quingem utilizando uma liga de alumínio. Na Figura 5.30 podem ser observados os resultados obtidos para os mesmos casos estudados anteriormente.

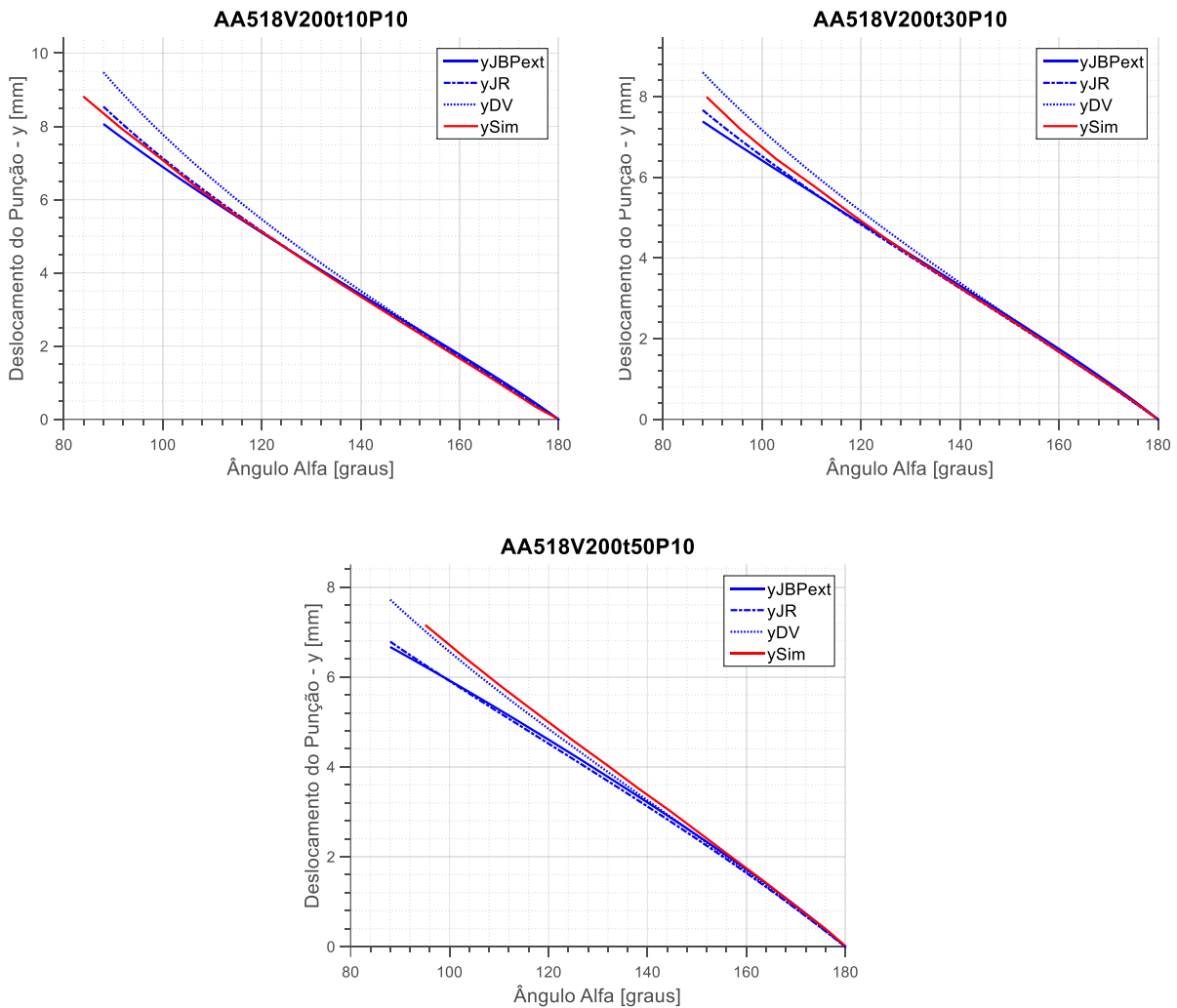


Figura 5.30 - Comparação das equações analíticas, para V constante e espessuras variáveis, para a liga de alumínio AA5182.

Analisado a Figura 5.30, é possível concluir que a equação JBPext não se ajusta para a previsão do deslocamento do punção, relativamente à curva obtida por simulação numérica. Para pontos onde ocorre flexão, V200t10P10, a expressão proposta por Jorge Rodrigues é a que apresenta o comportamento mais aproximado, enquanto que para pontos de esmagamento, nomeadamente $V/t=4.0$, a expressão proposta por De Vin (De Vin 1994) é a que apresenta os melhores resultados.

Na Figura 5.31 serão analisados os resultados para matrizes e espessuras crescentes.

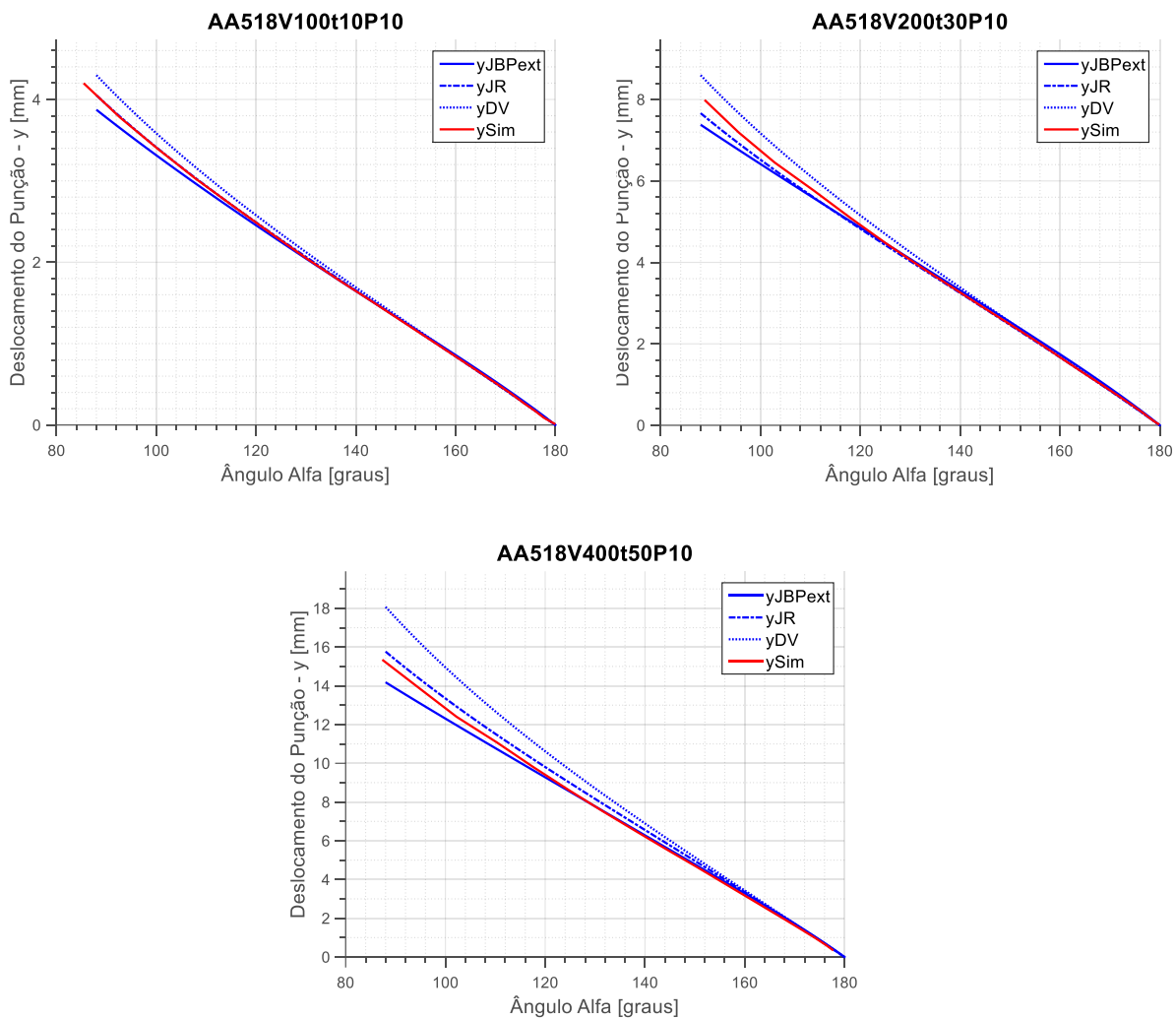


Figura 5.31 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para a liga de alumínio AA5182.

Novamente, conclui-se que a equação JBPext não se ajusta para a previsão do deslocamento do punção, relativamente à curva obtida por simulação numérica. Para pontos onde ocorre flexão, V200t10P10, a expressão proposta por Jorge Rodrigues (Rodrigues 2005) é a que apresenta o comportamento mais aproximado, enquanto que para pontos de esmagamento, nomeadamente V/t=4.0, a expressão proposta por De Vin (De Vin 1994) é a que apresenta os melhores resultados.

Tendo em conta, os resultados obtidos propõe-se um estudo do comportamento da liga de alumínio AA5182 comparativamente ao aço MS. A escolha deste aço deve-se ao facto de ambos os materiais apresentarem uma região plástica semelhante, Figura 3.1.

Na figuras seguintes serão analisados os resultados deste estudo para os casos V200t10P10 e V200t30P10, correspondentes a um caso na zona de flexão e a um caso na zona ótima de quinabilidade, respetivamente.

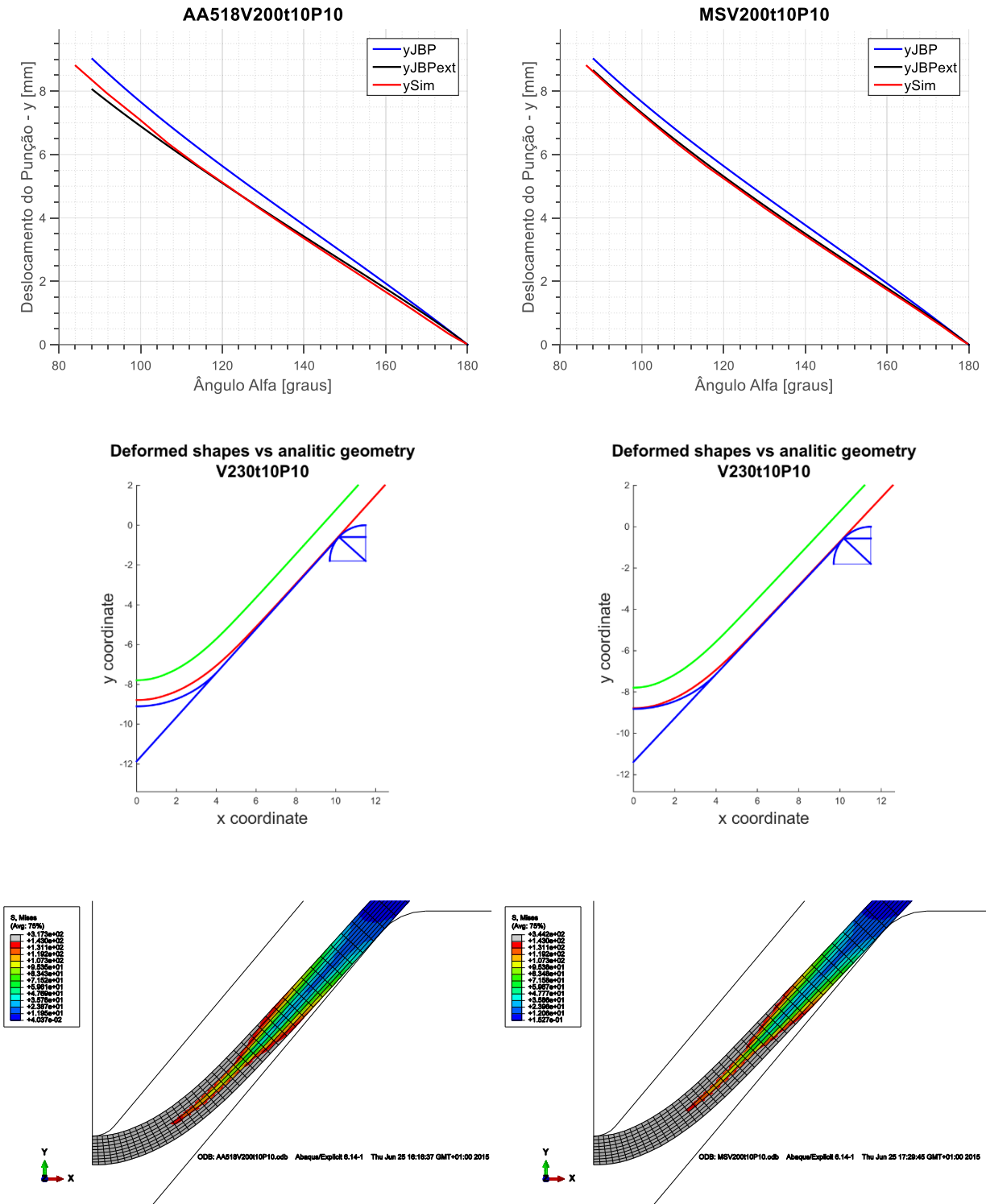


Figura 5.32 - Comparação entre a liga de alumínio AA5182 e o aço MS para V=200 mm e t=1 mm, em termos de deslocamento, deformada e distribuição de tensões.

A observação da Figura 5.32 permite verificar que os resultados obtidos em termos de deslocamento apresentam valores diferentes para os dois materiais estudados, quer para a curva numérica, quer para a JBPext. Tendo como referência a curva JBP com raio natural $V_{corr}/6.4$, conclui-se que a deformada da geometria simulada (azul) para a liga de alumínio encontra-se mais afastada da geometria analítica (vermelho), relativamente ao aço MS.

Simulação numérica do processo de quinagem

Contudo os perfis de tensão apresentados demonstram uma distribuição bastante semelhante para ambos os materiais.

Em seguida apresenta-se a comparação dos resultados para o caso V200t30P10.

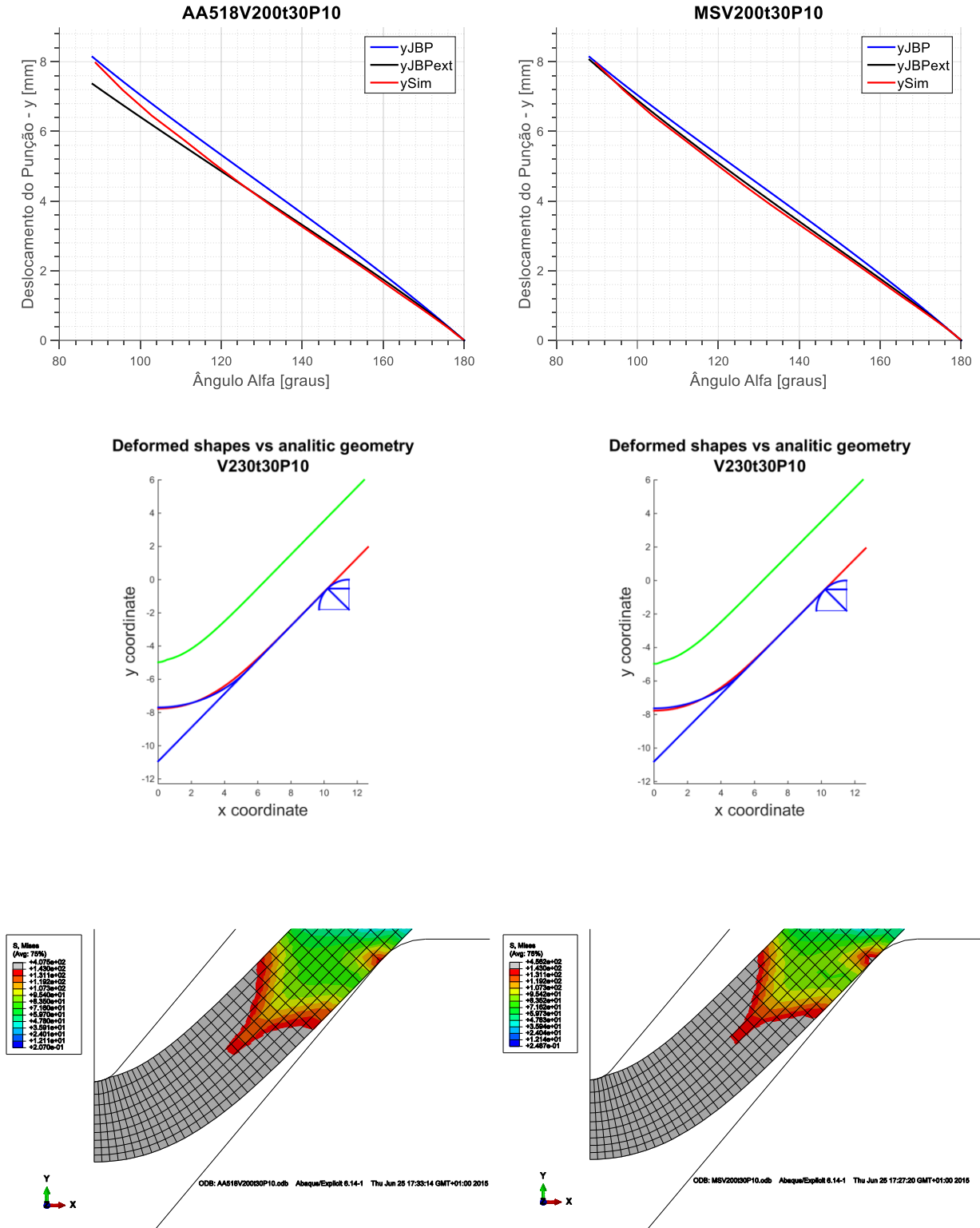


Figura 5.33 - Comparação entre a liga de alumínio AA5182 e o aço MS para $V=20$ mm e $t=3$ mm, em termos de deslocamento, deformada e distribuição de tensões.

A observação da Figura 5.33 permite verificar que os resultados obtidos em termos de deslocamento apresentam valores semelhantes para as curvas de simulação nos dois materiais em análise. Contudo a curva JBPext apenas se ajusta no caso do aço MS. Tendo como referência a curva JBP com raio natural $V_{corr}/6.4$, conclui-se que a deformada da geometria simulada (azul) para a liga de alumínio é bastante similar à da geometria analítica (vermelho) para ambos os materiais. Novamente os perfis de tensão apresentados demonstram uma distribuição bastante semelhante para ambos os materiais.

Após esta análise é possível retirar algumas conclusões. Primeiro, tal como esperado, os materiais apresentam um comportamento plástico bastante semelhante como se mostrou a partir da distribuição de tensões. Verifica-se também que quando a relação V/t diminui a geometria da liga do alumínio aproxima-se da geometria do aço MS. Ao mesmo tempo, as curvas de deslocamento obtidas por simulação numérica para os dois materiais apresentam uma evolução semelhante para o caso V200t30P10, ao contrário do verificado para V200t10P10. Finalmente estes resultados levam a acreditar que a componente elástica dos materiais é a razão pela qual estes apresentam as diferenças constatadas. Por esse motivo, será proposta uma correção do parâmetro V_{corr}/k_V pois relativamente ao raio natural utilizado é aquele que tem em conta as propriedades dos materiais. Com esta correção espera-se obter uma curva analítica com evolução semelhante à calculada por simulação numérica.

5.6.4.1 Correção do parâmetro V/k_V

Tendo como base o trabalho desenvolvido anteriormente (Miranda 2014), será aplicada a mesma metodologia para a correção do parâmetro k_V .

A partir do rearranjo da equação JBPext (Equação 5.8), é possível determinar o raio natural em ordem a V e t :

$$r_{ac} = \left[\left(\frac{V_{corr}}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - y_{sim} \right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] - t - r_m \quad (5.10)$$

Tendo em conta que para um ângulo de quinagem de 90° o raio analítico é dado por:

$$r_{ac} = \frac{V_{corr}}{k_V} \quad (5.11)$$

É possível determinar o valor de k_V através do rearranjo da Equação 5.11 em ordem a este parâmetro:

$$k_V = \frac{V_{corr}}{r_{ac}} \quad (5.12)$$

Relacionando a abertura da matriz, a espessura da chapa e os valores de k_V e considerando a relação existente entre tensão de rotura e tensão de cedência das duas ligas de alumínio estudadas nesta dissertação (Tabela 5.3), definem-se três pontos que permitem a determinação de um plano que abrange os casos possíveis de quinagem.

