EDUARDO ALBERTO PÉREZ RUIZ

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS REVESTIDOS SUBMETIDOS A ESFORÇOS DE CONTATO NORMAIS E TANGENCIAIS

SÃO PAULO

2016

EDUARDO ALBERTO PÉREZ RUIZ

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS REVESTIDOS SUBMETIDOS A ESFORÇOS DE CONTATO NORMAIS E TANGENCIAIS

Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto e Fabricação

Orientador:
Prof. Dr. Roberto Martins de Souza

SÃO PAULO

2016

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 07 de setembro de 2016

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catalogação-na-publicação

Pérez Ruiz, Eduardo Alberto
COMPORTAMENTO MECÂNICO DE SISTEMAS REVESTIDOS SUBMETIDOS A ESFORÇOS DE CONTATO NORMAIS E TANGENCIAIS / E. A. Pérez Ruiz -- versão corr. -- São Paulo, 2016.
141 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Ensaio de riscamento 2.Simulação numérica 3.Sistemas revestidos 4.Comportamento mecânico 5.Modos de Falha I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

A Dios, a mi familia y en especial a ese pequeñín: "Juan Davidzinho" traducción de Amor y motivación.

AGRADECIMENTOS

Ao senhor orientador, Prof. Dr. Roberto Martins de Souza, pela paciência, apoio, e grande confiança depositada em mim.

Ao senhor Prof. Dr. Amilton Sinatora, pela acolhida no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS)

Aos colegas do Laboratório de Fenômenos de Superfície pelo companheirismo e amizade, em especial à Vanessa Seriacopi, ao Gil Magno e ao Eleir Mundim Bortoleto.

Aos amigos colombianos alunos de pós graduação da EPUSP, Jimmy Penagos, Alexander Zuleta, Luis Varela, Pablo Silva pelo apoio e amizade, sempre desinteressada.

Aos professores da Universidad de Ibagué, Carlos Moya, Darío Martínez., quens estiveram sempre atentos ao desenvolvimento da pesquisa. Ao igual que aos caros amigos Fredy LLano M. e Oscar Araque de los Ríos, pela amizade, pelas dicas e pela motivação.

Aos grandes amigos e colegas da sala 4 de professores da Engenharia da Unviersidad de Ibagué, em particular o Celso, o Gustavo e o "Don Carlos", pela motivação para atingir este objetivo.

“Ninguém caminha sem aprender a caminhar,
sem aprender a fazer o caminho caminhando,
refazendo e retocando o sonho
pelo qual se pôs a caminhar.”
(Paulo Freire)

“Só sei que nada sei,
e o fato de saber isso, me coloca em vantagem
sobre aqueles que acham que sabem alguma coisa.”
(Sócrates)

RESUMO

A deposição de filmes finos resistentes ao desgaste é uma prática realizada com bastante frequência para melhorar o comportamento tribológico (atrito, desgaste, lubrificação) de diferentes peças e componentes. Afim de se garantir o adequado funcionamento do sistema revestido (substrato+filme), é importante avaliar o comportamento mecânico do mesmo. Um método para avaliação e estudo do comportamento mecânico destes sistemas é o ensaio de riscamento. O ensaio é utilizado para analisar a fratura superficial do revestimento (falha chamada coesiva), ou a resistência à adesão (falha chamada adesiva), e os modos de falha de revestimentos duros (HV≥5 GPa) e finos (≤30 μm), depositados sobre substratos cerâmicos ou metálicos. A caracterização de alguns modos de falha nos sistemas revestidos está relacionada com modelos qualitativos de tensões presentes na região de contato e nas bordas do riscamento.

Neste trabalho, foi estudado o comportamento das tensões Sxx e Szz desenvolvidas durante o riscamento de sistemas compostos por combinações de revestimentos/substratos. O trabalho foi baseado no desenvolvimento de modelos de simulação em 3D e 2D, utilizando o método dos elementos finitos (MEF), nos quais, uma partícula rígida com características de indentador Rockwell C, aplica carga progressiva até 2 N, ao longo de uma distância de 0,5 mm. No estudo, variou-se a dureza, traduzida em valores de tensão de escoamento do revestimento e do substrato, da mesma forma, analisou-se o efeito da tensão residual do revestimento, o efeito da espessura, o atrito, e a rugosidade, na superfície e na interface do sistema. O fato de obter valores de tensão que ultrapassam o valor do escoamento do revestimento pressupõe a possível ocorrência de falhas nos sistemas revestidos.

Os resultados obtidos por simulação indicaram que as combinações de revestimento com tensão de escoamento baixa (Sy<3000 MPa) levam a experimentar tensões ao nível da tensão de escoamento do revestimento. Os revestimentos com tensão de escoamento Sy>5000 MPa apresentaram valores de tensão inferiores aos da tensão do revestimento, bem como o uso de tensão residual de -3 GPa no revestimento, assim como o aumento da espessura do revestimento têm grande importância nos sistemas revestidos, em particular nos casos em que a tensão de escoamento no revestimento é Sy≥5000MPa.

O efeito do coeficiente de atrito leva à obtenção de valores de tensão (Sxx ou Szz) suficientemente altos na maioria das combinações, sendo esta a variável de estudo que levou ao maior número de vezes que foi atingido o valor da tensão de escoamento do revestimento.

Da mesma forma, a rugosidade afeta os valores de tensão Sxx (interior do sulco). Ao aumentar a rugosidade do sistema aumenta a possibilidade de ultrapassar valores da tensão do revestimento na superfície e na interface do conjunto.

