



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Inês Silva Ribeiro

**ESTRATÉGIAS DE IDENTIFICAÇÃO DO
COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE CHAPAS
METÁLICAS COM RECURSO A UMA BASE DE
DADOS**

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica na especialidade de Produção e Projeto, orientada pelo Doutor Pedro André Dias Prates e pela Doutora Nataliya Sakharova apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Março de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Estratégias de Identificação do Comportamento Plástico de Chapas Metálicas com Recurso a uma Base de Dados

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Database-supported strategy for the material parameter identification of metal sheets

Autor

Inês Silva Ribeiro

Orientadores

Pedro André Dias Prates

Nataliya Sakharova

Júri

Presidente	Professor Doutor José Valdemar Bidarra Fernandes Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
Orientador	Doutor Pedro André Dias Prates Investigador Doutoramento da Universidade de Coimbra
Vogais	Doutor André Filipe Gomes Pereira Investigador Doutoramento da Universidade de Coimbra

Coimbra, março, 2021

Aos meus pais.

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem o apoio e incentivo de várias pessoas, às quais não poderia deixar de exprimir o meu agradecimento.

Obrigado ao Professor Pedro André Dias Prates e à Professora Nataliya Sakharova por todos os conhecimentos transmitidos, por se terem demonstrado sempre disponíveis, pela colaboração em clarificar dúvidas e na resolução de problemas que foram surgindo ao longo da elaboração deste trabalho.

Aos meus pais e irmão, por terem tornado possível a realização desta dissertação, por todo o apoio, paciência e compreensão durante este processo.

Aos meus amigos, que sempre me acompanharam e apoiaram durante o meu percurso académico.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

Esta dissertação foi realizada no âmbito dos projetos RDFORMING (PTDC/EME-EME/31243/2017) e EZ-SHEET (PTDC/EME-EME/31216/2017), cofinanciados pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do programa Portugal-2020 (PT2020), no âmbito do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI-01-0145-FEDER-031243, POCI-01-0145-FEDER-031216) e pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através de fundos nacionais (PIDDAC); também foi patrocinada com fundos FEDER através do programa COMPETE - Programa Operacional Factores de Competitividade - e com fundos nacionais através da FCT, no âmbito do projeto UIDB/00285/2020.

Cofinanciado por:



Resumo

Estando a Indústria em constante evolução, também a procura de novas técnicas e abordagens aumenta de forma a que se adquiram soluções que permitam a redução tanto do tempo de fabrico como também melhore a qualidade e custo do produto final. Assim este tema tem como principal objetivo a elaboração de estratégias, com recurso a uma base de dados, de modo a conseguir uma estimativa precisa do comportamento plástico de chapas metálicas sem ter a necessidade de recorrer aos ensaios convencionais. A conformação de chapas metálicas torna essa estimativa bastante complexa uma vez que são exercidas cargas heterogêneas durante o seu processo sendo que, também a geometria das peças fabricadas influencia para dificultar a previsão do seu comportamento. A base de dados é desenvolvida através da análise de elementos finitos, que permite reduzir custos e leva a uma produção mais rápida, em que na simulação numérica do processo recorreu-se a um único ensaio mecânico de tração biaxial, que exhibe um comportamento idêntico ao que ocorre nos processos de estampagem.

Utiliza-se um modelo constitutivo que descreve o comportamento plástico de chapas metálicas e em seguida são propostas e exploradas algumas estratégias para a identificação dos parâmetros constitutivos. É também analisado de que modo essas mesmas estratégias se desempenham com diversos materiais e de que modo a quantidade de dados utilizados para as mesmas, influencia nas estimativas dos parâmetros.

Palavras-chave: Comportamento plástico, Base de dados, Chapas metálicas, Identificação de parâmetros.

Abstract

As the Industry is constantly evolving, the demand for new techniques and approaches also increases in order to achieve new ways that allow the reduction of the manufacturing time and also improve the quality and cost of the final product. This thesis has as main objective, an accurate estimate of the plastic behaviour of metal sheets, by application of a database, without having to resort to conventional tests. Forming processes of sheet metal makes this estimate quite complex since heterogeneous loads are applied during this process, and also the geometry influences to make it difficult to predict their behaviour. The database is developed through the analysis of finite elements, which allows reducing costs and leads to a faster production, in which the numerical simulation of the process it is used a mechanical single biaxial tensile test that exhibits an identical behaviour of what happens in the forming processes.

A constitutive model is applied to describe the plastic behaviour of metal sheets and then some strategies are proposed and explored to identify the constitutive parameters. It is also analysed how these same strategies perform with different materials and how the amount of data used influences the parameter estimates.

Keywords Plastic behaviour, Database, Metal sheets, Parameters Identification.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Simbologia Grega	xiii
Simbologia Romana	xiii
Siglas	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Estratégias de identificação de parâmetros	2
1.2.1. Estratégias Clássicas	2
1.2.2. Estratégias Inversas	3
1.3. Objetivos e estrutura da dissertação	4
2. MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO CRUCIFORME	5
2.1. Geometria do Provete	5
2.2. Discretização pelo Método dos Elementos Finitos	6
2.3. Modelo Constitutivo	7
3. CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS E ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO ..	9
3.1. Parâmetros em análise	9
3.2. Método para gerar as simulações	9
3.3. Descrição da Estratégia de Identificação de Parâmetros	10
4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E MELHORIAS À ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO	13
4.1. Sensibilidade à quantidade de dados	13
4.2. Sensibilidade ao material de referência	14
4.3. Melhorias à estratégia de identificação	15
5. CONCLUSÕES	23
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
APÊNDICE A-Estimativa dos Parâmetros do Material DC06 para o Eixo 0y	27
APÊNDICE B-Estimativa dos Parâmetros para os Restantes Materiais	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Geometria e dimensões do provete cruciforme (Prates, Oliveira, et al., 2016)..	6
Figura 3.1. Estimativa dos parâmetros para o eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	12
Figura 4.1. Representação do erro relativo médio e desvio padrão associados à estimativa de cada parâmetro de entrada, para 7000, 4000, 2000, 1000, 500, 250 e 50 simulações; o erro relativo obtido para 15925 simulações também está representado.	13
Figura 4.2. Representação do erro relativo obtido na estimativa de cada parâmetro de entrada para 15925 simulações.	15
Figura 4.3. Comparação de erros relativos nas estimativas dos parâmetros n e C , entre as funções-objetivo f e \emptyset , para diferentes números de simulações na base de dados.	16
Figura 4.4. Representação do erro relativo obtido na nova estratégia para a estimativa de cada parâmetro de entrada para 15925 simulações.	17
Figura 4.5. Comparação entre as diferentes estratégias para o parâmetro: (a) n ; (b) C .	19
Figura 4.6. Representação da lei de Swift para: (a) Simulação 2577; (b) Simulação 11388; (c) Hill Swift 1; (d) Hill Swift 2; e) Extrapolado 1; (f) Extrapolado 2.	20
Figura A.1. Estimativa dos parâmetros do material DC06 para o eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	28
Figura B.1. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 2577” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	29
Figura B.2. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 2577” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	30
Figura B.3. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 11388” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	31
Figura B.4. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 11388” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	32
Figura B.5. Estimativa dos parâmetros do material “Hill Swift 1” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	33
Figura B.6. Estimativa dos parâmetros do material “Hill Swift 1” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	34
Figura B.7. Estimativa dos parâmetros do material “Hill Swift 2” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	35
Figura B.8. Estimativa dos parâmetros do material “Hill Swift 2” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .	36

Figura B.9. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 1” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0	37
Figura B.10. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 1” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0	38
Figura B.11. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 2” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0	39
Figura B.12. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 2” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0	40

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Parâmetros do material de referência.	7
Tabela 4.1. Variação dos parâmetros dos novos materiais de referência em relação aos parâmetros do material DC06 (ver tabela 2.1).	14
Tabela 4.2. Verificação da proximidade dos valores dos parâmetros dos 30 materiais selecionados para os parâmetros dos materiais Hill Swift 1, Hill Swift 2, Extrapolado 1 e Extrapolado 2.	18

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia Grega

ε_0 – Parâmetro constitutivo da lei de Swift

$\bar{\varepsilon}^p$ – Deformação plástica equivalente

μ – Média

σ – Desvio padrão

$\sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{11}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$ e σ_{12} – Componentes do tensor das tensões de Cauchy

Φ^i – Função-objetivo de melhoria para os parâmetros n e C

$|\delta_j|$ – Valor absoluto do erro relativo do material hipotético no deslocamento j

$|\delta|^M$ – Média do valor absoluto do erro relativo do material hipotético

Simbologia Romana

A, B, C_i – Matriz **A, B** e **C_i** de parâmetros de entrada do modelo

C, n – Parâmetros constitutivos da lei de Swift

F, G, H, L, M, N – Parâmetros de anisotropia do critério de Hill'48

F_j^i – Força medida para o deslocamento j do material hipotético

F_j^{ref} – Força medida para o deslocamento j do material em análise

f^i – Função-objetivo

k – Quantidade de parâmetros de entrada do modelo

N – Quantidade de simulações do modelo

p – Quantidades de pontos de deslocamento medidos

r_0 – Coeficiente de anisotropia a 0° da direção de laminagem

r_{45} – Coeficiente de anisotropia a 45° da direção de laminagem

r_{90} – Coeficiente de anisotropia a 90° da direção de laminagem

x_j^{hip} – Valor da força do material hipotético no deslocamento j

x_j^{ref} – Valor da força do material de referência no deslocamento j

$x_i^{(l)}$ – Elemento de uma matriz de conjunto de parâmetros de entrada

y_A, y_B, y_{C_i} – Respostas do modelo com parâmetros de entrada **A**, **B** e **C_i**

Y – Tensão limite de elasticidade

Y_0 – Tensão limite de elasticidade inicial

Siglas

FEMU – Finite Element Model Updating

VFM – Virtual Fields Method

DD3IMP – Deep Drawing 3D IMPLICIT

1. INTRODUÇÃO

Serve o presente capítulo para apresentar a motivação deste estudo e uma breve abordagem a alguns conceitos para uma melhor compreensão do trabalho aqui apresentado, assim como os objetivos traçados.

1.1. Motivação

A indústria está sempre em constante evolução e cada vez mais em busca de novas técnicas que facilitem tanto a produção como a rentabilização do seu tempo e custo.

A aplicação da análise de elementos finitos tem sido bastante adotada na análise do comportamento plástico na conformação de metais permitindo reduzir custos no equipamento utilizado e na manufatura. Também leva a uma produção de qualidade mais rápida e a custos reduzidos, reduzindo também no desperdício de material e no tempo do ciclo de produção (Valberg, 2010).

Por vezes a resolução de um problema através de um método de análise teórico pode tornar-se difícil não pela complexidade das equações do método teórico em si, mas sim devido à geometria do objeto em estudo e das características do material em causa. Nestes casos a análise através de simulação numérica é um método alternativo para encontrar uma solução aproximada para o problema.

A estampagem de chapas metálicas é um processo largamente utilizado na indústria na produção das mais variadas peças e cada vez mais vão surgindo novas estratégias de identificação de parâmetros de modelos constitutivos para ajudar a desenvolver e aperfeiçoar este processo. Por vezes este processo pode-se tornar complicado quando se trata de formas muito complexas dado a aplicação de forças heterogéneas e multiaxiais no processo da deformação das chapas metálicas

Por esse motivo, existe a necessidade de criar metodologias alternativas aos métodos convencionais, uma vez que estes podem levar à caracterização incompleta do comportamento dos materiais. Igualmente exige-se que estas metodologias sejam mais eficazes na obtenção de informação sobre o comportamento plástico dos materiais metálicos e com maior fiabilidade através do aumento do número de parâmetros que seja possível

identificar. Os ensaios mecânicos convencionais promovem trajetórias de deformação lineares e campos de deformação e de tensão quasi-homogêneos na região de interesse dos provetes; no entanto, nos processos de estampagem geralmente ocorrem trajetórias de deformação não-lineares e campos de deformação e tensão heterogêneos.

Também o crescente uso e a disponibilidade de bases de dados tem vindo a aumentar, cada vez mais complexas e volumosas, relacionadas com as propriedades mecânicas de materiais, incluindo chapas metálicas, o que motiva a explorar o desenvolvimento de estratégias de identificação suportadas por bases de dados, como alternativa às estratégias de identificação de parâmetros clássicas e inversas.

1.2. Estratégias de identificação de parâmetros

Na literatura, podem ser constatados dois tipos principais de estratégias para a identificação de parâmetros de modelos constitutivos: a estratégia clássica e a inversa.

1.2.1. Estratégias Clássicas

Nas estratégias clássicas de identificação de parâmetros são abrangidos os ensaios mecânicos standardizados que permitem determinar os valores das tensões e das deformações através das forças, pressões e deslocamentos obtidos nos seus resultados. Apesar da conveniência da utilização destes ensaios pela sua simplicidade e facilidade de execução, eles têm algumas desvantagens como por exemplo, conseguir obter resultados rigorosos para situações complexas. Com o aumento de parâmetros a analisar e o facto de estes ensaios se realizarem com trajetórias de deformação lineares e deformação homogênea nas regiões de interesse dos provetes, torna-se difícil de conseguir caracterizar o comportamento do material com precisão em circunstâncias diferentes (Güner, 2012). De facto, os processos de conformação de chapas metálicas ocorrem geralmente sob condições de deformação heterogênea, em que ocorrem solicitações multiaxiais e trajetórias de deformação não-lineares, e, portanto, as estratégias clássicas não são as que mais se adequam às condições dos processos de conformação de chapas metálicas.

1.2.2. Estratégias Inversas

Ao contrário das estratégias clássicas de identificação de parâmetros, as estratégias inversas são muito mais flexíveis, recorrem a ensaios mecânicos que permitem obter campos de deformação não homogêneos assim como mudanças de trajetórias de deformação. Neste contexto, as estratégias inversas recorrem tipicamente a apenas um único ensaio mecânico não standardizado, entre os quais se destaca o ensaio de tração biaxial num provete cruciforme (Prates, Pereira, et al., 2016).

As informações necessárias, tais como as forças e os deslocamentos das amarras/ferramentas, e o campo de deformações medido na superfície do provete, são extraídas de único ensaio mecânico. Posteriormente, é realizada uma análise numérica através de um modelo constitutivo previamente escolhido e uma estimativa inicial dos seus parâmetros. Após esta análise, os resultados experimentais do ensaio mecânico são comparados através de diversas iterações com os resultados numéricos, atuando nos parâmetros do modelo constitutivo até se chegar a uma boa correlação entre os dois resultados (Avril, 2008).