Tabela 5.3 – Rácio Rm/Re para as duas ligas de alumínio analisadas.

	AA6016	AA5182
Re (MPa)	110	143
Rm (MPa)	210	300
Rm/Re	1.91	2.10

$$P_1 = (V_{corr1}, t_1, k_{V1}) \quad (5.13)$$

$$P_2 = (V_{corr2}, t_2, k_{V2}) \quad (5.14)$$

$$P_3 = (V_{corr3}, t_3, k_{V3}) \quad (5.15)$$

em que,

$$V_{corr1} = 23.06; t_1 = 1; k_{V1} = -1.5 \cdot \frac{R_m}{R_e} + 7.6 \quad (5.16)$$

$$V_{corr2} = 34.21; t_2 = 3; k_{V2} = -3.1 \cdot \frac{R_m}{R_e} + 11.5 \quad (5.17)$$

$$V_{corr3} = 53.73; t_3 = 3; k_{V1} = -1.9 \cdot \frac{R_m}{R_e} + 8.4 \quad (5.18)$$

Assim,

$$P_1 = \left(23.06, 1, -1.5 \cdot \frac{R_m}{R_e} + 7.6 \right) \quad (5.19)$$

$$P_2 = \left(34.21, 3, -3.1 \cdot \frac{R_m}{R_e} + 11.5 \right) \quad (5.20)$$

$$P_3 = \left(53.73, 3, -1.9 \cdot \frac{R_m}{R_e} + 8.4 \right) \quad (5.21)$$

Os resultados obtidos utilizando o raio natural com esta correção do parâmetro k_V serão agora analisados.

Na figura seguinte apresentam-se os resultados para aberturas de matriz constantes e espessura variável.

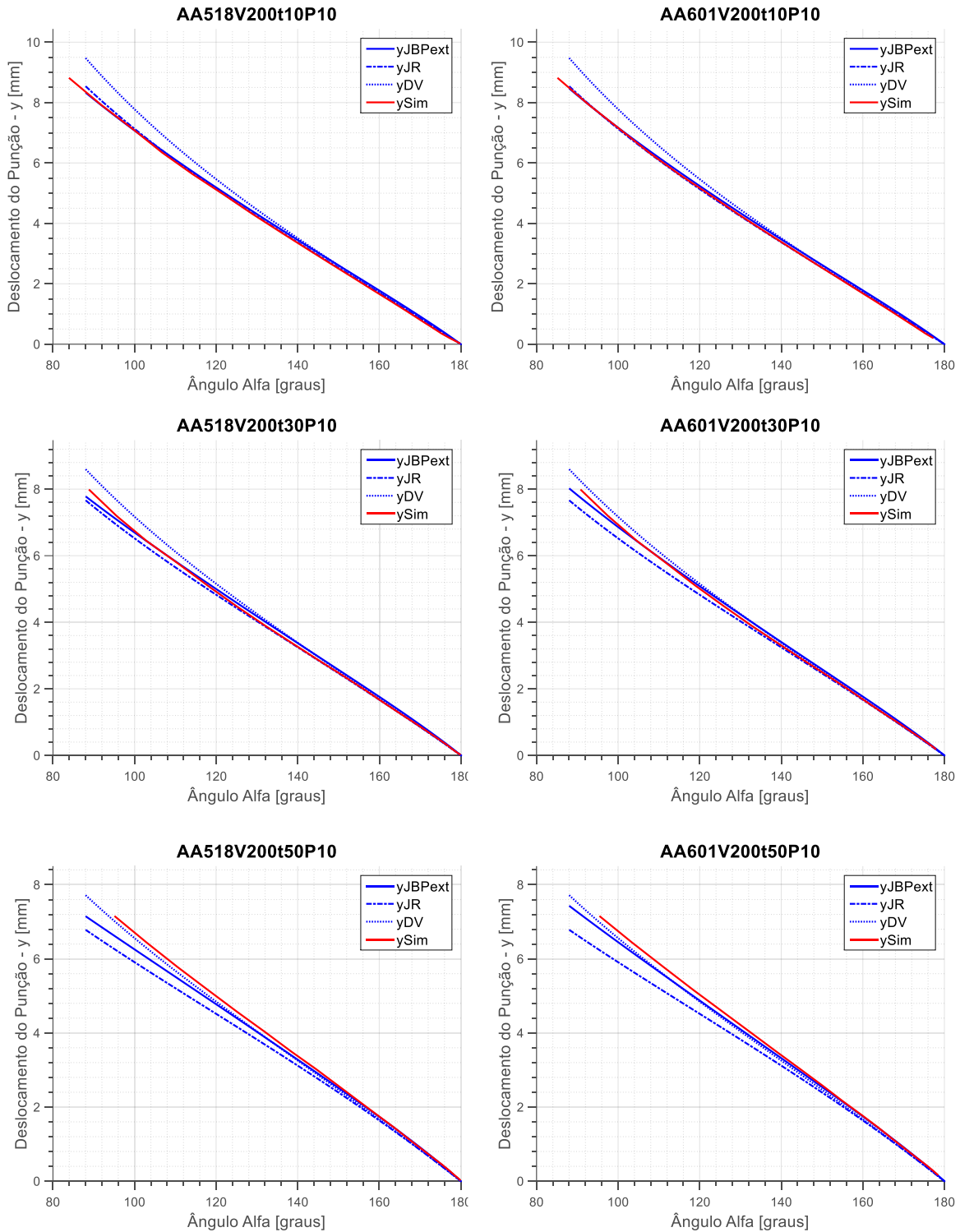


Figura 5.34 - Comparação das equações analíticas, para V constante e espessuras variáveis, para as ligas de alumínio AA5182 e AA6016.

Os resultados apresentados na Figura 5.34 permitem concluir que houve uma melhoria na curva JBPext. Contudo, continua a verificar-se para o caso V200t30P10 um afastamento considerável para ângulos de quingem de 90°. Para pontos que se situam na zona de esmagamento, V200t50P10, a expressão não se ajusta, como seria expetável.

Apresenta-se, em seguida, a análise para espessuras e aberturas de matriz variáveis.

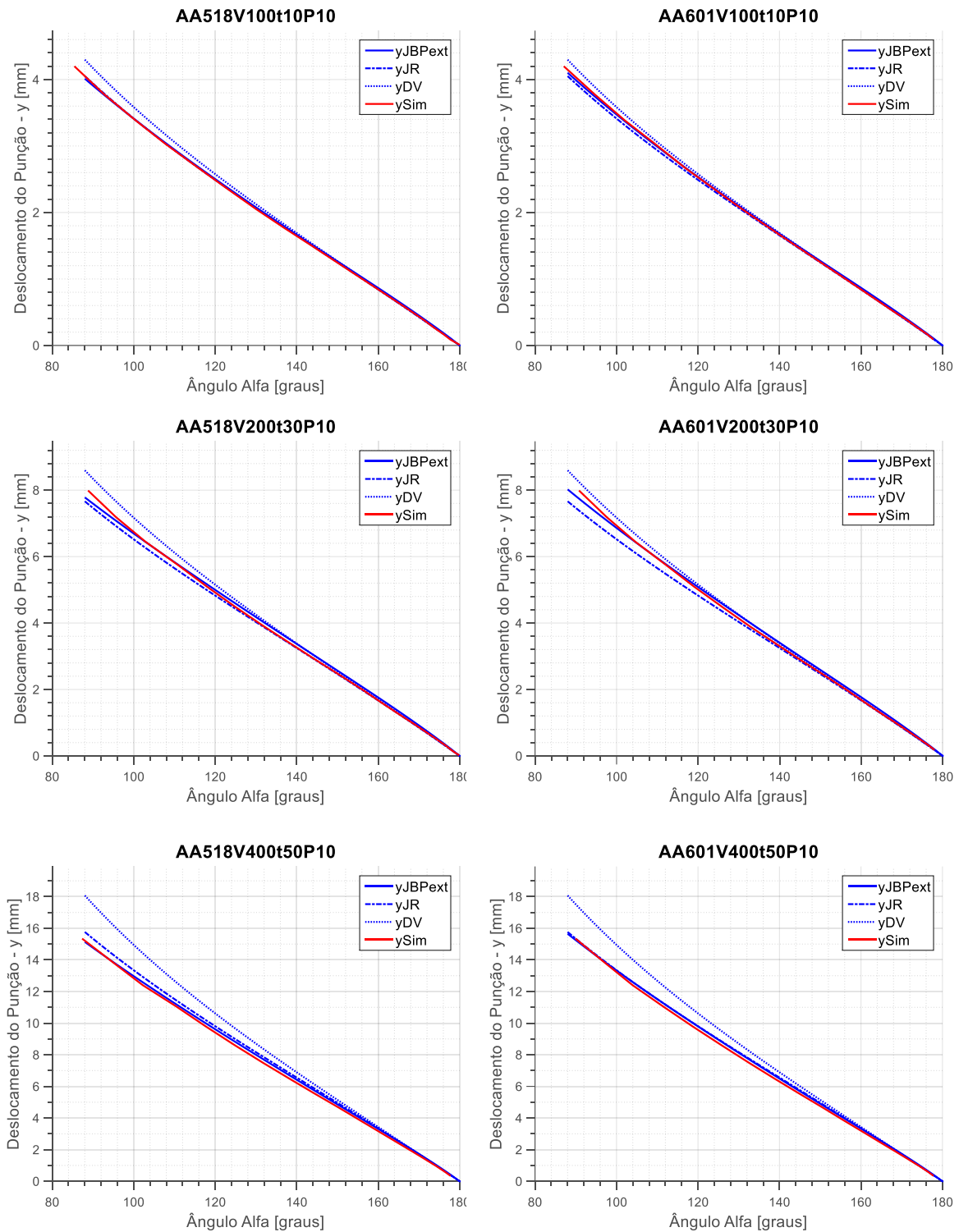


Figura 5.35 - Comparação das equações analíticas, para aberturas de matriz e espessuras variáveis, para as ligas de alumínio AA5182 e AA6016.

Os resultados apresentados na Figura 5.35 permitem concluir que a expressão JBPext é a que melhor traduz a evolução do deslocamento do punção. Contudo, tal como anteriormente, verifica-se, para o caso V200t30P10, um afastamento considerável para ângulos de quinagem de 90°.

Apresentam-se, agora, os resultados para diferentes raios do punção.

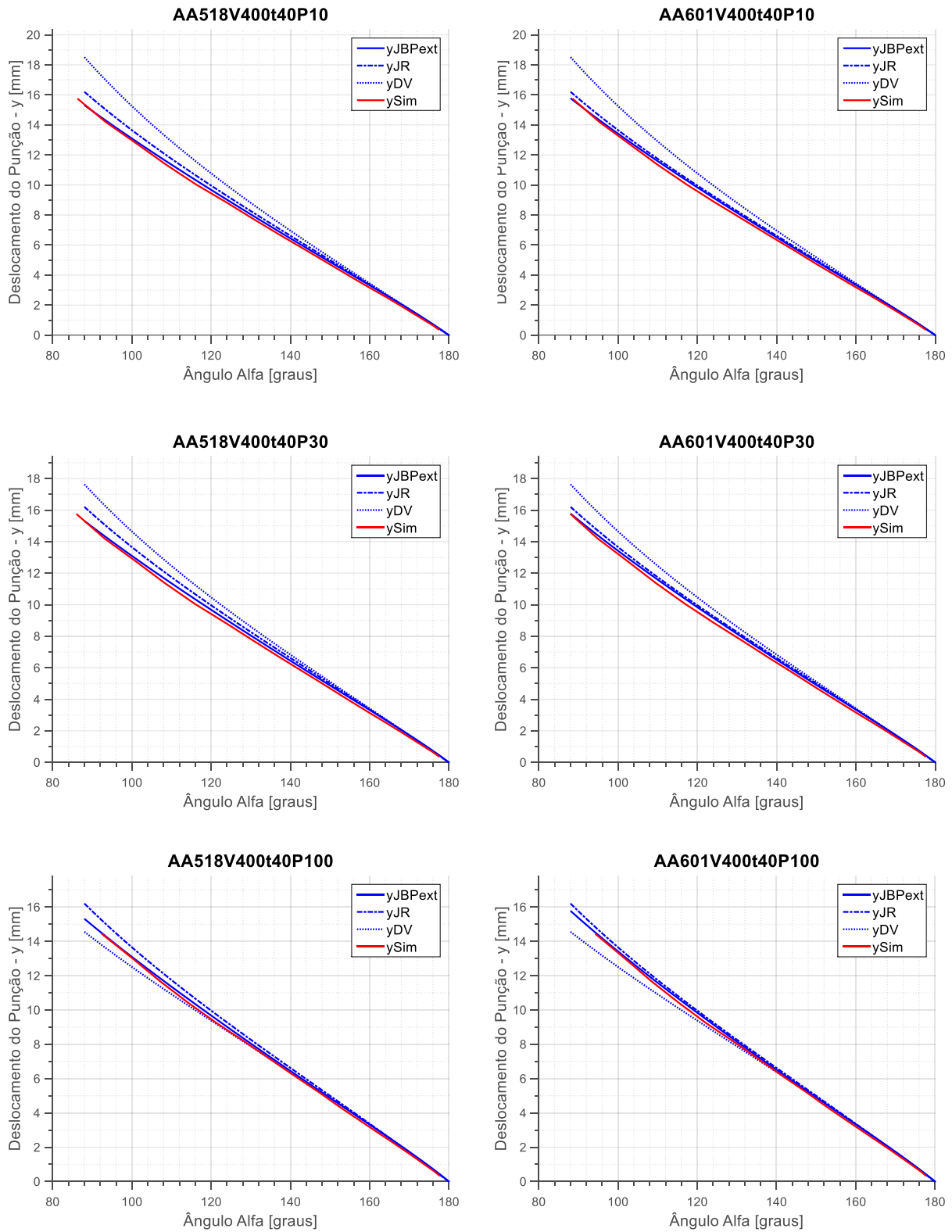


Figura 5.36 - Comparação das equações analíticas das ligas de alumínio AA5182 e AA6016 para diferentes raios de punção, com $V=40$ mm e $t=4$ mm.

Simulação numérica do processo de quinagem

Visualizando os resultados presentes na Figura 5.36, para diferentes raios do punção a curva JBPext é a que mais se adequa para o cálculo do deslocamento. Desta forma conclui-se que a correção proposta melhora a representação do deslocamento do punção para ligas de alumínio. Contudo, verificaram-se exceções, como no caso V200t30P10, pelo que se aconselha uma revisão deste estudo em trabalhos futuros.

5.7 Retorno elástico

Após a remoção das ferramentas a geometria final da chapa altera-se, sendo este fenómeno conhecido por retorno elástico.

Na Figura 5.37 observa-se que para um determinado ângulo de quinagem, a libertação dos momentos aplicados provoca a alteração da curvatura da chapa metálica (Garcia 2007, Wang 2008).

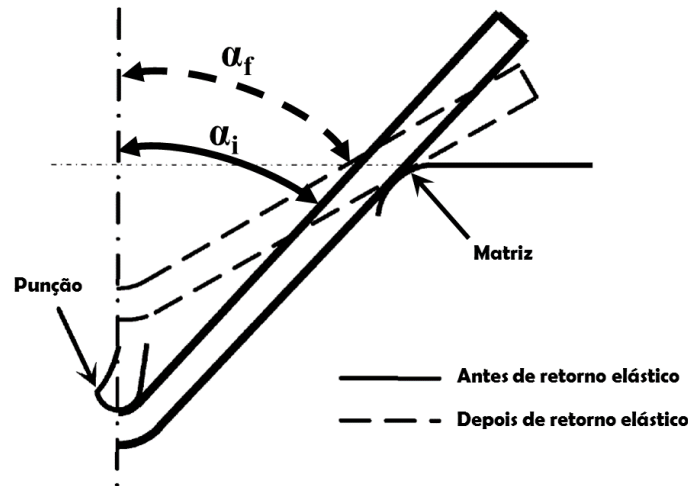


Figura 5.37 - Retorno elástico no processo de quinagem no oar (Garcia 2007).

A diferença ($\Delta\alpha$) entre o ângulo medido após a remoção da ferramenta (α_f) e o ângulo antes da remoção da ferramenta (α_i) corresponde ao retorno elástico sofrido pela chapa. Este fenómeno depende de diversas variáveis, incluindo, propriedades do material, geometria das ferramentas e do próprio ângulo de quinagem (Wang 2008).

A previsão do retorno elástico e, conseqüentemente, da geometria final é um tópico frequentemente estudado, pois constitui uma característica crucial nos processos de conformação plástica de chapas metálicas.

Sendo um processo versátil, a quinagem permite obter uma grande diversidade de peças pois, com a mesma configuração da ferramenta, é possível atingir diferentes ângulos e curvaturas.

A modificação geométrica verificada após a remoção das ferramentas, devido à recuperação elástica do material, provoca desvios na forma final da peça. Assim sendo, o produto obtido pode não estar dentro dos limites de tolerância, deixando de ser adequado para a aplicação para a qual foi projetado (Garcia 2007).

Desta forma, este fenómeno é dependente da conjugação de um número de fatores, nomeadamente:

- Propriedades mecânicas dos materiais;
- Geometria das ferramentas;
- Níveis e distribuição das tensões e deformações.

A estratégia para a obtenção de resultados de retorno elástico passa pela remoção das ferramentas utilizadas no modelo numérico. Para este efeito, utiliza-se o *Abaqus/Standard* com um fator de amortecimento (*damping factor*), assumido por defeito, de 0.002.

5.7.1 Análise do retorno elástico para diferentes situações de quinagem

Nesta secção serão estudados os resultados em termos de retorno elásticos para diferentes materiais e diferentes situações de quinagem. Este efeito será estudado para os pontos designados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Pontos de quinagem em análise com base no diagrama Vt (Figura 2.18).

Pontos na horizontal do diagrama Vt	Pontos na diagonal do diagrama Vt
V200t10P10	V100t10P10
V200t30P10	V300t30P10
V200t50P10	V500t50P10

Na Figura 5.38 observam-se os resultados para aberturas de matriz constantes e espessuras de chapa variáveis para os diferentes materiais.