Finalmente, pela complexidade do número de variáveis que afetam o ensaio, a simulação numérica sugere que o fato de analisar unicamente a dureza dos materiais, assim como as diferentes variáveis de forma isolada, não permite a reprodução de um mapa de falhas próximo ao proposto na literatura.

Palavras-Chave: Ensaio de riscamento. Simulação Numérica. Sistemas revestidos. Comportamento mecânico. Modos de falha.

ABSTRACT

The deposition of wear resistant thin films is a common practice to improve the tribological behavior (friction, wear, lubrication) of several mechanical components. In order to guarantee the adequate performance of the coated systems, it is important to evaluate the mechanical behavior. A method for evaluation and study of the coated systems is the scratch test. The test is used to analyze the fracture of the coating (cohesive failure), or the adhesion of the coating (adhesive failure), and the failure modes of hard coatings (HV≥5 GPa) and thin (≤30 μm) deposited on ceramic or metallic substrates. The characterization of some failure modes in coated systems is related to qualitative stress models at the contact region and the scratch edges.

In this work, the behavior of the Sxx and Szz stresses developed during the scratch test was analyzed in different combinations of coatings/substrates. The work was based on the development of 3D and 2D simulation models using the finite element method (FEM). In the simulation, a rigid particle (with the geometry of Rockwell C indenter) applied progressive load to 2N along a 0.5 mm distance. In the study, the hardness was expressed as yield stress values in the coating and the substrate. In addition, it was examined the effect of coating residual stress (-3 GPa), as well as the effect of the thickness, the friction coefficient, and roughness of the surface and interface in the stresses behavior. The fact of obtaining tension values, which exceed the yield stress of coating implies the possible occurrence of failure.

The results obtained by simulation indicated that the coating combinations with low yield stress (Sy < 3000 MPa) lead to Sxx and Szz stress values in the level of the coated yield stress. The coatings with yield stress Sy > 5000 MPa enable to obtain low Sxx and Szz values. The use of the residual stresses (-3 GPa) as well as increasing the thickness of the coating are very important factors in the coated systems, especially in the case of coatings with Sy > 5000 MPa.

The effect of the friction coefficient leads to stress values (Sxx or Szz) sufficiently high in most of the combinations. This factor is the most important variable leading to the greater number of times that the value of the coating yield stress was reached.

The roughness is responsible for Sxx stress values (inside groove). Increasing the roughness of the system increased the possibility of exceeding stress values in the surface and interface coating.

Finally, by the complexity of the number of variables that affect the scratch test, the numerical simulation suggests that the fact of only analyzing the hardness of materials, as well as other isolated variables of the scratch test does not allow reproduction of a map of failures similar to that proposed in the literature

Keywords: Scratch test. Numerical simulation. Coated systems. Mechanical Behavior. Failure modes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismos de contato tribológico 23
Figura 2 - Condições de contato macro mecânico durante o contato de uma esfera sobre uma superfície plana 24
Figura 3 - Temperaturas de trabalho segundo materiais substratos e processos de deposição. 26
Figura 4 - Esquema do método de ensaio (Scratch test) 29
Figura 5- Representação esquemática dos modos de falha característicos no ensaio de riscamento segundo influência da dureza do substrato e do revestimento. 33
Figura 6- Descrição gráfica e Micrografias do modo de falha da categoria 1. 34
Figura 7 - Descrição gráfica e Micrografias do modo de falha da categoria 2. 34
Figura 8 - Descrição gráfica e Micrografias do modo de falha da categoria 3. 35
Figura 9 - Ilustração do dobramento do sistema levando à indução de tensões. 38
Figura 10 - Tensão tangencial na superfície do revestimento para diferentes cargas de ensaio em sistema Al/Polimero. 38
Figura 11 - Ilustração do indentador deslizando sobre o sistema revestido. 40
Figura 12 - Representação das tensões na superfície do revestimento durante o contato com o indentador. 40
Figura 13 - Padrões de trincas gerados no ensaio de riscamento. (a) Trincas angulares, (b) trincas paralelas, (c) trincas semi circulares, (d) lascamento do revestimento, (e) fragmentação do revestimento, (f) Destacamento do revestimento 41
Figura 14 - Fotografias das trincas observadas no ensaio de riscamento. a) Trinca angular depois de 1,1 mm de deslizamento. b) Arrango de trincas angulares 1,5 mm. c) Trincas angulares e trincas paralelas 2,3 mm. 41
Figura 15 - Modos de falha do revestimento TiAlN depositado sobre aço rápido (HSS - High Speed Steel). (a) Trincas laterais (40N). (b) Trincas angulares (60N). (c) Trincas transversais dentro do sulco apresentadas antes da carga critica (64N). 42
Figura 16 - Esquema do modelo 3D para simulação do ensaio de riscamento. 47
Figura 17 - Malhas consideradas na análise de convergência. 51
Figura 18 - Valores de tensão principal Sxx obtidos em cada uma das malhas do modelo. 51
Figura 19 - Detalhe do refinamento da malha na região do contato 52
Figura 20 - Esquema do modelo 2D para simulação do riscamento 53
Figura 21 - Modelos 2D segundo rugosidade no sistema revestido. a) Ra=0 b) Ra= 0,16µm c) Ra= 0,35 µm 54
Figura 22 - Linha de contato para a obtenção da tensão Sxx e Szz 56
Figura 23 - Tensão Sxx ao longo da superfície do sistema durante o riscamento. 57