A estratégia mais utilizada é *Finite Element Model Updating* (FEMU) e consiste na realização de sucessivas simulações de elementos finitos do ensaio físico. O conjunto de parâmetros é obtido pela minimização da diferença entre as medições experimentais e os resultados de simulação numérica. Esta diferença é expressa por uma função objetivo, e sua minimização é realizada com recurso a algoritmos de otimização, que operam automaticamente sobre os valores dos parâmetros constitutivos.

Uma alternativa promissora ao uso do FEMU é o *Virtual Fields Method* (VFM), que se baseia no princípio do trabalho virtual. Esta abordagem não requer a análise por elementos finitos (que pode ser bastante demorada), evitando possíveis erros devido à imprecisão dos modelos de elementos finitos, como a representação da geometria e das condições de fronteira (Pierron, 2010). A estratégia VFM funciona minimizando a diferença entre o trabalho externo e o trabalho virtual interno do provete identificando assim os parâmetros constitutivos. O VFM já demonstrou ter sucesso na identificação de parâmetros constitutivos; porém, a precisão da identificação dos parâmetros depende da escolha adequada do campo virtual, o que atualmente é um desafio para problemas que envolvem grande heterogeneidade de deformação de materiais anisotrópicos, bem como grandes deformações plásticas. De facto, neste tipo de problemas, o campo virtual ótimo deve ser

avaliado para cada incremento de tempo, o que o torna menos atraente do que na resolução de problemas lineares.

Foi utilizado o ensaio mecânico de tração biaxial em provete cruciforme como método mecânico do processo na simulação numérica desta base de dados pois permite a ocorrência de campos de deformação heterogêneos e uma ampla gama de trajetórias de deformação na região de medição do provete, o que se assemelha muito ao que ocorre nos processos de estampagem.

1.3. Objetivos e estrutura da dissertação

O objetivo principal desta dissertação foi a elaboração de estratégias de identificação do comportamento plástico de chapas metálicas, com recurso a uma base de dados, por meio de um ensaio de tração biaxial em provete cruciforme. Este provete tem um comportamento idêntico ao qual tem lugar no processo de estampagem. Utiliza-se um modelo constitutivo que seja capaz de descrever corretamente o comportamento plástico, uma vez que no processo de estampagem iremos ter cargas aplicadas heterogêneas e multiaxiais. Pretende-se avaliar um conjunto de parâmetros suficientemente grande para a completa descrição do comportamento plástico de chapas metálicas, uma vez que, quanto maior o número de parâmetros a identificar, maior será a flexibilidade do modelo constitutivo.

Esta dissertação é composta por 5 capítulos. No capítulo 1 é demonstrado as motivações para a realização desta dissertação assim como os objetivos da mesma. Também é feita uma breve revisão bibliográfica. No capítulo 2 é apresentado o modelo constitutivo e o provete utilizado, bem como a sua discretização. Em seguida é apresentado o capítulo 3 em que é demonstrado a construção da base de dados e a elaboração da estratégia de identificação de parâmetros, sendo que no capítulo 4 são apresentadas melhorias à mesma, assim como uma análise à sensibilidade da estimativa tanto ao número de dados utilizados, como a diferentes materiais. Por último, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste estudo.

2. MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ENSAIO CRUCIFORME

A deformação plástica que ocorre durante o processo de estampagem de chapas metálicas pode ser de grande complexidade. Os materiais são sujeitos a solicitações multiaxiais e os componentes da tensão e da deformação variam bastante de local para local no material durante a deformação. Isto dificulta a compreensão do comportamento plástico do material e uma vez que as chapas metálicas utilizadas neste processo são normalmente anisotrópicas, ou seja, têm propriedades diferentes em diferentes direções, dificulta ainda mais a obtenção do comportamento plástico por métodos analíticos.

Para melhor compreensão do comportamento plástico de chapas metálicas também é necessário escolher um modelo constitutivo complexo para prever precisamente o estado da tensão instalada no material e a sua evolução quando está sob solicitação. Um modelo constitutivo é normalmente definido por (Banabic, 2010):

- Critério de plasticidade;
- Lei de encruamento;
- Lei de escoamento.

O critério de plasticidade descreve a superfície limite elástica (ou superfície de plasticidade) no espaço das tensões, enquanto a lei de encruamento expressa a evolução da superfície limite elástica com a deformação plástica. A superfície limite elástica consiste na extensão da noção de tensão limite elasticidade a solicitações multiaxiais.

2.1. Geometria do Provette

A geometria do provete utilizado na simulação numérica para a construção da base de dados pode ser observado na Figura 2.1, bem como as suas dimensões.

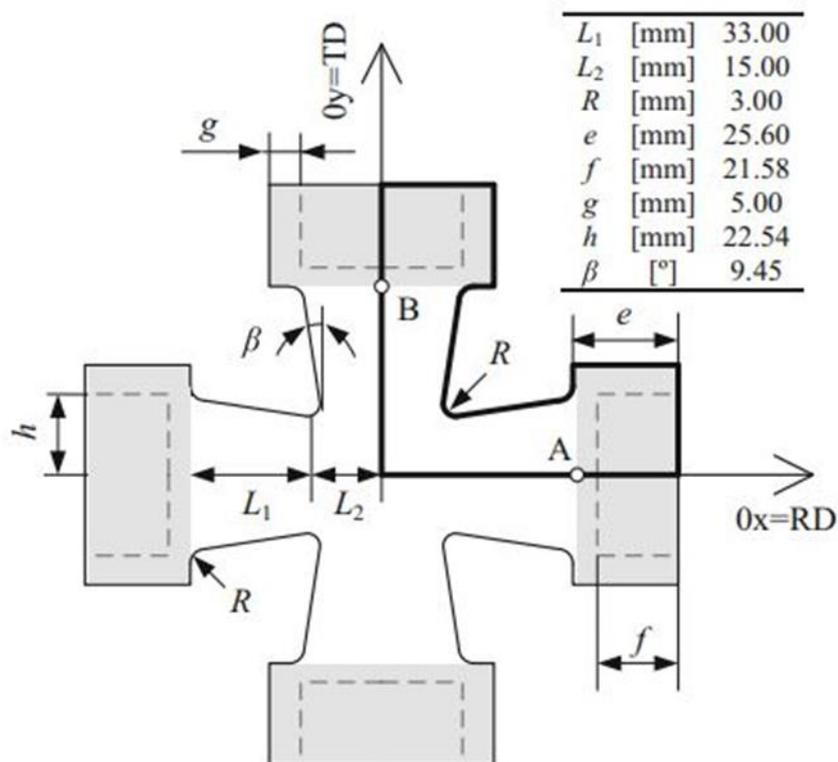


Figura 2.1. Geometria e dimensões do provete cruciforme (Prates, Oliveira, et al., 2016).

O provete cruciforme é sujeito a deslocamentos iguais em ambas as direções $0x$ e $0y$, aplicadas nas suas amarras. Os deslocamentos nos eixos $0x$ e $0y$ são medidos nos pontos A e B, respetivamente. Foi considerada uma espessura de 1,0 mm para a chapa metálica.

2.2. Discretização pelo Método dos Elementos Finitos

Dado que o provete tem simetria segundo o sistema de eixos $0x$, $0y$ e $0z$, e é considerado um material ortotrópico, foi considerado apenas um oitavo do provete no modelo de simulação numérica. A amostra é discretizada com elementos sólidos hexaédricos tri-lineares de 8 nós associados a uma integração seletiva reduzida, com tamanho médio no plano de 0,5 mm e uma camada de espessura. As simulações numéricas foram realizadas com o código de elementos finitos DD3IMP, desenvolvido e otimizado para simular processos de conformação plástica de chapas metálicas (Oliveira, 2008).

2.3. Modelo Constitutivo

O critério de plasticidade utilizado para construir a base de dados foi o critério de Hill'48, que é um critério de plasticidade ortotrópico; de facto, a anisotropia da chapa contém três planos de simetria ortogonais entre si. O critério de Hill'48 é expresso pela seguinte função:

$$F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = Y^2, \quad (2.1)$$

em que F, G, H, L, M e N são os parâmetros de anisotropia do material, $\sigma_{22}, \sigma_{33}, \sigma_{11}, \sigma_{23}, \sigma_{31}$ e σ_{12} são as componentes do tensor das tensões de Cauchy definidas no sistema de eixos de ortotropia da chapa e Y a tensão limite de elasticidade. Os índices 1, 2 e 3 representam os eixos principais de anisotropia, sendo que no caso de chapas metálicas, o eixo 1 é normalmente paralelo à direção de laminagem, o eixo 2 é transversal ao eixo 1 e o eixo 3 é colinear à normal ao plano da chapa. Considera-se a condição $G + H = 1$, de modo a que a tensão limite de elasticidade seja igual à tensão uniaxial em tração ao longo da direção de laminagem da chapa, e que $L = M = 1,5$ (von Mises). Os coeficientes F, G, H e N podem ser obtidos a partir dos coeficientes de anisotropia r_0, r_{45}, r_{90} , respetivamente a $0^\circ, 45^\circ$ e 90° com a direção de laminagem. As relações entre os coeficientes de anisotropia e os coeficientes F, G, H e N são obtidos através de:

$$F = \frac{r_0}{r_{90}}(r_0 + 1); \quad G = \frac{1}{r_0 + 1}; \quad H = \frac{r_0}{r_0 + 1}; \quad N = \frac{1}{2} \frac{(r_0 + r_{90})(2r_{45} + 1)}{r_{90}(r_0 + 1)}. \quad (2.2)$$

Para lei de encruamento foi utilizada a lei de Swift, que é dada por:

$$Y = C(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon}^p)^n, \quad (2.3)$$

em que C, ε_0 e n são constantes do material e $\bar{\varepsilon}^p$ a deformação plástica equivalente, a tensão limite de elasticidade inicial, Y_0 , é dada por:

$$Y_0 = C(\varepsilon_0)^n \quad (2.4)$$

Foi tido como material de referência o aço macio DC06 com os parâmetros apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Parâmetros do material de referência.

F	G	N	n	C [MPa]	Y₀ [MPa]
0,2826	0,3584	1,2885	0,2590	565,32	157,12

3. CONSTRUÇÃO DA BASE DE DADOS E ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO

3.1. Parâmetros em análise

Os parâmetros analisados na base de dados F , G e N do critério de Hill'48 e os parâmetros n , C e Y_0 da lei de Swift são os parâmetros de entrada do modelo numérico. Tem como resposta as forças segundo O_x e O_y .

Com base nos parâmetros de referência, que se podem visualizar na Tabela 2.1, escolheu-se uma gama de variação de +40% a -40% para cada parâmetro.

3.2. Método para gerar as simulações

A simulações numéricas necessárias para a construção da base de dados foram realizadas no âmbito de um trabalho anterior (Bernardo Câmara, 2021). Neste contexto, as várias combinações entre os parâmetros foram geradas de acordo com a Sequência de Sobol (Saltelli, 2008). Ela permite que as combinações entre parâmetros sejam distribuídas de forma mais uniforme do que aleatoriamente, evitando assim que muitos valores sejam repetidos.

O processo para a utilização deste método de obtenção das simulações começa pela criação de uma matriz de N por $2k$, sendo N o número de linhas correspondente à quantidade de simulações que queremos realizar e k o número de colunas e de parâmetros que vamos avaliar. A partir desta matriz inicial são formadas as matrizes **A** e **B** em que cada uma delas contém metade desta matriz inicial como se pode observar em 3.1 e 3.2.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_i^{(1)} & \dots & x_k^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_i^{(2)} & \dots & x_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N-1)} & x_2^{(N-1)} & \dots & x_i^{(N-1)} & \dots & x_k^{(N-1)} \\ x_1^{(N)} & x_2^{(N)} & \dots & x_i^{(N)} & \dots & x_k^{(N)} \end{bmatrix}; \quad (3.1)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_{k+1}^{(1)} & x_{k+2}^{(1)} & \cdots & x_{k+i}^{(1)} & \cdots & x_{2k}^{(1)} \\ x_{k+1}^{(2)} & x_{k+2}^{(2)} & \cdots & x_{k+i}^{(2)} & \cdots & x_{2k}^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_1^{(N-1)} & x_{k+2}^{(N-1)} & \cdots & x_{k+i}^{(N-1)} & \cdots & x_{2k}^{(N-1)} \\ x_{k+1}^{(N)} & x_{k+2}^{(N)} & \cdots & x_{k+i}^{(N)} & \cdots & x_{2k}^{(N)} \end{bmatrix}; \quad (3.2)$$

Após a definição destas duas matrizes, é formada uma nova matriz \mathbf{C}_i que é composta pelas colunas da matriz \mathbf{B} à exceção da coluna i , que é então substituída pela coluna i da matriz \mathbf{A} . Assim são construídas k matrizes \mathbf{C}_i .

$$\mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} x_{k+1}^{(1)} & x_{k+2}^{(1)} & \cdots & x_i^{(1)} & \cdots & x_{2k}^{(1)} \\ x_{k+1}^{(2)} & x_{k+2}^{(2)} & \cdots & x_i^{(2)} & \cdots & x_{2k}^{(2)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_1^{(N-1)} & x_{k+2}^{(N-1)} & \cdots & x_i^{(N-1)} & \cdots & x_{2k}^{(N-1)} \\ x_{k+1}^{(N)} & x_{k+2}^{(N)} & \cdots & x_i^{(N)} & \cdots & x_{2k}^{(N)} \end{bmatrix}. \quad (3.3)$$

Após formadas as matrizes podem então ser realizadas as simulações com os parâmetros de entrada das matrizes \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{C}_i , em que se obtém os seguintes vetores ($N \times 1$) como respostas do modelo:

$$\mathbf{y}_A = f(\mathbf{A}); \mathbf{y}_B = f(\mathbf{B}); \mathbf{y}_{C_i} = f(\mathbf{C}_i) \quad (3.4)$$

Para a base de dados considerou-se N igual a 2000 e k igual a 6. Assim, através desta estratégia, realizaram-se no total 16000 simulações a partir dos parâmetros de referência que podem variar em valor entre -40% e +40% dos valores de referência, obtendo posteriormente um conjunto de valores Força-Deslocamento referente a cada material através do programa de elementos finitos DD3IMP.

Foi utilizado um programa desenvolvido em *Python*[®] que permite ler os valores dos parâmetros de entrada e atualizar o modelo numérico com o objetivo de realizar as simulações com o programa de elementos finitos DD3IMP; após realizadas as simulações, o programa guarda a resposta do modelo num ficheiro Excel[®].