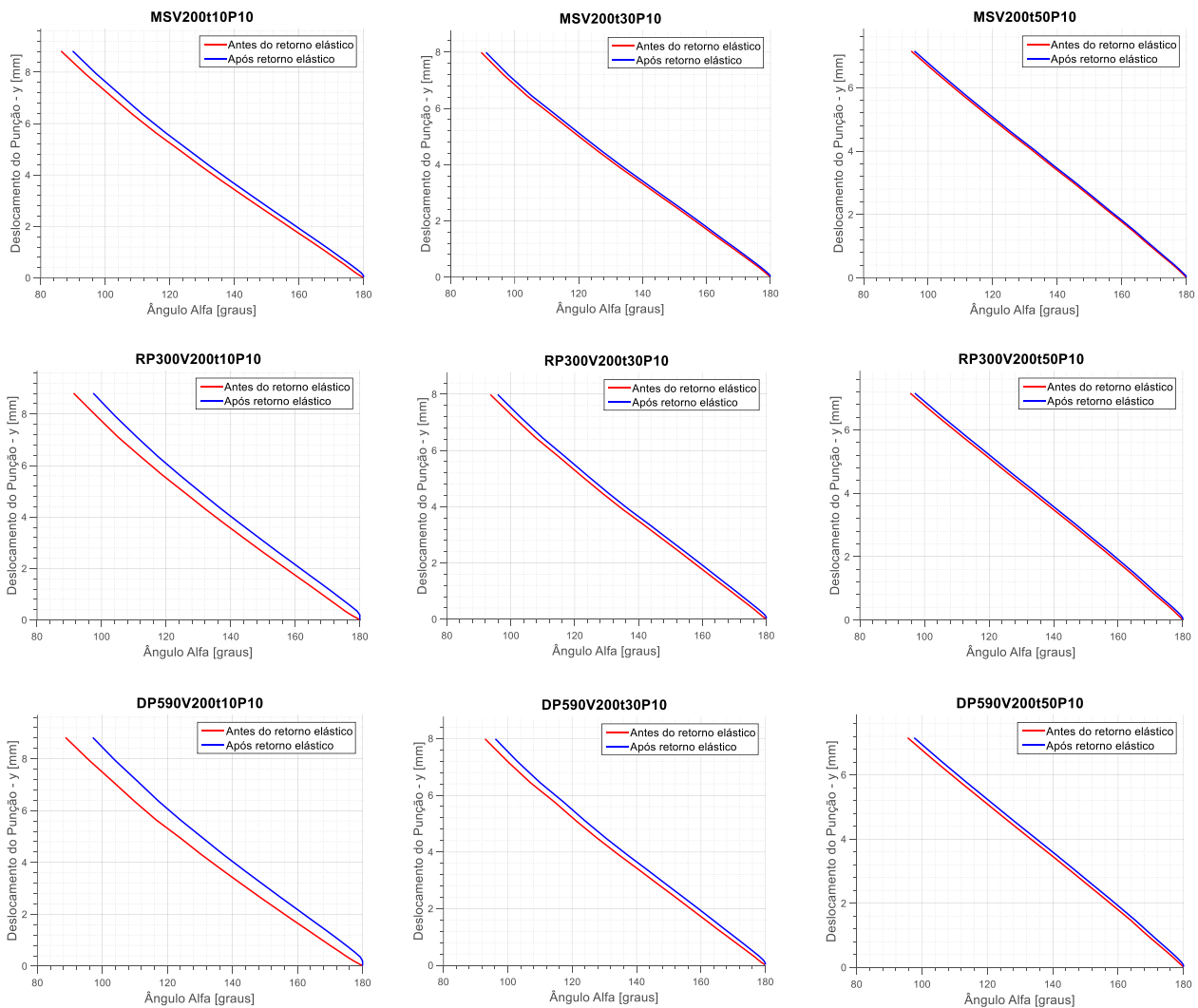


Figura 5.38 - Evolução do retorno elástico para os aços MS, RP300 e DP590, respetivamente, para a mesma abertura de matriz ($V=20$ mm) e espessuras variáveis.

Os resultados permitem concluir que à medida que a relação Vt diminui, menor será o retorno elástico sofrido pela chapa metálica. Verifica-se também que o retorno elástico é dependente do material, visto que quanto mais elevadas as propriedades dos materiais, maior será o retorno elástico sofrido pela chapa.

Na Figura 5.39 observam-se os resultados para os aços MS, RP300 e DP590 para aberturas de matriz e espessuras crescentes, mantendo uma relação Vt semelhante para os diferentes casos.

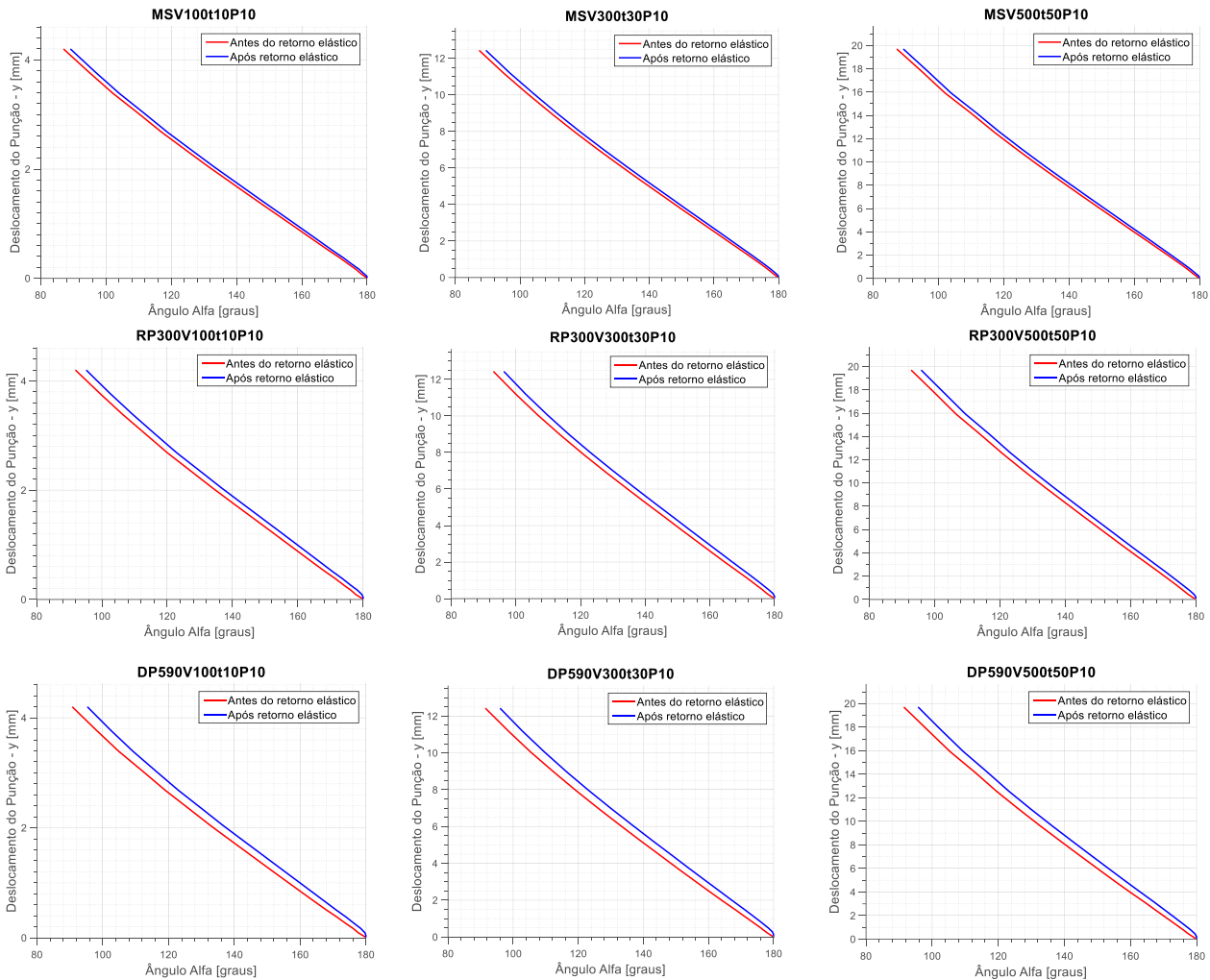


Figura 5.39 - Evolução do retorno elástico para os aços MS, RP300 e DP590, respetivamente, para aberturas de matriz e espessuras variáveis.

Os resultados permitem concluir que o valor do diferencial de ângulos, antes e após retorno elástico, se mantém aproximadamente constante, para relações Vt de valor semelhante, independentemente da geometria das variáveis envolvidas. Na Tabela 5.5, observam-se os valores de $\Delta\alpha$ para um ângulo de quingem de, aproximadamente, 90° .

Tabela 5.5 - Diferença de retorno elástico ($\Delta\alpha$ em graus) para diferentes situações de quingem e materiais com base em pontos definidos no diagrama Vt .

Pontos na diagonal do diagrama Vt	MS	RP300	DP590
V100t10P10	2.11	3.30	4.59
V300t30P10	2.09	3.22	4.49
V500t50P10	2.00	3.07	4.31

5.7.1.1 Análise do retorno elástico para diferentes raios de punção

Na Figura 5.40 observam-se os resultados para os aços MS, RP300 e DP590 para o caso V300t40P10 e diferentes raios de punção.

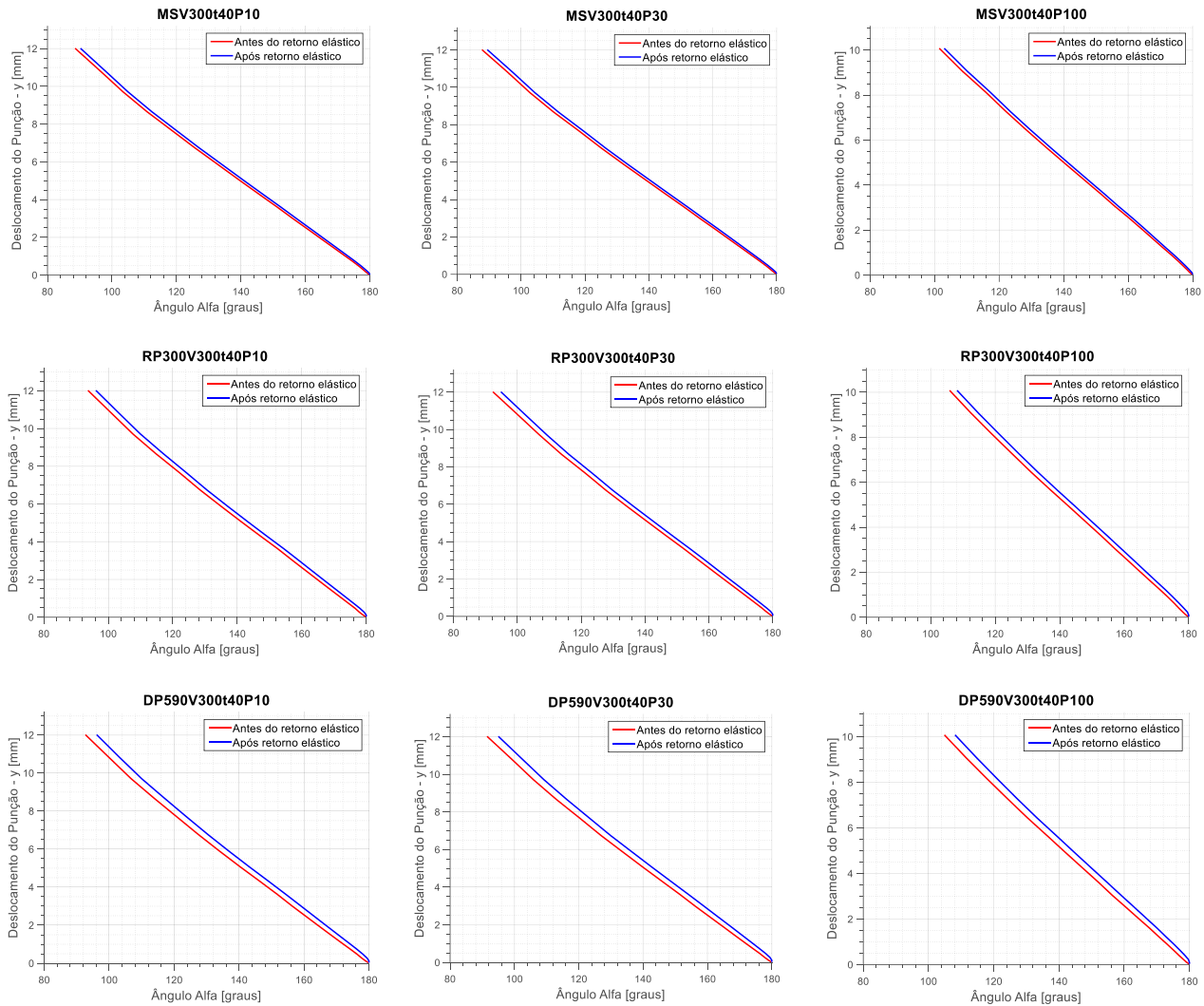


Figura 5.40 - Evolução do retorno elástico para os aços MS, RP300 e DP590, respetivamente, para diferentes raios de punção.

Os resultados obtidos demonstram que o retorno elástico não se altera significativamente para diferentes raios do punção. Contudo, esta análise requer um maior rigor, sendo necessário o seu estudo para uma maior diversidade de casos de quinagem, permitindo avaliar com maior precisão a influência desta variável.

6 Interface gráfica do utilizador

O reconhecimento da utilidade de ambientes gráficos estabeleceu a sua importância como um elemento crítico dos programas computacionais. Estes tornam o *software* fácil de utilizar, e reconhecendo esta potencialidade, os programadores dedicam grande parte do código para a implementação desta ferramenta (Memon 2001). O ambiente gráfico constitui, assim, o reflexo do código de programação (Figura 6.1).

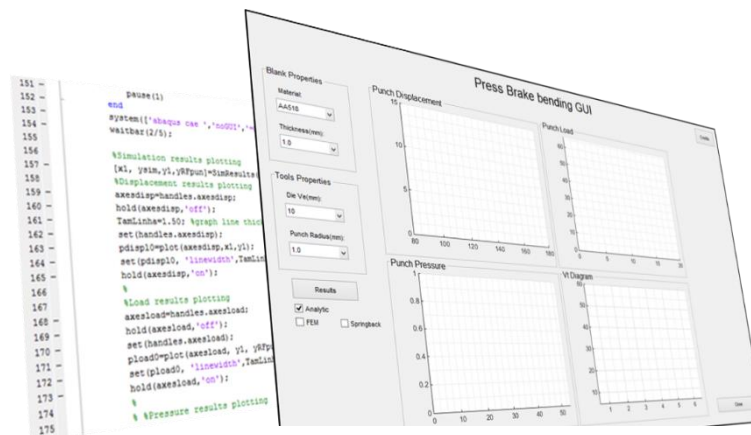


Figura 6.1 - A interface gráfica é o reflexo do código de programação.

Uma interface gráfica de utilizador (GUI) pode ser definida como o ambiente gráfico de um programa que regista os dados de entrada do utilizador e os dados gerados pelo sistema, produzindo uma saída gráfica dos resultados. Esta possui objetos gráficos, tendo estes determinadas propriedades. Durante a execução do programa, essas propriedades assumem valores discretos, constituindo o estado da GUI (Memon 2001).

As características mais importantes de uma interface de utilizador incluem: o grafismo, os dados de entrada, a estrutura hierárquica dos objetos e as suas propriedades.

Desta forma uma GUI tem como objectivos:

- Realizar operações de computação;
- Ler / escrever para ficheiros;
- Comunicar com outras GUIs;
- Apresentar dados em tabelas e gráficos.

Do ponto de vista da quinagem, a implementação de uma interface gráfica, que permita a análise prévia dos resultados obtidos utilizando determinados parâmetros, constitui um aspeto importante a nível de custos e eficiência do processo (Figura 6.2).

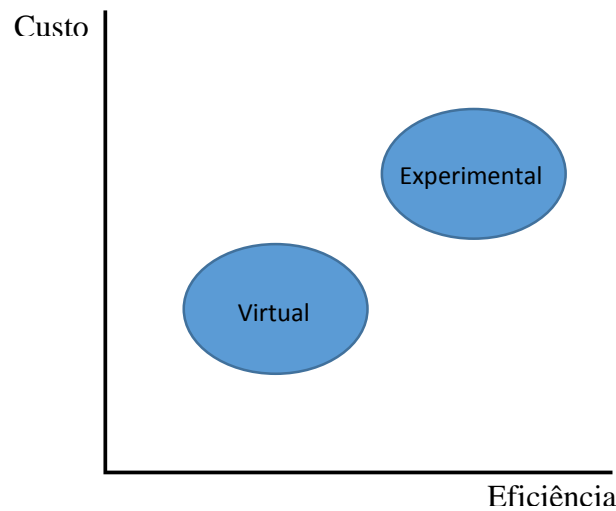


Figura 6.2 - A utilização de ferramentas numéricas é vantajosa em termos de custo e eficiência.

Assim, será desenvolvida uma interface gráfica para análise dos resultados para diferentes situações de quingem.

6.1 Bases de desenvolvimento

Um dos objectivos propostos nesta dissertação foi o desenvolvimento de uma interface gráfica para análise dos resultados. Neste desenvolvimento foram utilizados os softwares mencionados anteriormente.

O Abaqus® permitiu o cálculo dos resultados numéricos tendo em conta o modelo 2D desenvolvido. Já o Matlab® foi utilizado devido às grandes capacidades desta ferramenta, nomeadamente a facilidade de elaboração de scripts eficientes e também a ferramenta Graphical User Interface. Nesta vertente existem duas possibilidades:

- Desenvolvimento de uma GUI programável, em que todo o ambiente gráfico é gerado por programação;
- Construção da interface através de ferramentas gráficas já disponibilizadas (GUIDE), Figura 6.3.

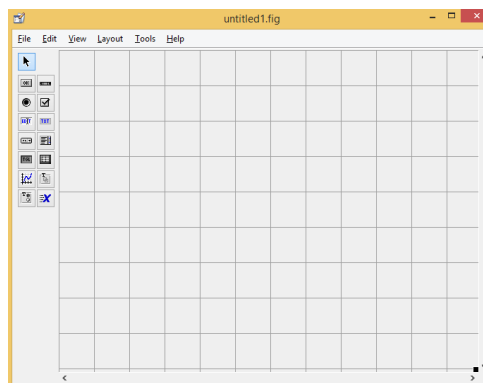


Figura 6.3 - Ambiente de desenvolvimento da interface gráfica disponível no Matlab.

6.2 Objectivos da interface gráfica

O desenvolvimento da interface gráfica desenvolvida tem como principais objetivos:

- Permitir uma análise detalhada e fácil de todos os resultados disponíveis, nomeadamente: deslocamento do punção, força e pressão do punção e também do diagrama Vt ;
- Entrada dos dados necessários para análise de vários casos de quinabilidade (Material e espessura da chapa, abertura da matriz e raio do punção);
- Possibilidade de obtenção de resultados analíticos e numéricos, também como de resultados numéricos para retorno elástico;
- Valor numérico de deslocamento do punção de acordo com o ângulo de quinagem pretendido;
- Opção para gravar os resultados obtidos.

6.3 Elementos da Interface Gráfica

Definidos os objetivos, foi necessário estabelecer uma metodologia de trabalho para o desenvolvimento desta aplicação. Inicialmente efetuou-se um estudo relativamente ao layout da interface gráfica. Pretendeu-se um *layout* simples e de fácil compreensão que permitisse uma fácil entrada dos dados necessários e também uma interpretação expedita dos resultados obtidos. Posto isto, propôs-se a seguinte estrutura para a interface gráfica, Figura 6.4.

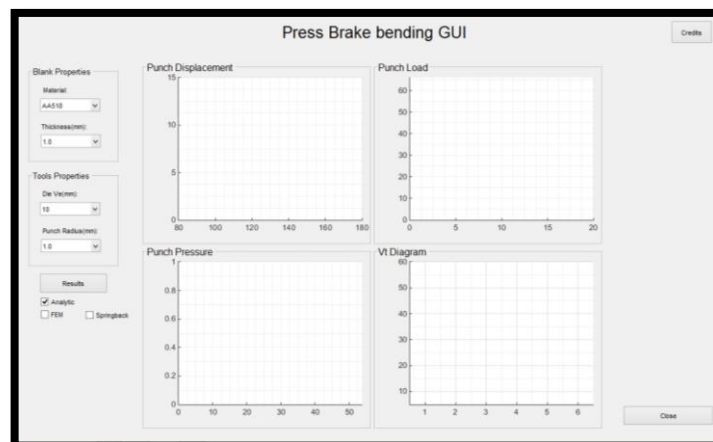


Figura 6.4 - *Layout* da interface gráfica desenvolvida.

6.4 Scripts utilizados

Para a obtenção dos resultados pretendidos foi necessário desenvolver os respetivos *scripts* e funções. Para isto foram criadas funções em Matlab® e também *scripts* em Abaqus® para obtenção dos resultados por simulação numérica. Em seguida serão listados e descritos todos estes elementos, Tabela 6.1 e Tabela 6.2.

Tabela 6.1 - *Scripts* utilizados no desenvolvimento da interface gráfica (Matlab®).