Figura 24 - Detalhe do pico de tensão principal Sxx ao longo da superfície do sistema durante o riscamento. 58
Figura 25 - Tensão Szz na superfície ao longo da linha transversal atrás do indentador 59
Figura 26 - Tensão Sxx ao longo da superfície do sistema após o descarregamento 60
Figura 27 - Tensão Szz ao longo da superfície do sistema após o descarregamento 61
Figura 28 - Tensão Sxx ao longo da interface revestimento/substrato durante o riscamento 62
Figura 29 - Detalhe do pico de tensão principal Sxx ao longo da interface revestimento/substrato durante o riscamento 63
Figura 30 - Tensão Szz ao longo da interface revestimento/substrato durante o riscamento 64
Figura 31 - Tensão Sxx ao longo da interface revestimento/substrato após o descarregamento. 65
Figura 32 - Tensão Szz ao longo da interface revestimento/substrato após o descarregamento. 66
Figura 33 - Tensão Sxx ao longo da interface do lado do substrato durante o riscamento 67
Figura 34 - Tensão Szz ao longo da interface, na superfície do substrato durante o riscamento 68
Figura 35 - Tensão Sxx ao longo do substrato depois do descarregamento 69
Figura 36 - Tensão Szz ao longo do substrato depois do descarregamento 70
Figura 37 - Influência da tensão residual na tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos 73
Figura 38 - Detalhe do efeito da tensão residual do revestimento no pico de tensão ao longo da superfície 74
Figura 39 - Influência da tensão residual na tensão Szz na superfície, na direção transversal ao riscamento. 75
Figura 40 - Influência da tensão residual na tensão Sxx ao longo da interface durante o riscamento 76
Figura 41 - Detalhe do efeito da tensão residual do revestimento, no pico de tensão Sxx ao longo da interface 77
Figura 42 - Influência da tensão residual na tensão Szz na interface, na direção transversal ao riscamento. 78
Figura 43 - Influência da tensão residual na tensão Sxx no substrato ao longo da direção do riscamento. 79
Figura 44 - Influência da tensão residual na tensão Szz no substrato, na direção transversal ao riscamento. 80
Figura 45 - Efeito da espessura do revestimento na tensão principal Sxx ao longo da superfície 84
Figura 46 - Detalhe do efeito da espessura do revestimento no pico de tensão principal Sxx ao longo da superfície 85
Figura 47 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Szz na superfície dos sistemas revestidos 86
Figura 48 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Sxx ao longo da interface do sistema. 87
Figura 49 - Detalhe do efeito da espessura do revestimento no pico de tensão principal Sxx ao longo da interface 88

Figura 50 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Szz na interface dos sistemas revestidos 89
Figura 51 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Sxx ao longo da superfície do substrato 90
Figura 52 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Szz ao longo da superfície do substrato 91
Figura 53 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Sxx ao longo da superfície. 94
Figura 54 - Detalhe do efeito do atrito no contato no pico de tensão Sxx ao longo da superfície 95
Figura 55 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Szz ao longo da superfície dos sistemas revestidos 96
Figura 56 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Sxx ao longo da interface 97
Figura 57 - Detalhe do efeito do atrito no contato no pico de tensão Sxx ao longo da interface 98
Figura 58 - Efeito do atrito na tensão Szz na interface dos sistemas revestidos 99
Figura 59 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Sxx na superfície do substrato durante o riscamento 100
Figura 60 - Efeito do atrito na tensão Szz ao longo da superficie do substrato. 101
Figura 61 - Comportamento da Tensão Sxx ao longo da superfície para sistemas rugosos. 102
Figura 62 - Comportamento da Tensão Sxx ao longo da interface para sistemas rugosos. 103
Figura 63 - Comportamento da Tensão Sxx ao longo da superfície do substrato para sistemas rugosos 104
Figura 64 - Contornos da tensão Sxx no sentido de riscamento. 110
Figura 65 - Comportamento da deformação plástica na superfície do sistema revestido 111
Figura 66 - Esquema representativo da tensão na superfície segundo a movimentação do indentador 114
Figura 67 - Propagação de trinca imposta no sistema revestimento (Sy=3000 MPa) substrato (Sy=600 MPa) 116
Figura 68 - Propagação de trinca imposta no sistema revestimento (Sy=4000 MPa) substrato (Sy=600 MPa) 116
Figura 69 - Representação esquemática do tipo de trinca segundo a combinação revestimento/substrato 117
Figura 70 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos complementarios 119
Figura 71 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da interface dos sistemas revestidos complementarios 119
Figura 72 - Comportamento da tensão Szz ao longo da superfície dos sistemas revestidos complementários 120
Figura 73 - Comportamento da tensão Szz ao longo da interface dos sistemas revestidos complementários 120
Figura 74 – Mapa de representação semi quantitativa dos modos de falha segundo a dureza dos materiais 123

Figura 75 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa 124
Figura 76 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da interface dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa 125
Figura 77 - Comportamento da tensão Szz ao longo da superfície dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa 125
Figura 78 - Comportamento da tensão Szz ao longo da interface dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa 126
Figura 79 – Mapa de representação semi quantitativa dos modos de falha segundo o efeito da tensão residual 127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Parâmetros experimentais no ensaio de adesão por riscamento [52] 30
Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos modos de realização do ensaio de riscamento [52] 31
Tabela 3 - Principais falhas encontradas segundo combinação revestimento-substrato [52] 33
Tabela 4 - Propriedades Mecânicas dos materiais 49
Tabela 5 - Propriedades da simulação para a seleção da malha 50
Tabela 6 – Análise de convergência segundo valores da tensão Sxx e tempos de processamento 52
Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados na simulação 2D do riscamento. 55
Tabela 8 - Numero de elementos e tempos de processamento para os modelos rugosos 55
Tabela 9 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Dureza dos materiais) 105
Tabela 10 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Tensão residual -3GPa) 106
Tabela 11 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Espessura 4 µm) 107
Tabela 12 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Atrito 0,2) 108
Tabela 13 - Possibilidade de falha nas combinações revestimento/substrato segundo a dureza dos materiais 121
Tabela 14 - Possibilidade de falha nas combinações revestimento/substrato segundo a tensão residual -3GPa 126