3.3. Descrição da Estratégia de Identificação de Parâmetros

Dos resultados Força-Deslocamento são retirados apenas os valores da força referente aos deslocamentos de 0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5 e 6 mm ocorridos no eixo 0x e 0y para

cada simulação. Após se obter estes valores, é feita uma análise para verificar para que deslocamentos ocorre a força máxima, uma vez que apenas são considerados valores de deslocamento até onde a força seja inferior ou igual à força máxima dessa simulação. Assim, verifica-se que em cerca de 40% das 16000 simulações, a força máxima ocorre entre os deslocamentos de 5 mm e 6 mm mas em apenas 75 das 16000 simulações a força máxima ocorre entre os deslocamentos de 2 mm e 3 mm. No sentido de maximizar a quantidade de simulações numéricas que constam na base de dados, opta-se por descartar essas 75 simulações e utilizar os valores das simulações até o deslocamento de 3 mm em vez de descartar 40% das simulações e utilizar os valores de deslocamento até 6 mm.

Em seguida, faz-se um tratamento de dados em Excel[®] onde se aplica a função objetivo (3.5) que quantifica a diferença relativa que existe nas forças entre o material em estudo (considerado como referência) e cada material que consta na base de dados (considerados materiais hipotéticos). As diferenças relativas nas forças foram calculadas para os eixos 0x e 0y.

$$f^i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \left| \frac{F_j^i - F_j^{ref}}{F_j^{ref}} \right| \quad (3.5)$$

A diferença relativa é medida entre os valores da força do material hipotético i e do material de referência, em que p é o número total de pontos de deslocamento até atingir se o deslocamento de 3mm (neste caso $p = 5$), F_j^i a força obtida para o deslocamento j do material hipotético i e F_j^{ref} a força obtida para o deslocamento j no material de referência.

De seguida, relacionam-se os valores da função objetivo associados a cada material hipotético com os respetivos valores de cada parâmetro de entrada. Nos gráficos da Figura 3.1, observa-se os resultados para o eixo 0x. Repete-se o mesmo procedimento para o eixo 0y (Apêndice A). A estimativa dos parâmetros associados ao material de referência é realizada por meio de uma regressão linear sobre a nuvem de pontos, retirando-se o valor da ordenada na origem pela observação da equação linear do gráfico como sendo o valor estimado para o parâmetro em questão no eixo 0x e 0y. Após efetuar esta análise tanto para o eixo 0x como 0y, é calculada uma média entre os resultados destes dois eixos para obter o valor final do parâmetro estimado.

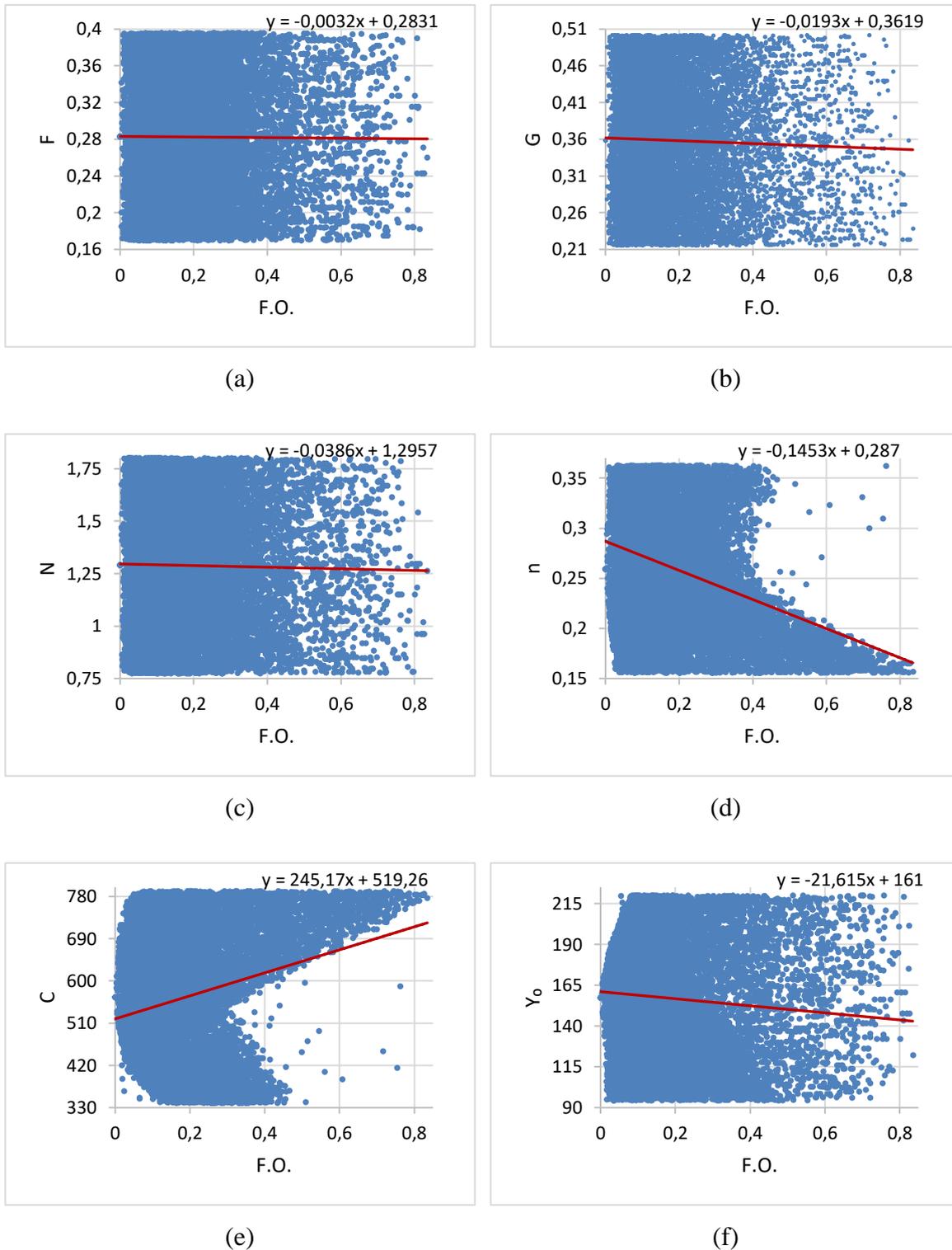


Figura 3.1. Estimativa dos parâmetros para o eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

4. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE E MELHORIAS À ESTRATÉGIA DE IDENTIFICAÇÃO

4.1. Sensibilidade à quantidade de dados

Através das 15925 simulações que compõem a base de dados, um estudo à quantidade de dados é verificado, em que se investiga a influência do número de simulações usadas na estimativa dos parâmetros associados ao material de referência. O estudo é efetuado para 7000, 4000, 2000, 1000, 500, 250 e 50 simulações. Foram obtidos 30 conjuntos aleatórios de cada número de simulações a partir da base de dados inicial, para avaliar a variância associada à estimativa de cada parâmetro. Os resultados são observados através da Figura 4.1, em que para cada número de simulações, determina-se a média do erro relativo na estimativa de cada parâmetro, obtido nos 30 conjuntos de simulações e o seu desvio padrão para comparação entre conjuntos.

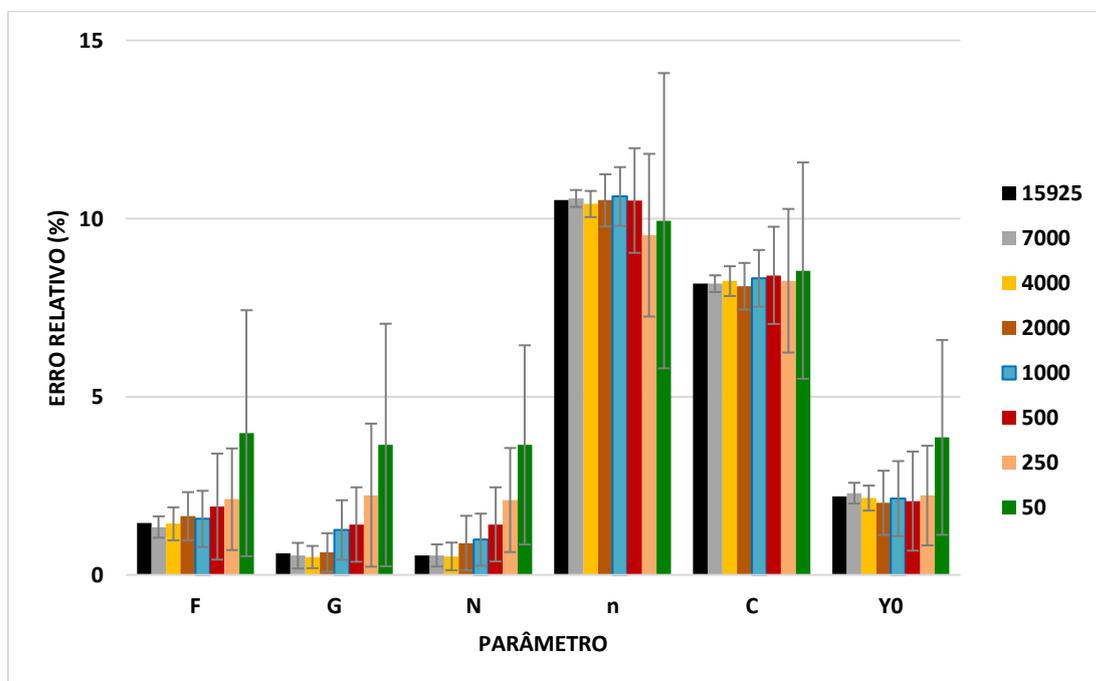


Figura 4.1. Representação do erro relativo médio e desvio padrão associados à estimativa de cada parâmetro de entrada, para 7000, 4000, 2000, 1000, 500, 250 e 50 simulações; o erro relativo obtido para 15925 simulações também está representado.

Observa-se, no geral, que o erro relativo dos parâmetros aumenta com a diminuição do número de simulações utilizadas. Também os parâmetros com maior erro relativo são os parâmetros n e C da lei de Swift, tendo um erro relativo muito acima dos 5% para o qual os restantes parâmetros se encontram abaixo, em qualquer que seja número de simulações.

4.2. Sensibilidade ao material de referência

Para além do material de referência DC06 (ver Tabela 2.1), a estratégia de identificação de parâmetros é agora testada em seis materiais distintos (Apêndice B), aqui considerados como materiais de referência. Estes materiais são testados para as 15925 simulações. Contidos na base de dados, testam-se dois materiais, em que um deles ronda a variação dos 20% em relação ao valor dos parâmetros do material DC06 e outro em que a variação é cerca de 40%, sendo eles respetivamente a simulação 2577 e a simulação 11388.

São também analisados outros quatro materiais que não integram as simulações da base de dados: dois materiais, designados “Hill Swift 1” e “Hill Swift 2”, em que os seus parâmetros se encontram no limiar dos -40% e +40% em relação aos parâmetros do material DC06; os restantes dois materiais, designados “Extrapolado 1” e “Extrapolado 2”, em que o primeiro pode conter os seus parâmetros dentro e fora dos 40% de variação enquanto que no segundo já ultrapassa essa variação de -40% e +40%. Na Tabela 4.1, pode-se observar mais concretamente essas mesmas variações.

Tabela 4.1. Variação dos parâmetros dos novos materiais de referência em relação aos parâmetros do material DC06 (ver tabela 2.1).

	F	G	N	n	C	Y₀
simulação 2577	17,27%	23,20%	28,20%	-18,36%	6,17%	27,42%
simulação 11388	-33,01%	38,32%	28,79%	-38,71%	39,81%	23,16%
Hill Swift 1	40,00%	40,00%	-40,00%	40,00%	40,00%	40,00%

Hill Swift 2	-40,00%	-40,00%	40,00%	-40,00%	-40,00%	-40,00%
Extrapol 1	183,05%	123,20%	-6,87%	54,44%	76,89%	52,27%
Extrapol 2	1079,39%	-53,50%	850,70%	93,05%	59,20%	90,94%

Através da análise da Figura 4.2 e da Tabela 4.1 verifica-se, em geral, um aumento considerável do erro relativo na estimativa dos parâmetros dos novos materiais de referência em relação ao material de DC06 inicialmente estudado, não se constatando necessariamente uma correlação entre o aumento do erro relativo e aumento da variação dos valores dos parâmetros indicados na Tabela 4.1. Como se pode observar na Tabela 4.1, o material “Hill Swift 1” tem exatamente o mesmo valor de variação que o material “Hill Swift 2” mas com diferentes sinais.

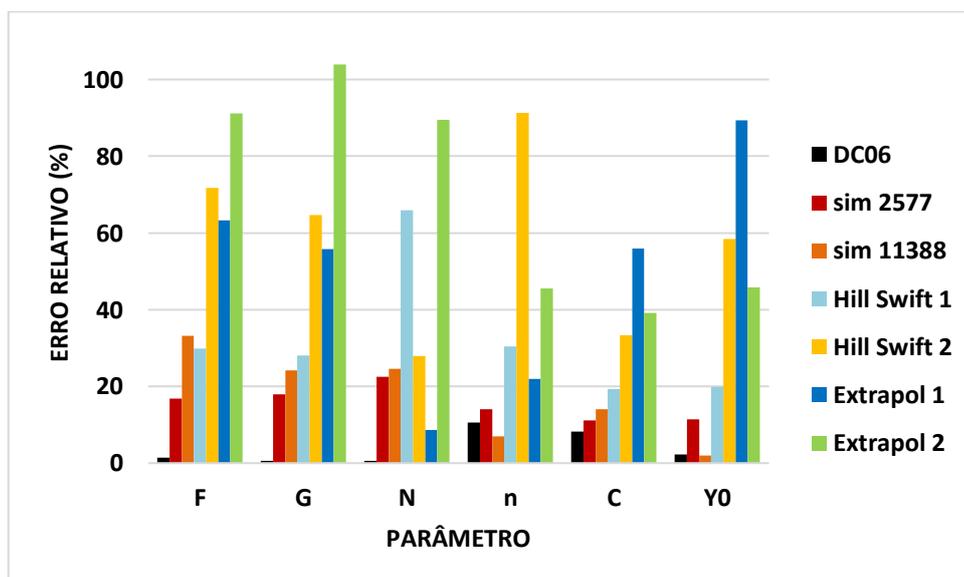


Figura 4.2. Representação do erro relativo obtido na estimativa de cada parâmetro de entrada para 15925 simulações.