Script - Matlab®	Descrição
AnGUI.m	Ficheiro responsável pela execução das restantes funções e que contém a programação referente à estrutura gráfica da interface.
Create_inp.m	Ficheiro responsável pela criação do ficheiro de entrada dos dados de simulação.
DeslQuinaAn.m	Cria as curvas de deslocamento do punção analíticas relativamente ao ângulo de quingem.
ForceQuinaAn.m	Contém as expressões analíticas para cálculo da força máxima do punção.
Isprocess.m	Ficheiro que pausa o processamento da interface quando a simulação numérica se encontra a decorrer
PresQuinaAn.m	Contém as expressões analíticas para cálculo da pressão do punção.
SBQuina.m	Lê os dados numéricos e desenha a curva de deslocamento do punção após retorno elástico.
SimResults.m	Lê os dados numéricos e desenha a curva de deslocamento e força do punção antes retorno elástico.
VtDiaQuinaAn.m	Ficheiro responsável pelo desenho do diagrama de quingem e curvas de limite de quingibilidade.

Tabela 6.2 - *Scripts* utilizados no desenvolvimento da interface gráfica (Abaqus®).

Script - Abaqus®	Descrição
quina_inp.inp	Ficheiro <i>python</i> que contém os dados do material, ferramentas e propriedades da análise por elementos finitos.
Quina2D3ODBrep.py	Ficheiro que permite a leitura e escrita dos resultados de simulação numérica.
Quina2DSB.py	Ficheiro <i>python</i> que permite o cálculo do retorno elástico.

6.5 Integração entre Matlab® e Abaqus®

Na fase inicial deste estudo os resultados obtidos através de métodos numéricos requeriam a utilização do ambiente gráfico do *Abaqus*®. No contexto da interface gráfica desenvolvida foi necessário estabelecer uma metodologia diferente que permitisse a integração dos dois *softwares* utilizados sem a necessidade de utilização desta interface auxiliar. Utilizando as capacidades de integração do Matlab® e o método de processamento do *Abaqus*® foram desenvolvidos ficheiros *input* que possuem toda a informação necessária para o cálculo numérico através do método dos elementos finitos. A possibilidade de criação destes ficheiros para toda a gama de ferramentas e chapas utilizadas garantiu uma forma expedita e simples de obtenção dos resultados por simulação numérica. A partir destes ficheiros é possível executar o *Abaqus*® a partir do Matlab® sem a necessidade de utilizar a *GUI* do primeiro, Figura 6.5.

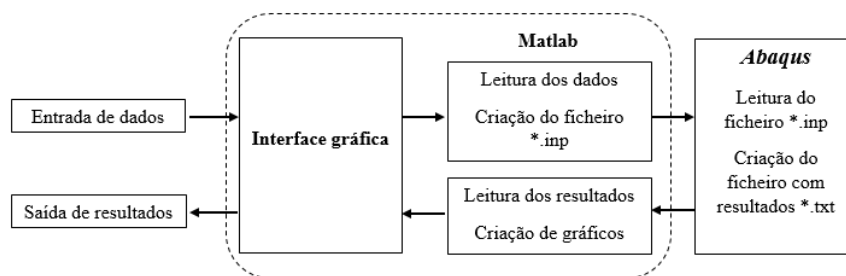
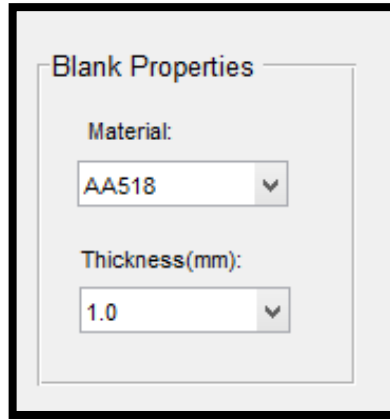


Figura 6.5 - Procedimento de integração das ferramentas de cálculo utilizadas.

6.6 Opções disponíveis

Nesta secção serão descritas as opções disponíveis na interface gráfica desenvolvida.

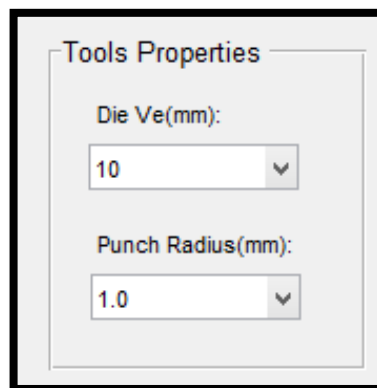
- Propriedades do material - Esta opção permite a definição do material a utilizar, também como a espessura da chapa a quinar, Figura 6.6. Os materiais e espessuras disponíveis correspondem aos estudados ao longo desta dissertação.



The image shows a dialog box titled "Blank Properties". Inside, there are two labels with corresponding dropdown menus. The first label is "Material:" and the dropdown menu shows "AA518". The second label is "Thickness(mm):" and the dropdown menu shows "1.0".

Figura 6.6 - Definição dos parâmetros do material.

- Propriedades das ferramentas - Esta opção permite a escolha das ferramentas a utilizar no processo de quinagem. É possível definir a abertura da matriz e o raio de punção a utilizar, Figura 6.7. Tal como anteriormente, os valores disponíveis correspondem aos estudados.



The image shows a dialog box titled "Tools Properties". Inside, there are two labels with corresponding dropdown menus. The first label is "Die Ve(mm):" and the dropdown menu shows "10". The second label is "Punch Radius(mm):" and the dropdown menu shows "1.0".

Figura 6.7 - Definição dos parâmetros das ferramentas.

- Tipo de análise – Na interface gráfica é possível optar pela visualização dos resultados analíticos (mais rápido), numéricos (mais preciso) ou ambos, Figura 6.9. Desta forma o utilizador pode comparar os resultados obtidos para os casos de quinagem disponíveis. Adicionalmente, em caso de seleção da análise por simulação numérica surge a opção de retorno elástico da chapa metálica, que calcula o deslocamento do punção após o retorno elástico.

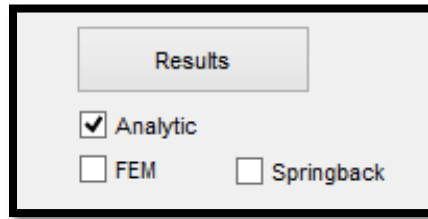


Figura 6.9 - Seleção do tipo de análise desejada.

- Opções adicionais – Após a finalização do processamento dos resultados surgem duas opções adicionais, Figura 6.8. A primeira permite obter o valor numérico do deslocamento do punção para um determinado ângulo de quingem, para o caso analisado. A segunda opção possibilita a visualização dos vários resultados obtidos em maior detalhe, gerando uma figura externa à interface gráfica. Caso o utilizador pretenda gravar os gráficos resultantes da análise basta seleccionar a respectiva opção.

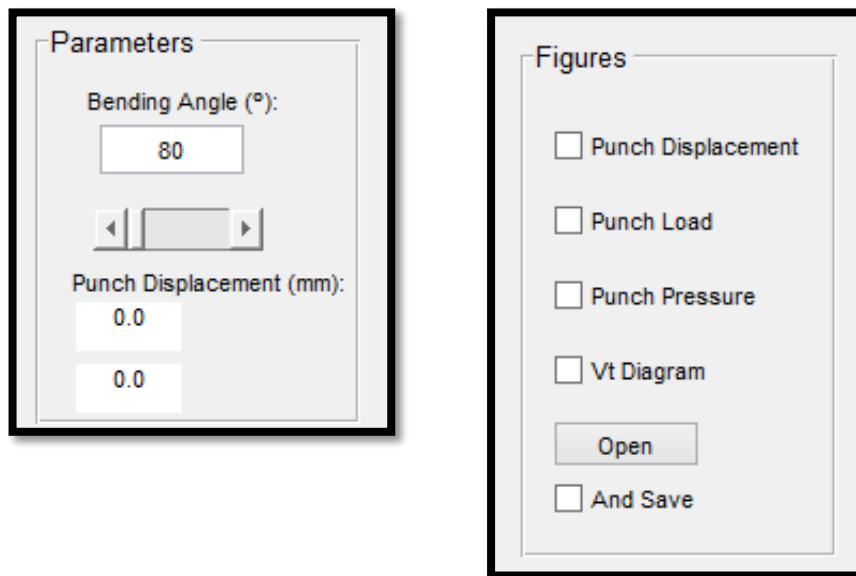


Figura 6.8 - Opções adicionais da interface gráfica.

Após a escolha dos parâmetros pretendidos, resta ao utilizador pressionar o botão “Resultados”. É neste que reside grande parte do código de programação, permitindo a obtenção dos resultados para o caso seleccionado.

6.7 Resultados disponíveis

Tal como referido anteriormente, um dos objectivos desta interface era permitir a interpretação e estudo dos vários resultados disponíveis, nomeadamente: deslocamento do punção, força e pressão do punção e o diagrama Vt de quingem. Após a conclusão da análise o utilizador é notificado através de uma caixa de diálogo, Figura 6.10.

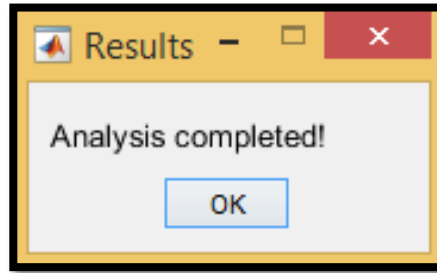


Figura 6.10 - O utilizador é notificado através de uma caixa de diálogo.

6.7.1 Deslocamento do punção

Relativamente às expressões analíticas decidiu-se implementar diversas abordagens, nomeadamente a expressão proposta por De Vin (De Vin 1994), Jorge Rodrigues e Paulo Martins (Rodrigues 2005) e também a do Engenheiro José Bessa Pacheco. A utilização das diferentes abordagens permite uma comparação com os resultados numéricos para diferentes situações de quinagem. Estas expressões não têm em consideração o retorno elástico sofrido pela chapa, sendo que este fenómeno pode ser obtido através do método de simulação numérica, Figura 6.11.

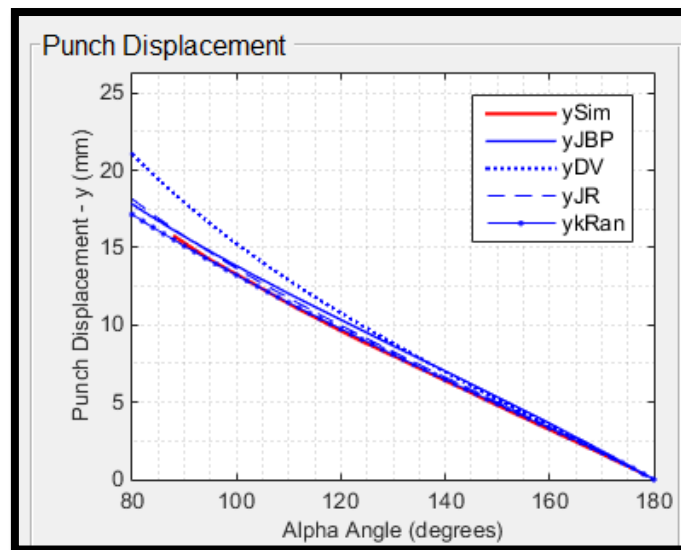


Figura 6.11 - Deslocamento de punção para diferentes ângulos de quinagem.

6.7.2 Força do punção

As expressões analíticas para a força do punção têm o objetivo de prever a força máxima ocorrida. Duas expressões são utilizadas, a primeira tem por base a norma DIN6935 enquanto a outra é proposta pela SSAB. Ao contrário do que se verifica este valor é constante ao longo do deslocamento do punção. Tal situação comprova-se quando os resultados por simulação numérica são disponibilizados, Figura 6.12.

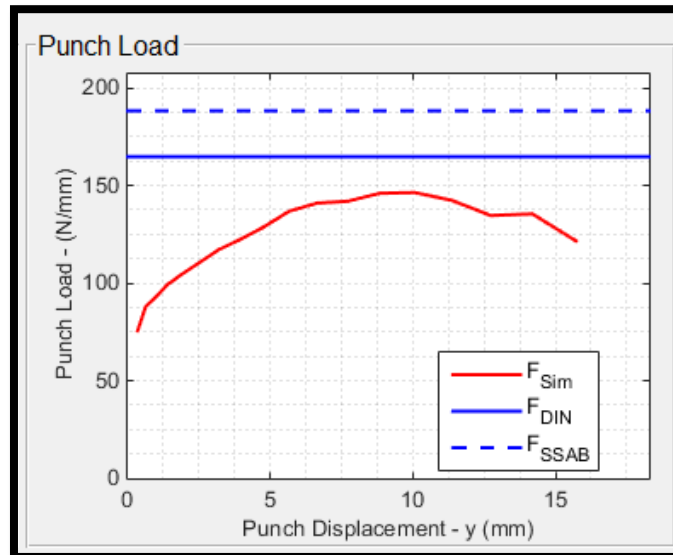


Figura 6.12 - Força do punção para diferentes deslocamentos.

6.7.3 Pressão do punção

Diferentes perfis de pressão são apresentados, variando com diferentes raios de punção. Tendo em conta o limite de pressão estabelecido é possível comparar o ponto de pressão para o caso particular com este valor, Figura 6.13.

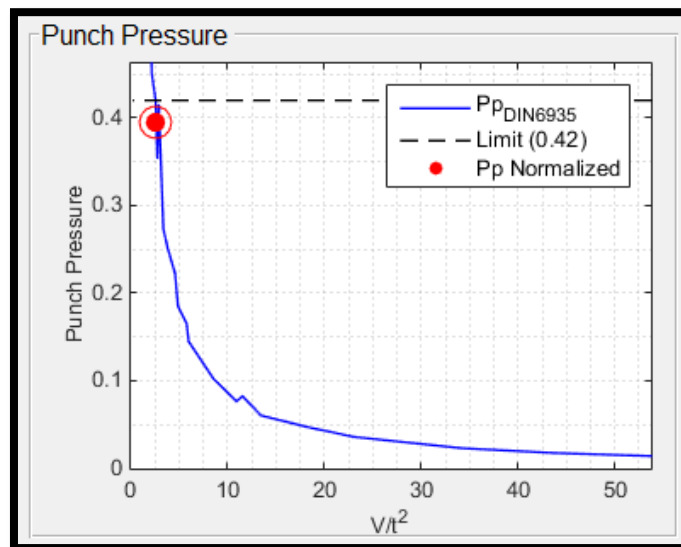


Figura 6.13 - Pressão do punção e sua posição relativamente ao limite de pressão definido.

6.7.4 Diagrama de quinagem Vt

Neste diagrama são ilustrados todos os pontos de quinagem possíveis, destacando-se o ponto de quinagem do caso em estudo (Figura 6.14). Através das curvas limite de quinabilidade é possível estudar o caso com maior detalhe.

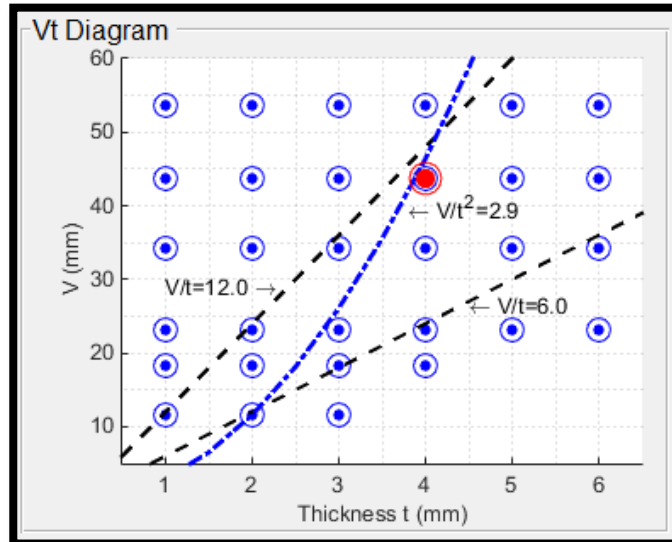


Figura 6.14 - Diagrama Vt com ponto em análise assinalado.

7 Caracterização do material por análise inversa

No processo de quinagem nem sempre é possível obter informações sobre as características mecânicas dos materiais que são utilizados durante a operação, levando a um elevado número de tentativas para obtenção dos resultados desejados.

Este problema verifica-se em grande parte dos processos de conformação plástica e por isso é extremamente importante utilizar métodos para a previsão do comportamento dos materiais. Os problemas de análise inversa centram-se no desenvolvimento de metodologias para determinação dos parâmetros de modelos constitutivos utilizados para descrever o comportamento plástico de chapas metálicas. A identificação dos parâmetros dá-se pela comparação entre resultados experimentais e matemáticos, sendo que a diferença entre ambos é avaliada por uma função específica, a função objetivo.

7.1 Algoritmos de otimização

Ao longo dos tempos, os processos de otimização fazem parte do nosso dia a dia. Efetivamente, até a escolha da data correta para as plantações pode ser considerado um processo de otimização. Estes baseiam-se principalmente no bom senso e experiência adquiridos ao longo dos anos.

Com o avanço da tecnologia, estes processos empíricos começaram a ser substituídos por regras matemáticas. Na década de 1950, registou-se um grande progresso em termos de processos de otimização devido ao aparecimento dos computadores. O aumento da eficiência computacional permitiu um avanço das técnicas de otimização, possibilitando que problemas complexos fossem solucionados (Antoniou 2007).

Os problemas de otimização são estudados em diversas áreas, tais como: engenharia, física, matemática, economia, etc. Em engenharia, estas técnicas podem ser adequadas a diversos ramos da mesma. No contexto desta dissertação a otimização estará relacionada com a engenharia mecânica.

A otimização de um problema pode apresentar múltiplas soluções, sendo até possível obter um número infinito destas. Nesses casos, a otimização consiste em encontrar a melhor solução tendo em conta critérios específicos.

Existem vários métodos para solucionar problemas de otimização, tais como: métodos analíticos, gráficos, experimentais e numéricos (Antoniou 2007).

Na presente dissertação será utilizado um método numérico para determinar a solução pretendida.

7.2 Estratégias para determinação das propriedades dos materiais

Relativamente ao processo de quingem diferentes estratégias foram já desenvolvidas no sentido de prever não só o comportamento dos materiais, como também o efeito de retorno elástico. Em seguida serão abordadas duas metodologias propostas em estudos anteriores.

7.2.1 Determinação das propriedades do material utilizando uma quinadora

Em 2003, R. J. Mentink publicou um artigo científico, apresentando um procedimento para a determinação das propriedades do material utilizando uma quinadora.

Através do diagrama força-deslocamento do punção diversos pontos são estabelecidos para determinação de diferentes parâmetros, Figura 7.1.

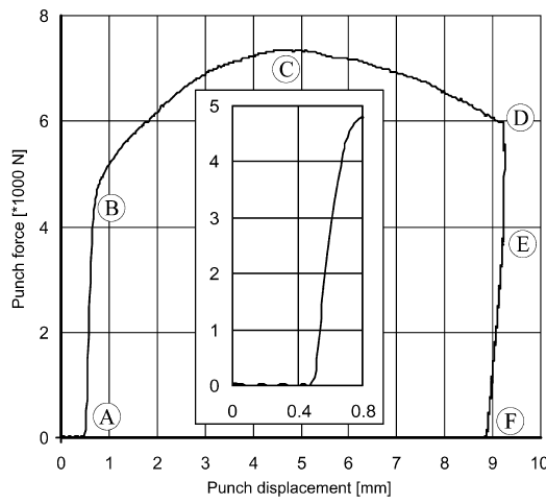


Figura 7.1 - Pontos característicos do diagrama Força-deslocamento(Mentink 2003).

Utilizando a lei de Ludwik-Nadai para descrever o comportamento plástico do material, foram comparados os resultado de simulação numérica com os resultados experimentais, Figura 7.2.

$$\sigma = K(\varepsilon - \varepsilon_0)^n \quad (7.1)$$

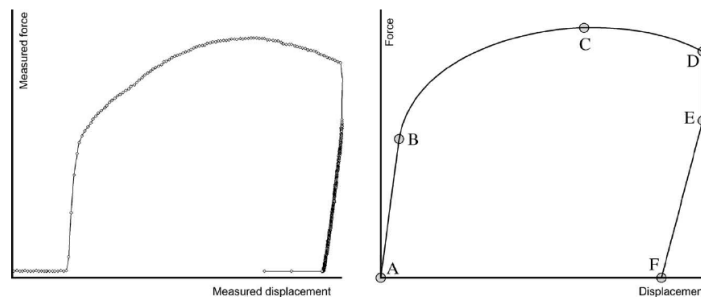


Figura 7.2 - Diagrama força-deslocamento experimental e modelado (Mentink 2003).