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_R	Tensão residual
σ_{ep}	Tensão epitaxial
σ_g	Tensão pelo crescimento
σ_c	Tensão térmica pelo resfriamento
$\Delta\sigma t$	Tensão térmica
ΔT	Diferença entre as temperaturas de deposição e ambiente
αs	Coeficiente de expansão térmica do substrato
αc	Coeficiente de expansão térmica do revestimento
Ec	Módulo elástico do revestimento
νc	Coeficiente de Poisson do revestimento
E	Módulo elástico
St	Tensão máxima de tração
Sy	Tensão de escoamento
PEEQ	Deformação plástica equivalente
H	Dureza
Sxx	Tensão na direção do riscamento “x”
Szz	Tensao na direção transversal ao riscamento “z”
Ra	Rugosidade média
K_{IC}	Tenacidade à fratura
τ_{xy}	Tensões cisalhantes
PL	Carga progressiva de riscamento
CL	Carga constante de riscamento

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 5
RESUMO 7
ABSTRACT 9
1. INTRODUÇÃO 19
1.1 OBJETIVOS 21
1.1.1 OBJETIVO GERAL 21
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21
2. REVISÃO DA LITERATURA 22
2.1 TRIBOLOGIA E SISTEMAS REVESTIDOS 22
2.2 PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS EM FASE DE VAPOR 26
2.3 ENSAIO DE RISCAMENTO 28
2.4 APLICAÇÃO DO ENSAIO DE RISCAMENTO NA AVALIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS 30
2.5 MODOS DE FALHA DOS SISTEMAS REVESTIDOS NO ENSAIO DE RISCAMENTO 32
2.6 SIMULACÃO DE TENSÕES RESPONSÁVEIS PELA FALHA NOS SISTEMAS REVESTIDOS 36
3. MATERIAIS E MÉTODOS 46
3.1 MODELO DE SIMULAÇÃO 46
3.1.1 Modelo para análise do comportamento da tensão e falha do sistema revestido. 46
3.1.1.1 Dimensões 46
3.1.1.2 Força Normal 47
3.1.1.3 Propriedades mecânicas do sistema revestido 48
3.1.1.4 Tensão Residual no revestimento 49
3.1.1.5 Espessura do revestimento 49
3.1.1.6 Coeficiente de Atrito 49
3.1.2 Seleção do modelo de simulação 50
3.1.3 Modelo considerando rugosidade na superfície do sistema revestido 53
4. RESULTADOS 56
4.1 INFLUÊNCIA DA DUREZA DO REVESTIMENTO E DO SUBSTRATO, NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES Sxx, Szz NOS SISTEMAS REVESTIDOS. 56
4.2 INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL DO REVESTIMENTO NO COMPORTAMENTO DAS TENSOES Sxx, Szz NOS SISTEMAS REVESTIDOS. 70

4.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES Sxx, Szz. 81
4.4 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO ENTRE O INDENTADOR E O SISTEMA REVESTIDO NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES Sxx, Szz. 92
4.5 INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DO SISTEMA REVESTIDO NO COMPORTAMENTO DA TENSÃO Sxx 102
4.6 FALHA DOS SISTEMAS REVESTIDOS 104
5. DISCUSSÃO 109
6. CONCLUSÕES 129
REFERÊNCIAS 132
ANEXO A – MAPA DA DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO. 140
TRABALHOS DERIVADOS DO PROJETO 141

1. INTRODUÇÃO

O desempenho insatisfatório de um determinado componente ou elemento de máquina pode estar associado a falhas que ocorrem em sua superfície, como consequência das diversas possibilidades de interação mecânica entre corpos. Neste contexto, desenvolveu-se, dentro da engenharia, uma área chamada "engenharia de superfícies", voltada ao estudo dos fenômenos que ocorrem na superfície dos materiais e cujo objetivo é promover o aperfeiçoamento das propriedades superficiais [1].

O termo "engenharia de superfície" é definido como o campo que analisa e desenvolve técnicas e processos necessários para induzir, modificar e melhorar o desempenho das superfícies. Na área metal-mecânica este desempenho frequentemente refere-se ao desgaste, corrosão e fadiga. Estas técnicas incluem métodos tradicionais como a galvanização, os tratamentos de endurecimento superficial e métodos como a deposição química a vapor (CVD – *Chemical Vapor Deposition*), deposição física a vapor (PVD – *Physical Vapor Deposition*), aspersão térmica e o processamento a laser, com os quais pode-se obter revestimentos de materiais resistentes ao desgaste. Estas alternativas de tratamento superficial podem ser particularmente importantes quando o componente é fabricado em materiais dúcteis, pela baixa resistência ao desgaste que estes materiais podem apresentar e, em muitos casos, pela impossibilidade da realização de tratamentos metalúrgicos localizados, como, por exemplo, cementação e nitretação em materiais não ferrosos, como ligas de alumínio [1,2].