4.3. Melhorias à estratégia de identificação

Após analisar os resultados obtidos no estudo de sensibilidade à quantidade de dados no material de referência, consegue-se verificar que no parâmetro n existe um grande aumento, mais do dobro, no erro relativo em relação à maioria dos parâmetros. Também o

parâmetro C se encontra acima dos 5% de erro relativo em que os restantes parâmetros não ultrapassam em qualquer que seja a quantidade de dados estudada. Foi escolhida a seguinte função-objetivo (Prates et al., 2014) no sentido de procurar melhorar a estimativa dos parâmetros n e C uma vez que esta função descreve a inclinação dos resultados força vs. deslocamento, que está intimamente relacionada com o encruamento (n, C):

$$\phi^i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \left| |\delta_j| - |\delta|^M \right|, \quad (4.1)$$

em que $|\delta_j|$ é o valor absoluto do erro relativo entre o material de referência e o material hipotético i para o deslocamento j e $|\delta|^M$ é a média destes valores, que é dado por:

$$|\delta|^M = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p |\delta_j|, \quad (4.2)$$

$$|\delta_j| = \left| \frac{x_j^{hip} - x_j^{ref}}{x_j^{ref}} \right|. \quad (4.3)$$

Sendo que x_j^{hip} representa o valor da força do material hipotético no deslocamento j e x_j^{ref} representa o valor da força do material de referência no deslocamento j .

Obtém-se os seguintes resultados em que os parâmetros estimados através desta função-objetivo estão representados como n_1 e C_1 :

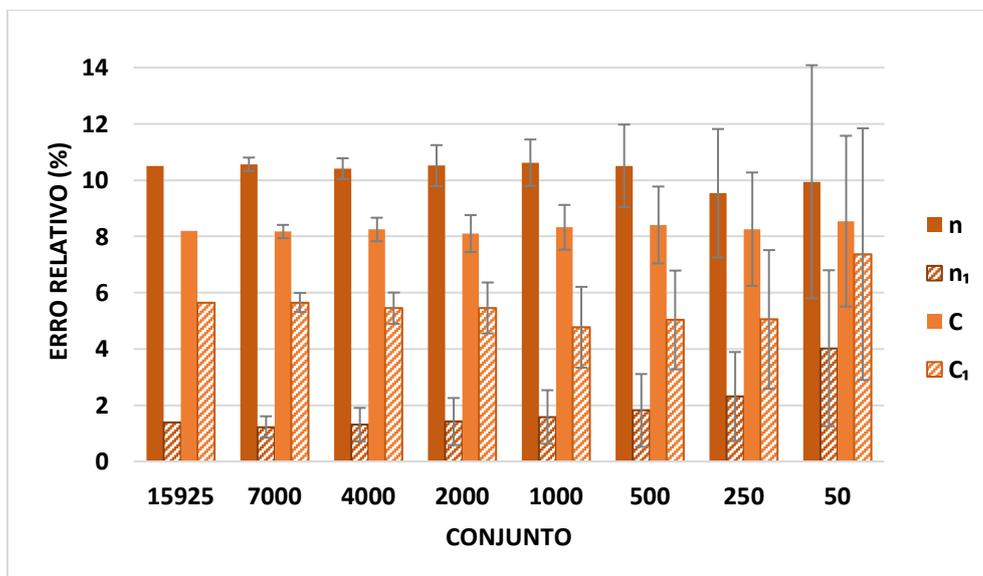


Figura 4.3. Comparação de erros relativos nas estimativas dos parâmetros n e C , entre as funções-objetivo f e ϕ , para diferentes números de simulações na base de dados.

Observamos na Figura 4.3 que esta nova função objetivo reduz significativamente o erro relativo médio de ambos os parâmetros, n e C , enquanto que o seu desvio-padrão aumenta ligeiramente na maioria dos conjuntos.

Nos restantes 6 materiais de referência nota-se um aumento geral do erro relativo em todos os parâmetros em relação ao material DC06 (ver Figura 4.2). Assim opta-se por estudar uma nova estratégia para estimar os parâmetros dos materiais. Também se estuda a influência da nova função objetivo para estimar os parâmetros n e C nesta nova estratégia.

A nova solução explorada para esta melhoria é concebida ao considerar apenas os 30 materiais hipotéticos em que a função objetivo f é a menor, de modo a determinar os parâmetros do material em estudo apenas com materiais hipotéticos semelhantes. Os resultados desta nova estratégia, designados com o índice “30”, encontram-se na Figura 4.4, em que se pode visualizar o erro relativo em comparação com o erro relativo obtido inicialmente para os parâmetros destes materiais (Figura 4.2).

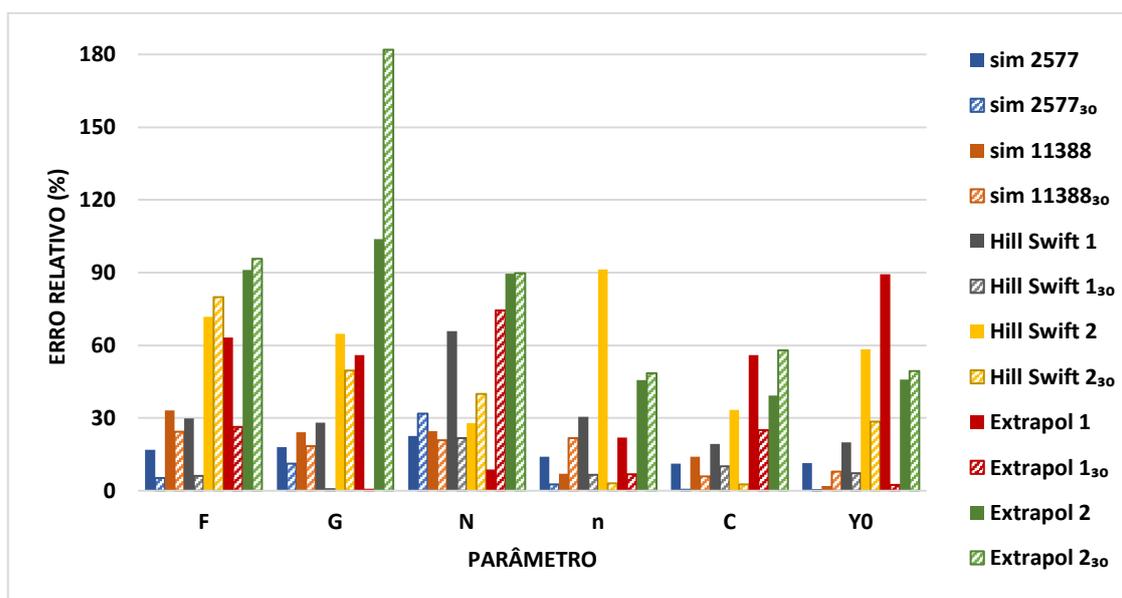


Figura 4.4. Representação do erro relativo obtido na nova estratégia para a estimativa de cada parâmetro de entrada para 15925 simulações.

Após examinar os resultados obtidos com auxílio da nova estratégia, no geral, observa-se uma diminuição do erro na estimativa dos parâmetros ou o erro permanece idêntico relativamente à estratégia inicial. Ainda assim constata-se erros elevados em comparação aos erros obtidos para o material DC06 (ver Figuras 4.1 e/ou 4.2). Também os materiais “Hill Swift 1” e “Hill Swift 2” continuam a demonstrar uma grande discrepância

no erro relativo, o que levou a um estudo mais detalhado sobre os valores dos parâmetros dos 30 materiais hipotéticos selecionados.

Para comparar os valores dos parâmetros que existem nestes 30 materiais hipotéticos selecionados, em relação ao material de referência, calcula-se uma média para cada parâmetro desses 30 materiais hipotéticos. Determina-se o erro relativo dessa média em relação aos valores dos parâmetros do material tido como referência. Desta forma quantifica-se a divergência existente nos parâmetros dos 30 materiais hipotéticos selecionados em relação aos parâmetros do material de referência.

Tabela 4.2. Verificação da proximidade dos valores dos parâmetros dos 30 materiais selecionados para os parâmetros dos materiais Hill Swift 1, Hill Swift 2, Extrapolado 1 e Extrapolado 2.

		F	G	N	n	C [MPa]	Y₀ [MPa]
Hill Swift 1	Ref.	0,3956	0,5017	0,7731	0,3626	791,45	219,97
	Média	0,2798	0,3778	1,2008	0,3162	683,81	208,89
	Erro (%)	29,26	24,70	55,33	12,77	13,60	5,04
Hill Swift 2	Ref.	0,1695	0,2150	1,8039	0,1554	339,19	94,27
	Média	0,2962	0,3469	1,3467	0,1865	375,51	133,88
	Erro (%)	74,71	61,34	25,34	20,06	10,71	42,01
Extrapolado 1	Ref.	0,8	0,8	1,2	0,4	1000	75
	Média	0,3243	0,3594	1,2716	0,3553	683,65	98,85
	Erro (%)	59,46	55,07	5,97	11,16	31,64	31,80
Extrapolado 2	Ref.	3,3333	0,1666	12,25	0,5	900	300
	Média	0,3160	0,3098	1,3040	0,2467	451,01	160,72
	Erro (%)	90,52	85,91	89,35	50,65	49,89	46,43

A partir da Tabela 4.2 e Figura 4.4 pode-se observar que os parâmetros com um erro relativo elevado na estimativa dos parâmetros com esta nova estratégia, também verifica um erro relativo elevado entre a média dos valores selecionados com o material de referência e vice-versa. Assim, os valores dos parâmetros dos 30 materiais hipotéticos selecionados têm valores muito diferentes do que o esperado, pois, apesar de serem considerados como os mais semelhantes devido aos seus baixos valores da função-objetivo f , estes materiais não são semelhantes em alguns valores de parâmetros. Daí existir uma discrepância elevada no erro relativo da estimativa de parâmetros entre dois materiais com a mesma variação mas em sinal diferente. Desta forma é possível verificar que a função-objetivo f nem sempre permite estimar convenientemente os valores dos parâmetros constitutivos.

Obtêm-se também na Figura 4.5 as estimativas de n e C nesta nova estratégia com a nova função-objetivo, designados com o índice “1,30”.

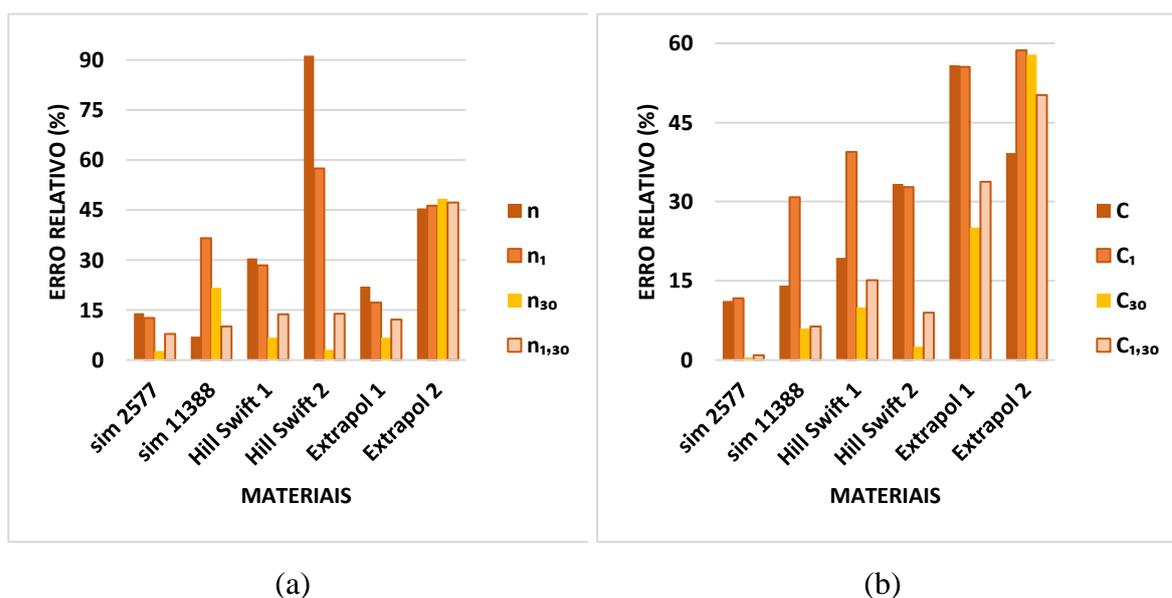


Figura 4.5. Comparação entre as diferentes estratégias para o parâmetro: (a) n ; (b) C .

Comparando os valores de erro relativos na estimativa dos parâmetros na Figura 4.5, percebe-se que o resultado da nova estratégia (índice “30”) é o que, no geral, permite atingir valores de erro mais baixos. Apenas o material “Extrapolado 2” não apresenta quaisquer melhorias na estimativa dos parâmetros com estas melhorias estudadas.

Para uma melhor compreensão destes resultados traçou-se os gráficos da lei de Swift para todas as estimativas analisadas, representados na Figura 4.6.

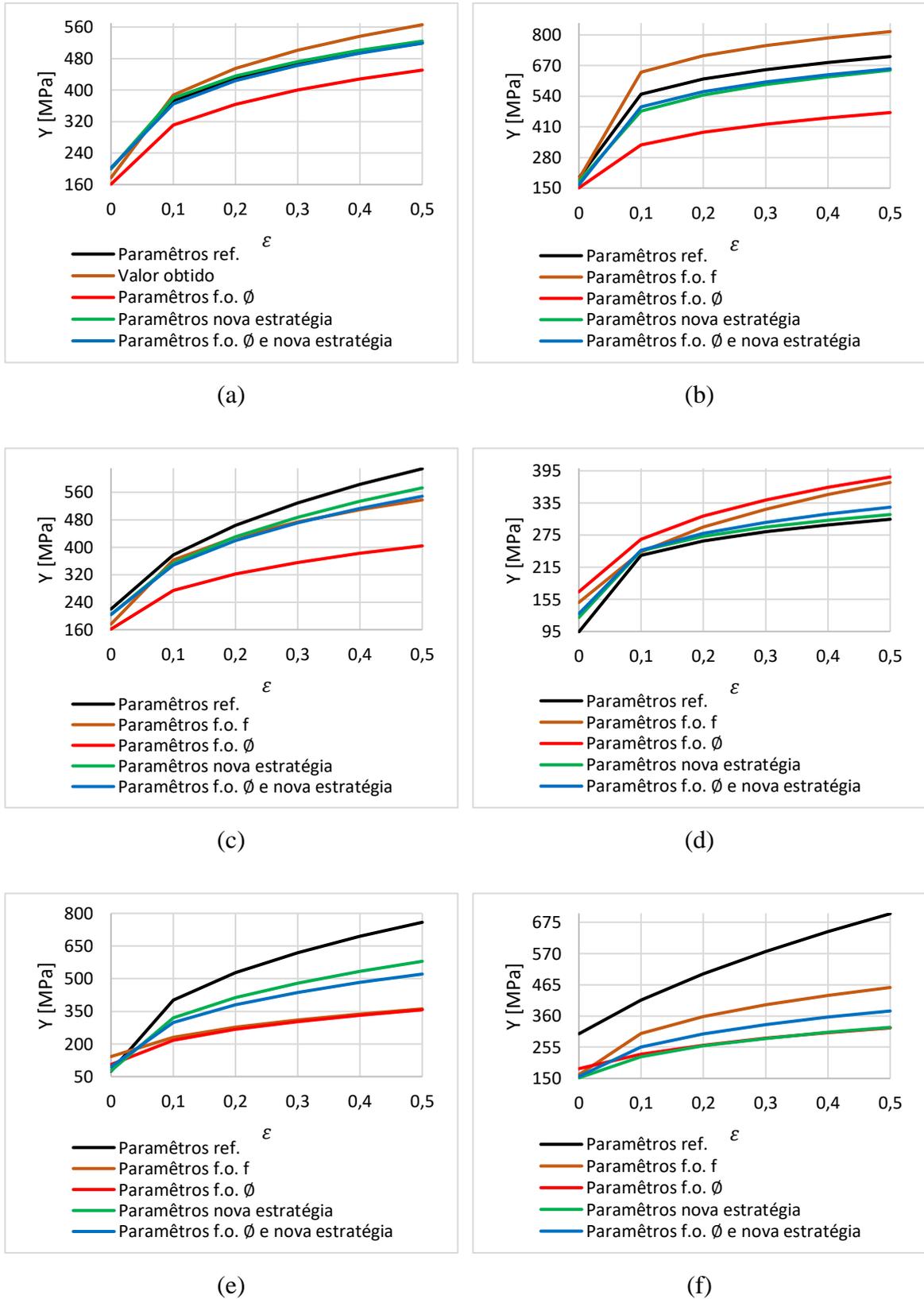


Figura 4.6. Representação da lei de Swift para: (a) Simulação 2577; (b) Simulação 11388; (c) Hill Swift 1; (d) Hill Swift 2; (e) Extrapolado 1; (f) Extrapolado 2.