Recorrendo um processo iterativo, dá-se um ajustamento dos parâmetros utilizados, até que a diferença entre ambos os resultados possua um erro de baixo valor.

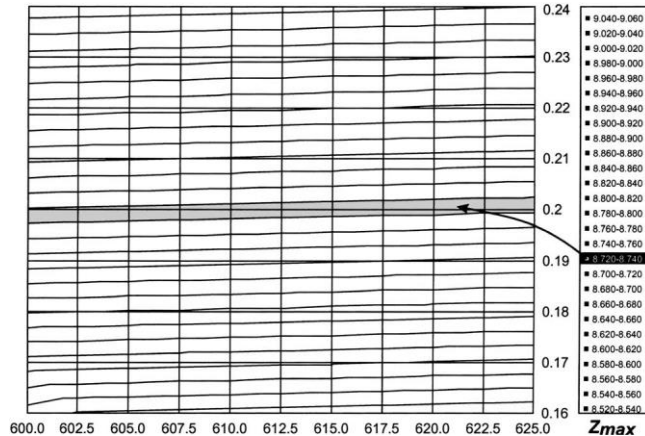


Figura 7.3 - Dependência dos parâmetros C e n da lei de Ludwick-Nadai relativamente ao deslocamento do punção (Mentink 2003).

A determinação dos parâmetros correspondentes ao comportamento plástico dá-se através da utilização de tabelas de dependência (Figura 7.3) que utilizam os valores de força e deslocamento máximos verificados nos ensaios experimentais para interpolar estes valores.

Esta metodologia apresentou resultados satisfatórios permitindo a determinação das características dos materiais e do retorno elástico utilizando uma quinadora.

7.2.2 Algoritmo de previsão do retorno elástico em quinagem no ar

Em semelhança ao procedimento anterior, este utiliza também os resultados de força-deslocamento do punção, tendo sido desenvolvido por M. Longo. Utilizando a mesma lei constitutiva, esta metodologia baseia-se na utilização de um algoritmo heurístico que requer a determinação de três forças para deslocamentos distintos e que permitem caracterizar o material elástica e plasticamente, Figura 7.4. As forças e respetivos deslocamentos são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Forças definidas para a previsão do comportamento do material

Força	Deslocamento (mm)	Descrição
F_{η}	0.01 a 0.25	Previsão do comportamento elástico do material.
F_1	1.0	Previsão do comportamento plástico do material.
F_2	2.0	Previsão do coeficiente de encruamento do material.

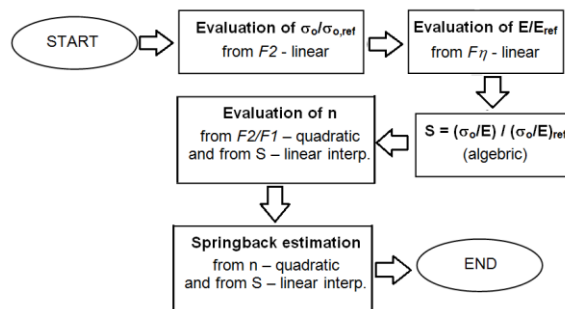


Figura 7.4 - Procedimento heurístico (Longo 2013).

Utilizando um modelo de simulação numérica previamente validado, foi criada uma base de dados para diferentes situações de quingem. Através desta, a aplicação do algoritmo permite a determinação das propriedades mecânicas do material, Figura 7.5.

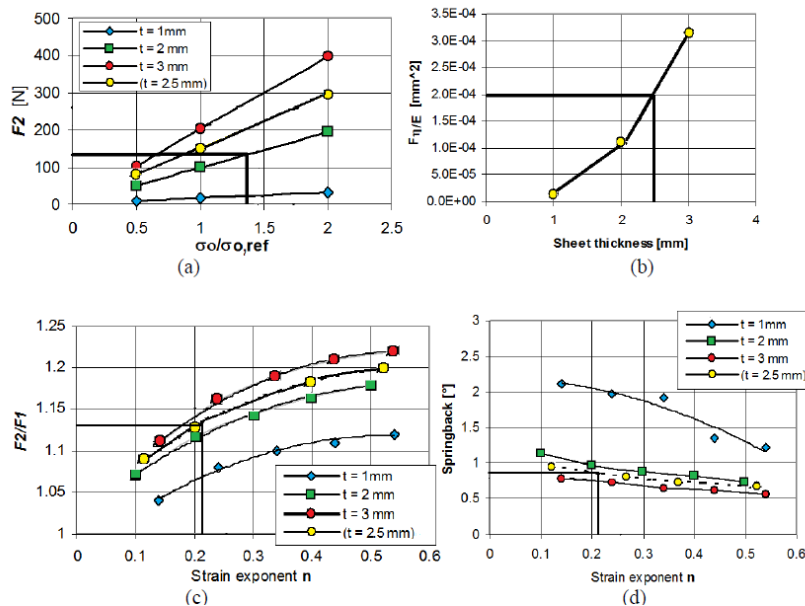


Figura 7.5 - Diferentes resultados para as avaliações realizadas (Longo 2013).

Esta metodologia demonstrou resultados satisfatórios na previsão das características mecânicas dos materiais e do retorno elástico sofrido pela chapa metálica. Devido à simplicidade de aquisição dos dados necessários para esta previsão, é uma metodologia que apresenta vantagens em termos de implementação.

Ambas as metodologias apresentadas anteriormente apresentaram resultados positivos, tendo como base comum, a utilização do diagrama força-deslocamento do punção. Contudo, existe uma dependência em termos de base de dados levando à necessidade de execução de diversos ensaios para diferentes materiais no sentido de serem viáveis para uma vasta gama de resultados.

7.3 Metodologia proposta

No contexto desta dissertação será proposta uma metodologia baseada nos problemas de análise inversa para determinação das propriedades plásticas de materiais utilizados no processo de quingem.

A metodologia proposta será aplicada através da integração de dois programas já referidos ao longo deste trabalho, *Abaqus*® e *Matlab*®. A aplicação do algoritmo criado tem como base uma avaliação virtual no sentido em que os materiais utilizados como referência foram definidos tendo em conta a sua tensão de cedência e um parâmetro pertence à lei de Swift, o coeficiente de encruamento n .

Tal como nas metodologias abordadas anteriormente, os resultados de referência correspondem ao diagrama força-deslocamento do punção. Utilizando os resultados dos materiais definidos e parâmetros iniciais, será efetuada uma otimização em termos dos parâmetros K e n utilizados na lei de Swift.

7.3.1 Definição da função objetivo

A determinação precisa dos parâmetros pertencentes ao modelo constitutivo requer a definição de uma função que calcule o erro entre os dados experimentais e numéricos. Esta função constitui a função objetivo utilizada no método de otimização. A definição desta função é crucial em todos os processos de otimização e para a determinação dos parâmetros em análise (Silva 2012).

Uma função objetivo deve respeitar os seguintes critérios:

- Antes do processo de otimização os dados experimentais devem ser filtrados;
- Todos os pontos experimentais devem ser considerados durante a otimização;
- Em otimizações com múltiplos dados experimentais, todos devem ter a mesma oportunidade para ser otimizados mesmo que o número de pontos disponíveis seja diferente;
- A otimização deve ser realizada sem influência dos parâmetros iniciais utilizados.

Neste método de otimização os dados experimentais-virtuais consistem em diversos pontos, que correspondem aos pontos calculados, originando um diagrama força-deslocamento.

Uma das funções de erro mais utilizadas consiste na soma do erro quadrático, sendo neste caso concreto a soma do erro quadrático da diferença de força entre a curva experimental e numérica (Silva 2012).

Considerando os problemas de otimização por identificação de parâmetros, a função objetivo pode ser definida como:

$$S_{obj} = \sum_{k=1}^{n_{tests}} \sum_{i=1}^{n_{points}} \left(\frac{F_i^{exp} - F_i^{num}}{W_{abs} + W_{rel} F_i^{exp}} \right)^2 \quad (7.2)$$

em que o numerador é a diferença entre o valor da força experimental e a força obtida por simulação numérica para cada um dos pontos de deslocamento. Já W_{abs} e W_{rel} são fatores de ponderação que devem ser ajustados de acordo com o problema em estudo. Esta função objetivo foi utilizada devido à sua simplicidade de implementação e análise. No final do processo de otimização é expectável que o valor do erro tenha um valor próximo de zero, o que significa que os resultados numéricos são praticamente coincidentes com os experimentais. É importante ter em conta que ao longo da otimização poderão existir diferentes combinações de parâmetros que apresentam valores razoáveis, sendo que nestes casos o utilizador deverá avaliar as diferentes soluções considerando o significado dos parâmetros em estudo.

7.3.2 Parametrização

Na metodologia utilizada foram definidos os parâmetros iniciais para que uma primeira avaliação possa ocorrer, permitindo a execução do algoritmo. Tendo em conta os materiais utilizados como referência, os parâmetros de Swift iniciais assumiram um valor intermédio, com $K=750$ e $n=0.35$.

Relativamente à parametrização ocorrida neste processo, esta consiste numa parametrização de duas variáveis, mencionadas anteriormente. É importante referir que o outro parâmetro

utilizado na lei de Swift, extensão inicial (ϵ_0), assumirá um valor de 0.01 para todos os materiais.

7.3.3 Estratégia de otimização

Tal como referido anteriormente a metodologia aplicada baseia-se num algoritmo de otimização que utiliza uma estratégia de otimização singular. Isto significa que os parâmetros iniciais possuem um valor constante, constituindo o ponto de partida da otimização. Desta forma existe uma dependência do algoritmo relativamente a estes.

Do ponto de vista programacional foram utilizadas as seguintes funções de Matlab®:

- *optimset* - Cria uma estrutura com opções de otimização chamada *options*, em que determinadas opções assumem valores específicos.
- *fminsearch* – Utilizada para encontrar o valor ótimo dos parâmetros de ajuste de uma curva aos dados experimentais.
- Função objetivo – Calcula a soma do erro quadrático relativo ao gradiente entre os valores experimentais e numéricos.

Os critérios utilizados para determinar o final da execução do algoritmo foram:

- Se a diferença do somatório do erro quadrático de uma iteração relativamente à anterior for inferior a $SSE < 1 \times 10^{-1}$.
- O número máximo de iterações admissíveis (500) for atingido.

Em cada iteração da função objetivo calculada no Matlab®, realizaram-se dois incrementos correspondentes à análise numérica do modelo alterando apenas um dos parâmetros em cada um desses incrementos.

Para além disto é importante evidenciar a utilização do *Abaqus*® para obtenção dos resultados numéricos. Tal como no desenvolvimento da interface gráfica, a integração dos dois programas permitiu a aplicação da metodologia apresentada (Figura 7.6).

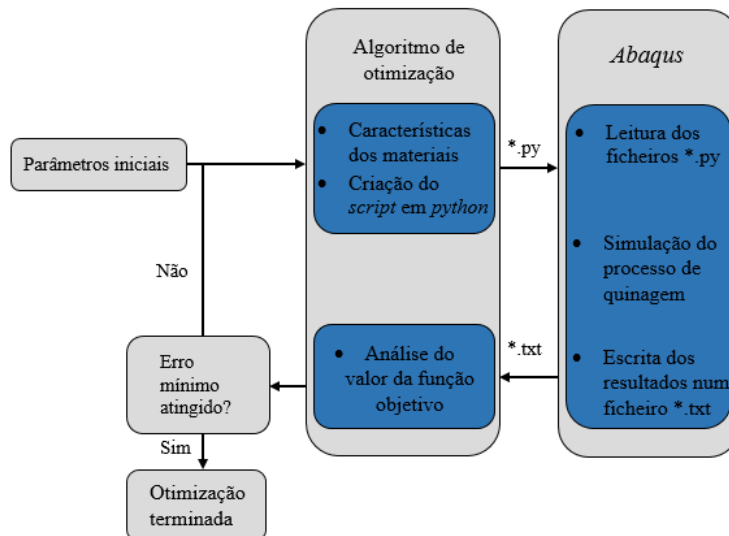


Figura 7.6 - Procedimento de otimização implementado.

7.4 Materiais utilizados

Neste capítulo três materiais pertencentes à classe dos aços serão caracterizados como referência na aplicação da metodologia proposta. Estes materiais apresentam comportamento plástico definido pela tensão de cedência e pela lei de encruamento proposta por Swift:

$$\sigma = K(\varepsilon + \varepsilon_0)^n \quad (7.3)$$

O comportamento elástico é considerado isotrópico com um módulo de Young e coeficiente de Poisson, assumindo valores típicos para aços, Tabela 7.2. Os parâmetros de Swift para os diferentes materiais podem ser observados na Tabela 7.3.

Atribuíram-se diferentes valores de tensão de cedência e coeficiente de encruamento, e foi assumido um valor constante para o parâmetro ε_0 . Devido às combinações entre os diferentes parâmetros adotou-se uma designação para cada um dos materiais: “Aco_XXX_YY”, em que “XXX” representa o valor da tensão de cedência e “YY” é o valor do coeficiente de encruamento.

Tabela 7.2 - Propriedades mecânicas dos materiais.

Propriedades	Aco_200_02	Aco_200_05	Aco_600_02	Aco_200_005
E [GPa]	210	210	210	210
v	0.3	0.3	0.3	0.3

Tabela 7.3 - Parâmetros de Swift para os aços analisados.

Propriedades	Aco_200_02	Aco_200_05	Aco_600_02	Aco_200_005
σ_0 [Mpa]	200	200	600	200
n	0.2	0.5	0.2	0.05
ε_0	0.01	0.01	0.01	0.01

Para uma melhor percepção do comportamento dos materiais em estudo, apresentam-se as curvas tensão-extensão caracterizadas pela lei de Swift, fazendo uso dos parâmetros anteriormente referidos, Figura 7.7.

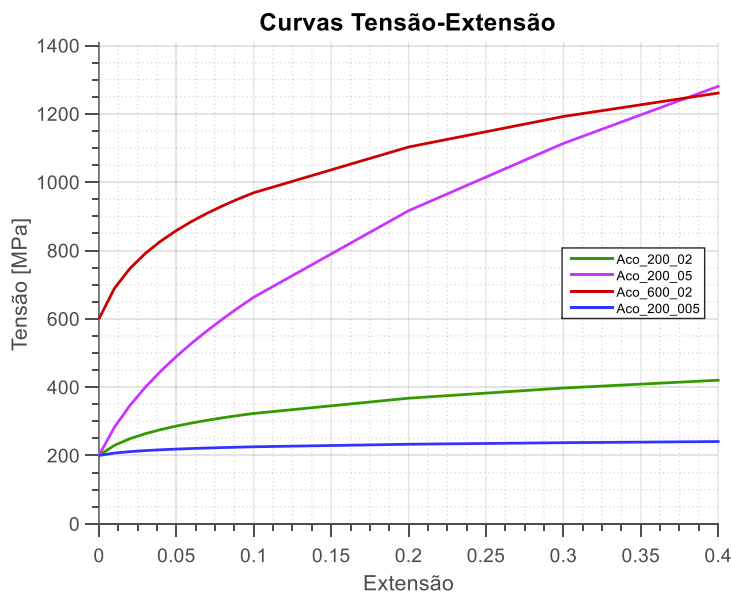


Figura 7.7 - Comportamento mecânico dos materiais.

7.5 Análise de sensibilidades

A análise de sensibilidade dos parâmetros utilizados para a definição do modelo de simulação numérica tem um papel importante na compreensão e aperfeiçoamento deste mesmo modelo, com o objetivo de melhorar os resultados obtidos. Em seguida apresenta-se um estudo da sensibilidade da discretização da malha utilizada para a definição da chapa metálica.

Após a realização dos primeiros testes do algoritmo de otimização utilizando o modelo numérico com análise explícita verificou-se que a curva força-deslocamento obtida apresentava grande dispersidade, dificultando o cálculo de otimização. Para contornar este problema, procedeu-se à alteração do tipo de análise passando a utilizar-se o *Abaqus/Standard* para este efeito. O computador utilizado nas análises possui um processador Intel® Core™ i5-4210U a 1.7 GHz com 6 GB de RAM.

Na Figura 7.8, Figura 7.9 e Figura 7.10 observa-se a configuração da malha utilizada nesta análise também como os resultados obtidos com esta.

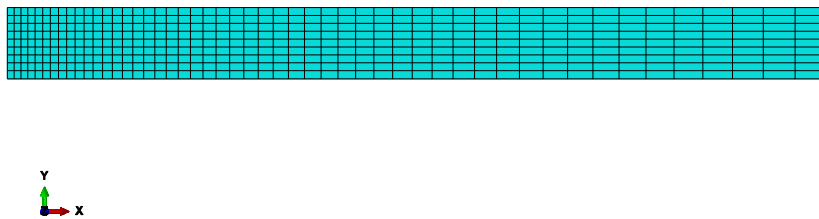


Figura 7.8 - Discretização da primeira malha utilizada no processo de otimização.

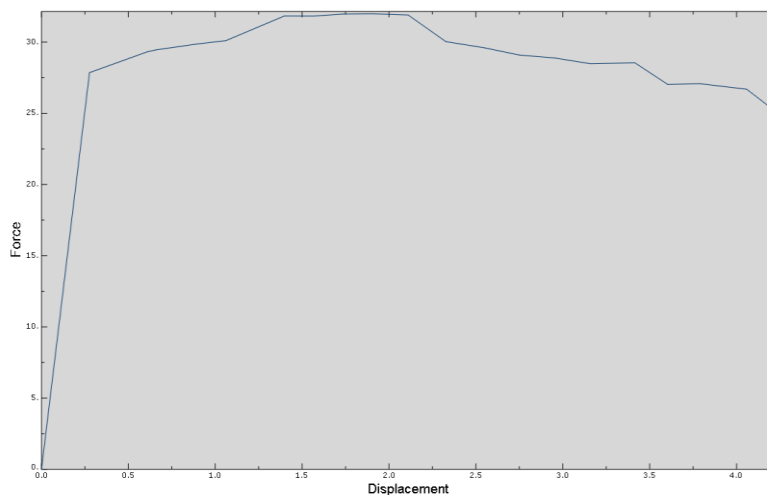


Figura 7.9 - Curva força-deslocamento para a primeira malha, utilizando o *Abaqus/Explicit*.

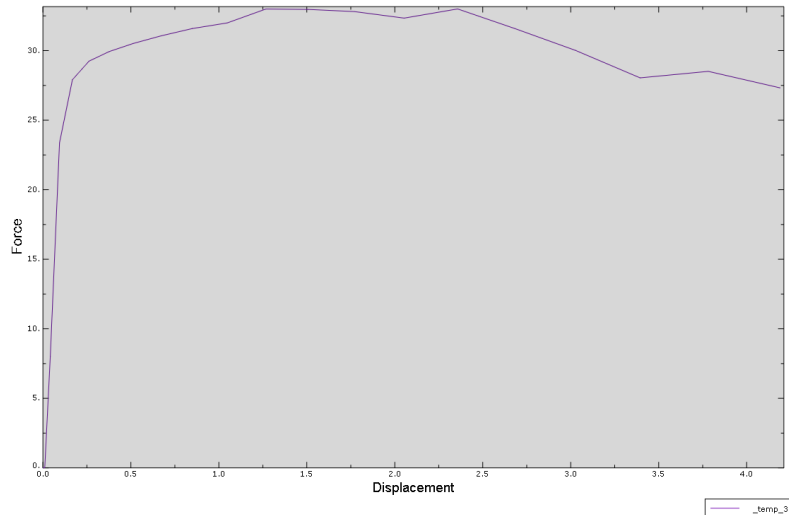


Figura 7.10 - Curva força-deslocamento para a primeira malha, utilizando o Abaqus/Standard.