O entendimento do comportamento mecânico geral dos revestimentos é por vezes obtido por meio da análise das tensões de contato desenvolvidas durante um ensaio de indentação [3,4]. Neste tipo de estudo, frequentemente usa-se a simulação numérica do contato quase estático, considerando indentadores com diferentes geometrias, tais como pirâmides, cones ou esferas [4]. Em sistemas destinados à melhoria da resistência ao desgaste, o Método dos Elementos Finitos (MEF) é geralmente utilizado para estudar o comportamento mecânico de sistemas revestidos contendo filmes com módulo de elasticidade superior ao do substrato [5-11].

Nos casos citados [5-11], considerou-se que o sistema revestido foi carregado apenas por esforços normais. O principal resultado fornecido por trabalhos desta natureza é um mapeamento das tensões de contato obtidas quando o sistema revestido é carregado, o que permite verificar os pontos que são mais susceptíveis à falha [12], ou ainda estudar o efeito da

deformação plástica nas bodas do contato (pile-up), a qual aumenta quando diminui o diâmetro do indentador ou quando aumenta o valor de carga normal aplicada em um ciclo de indentação. Da mesma forma, outros trabalhos [13,14] apresentaram resultados numéricos e experimentais da análise da indentação de sistemas contendo substratos com diferentes propriedades mecânicas. Em um destes estudos [14], foi confirmada a influência das propriedades do substrato na fratura do revestimento durante o contato.

De outro lado, em estudos do comportamento mecânico de sistemas revestidos é importante considerar a adesão do revestimento ao substrato, assim como os modos de falha apresentados durante o contato normal e deslocamento tangencial de uma partícula sobre a superfície do revestimento. Para tanto, têm sido desenvolvidos estudos tanto experimentais como de simulação, onde é reproduzido o ensaio de riscamento. Este tipo de ensaio fornece informação qualitativa que permite analisar a resistência à falha dos sistemas revestidos. Desta forma, os resultados de estudos apresentados inicialmente por Bull (1991, 1997, 2006) [15-17], considerando contato e deslocamento de um indentador sobre a superfície de um sistema revestido, levaram à geração de mapas qualitativos de falha, onde, em função das propriedades dos materiais (dureza) do revestimento e do substrato, é possível identificar condições favoráveis para cada um dos tipos de falha.

De igual forma, a simulação numérica, através do método dos elementos finitos, tem sido utilizada por alguns autores no entendimento do comportamento dos sistemas revestidos submetidos a ensaio de riscamento. Dentre estes trabalhos, os de Holmberg et al [18-24] têm possibilitado um avanço no entendimento do comportamento das tensões de contato [18-20] e da fratura dos filmes quando o sistema é submetido a um ensaio de riscamento. Estes trabalhos têm focado seus estudos, entre outros aspectos, na análise de características do filme como: a espessura e módulo elástico [21], tenacidade à fratura [22] e tensões considerando diferentes materiais [23]. Esse grupo de pesquisas fez, ainda, análise explorando as tensões residuais [24].

Em termos gerais, as simulações do contato mencionadas acima foram feitas considerando-se análises quase-estáticas. Pelo anterior, observa-se, de um lado, estudos focados na análise e geração de mapas qualitativos para estudo dos modos de falha em sistemas revestidos e, de outro, os estudos das tensões responsáveis pela fratura do revestimento durante o contato. Entretanto, ainda ficam dúvidas quanto ao comportamento mecânico (tensões) dos sistemas revestidos ao considerar variáveis como tensão residual, a espessura do revestimento, o atrito

durante o contato, a rugosidade presente na superfície e na interface dos sistemas revestidos, o tamanho de grão, a microestrutura, entre outras. Assim como incerteza quanto à quantificação de mapas associados aos modos de falha.

O parágrafo anterior justifica o desenvolvimento deste estudo, o qual procura analisar, via simulação numérica (Método de elementos finitos) o comportamento mecânico e obtenção de modos de falha de conjuntos substrato+revestimento, considerando a dureza traduzida em resistência dos materiais, a tensão residual do revestimento, a espessura do revestimento, o atrito entre o indentador e o sistema revestido, e a rugosidade do sistema, assim como elaboração de mapas segundo o comportamento mecânico dos sistemas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento mecânico (tensões e modos de falha) dos sistemas revestidos (revestimento duro e substrato dúctil), submetidos a condições de contato normal e tangencial de um penetrador escorregando sobre sua superfície.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o comportamento mecânico dos sistemas revestidos considerando diferentes valores de dureza dos materiais (no substrato e no filme), quando submetidos a condições de contato.

- Analisar o comportamento mecânico dos sistemas revestidos, considerando diferentes valores de tensão residual, espessura, atrito e rugosidade do revestimento, quando submetidos a condições de contato.

- Reproduzir e analisar, através de simulação, mapas de falha segundo a literatura.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 TRIBOLOGIA E SISTEMAS REVESTIDOS