Observa-se também, que a nova estratégia de melhoria é a estratégia que obtém a curva mais semelhante e próxima à curva da lei de Swift com os parâmetros de referência na maioria dos materiais analisados.

5. CONCLUSÕES

O propósito desta dissertação, é a elaboração de estratégias de identificação do comportamento plástico de chapas metálicas. Através da aplicação da análise de elementos finitos, construiu-se uma base de dados que foi utilizada para a aplicação das estratégias estudadas.

Numa primeira abordagem, estimou-se os parâmetros do material DC06 para todas as simulações da base de dados. Parte-se do pressuposto que este cálculo inicial dos parâmetros deu resultados muito favoráveis (erros baixos) para a estimativa dos parâmetros do material de referência porque todos os materiais hipotéticos da base de dados foram gerados a partir desse material. Seguiu-se uma análise da sensibilidade à quantidade de dados onde se verificou uma redução do erro relativo médio, associado a uma redução do desvio-padrão em todos os parâmetros com o aumento do número de materiais hipotéticos contidos na base de dados. Assim pode-se concluir que se a base de dados tivesse um número superior de materiais hipotéticos, as estimativas provavelmente iriam melhorar. Dado o elevado erro dos parâmetros n e C , estudou-se uma nova função-objetivo \emptyset com intuito de obter uma melhor estimativa desses parâmetros em relação à função-objetivo aplicada inicialmente, que é utilizada para estimar os restantes parâmetros. Como resultado, verificou-se uma melhoria da estimativa.

Posteriormente, analisou-se a sensibilidade desta estratégia a outros materiais distintos do material de referência considerado inicialmente. Observou-se um grande aumento do erro relativo em relação aos parâmetros de referência, o que originou o estudo de uma nova estratégia de modo a melhorar esta estimativa. Conclui-se que, utilizar esta nova estratégia, ao considerar apenas os 30 materiais hipotéticos mais semelhantes ao material de referência para estimar os parâmetros, melhora a estimativa dos parâmetros do material no geral. Mas, após a análise da Tabela 4.2, pode-se constatar que apesar da estimativa ser realizada com materiais idênticos em termos de valores força-deslocamento, não são necessariamente idênticos em termos dos valores dos parâmetros do material. Este resultado também se pode ter verificado devido ao facto dos materiais estudados na Tabela

4.2 serem materiais com poucos materiais hipotéticos idênticos na base de dados (por já se encontrarem ou no limiar da variação dos valores da base de dados ou até mesmo fora).

A base de dados deveria conter uma maior variação de parâmetros já que se verifica que o material “Extrapolado 2”, o único material em que todos os parâmetros ultrapassam os 40% de variação (o máximo de variação na base de dados), é no geral o material com maior erro nos parâmetros estudados. Também se pode concluir que existe uma necessidade de aumentar o número de materiais hipotéticos da base de dados, pois este é o único material que a base de dados não contém um único material com parâmetros iguais aos seus. Assim, quanto maior o número de materiais hipotéticos, mais provável é de encontrar materiais com os valores idênticos e, conseqüentemente, melhor será a estimativa.

Para futuros trabalhos sugere-se o aumento do número de materiais hipotéticos na base de dados e uma maior variação dos parâmetros dos mesmos. Também o estudo de outras funções-objetivo, outro tipo de regressões, ou aplicar outros modelos constitutivos pode possibilitar melhorias. Incluir também outro tipo de informação dos ensaios, como por exemplo, o campo de deformações medido na superfície do provete, poderá permitir a melhoria da precisão das estimativas dos parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Avril, S., Bonnet, M., Bretelle, A. S., Grédiac, M., Hild, F., Ienny, P., Latourte, F., Lemosse, D., Pagano, S., Pagnacco, E., & Pierron, F. (2008). Overview of identification methods of mechanical parameters based on full-field measurements. *Experimental Mechanics*, 48(4), 381–402. <https://doi.org/10.1007/s11340-008-9148-y>
- Banabic, D. (2010). Sheet Metal Forming Processes. In *Sheet Metal Forming Processes*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>
- Câmara, B., (2021), “Análise de sensibilidade do ensaio biaxial em provete cruciforme”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Güner, A., Soyarslan, C., Brosius, A., & Tekkaya, A. E. (2012). Characterization of anisotropy of sheet metals employing inhomogeneous strain fields for Yld2000-2D yield function. *International Journal of Solids and Structures*, 49(25), 3517–3527. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.05.001>
- Oliveira, M. C., Alves, J. L., & Menezes, L. F. (2008). Algorithms and strategies for treatment of large deformation frictional contact in the numerical simulation of deep drawing process. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 15(2), 113–162. <https://doi.org/10.1007/s11831-008-9018-x>
- Pierron, F., Avril, S., & Tran, V. T. (2010). Extension of the virtual fields method to elasto-plastic material identification with cyclic loads and kinematic hardening. *International Journal of Solids and Structures*, 47(22–23), 2993–3010. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.06.022>
- Prates, P. A., Oliveira, M. C., & Fernandes, J. V. (2014). A new strategy for the simultaneous identification of constitutive laws parameters of metal sheets using a single test. *Computational Materials Science*, 85, 102–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.12.043>
- Prates, P. A., Oliveira, M. C., & Fernandes, J. V. (2016). Identification of material parameters for thin sheets from single biaxial tensile test using a sequential inverse identification strategy. *International Journal of Material Forming*, 9(4), 547–571. <https://doi.org/10.1007/s12289-015-1241-z>
- Prates, P. A., Pereira, A. F. G., Sakharova, N. A., Oliveira, M. C., & Fernandes, J. V. (2016). Inverse Strategies for Identifying the Parameters of Constitutive Laws of Metal Sheets. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(Dic). <https://doi.org/10.1155/2016/4152963>
- Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). Global Sensitivity Analysis. The Primer. In *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. <https://doi.org/10.1002/9780470725184>

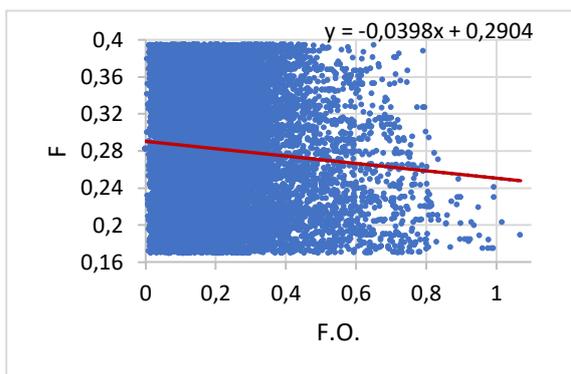
Valberg, H. S. (2010). *Applied Metal Forming: Including FEM Analysis*

Zhong, J., Song, M., Guan, K., & Dymacek, P. (2020). Application of a database in the evaluation of strengths of Cr-Mo steels by means of small punch test. *International Journal of Mechanical Sciences*, 166, 105195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105195>.

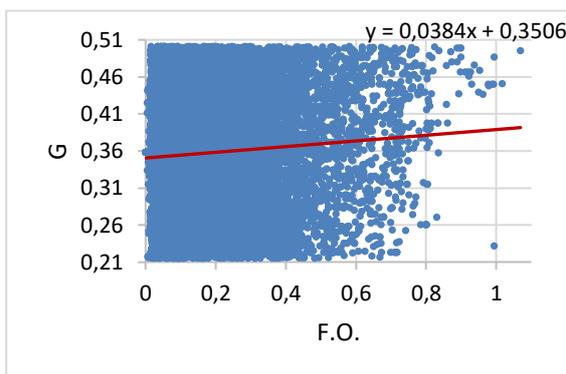
para o Eixo 0y

APÊNDICE A-ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DO MATERIAL DC06 PARA O EIXO 0Y

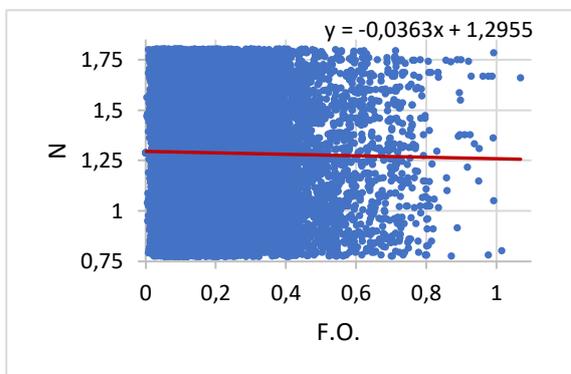
Gráficos da estimativa dos parâmetros para o eixo 0y para as 15925 simulações.



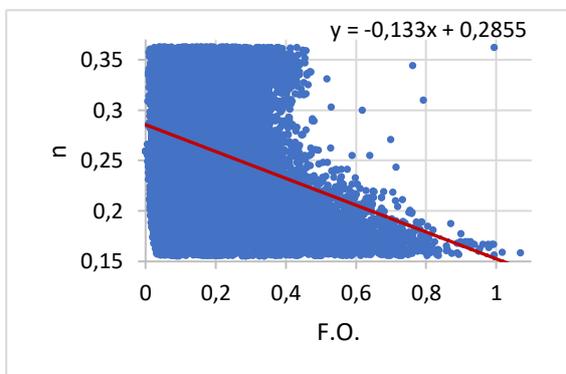
(a)



(b)



(c)



(d)

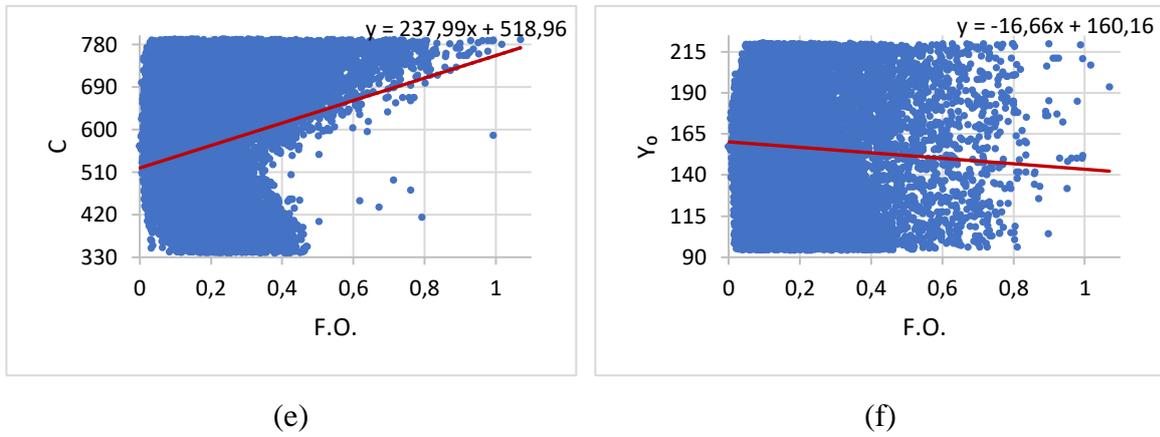


Figura A.1. Estimativa dos parâmetros do material DC06 para o eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

APÊNDICE B-ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS PARA OS RESTANTES MATERIAIS