Esta análise permitiu concluir que os resultados obtidos através de uma análise implícita (*Abaqus/Standard*) permitem a obtenção de uma curva força-deslocamento que apresenta uma fase inicial mais linear e que apesar das oscilações observadas é mais regular em termos de oscilações.

Contudo os resultados obtidos continuam a não produzir a suavidade desejada para uma execução mais eficiente do algoritmo. Por esse motivo analisaram-se duas configurações de malha adicionais.

A segunda malha analisada tem a particularidade de possuir uma discretização mais detalhada considerando as interações com as ferramentas Figura 7.11. O número de elementos utilizados não sofreu alterações, permitindo manter tempos de análise em conformidade com a discretização inicial.

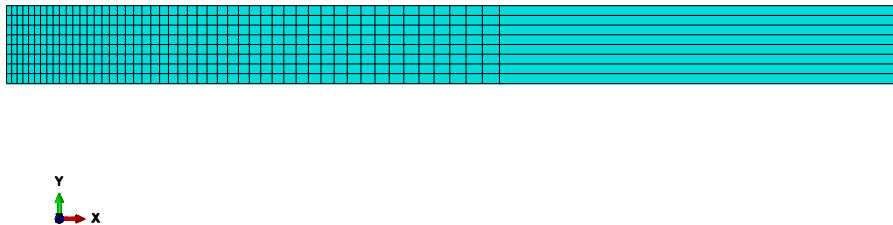


Figura 7.11 - Discretização da segunda malha utilizada no processo de otimização.

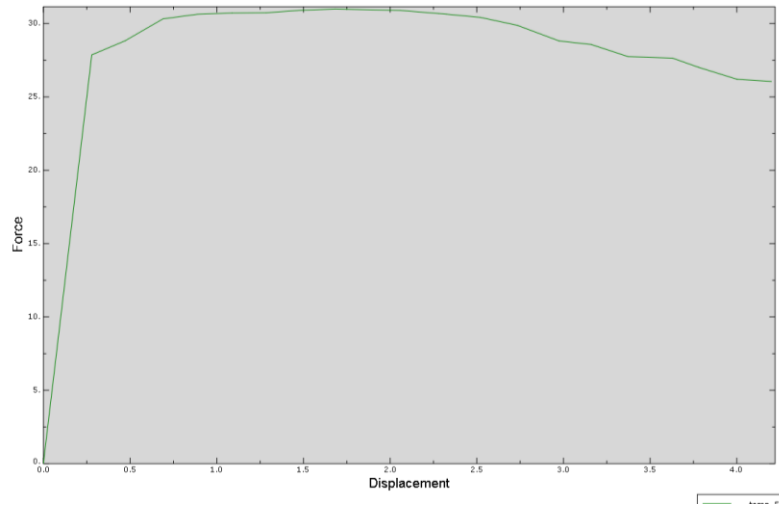


Figura 7.12 - Curva força-deslocamento para a segunda malha, utilizando o *Abaqus/Standard*.

Esta análise permitiu concluir que os resultados obtidos com o refinamento da malha permitem a obtenção de uma curva força-deslocamento que apresenta uma fase inicial mais linear e um comportamento “suave” ao longo do seu domínio, Figura 7.12. Este resultado constitui uma melhoria significativa relativamente à malha anterior.

A terceira malha analisada tem a particularidade de possuir uma discretização mais detalhada nas zonas de contacto da chapa com as ferramentas, Figura 7.13. Novamente o número de elementos utilizados não sofreu alterações, mantendo as condições de análise.

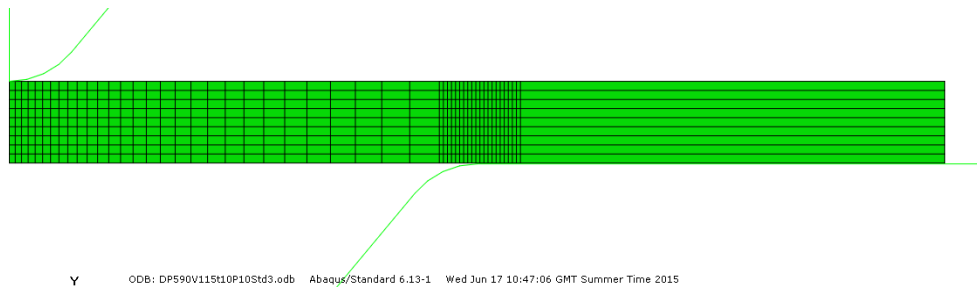


Figura 7.13 - Discretização da terceira malha utilizada no processo de otimização.

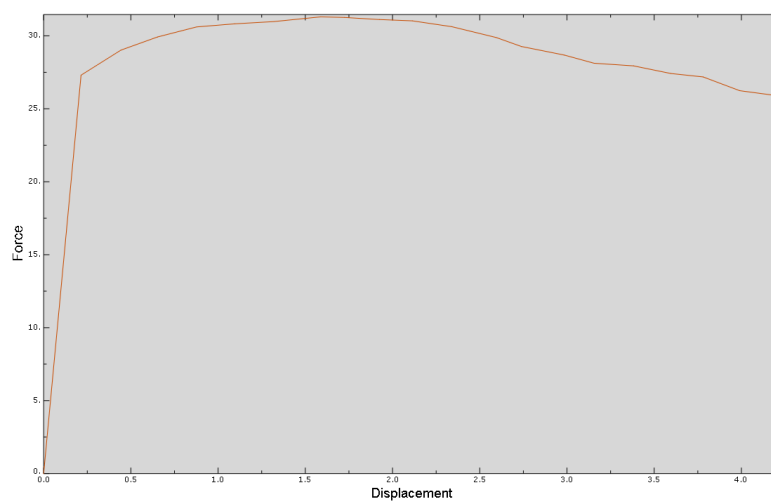


Figura 7.14 - Curva força-deslocamento para a terceira malha, utilizando o *Abaqus/Standard*.

Esta análise permitiu concluir que esta configuração permite a obtenção de uma curva força-deslocamento bastante regular ao longo do seu domínio, Figura 7.14. Para além disto, o tempo de processamento não sofreu alterações significativas devido à discretização localizada.

A comparação entre as diversas malhas analisadas permite concluir que a malha com refinamento localizado apresenta os melhores resultados. Desta forma será esta a configuração utilizada no modelo numérico associado ao algoritmo de otimização.

Conclui-se também que os tempos de processamento utilizando análise explícita e implícita são consideravelmente diferentes. Este é um fator crítico pois permite aumentar a eficiência do algoritmo de otimização. Os tempos de processamento podem ser observados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Tempos de cálculo para diferentes tipos de análise e malhas.

	Tempo total de CPU (segundos)			
	Explicit Malha 1	Standard Malha 1	Standard Malha 2	Standard Malha 3
Aco_200_02	91.7	16.0	20.2	25.9
Aco_200_05	92.5	14.8	10.6	24.1
Aco_200_005	96.1	26.3	21.7	32.8
Aco_600_02	92.0	10.7	11.5	18.6

7.6 Resultados do algoritmo de otimização

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia proposta. Na aplicação do processo foi utilizada uma geometria específica, relativamente a abertura da matriz, raio do punção e espessura da chapa metálica. A Tabela 7.5 apresenta os detalhes geométricos do modelo numérico utilizados no processo de otimização.

Tabela 7.5 - Parâmetros geométricos do caso analisado.

Abertura da matriz (mm)	11.53
Raio do punção (mm)	1
Espessura da chapa metálica (mm)	1

7.6.1 Aco_200_02

Na Figura 7.15 e Figura 7.16 ilustra-se a comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução em termos de força-deslocamento e tensão-extensão do Aco_200_02.

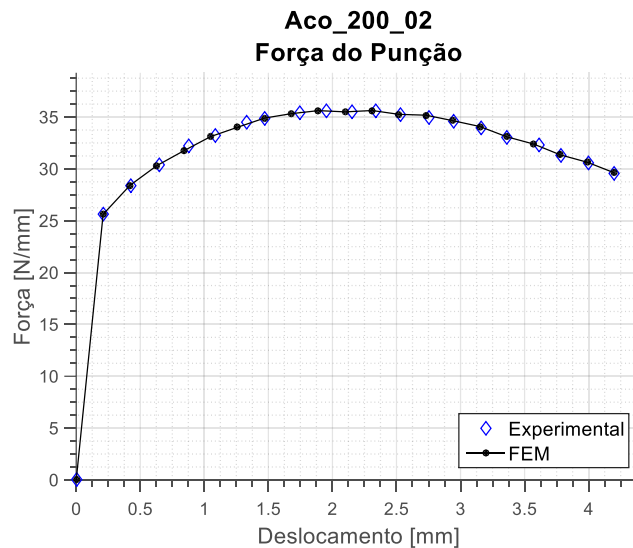


Figura 7.15 – Evolução da curva força-deslocamento para o aço 200_02 obtido pela metodologia de otimização.

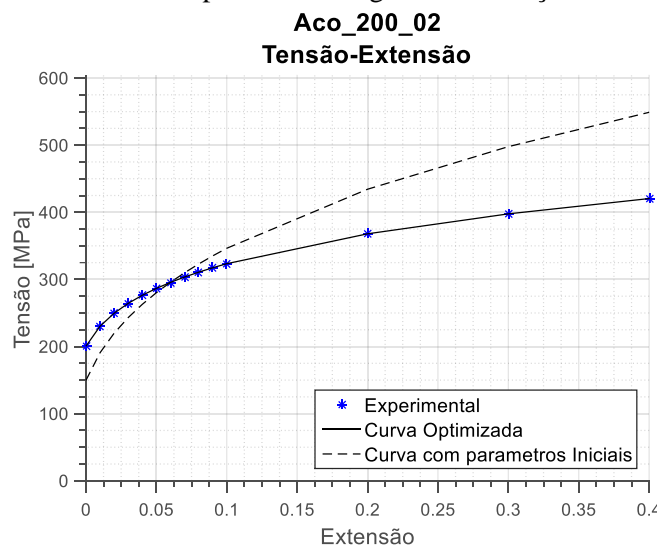


Figura 7.16 - Curva tensão-extensão obtida para o aço 200-02, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.

Conclui-se que o algoritmo de otimização apresenta resultados bastante satisfatórios em termos da descrição das curvas força-deslocamento e tensão-extensão. Observa-se que os valores calculados são muito próximos dos utilizados para descrever o material experimental, recriando com precisão adequado as curvas experimentais do aço estudado.

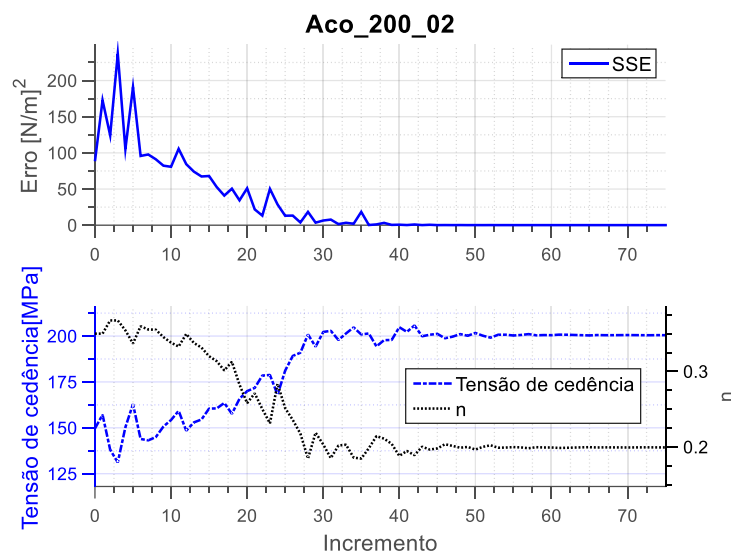


Figura 7.17 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 200_02.

Na Figura 7.17 pode observar-se a evolução da soma do erro quadrático e também a evolução do valor da tensão cedência e do parâmetro pertencente à lei de Swift. Pode concluir-se que os resultados obtidos são satisfatórios e que os valores obtidos para os parâmetros em estudo se aproximam dos valores do material em estudo. Ao longo dos primeiros 25 incrementos observou-se um comportamento irregular dos parâmetros e do erro, devido aos ajustes necessários do algoritmo de otimização. Observa-se também que a partir do incremento 50, aproximadamente, existe uma estabilização dos valores e que o erro é aproximadamente zero.

7.6.2 Aço_200_05

Na Figura 7.18 e Figura 7.19 ilustra-se a comparação entre os resultados experimentais e de otimização da evolução em termos de força-deslocamento e tensão-extensão do Aço_200_05.

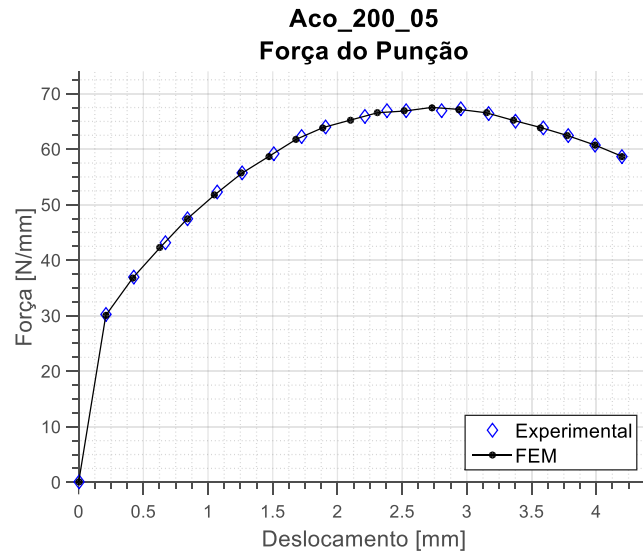


Figura 7.18 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço 200_05 obtido pela metodologia de otimização.

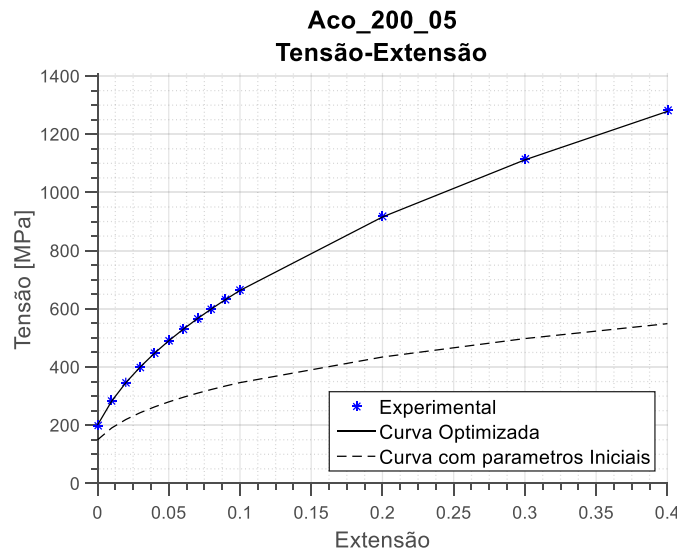


Figura 7.19 - Curva tensão-extensão obtida para o aço 200_05, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.

Conclui-se que o algoritmo de otimização apresenta resultados bastante satisfatórios em termos da descrição das curvas força-deslocamento e tensão-extensão. Observa-se que os valores calculados são muito próximos dos utilizados para descrever o material experimental, recriando com precisão adequado as curvas experimentais do aço estudado.

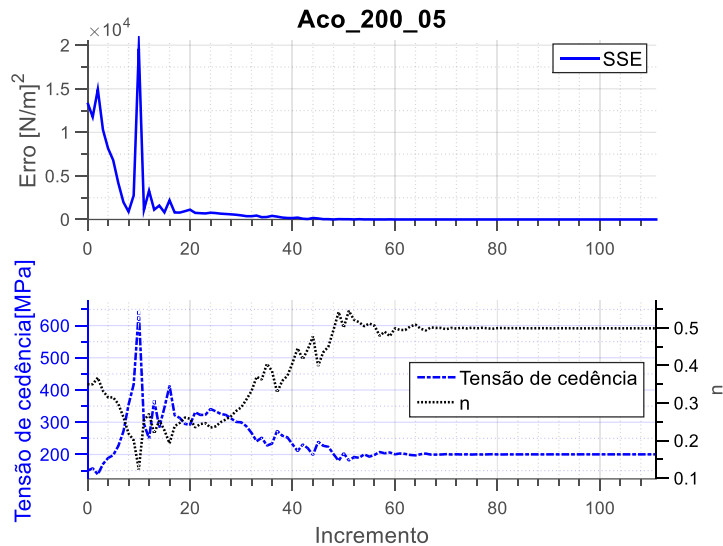


Figura 7.20 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 200_05.

Na Figura 7.20 pode observar-se a evolução da soma do erro quadrático e do valor da tensão cedência e do parâmetro pertencente à lei de Swift. Pode concluir-se que os resultados obtidos são satisfatórios e que os valores obtidos para os parâmetros em estudo se aproximam dos valores do material em estudo. Nos primeiros 16 incrementos observa-se um comportamento irregular dos parâmetros e do erro, devido ao ajustamento dos parâmetros utilizados no algoritmo de otimização. Observa-se também que a partir do incremento 60 os valores dos parâmetros convergem para o seu valor final e o erro é aproximadamente nulo.

7.6.3 Aco_200_005

Na Figura 7.21 e Figura 7.22 ilustra-se a comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução em termos de força-deslocamento e tensão-extensão do Aco_200_005.

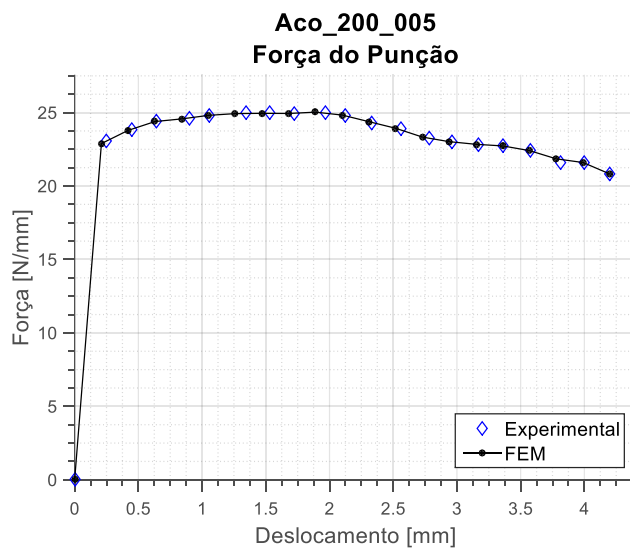


Figura 7.21 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço 200_005 obtido pela metodologia de otimização.

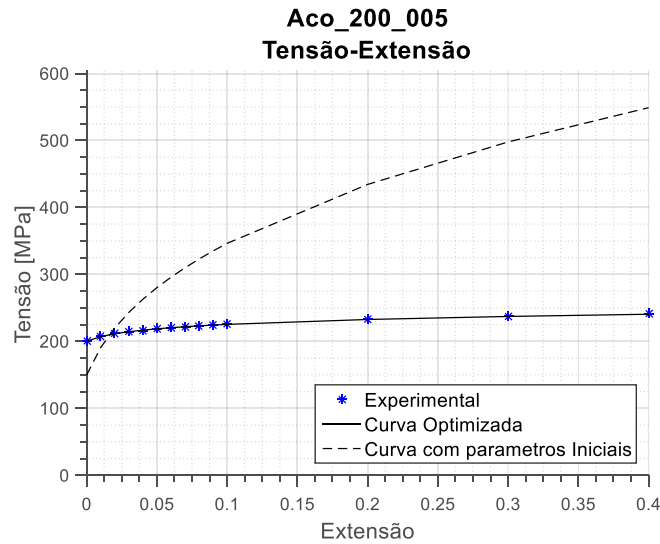


Figura 7.22 - Curva tensão-extensão obtida para o aço 200-005, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.

Conclui-se que o algoritmo de otimização apresenta resultados bastante satisfatórios em termos da descrição das curvas força-deslocamento e tensão-extensão. Observa-se que os valores calculados são muito próximos dos utilizados para descrever o material experimental, recriando com precisão adequada as curvas experimentais do aço estudado.