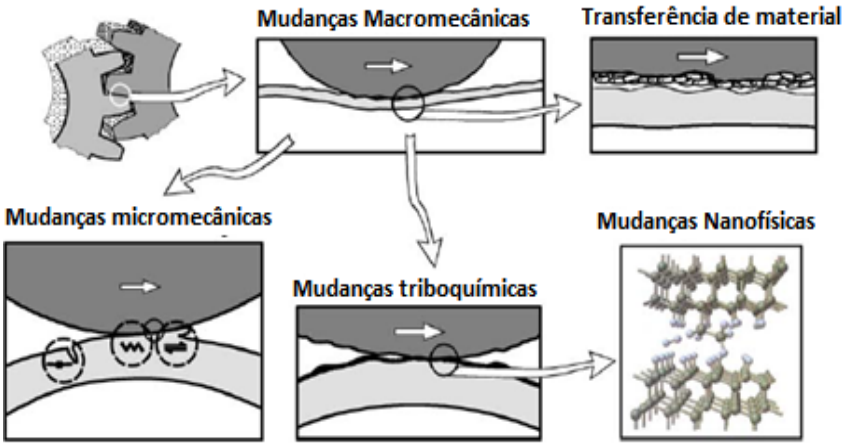
A palavra tribologia é derivada das palavras grega *TRIBOS*, que significa esfregar, e *LOGOS*, que significa estudo, de forma que uma tradução literal poderia ser o 'Estudo do Escorregamento', ou a Ciência que estuda o Atrito e o Desgaste. A Tribologia é definida por Zum Gar (1987) [25], como a ciência e a tecnologia da interação entre superfícies com movimento relativo e abrange as pesquisas científicas assim como as aplicações práticas dos fenômenos de atrito, lubrificação e desgaste. Da mesma forma, a Tribologia é definida por Hutchings (1992) [26] como o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação, e é um assunto de alta importância para os engenheiros mecânicos e projetistas de máquinas.

O atrito, especialmente a força de atrito, é definido como a resistência experimentada por um corpo em contato e movimentação sobre outro. A magnitude desta força é comumente descrita pelo valor do coeficiente de atrito. Quanto ao desgaste, este é definido por autores como Rabinowicz (1995) [27] e Pugh (1973) [28], como a remoção ou perda progressiva de material na superfície devido à interação mecânica. Trata-se de um fenômeno bastante complexo, que, assim como o atrito, depende de parâmetros como: pressão normal, deslocamento relativo, velocidade, rugosidade, deformação superficial, lubrificação, temperatura, encruamento e o revestimento superficial, entre outros.

O contato que envolve superfícies em movimento pode ser entendido como um processo associado a dados tanto na entrada como na saída. Os dados de entrada, os quais são utilizados como um ponto de partida para a análise de um contato tribológico são: a geometria do contato, tanto em macro como micro-escala, as propriedades do material com base na sua composição química e estrutural, assim como os parâmetros do meio ambiente [2]. Outros dados de entrada são os parâmetros de energia, tais como a carga, a velocidade, a força normal e tangencial, além da temperatura. Em função do tempo, o processo tribológico pode provocar modificações tanto na geometria quanto na composição do material na superfície, levando a efeitos de saída igualmente relacionados com a energia: velocidade, temperatura, atrito, desgaste e comportamento dinâmico [29,30].

Para alcançar uma compreensão integral do processo tribológico, é útil analisar diferentes tipos de alterações tribológicas, como os efeitos mecânicos em macro-micro-escala e os efeitos químicos presentes na transferência de material ocorrendo em escala nanométrica. Na figura 1 [30], apresenta-se um esquema dos mecanismos de contato tribológico representando alterações macro e micro mecânicas, triboquímicas e transferência de massa.

Figura 1 - Mecanismos de contato tribológico



Fonte: Adaptado de Holmberg; Ronkainen e Matthews (2000) [30].

Segundo Holmberg; Ronkainen e Matthews (2000) [30], os mecanismos tribológicos macro mecânicos descrevem o atrito e os fenômenos de desgaste considerando a distribuição de tensões e deformações em todo o contato. Desta forma, no contato entre duas superfícies, onde uma ou as duas apresentam revestimento, quatro parâmetros principais podem ser definidos: Relação dureza revestimento/substrato, espessura do revestimento, rugosidade das superfícies e a dureza e tamanho das partículas removidas (debris).

A relação entre os quatro parâmetros resulta em diferentes alterações superficiais, caracterizadas pelos mecanismos de contato. A figura 2 [19] apresenta doze condições típicas de contato onde uma esfera dura desliza sobre uma superfície plana revestida.

Um dos parâmetros de maior importância é a dureza do revestimento e a sua relação com a dureza do substrato, já que é comum considerar revestimentos duros e moles de forma separada. Um revestimento duro depositado sobre substrato dúctil pode, em determinadas condições reduzir o atrito e prevenir o desgaste tanto em macro como em micro escala [31]. Estes revestimentos geralmente apresentam tensões residuais compressivas, que além de

ajudar na redução do atrito e do desgaste, favorecem o suporte de carga normal sobre o conjunto, junto com a dureza do substrato [2, 22].

Figura 2 - Condições de contato macro mecânico durante o contato de uma esfera sobre uma superfície plana

Fonte: Adaptado de Holmberg et al. (2005) [19].

Com base nos pontos tratados nos parágrafos anteriores, observa-se que, a obtenção de dados tribológicos (taxa de desgaste e coeficiente de atrito) confiáveis para diferentes combinações de materiais, e as condições de trabalho de peças e equipamentos, permitem determinar a eficácia e confiabilidade de elementos de máquinas e de sistemas de produção. Por este motivo, os estudos de tribologia permitem antever a durabilidade de peças e a sua probabilidade de falha [29].

Em muitos casos, o objetivo da engenharia de superfícies é promover o aperfeiçoamento das propriedades superficiais. Strafford e Subramanian (1995) [32] definiram que a engenharia de superfície, abrange três categorias principais:

- Otimização de propriedades de superfície: A otimização do desempenho de superfícies (substratos e sistemas revestidos) em termos de corrosão, adesão, desgaste e outras propriedades físicas e mecânicas.