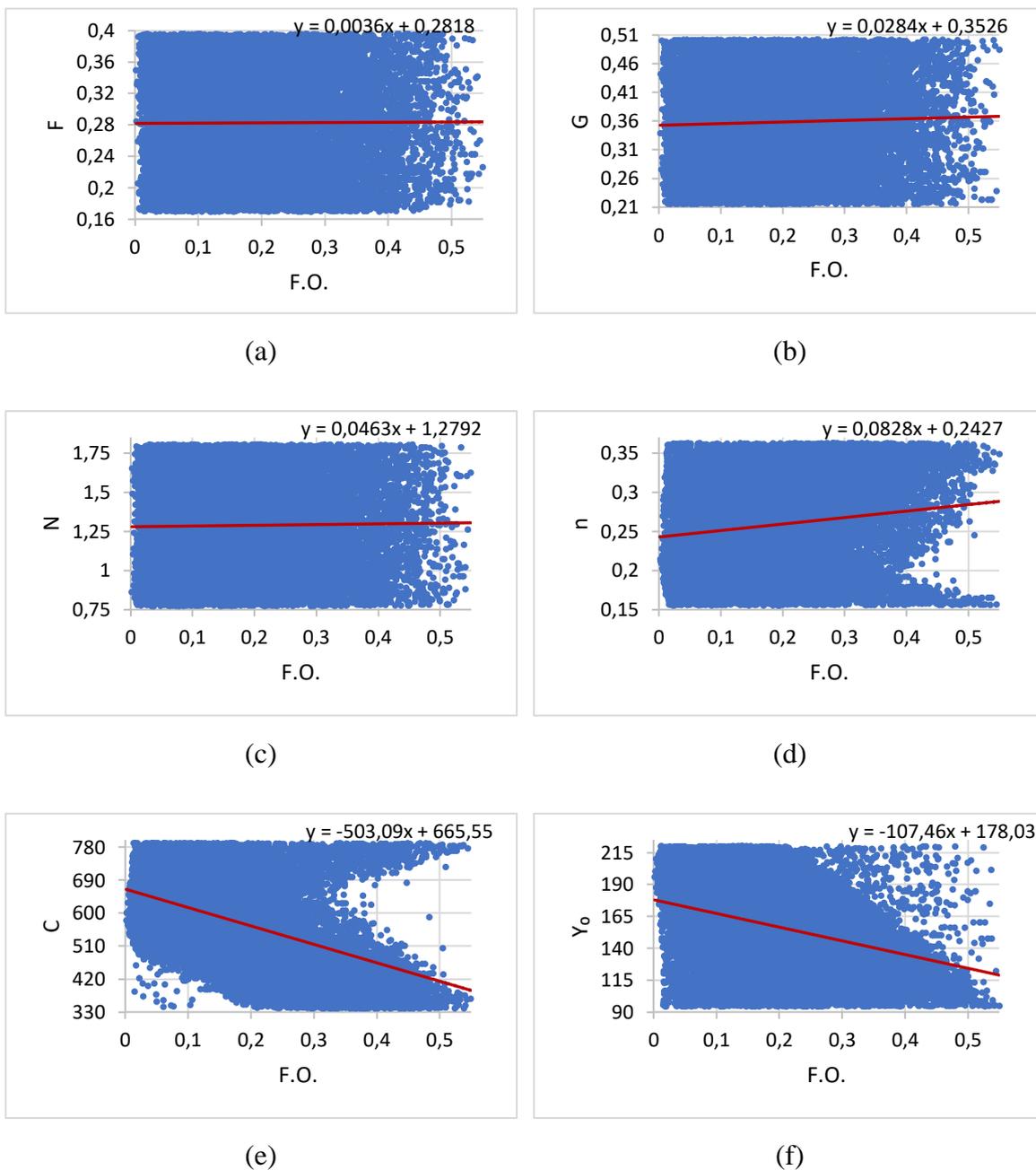


Figura B.1. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 2577” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

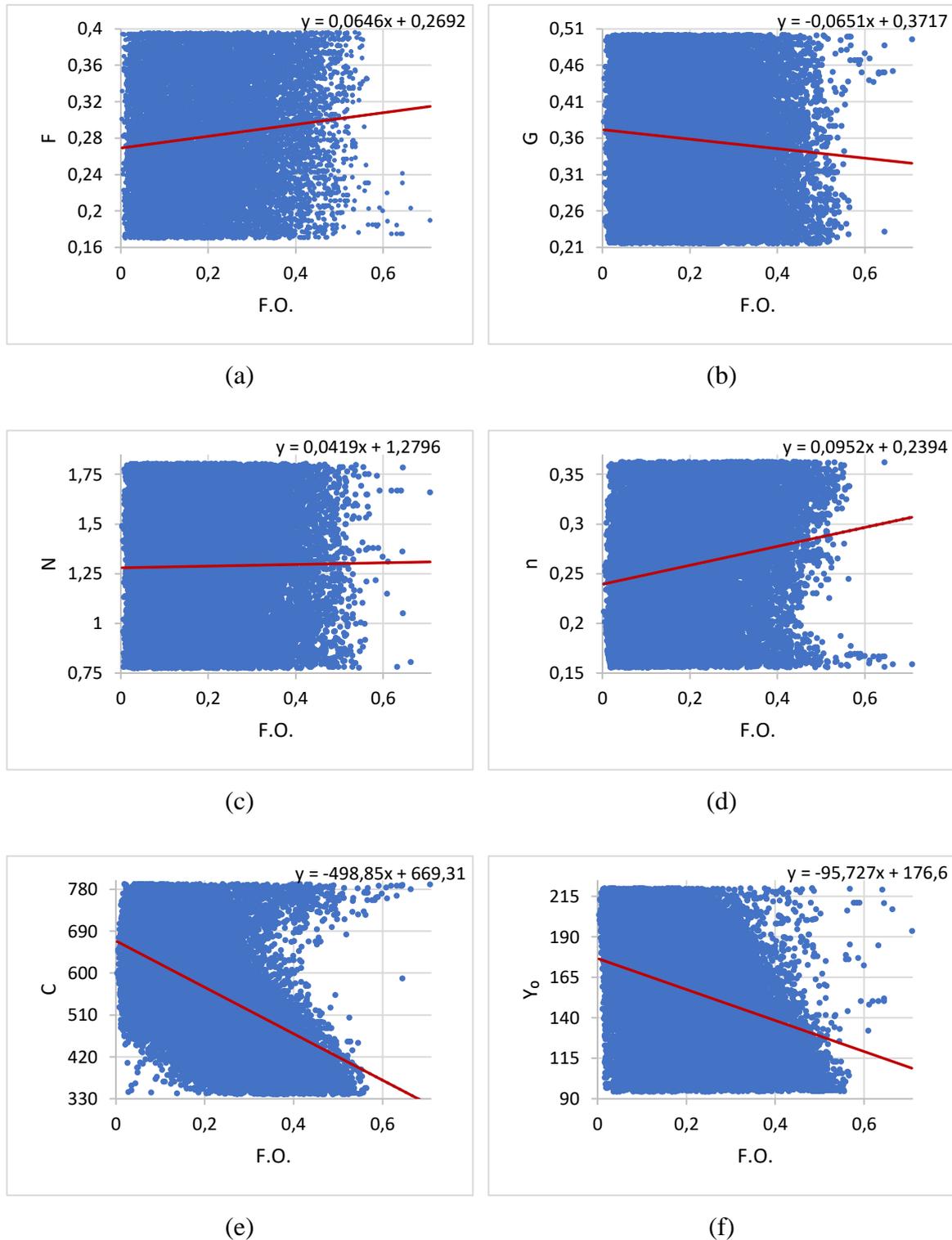


Figura B.2. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 2577” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

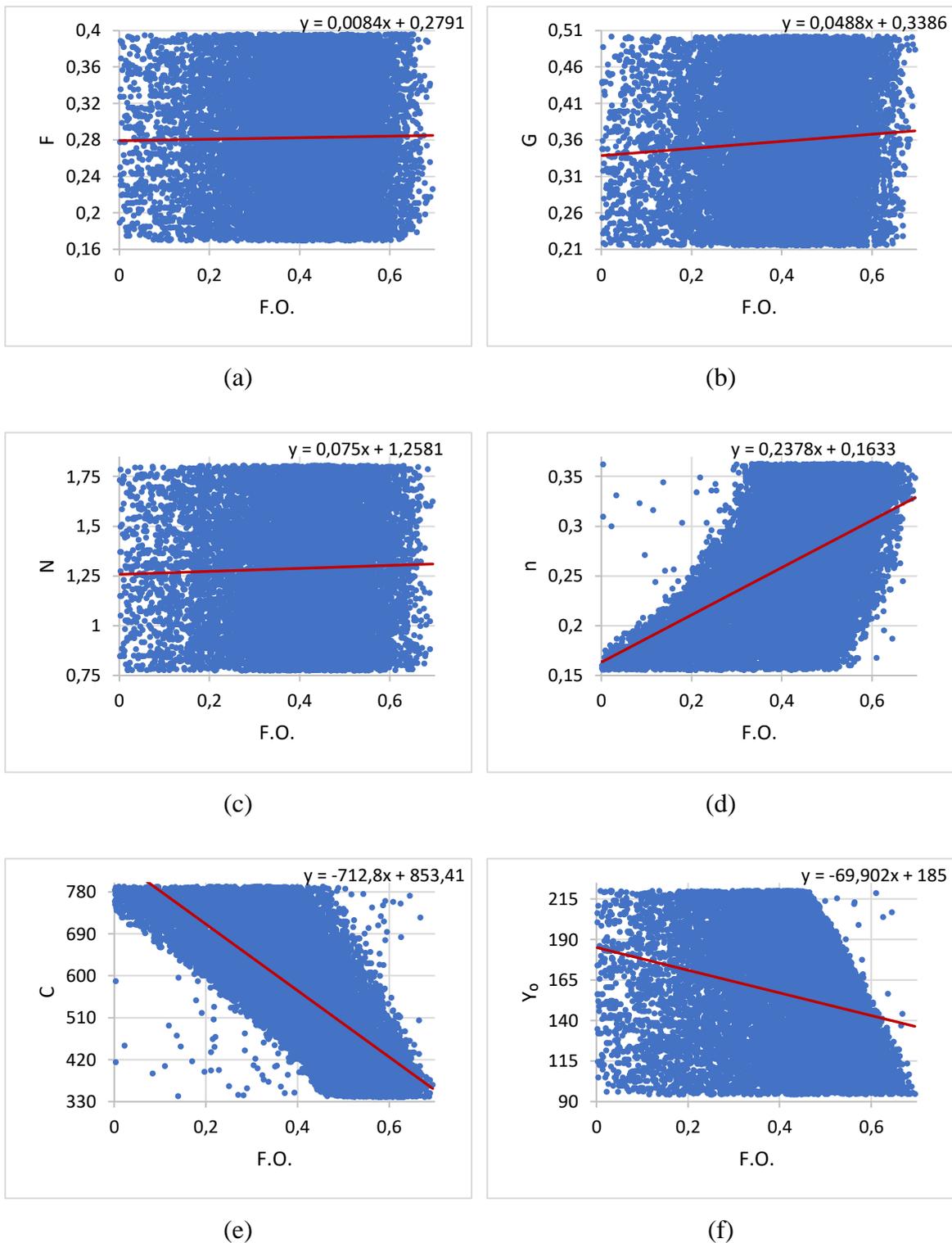


Figura B.3. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 11388” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

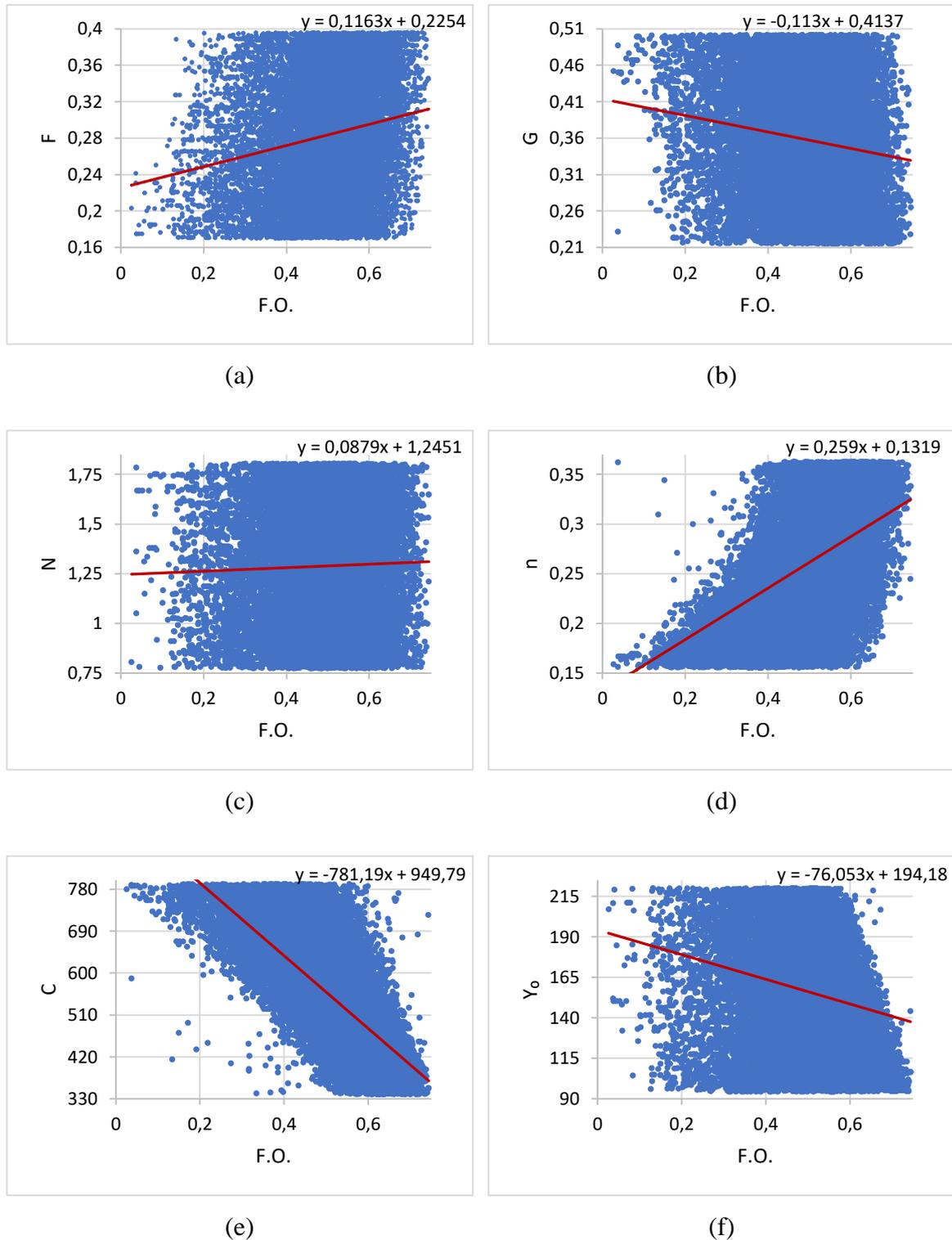


Figura B.4. Estimativa dos parâmetros do material “simulação 11388” do eixo Oy para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