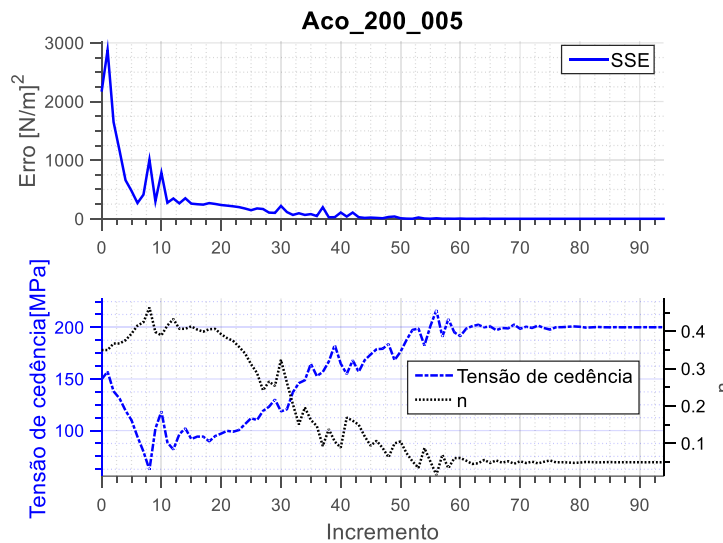


Figura 7.23 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 200_005.

Na Figura 7.23 pode observar-se a evolução da soma do erro quadrático e também a evolução do valor da tensão cedência e do parâmetro pertencente à lei de Swift. Pode concluir-se que os resultados obtidos são satisfatórios e que os valores obtidos para os parâmetros em estudo se aproximam dos valores do material em estudo. Nos primeiros 20 incrementos observou-se um comportamento irregular dos parâmetros e do erro, devido aos ajustes necessários do algoritmo de otimização. Observa-se também que a partir do incremento 60, aproximadamente, existe uma estabilização dos valores e que o erro é aproximadamente zero.

7.6.4 Aco_600_02

Na Figura 7.24 e Figura 7.25 ilustra-se a comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução em termos de força-deslocamento e tensão-extensão do Aco_600_02.

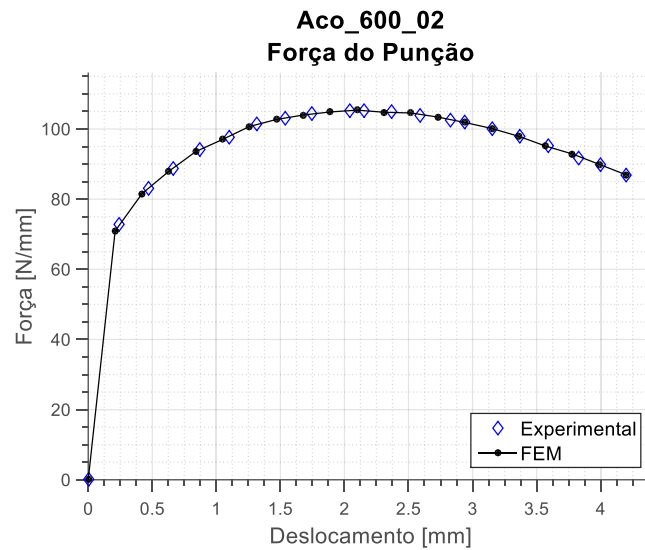


Figura 7.24 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço 600_02 obtido pela metodologia de otimização.

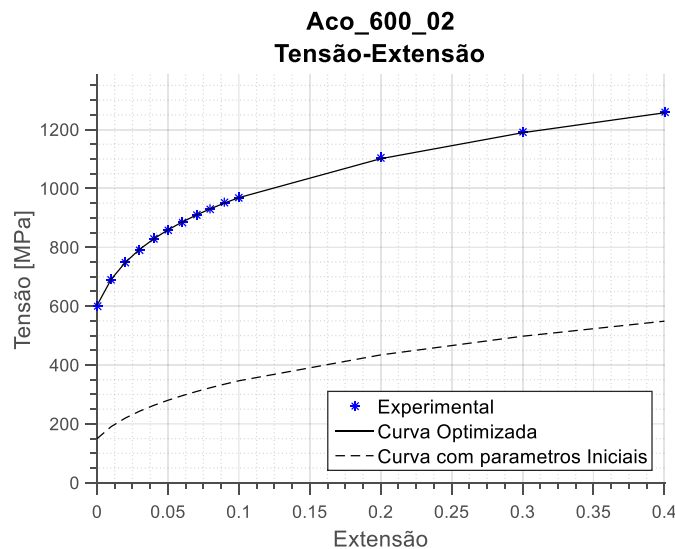


Figura 7.25 - Curva tensão-extensão para o aço 600-02, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização..

Pode-se concluir que o algoritmo de otimização apresenta resultados bastante satisfatórios em termos da descrição das curvas força-deslocamento e tensão-extensão. Observa-se que os valores calculados são muito próximos dos utilizados para descrever o material experimental, recriando com precisão adequado as curvas experimentais do aço estudado.

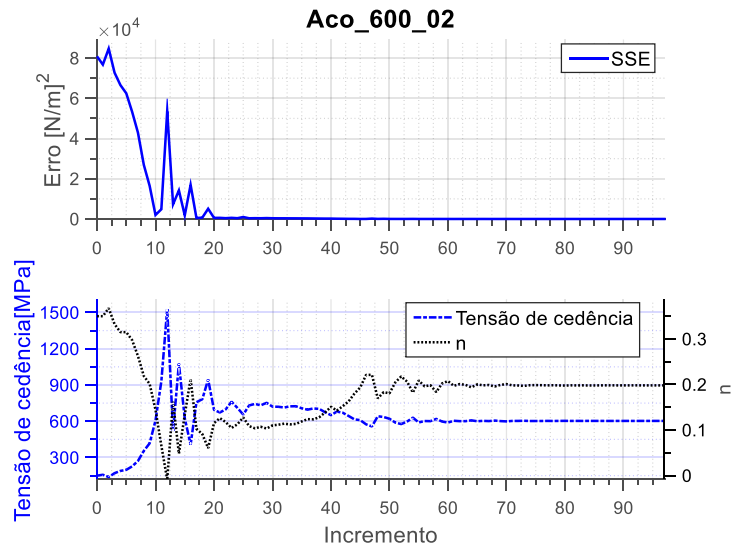


Figura 7.26 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço 600_02.

Na Figura 7.26 pode observar-se a evolução da soma do erro quadrático e também a evolução do valor da tensão cedência e do parâmetro pertencente à lei de Swift. Pode concluir-se que os resultados obtidos são satisfatórios e que os valores obtidos para os parâmetros em estudo se aproximam dos valores do material em estudo. Durante as primeiros 20 incrementos observou-se um comportamento irregular dos parâmetros e do erro, devido aos ajustes necessários do algoritmo de otimização. Observa-se também que a partir do incremento 55, aproximadamente, existe uma estabilização dos valores e que o erro é aproximadamente zero. Apesar de o valor da soma do erro tender para o seu valor mínimo num baixo número de incrementos, o algoritmo necessitou realizar muitas iterações para estabilizar o seu valor.

7.7 Validação experimental

O artigo científico referido na secção 7.2.1, publicado por R. J. Mentink, contém dados experimentais relativamente ao diagrama força-deslocamento obtido através do ensaio experimental realizado para o aço St37 (Figura 7.27).

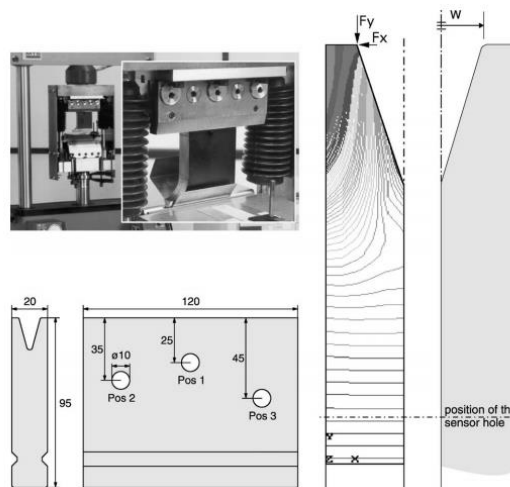


Figura 7.27 - Condições experimentais (*set-up*) para obtenção do diagrama força-deslocamento (Mentink 2003).

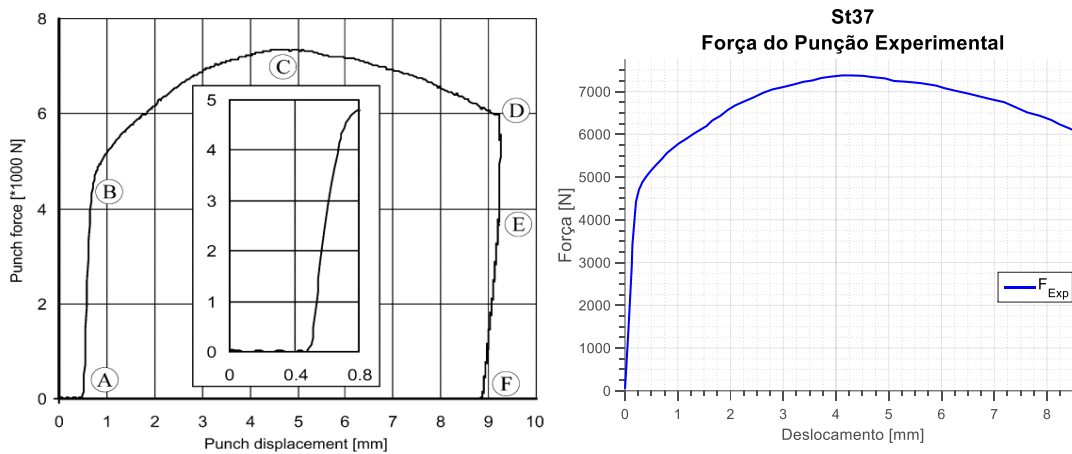


Figura 7.28 - Diagrama força-deslocamento experimental e extrapolado, obtidos a partir da literatura (Mentink 2003).

Através da ferramenta GRABIT, desenvolvida para o Matlab® por J. Doke, extrapolaram-se os pontos do diagrama disponível, Figura 7.28. É importante referir a necessidade de remoção do ruído na fase inicial da curva experimental. Os pontos resultantes encontram-se disponíveis no anexo A.

Os dados relativos à geometria da ferramentas e da chapa metálica, e propriedades do material, podem ser observados na Tabela 7.6 e Tabela 7.7.

Tabela 7.6 - Parâmetros do caso experimental.

Abertura da matriz (mm)	23.06
Raio do punção (mm)	2
Espessura da chapa metálica (mm)	1.95
Comprimento de quinagem (mm)	90
Coefficiente de atrito	0.158

Tabela 7.7 - Propriedades do material St37.

Propriedades	E [GPa]	Coefficiente de Poisson ν	Densidade $\rho [kg/m^3]$	K	ϵ_0	n
St37	210	0.3	7800	615	0.01	0.204

Contudo, dado que o comprimento de quinagem corresponde a 90 mm, foi necessário calcular o valor da força do punção por unidade de comprimento, dado que a simulação numérica considera comprimento unitário. Desta conversão resulta o diagrama força-deslocamento compatível com o modelo numérico utilizado, apresentado na Figura 7.29.

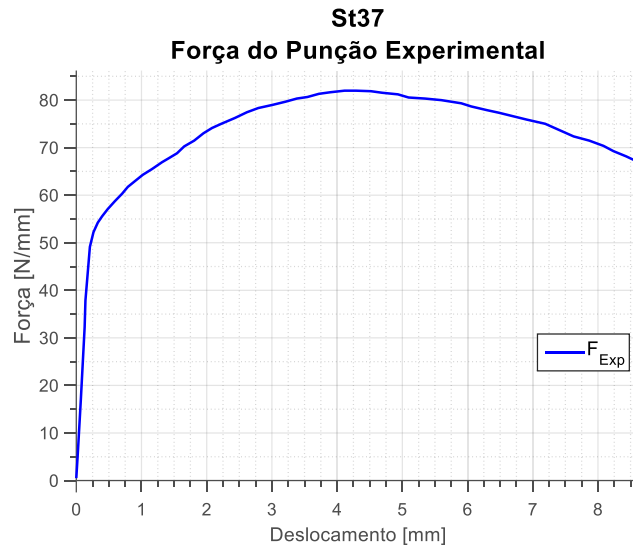


Figura 7.29 - Diagrama força-deslocamento experimental por unidade de comprimento.

Após a recolha de todos os dados necessários procedeu-se ao início do processo de otimização.

7.7.1 Resultados obtidos

Na Figura 7.30 e Figura 7.31 ilustra-se a comparação entre os resultados experimentais e numéricos da evolução em termos de força-deslocamento e tensão-extensão do Aço St37.

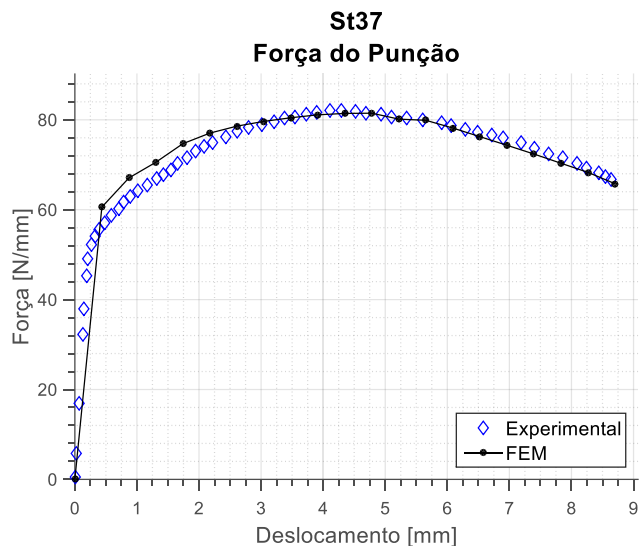


Figura 7.30 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço St37 obtido pela metodologia de otimização.

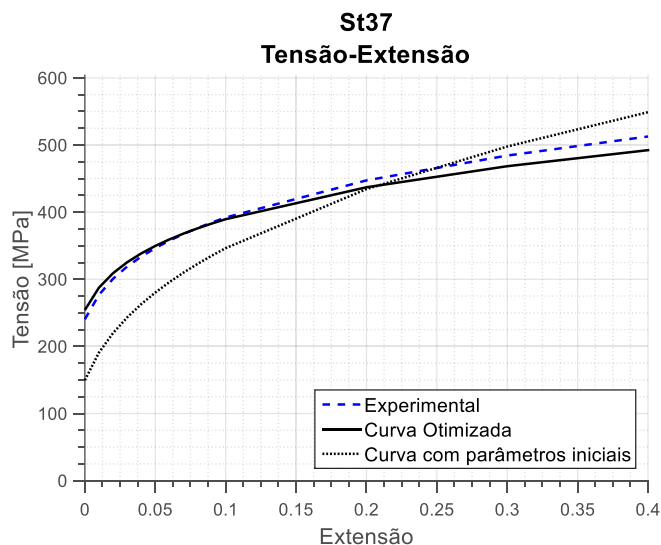


Figura 7.31 - Curva tensão-extensão para o aço St37, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.

Conclui-se que o algoritmo de otimização apresenta resultados aproximados em termos da descrição das curvas força-deslocamento e tensão-extensão. Observa-se que os valores calculados, $K=577.1$ e $n=0.178$, apresentam alguma discrepância relativamente aos utilizados para descrever o material experimental ($K=615$ e $n=0.204$), sendo próximos, no entanto, das curvas experimentais do aço estudado.

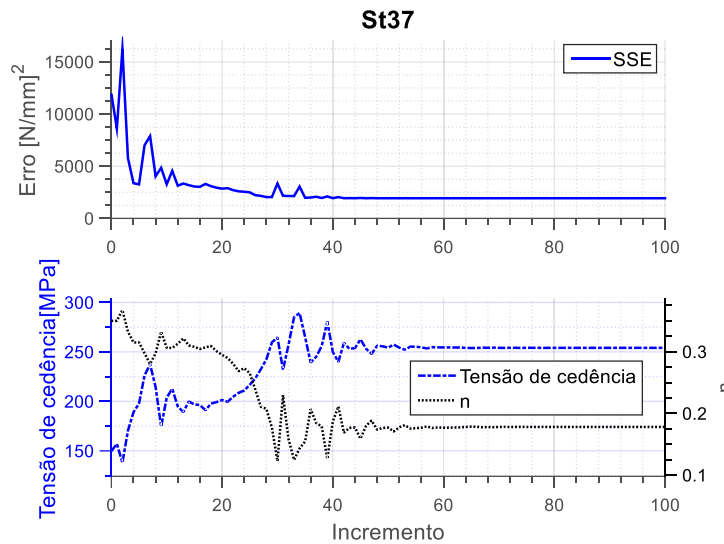


Figura 7.32 - Evolução da soma do erro quadrático, tensão de cedência e coeficiente de encruamento para o aço St37.

Na Figura 7.32 pode observar-se a evolução da soma do erro quadrático e também a evolução do valor da tensão cedência e do parâmetro pertencente à lei de Swift. Pode concluir-se que os resultados obtidos são satisfatórios e que os valores obtidos para os parâmetros em estudo se aproximam dos valores do material em estudo. Ao longo dos primeiros 30 incrementos observou-se um comportamento irregular dos parâmetros e do erro, devido aos ajustes necessários do algoritmo de otimização. Observa-se também que, a partir do incremento 50 existe uma estabilização dos valores e que o erro é, aproximadamente, zero.

Como se deprende através dos resultados demonstrados, o modelo geométrico não se encontra adaptado aos dados experimentais definidos na literatura. A extrapolação dos pontos experimentais permitiu a definição de uma curva aproximada, mas sem o rigor necessário para uma avaliação mais precisa do método utilizado. A observação da Figura 7.2, permite constatar que até para o método referido na literatura existiu a necessidade de adaptação do modelo numérico.

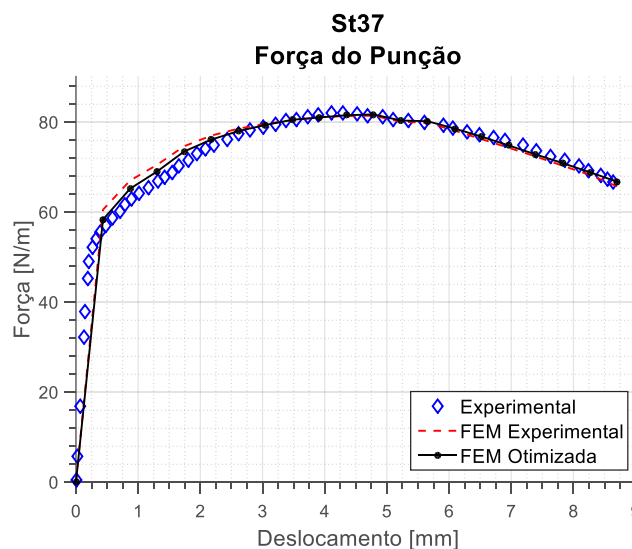


Figura 7.33 - Comparação das curvas força-deslocamento para diferentes situações de teste, para o aço St37.

Na Figura 7.33, observa-se a comparação entre os resultados experimentais, numéricos e os obtidos pelo algoritmo de otimização, observando que, com estas condições de teste, nunca iríamos obter os resultados pretendidos. É importante referir que a própria caracterização plástica do aço St37 poderá ter condicionado os resultados obtidos com o algoritmo de otimização.

Para comprovar este facto, definiram-se as propriedades do material no modelo numérico, obtendo-se o diagrama força-deslocamento correspondente. Em seguida, aplicou-se o algoritmo de otimização, resultando na Figura 7.35 e Figura 7.34.