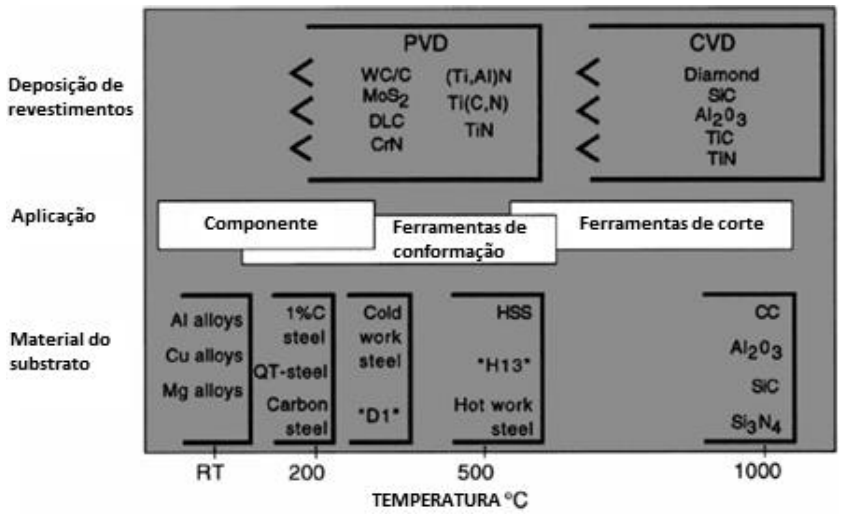
- Tecnologia de Revestimentos: Incluem as tecnologias mais tradicionais de tintas, galvanoplastia, solda, tratamentos térmicos e tratamentos termoquímicos como a nitretação e cementação, bem como as novas tecnologias de deposição laser, deposição física e química de vapor e implantação de íons.

- Caracterização dos revestimentos. Avaliação de superfícies e interfaces em termos de composição, morfologia, estrutura e propriedades mecânicas, elétricas e ópticas.

Inseridas nestas categorias, as tecnologias de deposição de revestimentos têm sido desenvolvidas ao longo das últimas décadas e oferecem uma grande variedade de possibilidades para diferentes materiais e estruturas. Em particular, processos de deposição química a vapor (CVD) e deposição física a vapor (PVD) têm permitido a deposição de revestimentos finos e duros em temperatura desde a ambiente até valores ao redor de 1000 ^{o}C [33]. Da mesma forma, permitem a deposição de revestimentos de espessura na faixa de micrometros e sua utilização para diferentes temperaturas. A figura 3 apresenta a utilização dos processos e uso de materiais como substratos segundo a temperatura de trabalho.

Em geral, materiais depositados com o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste das superfícies são: nitretos (TiN, CrN, etc.), carbetos (TiC, CrC, W_2C, WC/C,etc.), óxidos (alumina) ou uma combinação destes; as quais são camadas caracterizadas por uma alta dureza, alta aderência, baixa porosidade e alta estabilidade química e térmica. Revestimentos, tais como TiN, TiC, Al_2O_3, DLC (Diamond-like carbon) e MoS_2, e suas combinações multicamadas, têm sido utilizados com grande sucesso. Estes tipos de revestimentos, segundo Holmberg et al (2003) [18], têm permitido reduzir o coeficiente de atrito e as taxas de desgaste, levando, por exemplo, à medição de valores de coeficiente de atrito baixos (0,001) em condições de deslizamento a seco.

Figura 3 - Temperaturas de trabalho segundo materiais substratos e processos de deposição.



Fonte: Adaptado de Hogmark; Jacobson e Larsson (2000) [33].

2.2 PROCESSOS DE DEPOSIÇÃO DE REVESTIMENTOS EM FASE DE VAPOR

Processos de deposição de vapor podem, em princípio, ser divididos em dois tipos: (i) Deposição Física de Vapor (PVD) e (ii) Deposição Química de Vapor (CVD). Os processos CVD consistem, basicamente, na introdução de reagentes gasosos no interior de um reator (câmara de deposição). Os reagentes levam à ocorrência de reações químicas na superfície do material a ser revestido. Este processo conduz ao "crescimento" do revestimento na superfície do substrato. A Deposição Física de Vapor (PVD) consiste num grupo de técnicas de deposição, as quais têm em comum o fato de permitir o transporte de material no estado sólido entre o material do alvo e o substrato a ser revestido. O processo ocorre numa câmara fechada. De entre as principais técnicas PVD, pode-se salientar a evaporação por feixe de elétrons, a evaporação por arco e a pulverização por bombardeamento de íons (*sputtering*).

Uma característica a ser considerada nos processos de deposição é a geração de tensões residuais no filme [34-36]. O estado de tensões dentro de um revestimento é crucial, uma vez que estas influenciam características do sistema revestido, incluindo o risco de falha adesiva, o risco de trincas através do revestimento, a resistência ao desgaste abrasivo, o risco de falha por fadiga, a tendência à corrosão e a dureza [22,24]. Em geral, os processos de deposição de revestimentos cerâmicos por processos PVD apresentam tensões de compressão [16]. Para revestimentos por processos CVD as tensões nos revestimentos podem ser de tração ou de compressão, dependendo nas combinações de materiais.