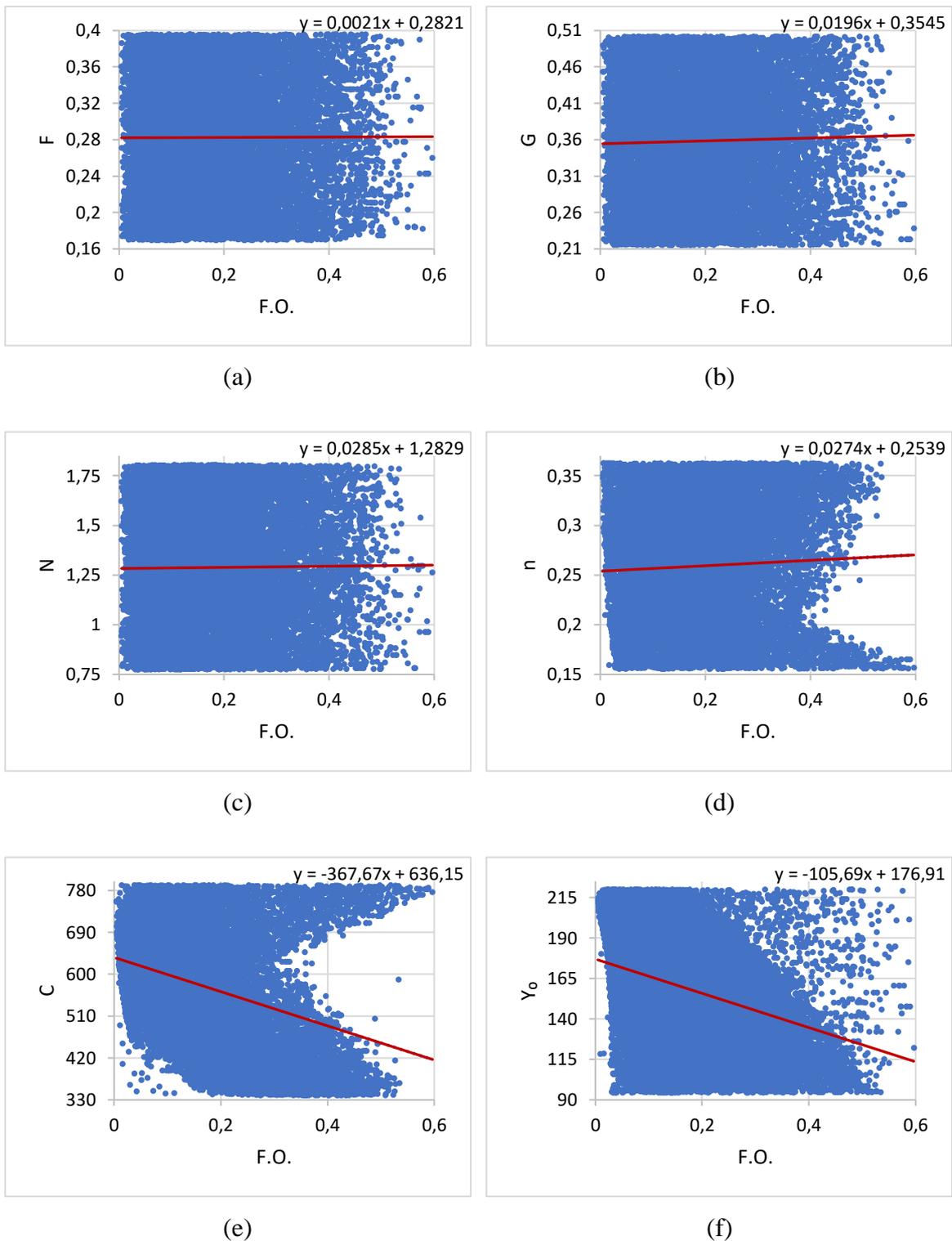


Figura B.5. Estimativa dos parâmetros do material “Hill Swift 1” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

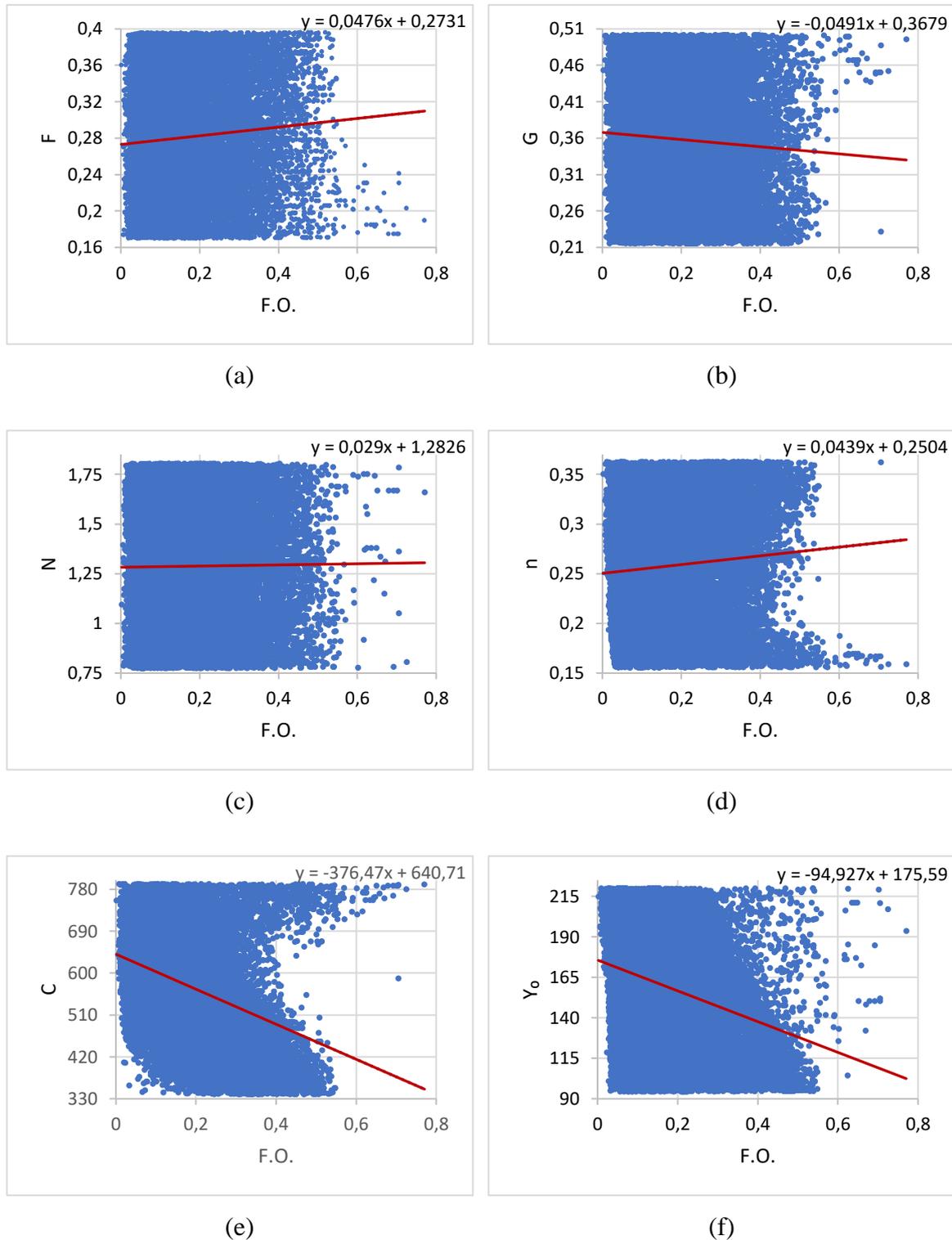


Figura B.6. Estimativa dos parâmetros do material "Hill Swift 1" do eixo Oy para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

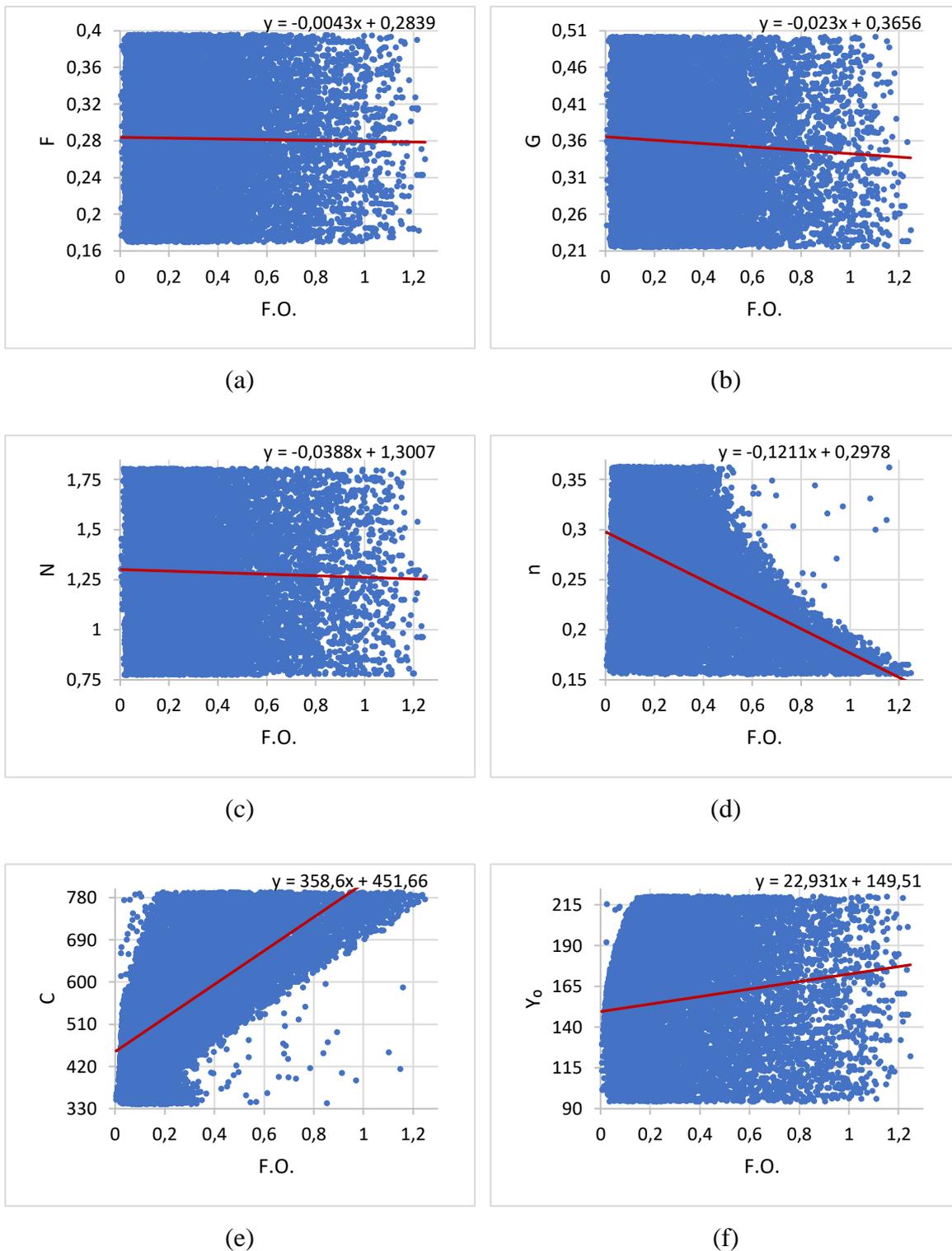


Figura B.7. Estimativa dos parâmetros do material “Hill Swift 2” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

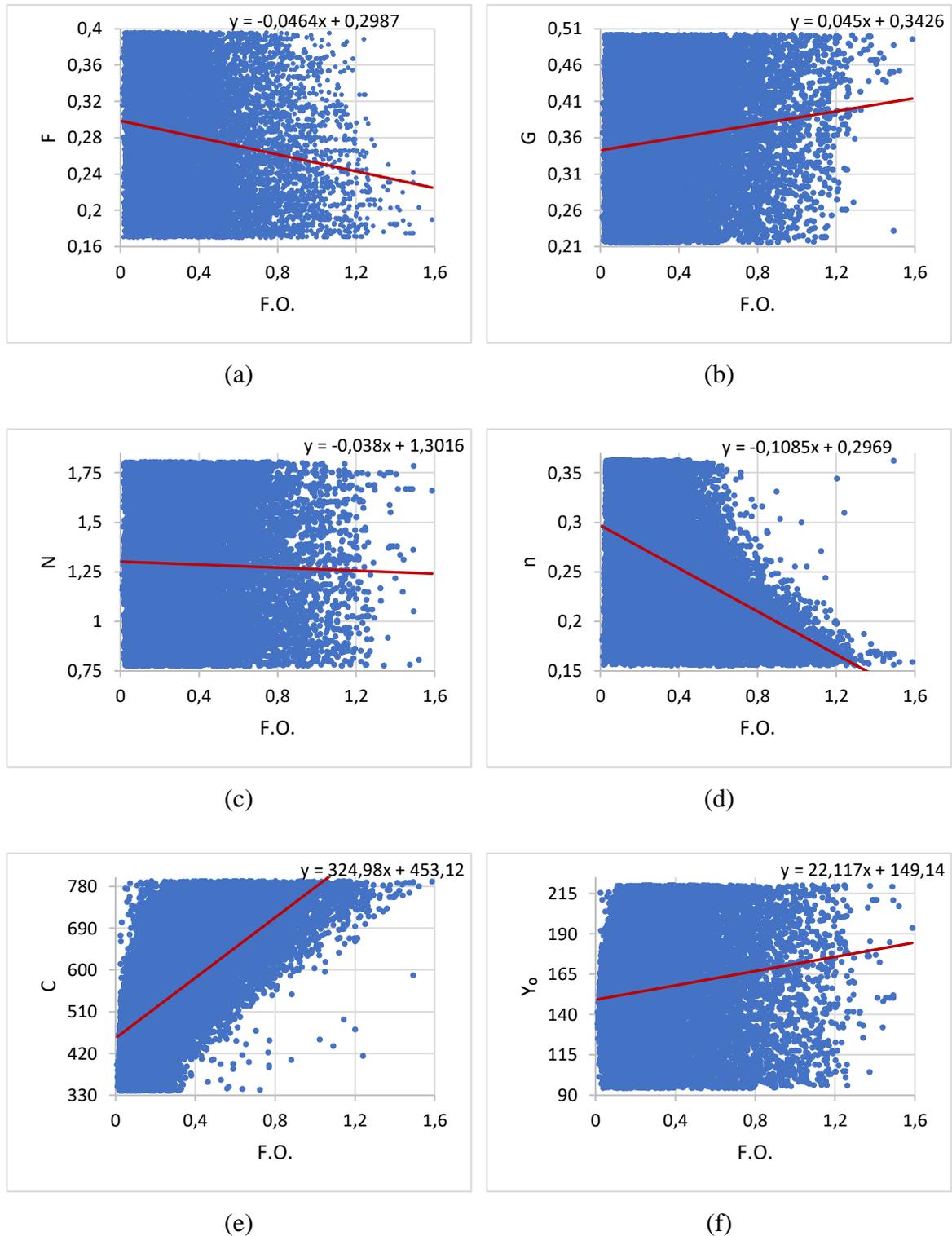


Figura B.8. Estimativa dos parâmetros do material "Hill Swift 2" do eixo Oy para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