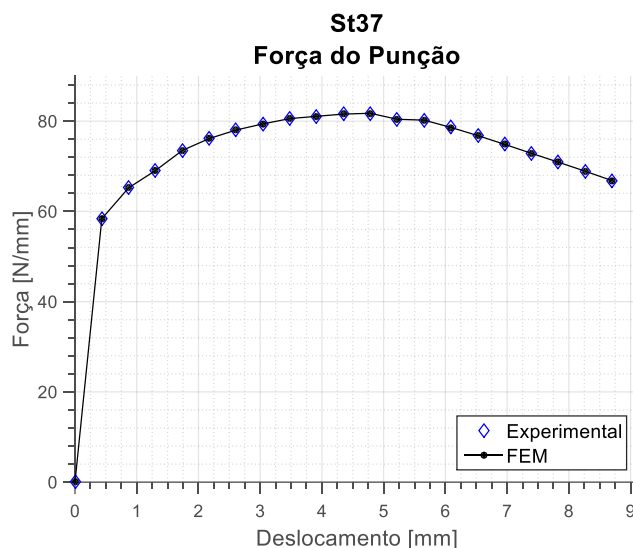


Figura 7.35 - Evolução da curva força-deslocamento para o aço St37 obtido pela metodologia de otimização.

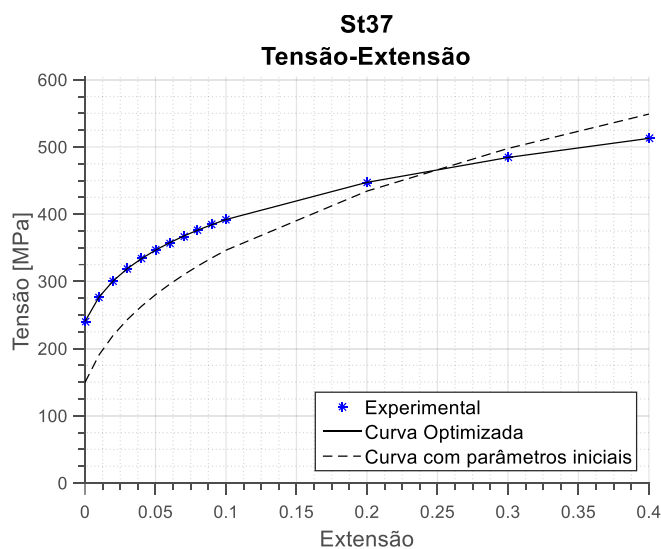


Figura 7.34 - Curva tensão-extensão para o aço St37, com base nos resultados de caracterização do material obtidos pela metodologia de otimização.

Com base nestes resultados, confirma-se que o nível de adaptação às condições experimentais influencia os parâmetros obtidos através do algoritmo de otimização, atestando a capacidade deste método para a obtenção de uma solução aproximada.

Finalmente, conclui-se que é necessária uma maior proximidade aos resultados experimentais, de modo a dispormos de um maior controlo sobre os resultados e modelo a utilizar.

7.7 Discussão dos resultados

Na Tabela 7.8 pode observar-se uma perspectiva dos resultados obtidos para os diferentes aços.

Tabela 7.8 - Resultados obtidos para o algoritmo de otimização utilizado, para os diferentes materiais.

Variáveis	Aco_200_02	Aco_200_05	Aco_200_005	Aco_600_02
Iterações	37	55	47	48
Incrementos	75	111	94	97
Erro mínimo $[N/m]^2$	0.109	0.361	0.072	0.450
K_{FEM}	502.19	1994.95	251.43	1499.80
n_{FEM}	0.1994	0.4990	0.0495	0.1980
σ_{FEM}^0	200.48	200.42	200.18	602.61

Os resultados obtidos através da metodologia implementada são bastante satisfatórios. Os parâmetros calculados pelo algoritmo de otimização apresentam valores muito próximos dos parâmetros experimentais apresentando um erro praticamente nulo. É possível concluir que os parâmetros iniciais do algoritmo influenciam o número de incrementos necessários existindo uma dependência relativamente a estes, como seria expetável. Pode também concluir-se que apesar da dependência referida, a convergência dos parâmetros é bastante similar em termos do número de incrementos necessário para os casos estudados.

Relativamente à validação experimental, conclui-se que os resultados obtidos foram aproximados, revelando precisão adequada tendo em consideração as condições disponíveis, Tabela 7.9.

Tabela 7.9 - Resultados obtidos para o algoritmo de otimização utilizado, para o aço St37.

Variáveis	Aço St37	
	Otimização	Experimental
Iterações	34	-
Incrementos	68	-
Erro mínimo $[N/m]^2$	0.001	-
K_{FEM}	577.09	615
n_{FEM}	0.178	0.204
σ_{FEM}^0 [MPa]	254.12	240.4

Adicionalmente realizaram-se testes com diferentes parâmetros iniciais, para verificar os valores obtidos no final do processo de otimização, tendo como referência os resultados do modelo numérico para o aço St37, em que $K=615$ e $n=0.204$, Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Evolução da otimização para diferentes parâmetros iniciais.

Variáveis	Aço St37	
	Teste 1	Teste 2
K_{FEM}^0	750	150
n_{FEM}^0	0.35	0.1
Iterações	34	60
Incrementos	68	120
Erro mínimo [N/m] ²	0.001	0.001
K_{FEM}^f	615.04	615.05
n_{FEM}^f	0.204	0.204
σ_{FEM}^0	240.38	240.38

A observação dos valores obtidos leva a concluir que, independentemente dos parâmetros iniciais, o algoritmo de otimização consegue atingir a solução pretendida, necessitando de um maior número de incrementos quanto mais afastados estiverem os parâmetros iniciais dos finais.

Por fim, conclui-se que a metodologia proposta permite a previsão do comportamento plástico dos materiais, apresentando bons resultados para os diferentes materiais estudados, necessitando de uma validação experimental que permita um maior controlo destes resultados.

8 Considerações finais

A indústria da conformação plástica de chapas metálicas tem beneficiado da utilização de ferramentas numéricas, possibilitando a previsão, com precisão congruente, de defeitos nas peças produzidas, permitindo solucionar os problemas detetados, com o intuito de obter componentes em conformidade com os objetivos definidos.

No entanto, é notório o crescente rigor e complexidade de novas geometrias, para além da utilização de novos materiais com propriedades distintas, constituindo novos desafios que tornam a simulação numérica uma ferramenta indispensável nesta indústria.

Na presente dissertação o método dos elementos finitos, foi utilizado na simulação do processo de quinagem, possibilitando a previsão de parâmetros do processo e, assim, encontrar a solução adequada para determinados casos de quinagem. A par disto, a integração dos resultados obtidos numa interface gráfica demonstrou a sua utilidade em termos de eficiência e aplicabilidade na prática, simplificando a execução e leitura dos parâmetros do processo.

8.1 Conclusão

Nesta dissertação desenvolveram-se ferramentas para automatizar os processos de introdução de dados e aquisição de resultados, através de *scripts* em *Abaqus*® e *Matlab*®.

Neste estudo utilizaram-se materiais pertencentes às classes dos aços e ligas de alumínio, procedendo-se à sua caracterização a partir de leis constitutivas.

Recorrendo a um diagrama Vt , que relaciona a abertura da matriz com a espessura da chapa metálica, foi possível visualizar os limites ótimos de quinabilidade, permitindo diferenciar as zonas com maior tendência para a ocorrência de esmagamento localizado da chapa, e as zonas em que se verifica maior flexão.

A análise das forças de quinagem através de métodos analíticos, por comparação com os resultados numéricos permitiu definir a expressão DIN 6935 como a que melhor prevê a força máxima ocorrida durante o processo de quinagem.

Apresentou-se uma metodologia para a definição mais precisa da área de contacto entre punção e chapa metálica, com a finalidade de caracterizar, com maior rigor, a pressão de contacto do punção.

Realizou-se um estudo da expressão analítica para o deslocamento do punção proposta por José Bessa Pacheco, comparando os resultados obtidos utilizando um raio natural de valor constante e um raio natural que depende das propriedades do material. Estudaram-se também diferentes expressões analíticas para a definição do deslocamento do punção com o ângulo de

quinagem. Propuseram-se alterações no parâmetro de cálculo do raio natural para adequação da sua utilização em ligas de alumínio.

Também se realizou um estudo acerca do retorno elástico, tendo sido comparados os resultados para diferentes aberturas de matriz, espessuras e materiais. Esta análise permitiu compreender a influência entre estas diferentes variáveis.

Foi desenvolvida uma interface gráfica para análise dos resultados de quinagem através da integração do Matlab® com o Abaqus®. Nesta ferramenta implementou-se a possibilidade de introdução de dados para os diferentes parâmetros de quinagem disponíveis e aquisição dos respetivos resultados. Com isto pretendeu-se aumentar a eficiência e facilidade da obtenção e análise dos resultados.

Por fim, com base no processo de quinagem foi implementado um algoritmo de otimização, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas dos materiais por análise inversa utilizando o diagrama força-deslocamento. Efetuou-se uma análise de sensibilidades permitindo definir a discretização adequada para a execução do algoritmo. Adicionalmente, definiram-se três materiais com propriedades mecânicas distintas para a verificação da metodologia proposta cujos resultados mostraram as virtualidades de eficiência e possibilidade de aplicação prática.

8.2 Trabalhos futuros

De entre as perspetivas de trabalhos futuros podemos considerar as seguintes:

- Implementação nos *scripts* desenvolvidos do conceito de pressão de contacto para uma previsão mais rigorosa deste parâmetro;
- Expansão dos campos de análise, considerando diferentes materiais, como o magnésio e outras ligas de alumínio;
- Aperfeiçoamento da interface gráfica desenvolvida, integrando, por exemplo, a análise com base em redes neuronais;
- Validação do algoritmo de otimização utilizando uma quinadora ou um processo de quinagem.

Referências

[Abedabbro 2006] N. Abedabbro, F. Pourboghrat e J. Carsley (2006), "Forming of AA5182-O and AA5754-O at elevated temperatures using coupled thermo-mechanical finite element models", *International Journal of Plasticity* no. 23: 841–875

[Adira 2015] <http://www.adira.pt>, acessado em Maio de 2015.

[Alves 2003] J. L. Alves (2003), *Simulação numérica do processo de estampagem de chapas metélicas*, Tese de doutoramento, Universidade do Minho.

[Antoniou 2007] A. Antoniou, W. Lu (2007) *Practical Optimization – Algorithms and engineering applications*, Springer-Verlag.

[Bastardo 2013] P. V. Bastardo (2013) *Previsão de comportamentos típicos e análise do processo de quinagem pelo método dos elementos finitos*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[Costa 2008] A. F. Costa (2008), *Desenvolvimento e validação de um sistema inovador de compensação de deformação numa quinadora*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[De Vin 1994] L. J. De Vin (1994), *Computer Aided process Planing for the Bending of Sheet Metal Components*, Tese de Doutoramento, Universidade de Twente (NL).

[DIN6935 1975] D. Deutsche Normen (1975), 'Cold bending of flat steel product, din 6935'.

[Diegel 2002] O. Diegel (2002), *The final art of Sheet Metal Bending*, Complete Design Services.

[efunda 2015] http://www.efunda.com/processes/metal_processing/bending.cfm, acessido em Abril de 2015.

[Fonseca 2011] P. F. Fonseca (2011), *Desenvolvimento de um sistema de medição do ângulo de quingem*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[Garcia 2007] M. L. Garcia, J. Ciurana e I. Ferrer (2007), 'Springback determination of sheet metals in an air bending process based on an experimental work', *Journal of Materials Processing Technology* Vol. 191: 174–177.

[Hämmerle 2008] Hämmerle (2008). *Hämmerle Bending Machines*, Catálogo.

[Kuvín 2011] B. F. Kuvín (2011), *Selecting Metal Alloys for Stamped Parts*.

[Leitao 2010] C. Leitao et al. (2010), "Mechanical behaviour of similar and dissimilar AA5182-H111 and AA6016-T4 thin friction stir welds", *Materials and Design* no.30: 101-108.

[Longo 2013] M. Longo, G. Maccarini (2013), "Control System Algorithm for the prediction of Springback in Air Bending", *Key Engineering Materials* Vols. 554-557: 1382-1387

[Memon 2001] A. M. Memon (2001), *A comprehensive Framework for testing Graphical User Interfaces*, Tese de Doutorado, Universidade de Pittsburgh.

[Mentink 2003] R. J. Mentink, D. Lutters, A. H. Streppel e H. J. J. Kals (2003), "Determining material properties of sheet metal on a press brake", *Journal of Materials Processing Technology* no. 141 (1):143-154.

[Miranda 2014] S. Miranda (2014), *Análise do processo de quingem: desenvolvimentos analíticos e numéricos para a sua caracterização*, Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[Pacheco 2011] J. A. B. Pacheco e A. D. Santos (2011), A simulação numérica por elementos finitos na validação de um critério para o projecto de quinadoras de quinadoras minorando as variação angulares ao longo do comprimento, Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia.

[Pacheco 1992] J. B. Pacheco (1992), *Utilização de quinadoras e guilhotinas*, APTCP.

Referências

[Pacheco 2013] J. B. Pacheco, A. D. Santos (2013), *Desenvolvimentos no estudo do processo de quinagem e limites das recomendações analíticas recorrendo à simulação numérica por elementos finitos*, SEMNI 2013 - Congresso de Métodos Numéricos en Ingeniería.

[Precision Machine Design 2006] <http://www.mech.utah.edu/~me7960/lectures/>, acedido em Junho de 2015.

[Santos 2005] A. D. Santos, José F. Duarte e A. Barata da Rocha (2005), *Tecnologia de Embutidura - Princípios e Aplicações*, Vol. Vol. 3. INEGI.

[Shaeffler 2004] D. J. Shaeffler (2004), 'Introduction to advanced high strength steels', *Stamping Journal*.

[sheetmetal 2015] <http://sheetmetal.me/tooling-terminology/spring-back/>, acedido em Junho de 2015.

[Silva 2012] R. Silva (2012), *Development of numerical methodologies for parameter identification and shape optimization in metal forming simulations*, Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro.

[SSAB 2006] SSAB (2006), *Hardox Weldox bending/shearing Publication*.

[SSAB 2007] SSAB (2007). *Cold Reduced Rephosphorized SSteel*.

[SSAB 2008] SSAB (2008). *It's All About Strength and Lightness*.

[Rodrigues 2005] J. M. Rodrigues e P. F. Martins (2005), *Tecnologia Mecânica*, Vol. II, Escolar Editora.

[Ruukki 2014] Ruukki (2014), *Square S355J2H and Other Hollow Sections Made by EN 10219*.

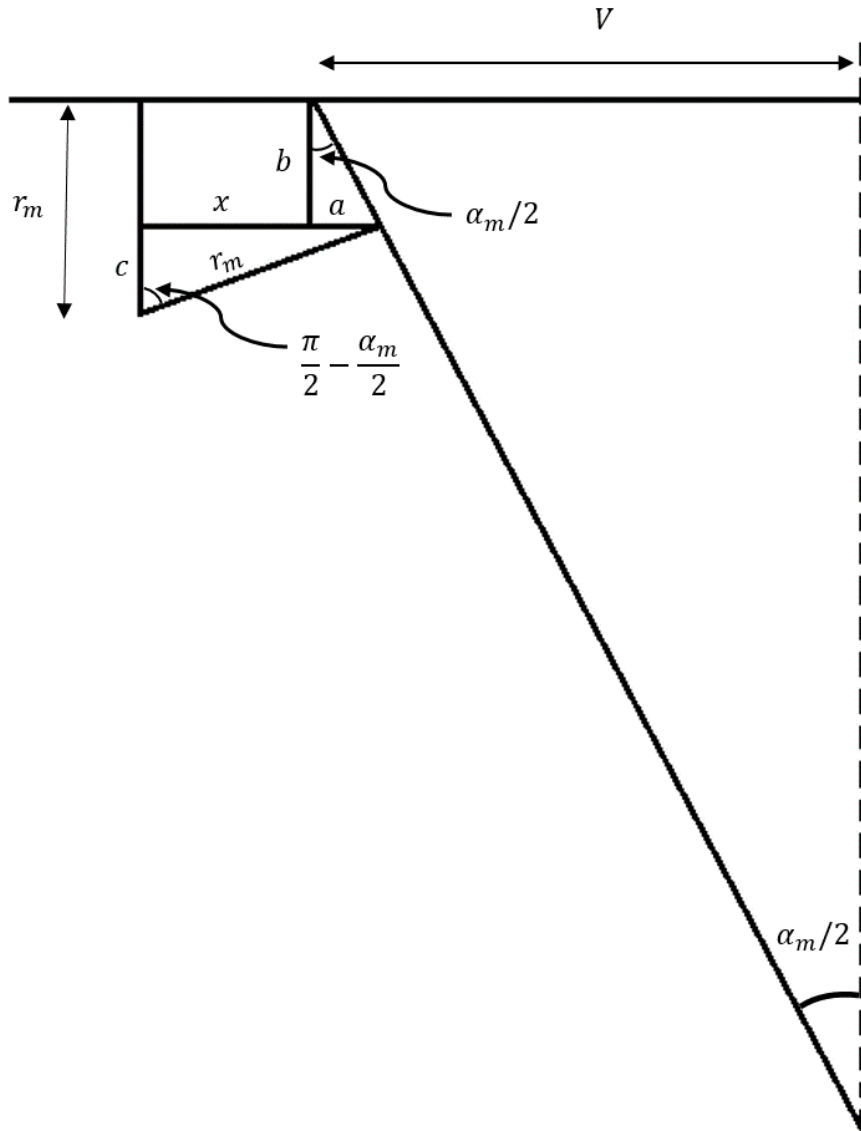
[Timoshenko 1940] S. Timoshenko (1940), *High Strength Materials*, Vol. II, Lancaster Press.

[Wang 2008] J. Wang, S. Verma, R. Alexander e J. Gau (2008), "Springback control of sheet metal air bending process", *Journal of Manufacturing Processes* **10**, 21–27.

[Wila 2015] <http://www.fabmachsales.com/Wila.php>, acedido em Julho de 2015.

Anexos

Anexo A1 – Definição geométrica das variáveis da matriz



$$x + a = r_m \cdot \cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)$$

$$c = r_m \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)$$

$$b = r_m - c = r_m - r_m \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)$$

$$a = b \cdot \tan\left(\frac{\alpha_m}{2}\right) = (r_m - r_m \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)) \cdot \tan\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)$$

$$x = r_m \cdot \cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right) - a = r_m \cdot \cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right) - (r_m - r_m \cdot \text{sen}\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)) \cdot \tan\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)$$

Simplificando vem:

$$x = r_m \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)} - \tan\left(\frac{\alpha_m}{2}\right)\right)$$

Anexo B1 – Pontos experimentais da curva força-deslocamento do aço St37

Tabela B1 - Pontos de deslocamento e força do punção extrapolados da curva disponível na literatura, para o aço St37 (Mentink 2003).

Deslocamento antes da remoção do ruído (mm)	Deslocamento antes da remoção do ruído (mm)	Força (N)	Força (N/mm)
0,47	0,00	44,78	0,50
0,61	0,14	3407,96	37,87
0,68	0,21	4422,89	49,14
0,80	0,33	4880,60	54,23
0,87	0,40	5000,00	55,56
1,06	0,59	5288,56	58,76
1,37	0,90	5666,67	62,96
1,63	1,16	5895,52	65,51
2,01	1,55	6194,03	68,82
2,28	1,81	6432,84	71,48
2,55	2,08	6671,64	74,13
2,69	2,22	6751,24	75,01
3,09	2,62	6970,15	77,45
3,48	3,01	7109,45	78,99
4,02	3,55	7258,71	80,65
4,37	3,90	7348,26	81,65
4,76	4,29	7378,11	81,98
5,16	4,69	7338,31	81,54
5,40	4,93	7308,46	81,21
5,82	5,35	7228,86	80,32
6,07	5,60	7199,00	79,99
6,37	5,90	7139,30	79,33
6,77	6,30	7009,95	77,89
6,95	6,48	6960,20	77,34
7,38	6,91	6830,85	75,90
7,66	7,19	6751,24	75,01
8,10	7,63	6512,44	72,36
8,55	8,08	6333,33	70,37
8,90	8,43	6134,33	68,16
9,11	8,64	6004,98	66,72