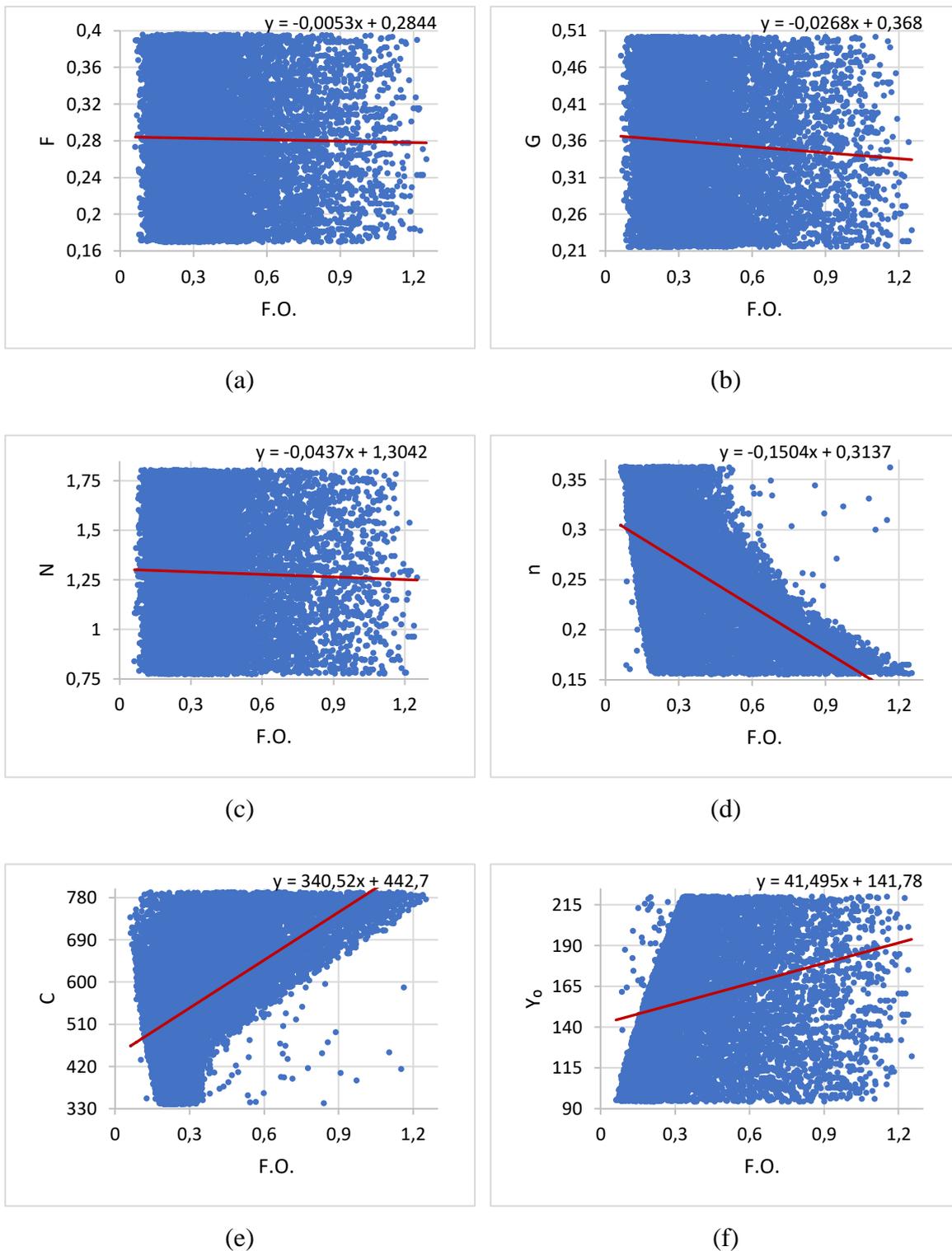


Figura B.9. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 1” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

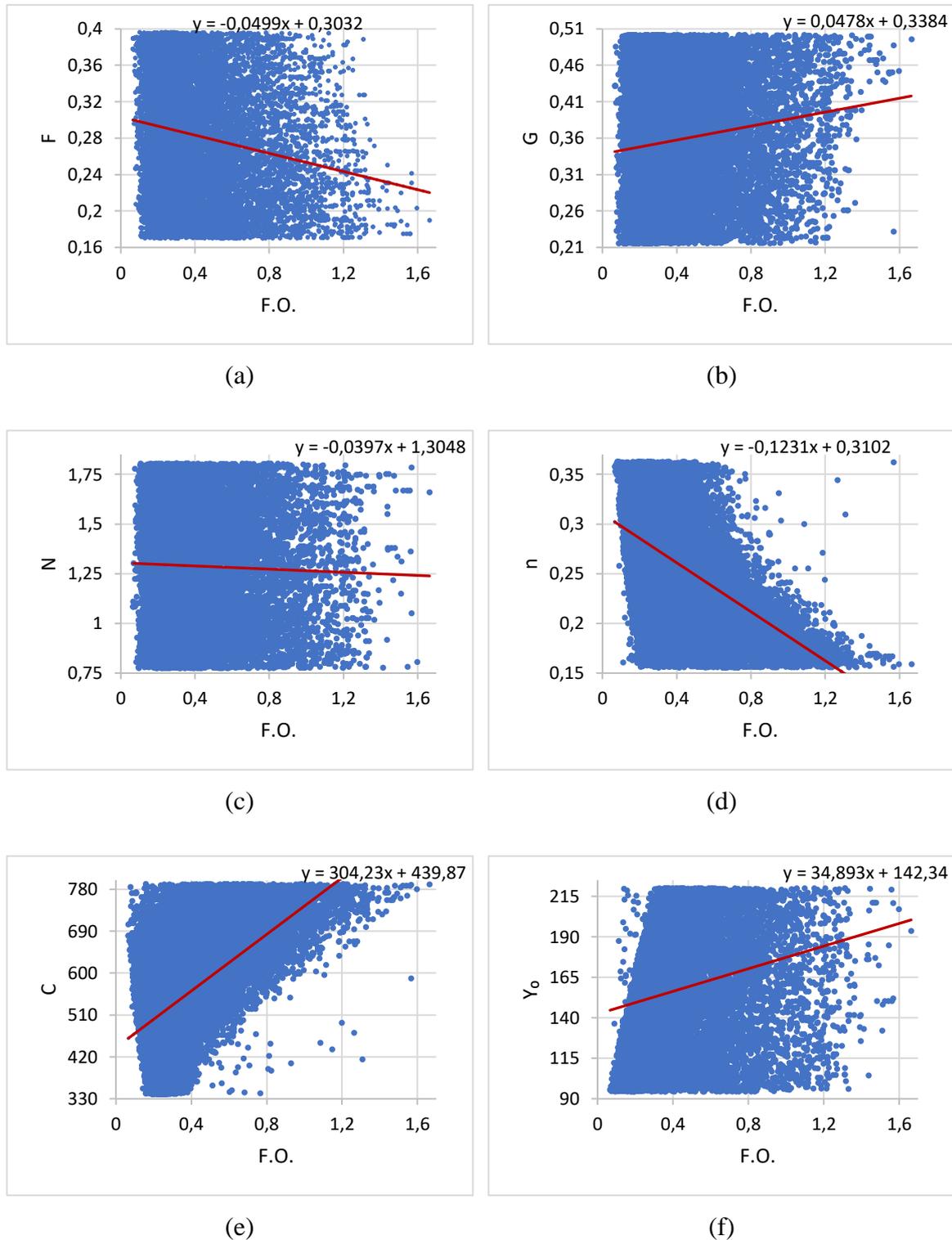


Figura B.10. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 1” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

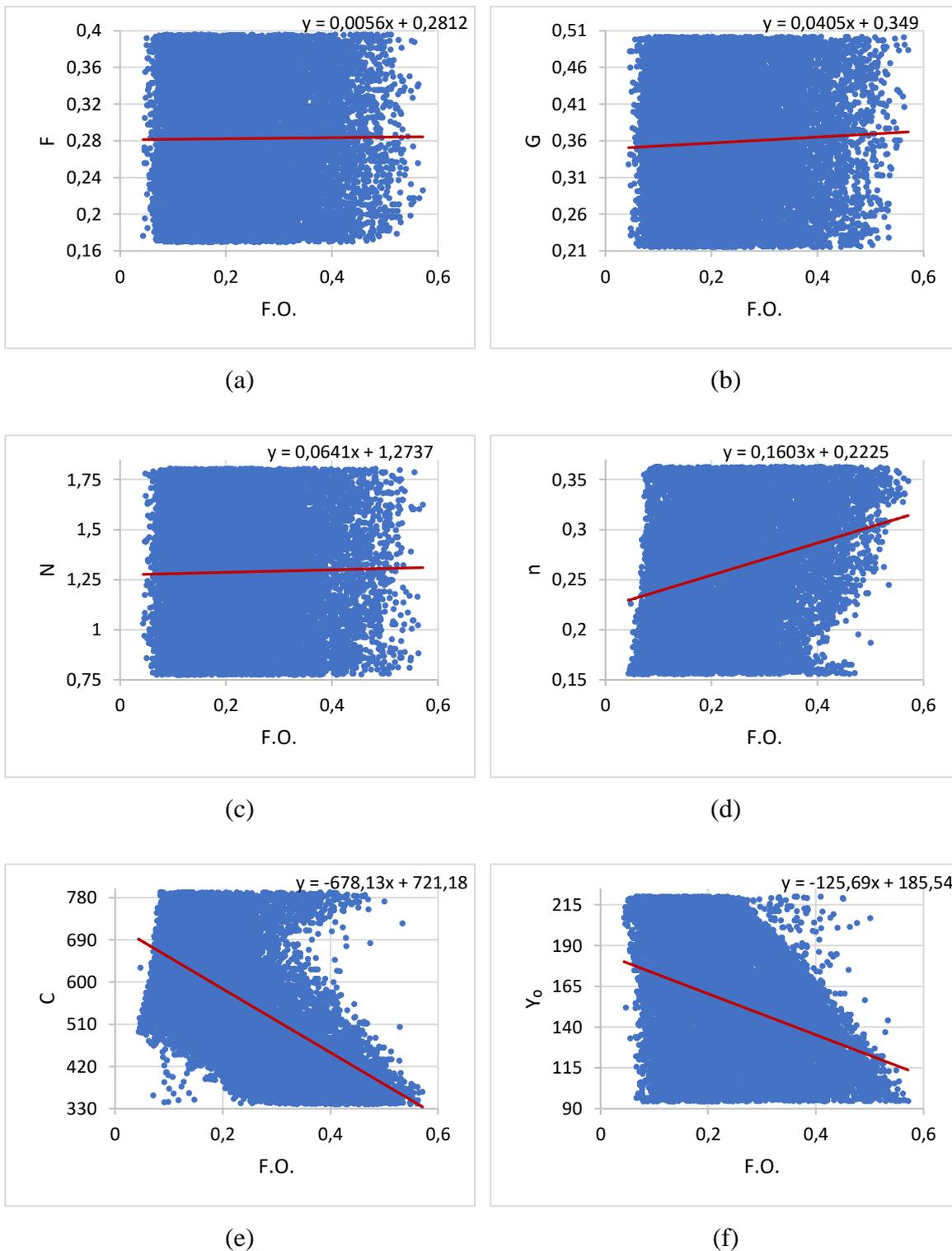


Figura B.11. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 2” do eixo 0x para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .

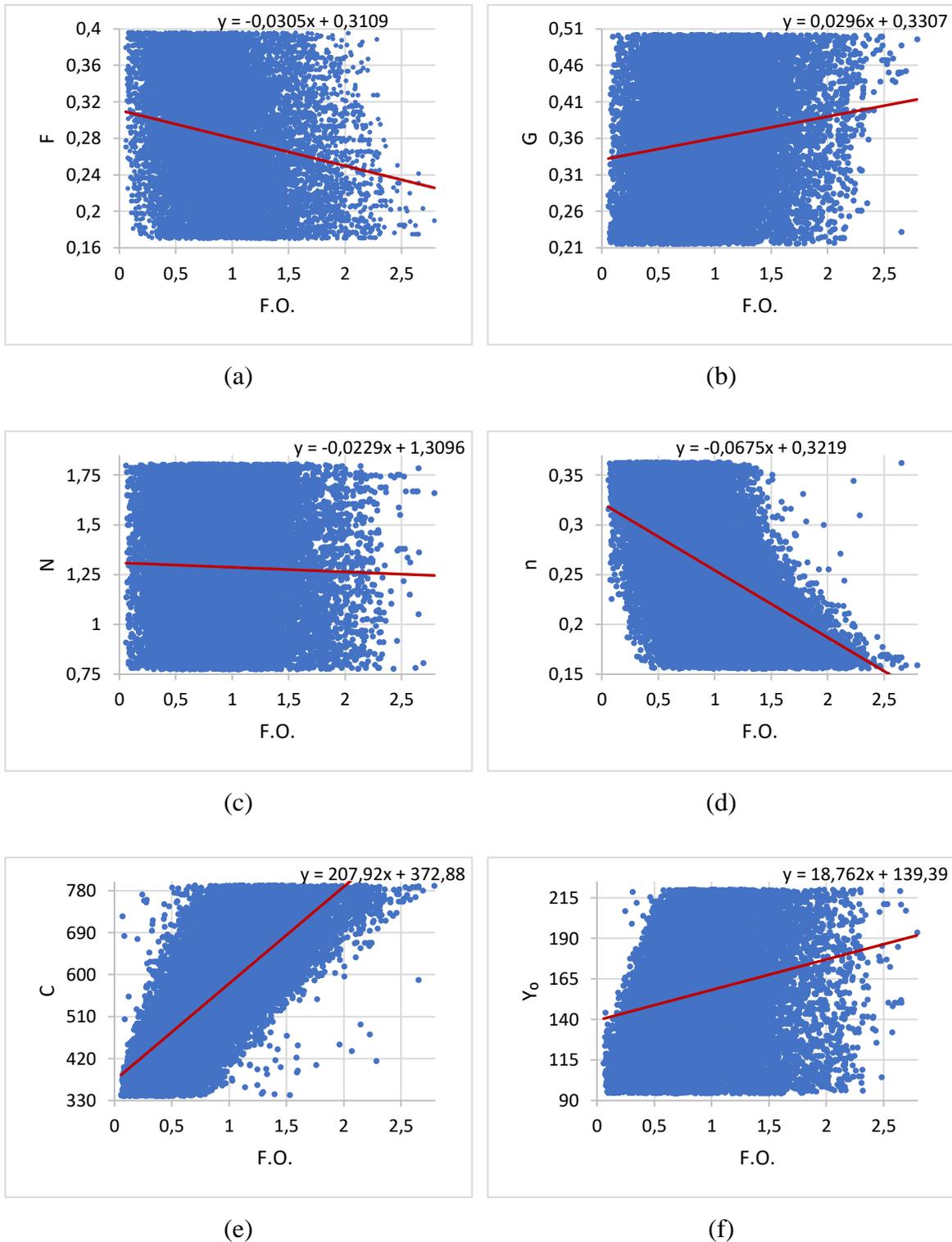


Figura B.12. Estimativa dos parâmetros do material “Extrapolado 2” do eixo 0y para: (a) F ; (b) G ; (c) N ; (d) n ; (e) C ; (f) Y_0 .