Neste sentido, são considerados três tipos principais de tensões, as quais, em conjunto, dão origem ao valor de tensão residual no sistema. A eq. (1), apresenta as componentes principais da tensão residual [36].

$$\sigma_R = \sigma_{ep} + \sigma_g + \sigma_c \quad (1)$$

Onde:

σ_R = Tensão residual

σ_{ep} = Tensão epitaxial

σ_g = Tensão pelo crescimento

σ_c = Tensão térmica pelo resfriamento

No princípio da deposição, e dependendo da estrutura (parâmetro de rede) do revestimento e do substrato, tensões epitaxiais podem ser geradas quando a estrutura do filme tenta se ajustar à estrutura do substrato. Outro tipo de tensão desenvolvida no processo de deposição é a tensão intrínseca ou de crecimento, a qual está associada aos defeitos gerados na estrutura do filme durante o seu crescimento, quando, por exemplo, o filme é bombardeado por partículas neutras e íons de alta energia. Um terceiro tipo de tensão residual é desenvolvido depois da deposição do filme. Neste caso, tensões térmicas são geradas durante o resfriamento da peça, devido à diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do filme e do substrato. Para revestimentos da ordem de micrometros, as tensões epitaxiais normalmente são de baixa intensidade e, a princípio, podem ser desprezadas.

Para Holmberg et al (2009) [24], as tensões residuais térmicas resultam da diferença nos coeficientes de dilatação térmica entre o revestimento e substrato. A maioria dos revestimentos finos são depositados em temperaturas acima do ambiente. Durante o resfriamento após a deposição, qualquer incompatibilidade da expansão térmica entre o material do revestimento e o material do substrato irá dar origem a uma tensão residual térmica, a qual, para os casos em que o revestimento é muito mais fino do que o substrato, pode ser calculada a partir da eq. **(2)** [24]:

$$\Delta\sigma t = \frac{\Delta T(\alpha s - \alpha c)Ec}{1 - vc} \quad (2)$$

Onde:

$\Delta\sigma t$= Tensão térmica

ΔT = Diferença entre as temperaturas de deposição e ambiente

αs = Coeficiente de expansão térmica do substrato

αc = Coeficiente de expansão térmica do revestimento

Ec = Módulo elástico do revestimento

νc = Coeficiente de Poisson do revestimento

Uma redução nas tensões residuais térmicas no revestimento pode ser obtida utilizando revestimentos de espessura não desprezível em relação à do substrato, ou com revestimento de baixo módulo elástico ou com alto coeficiente de expansão térmica [24].

Dependendo dos parâmetros de deposição, as tensões residuais (σ_R) compressivas de revestimentos cerâmicos estão normalmente na faixa de 0,1-3GPa [20], mas podem atingir valores compressivos da ordem de 10 GPa [35,36]. As condições de deposição também podem levar a valores trativos superiores a 1 GPa.

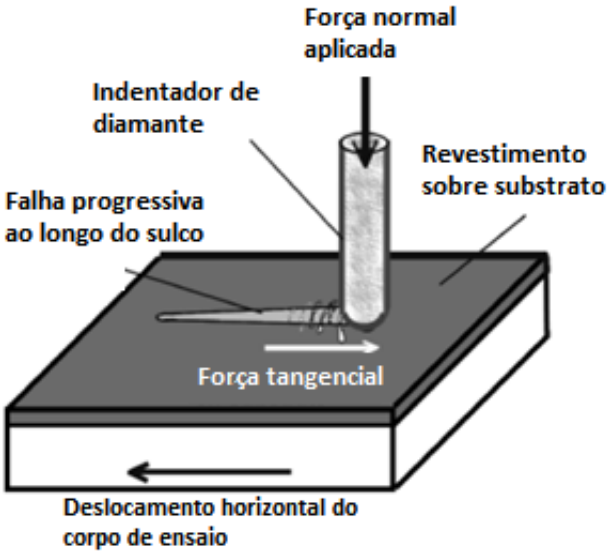
2.3 ENSAIO DE RISCAMENTO

Alguns métodos têm sido desenvolvidos para determinar as propriedades mecânicas dos materiais em sistemas revestidos. Segundo Perry (1983) [37] e Xie e Hawthorne (2001) [38], podem existir mais de 20 métodos para avaliar a adesão e as propriedades mecânicas de revestimentos duros e finos. Estes métodos incluem o ensaio de indentação e o ensaio de riscamento. O primeiro destes métodos, indentação, tem demonstrado ser, por vezes, vantajoso em relação a métodos de ensaio convencionais, tais como o ensaio de tração. Isto se dá devido à rapidez e aos poucos requisitos existentes para confecção dos corpos de prova. Adicionalmente, relações empíricas entre o ensaio de tração e o ensaio de indentação têm permitido estabelecer boa correlação nos resultados finais [39], justificando a utilização desta técnica para identificar propriedades como módulo elástico (E) e tensão de escoamento (s_y). Em paralelo, o ensaio de indentação é utilizado para gerar falhas nos sistemas revestidos unicamente sob aplicação de carregamento normal [40].

A caracterização de alguns modos de falha nos sistemas revestidos está relacionada com modelos qualitativos de tensões presentes na região de contato e nas bordas da indentação [31-34]. Sob as tensões de contato, os sistemas revestidos podem apresentar falhas devido à baixa adesão entre o filme e o substrato (falha chamada adesiva), ou devido à fratura superficial do filme (falha chamada coesiva).

O segundo método citado acima é o ensaio de riscamento, que é fácil de aplicar, por geralmente não precisar de corpos de prova com preparação especial [38]. O ensaio já foi utilizado em muitos trabalhos da literatura, por exemplo, por autores como Bull (1991, 1997) [15,16], Bull e Berasetegui (2006) [17], Jacobs, R. et al. (2003) [41], Kamminga; Alkemade e Janssen (2004) [42], Kataria, et al. (2010) [40], Li e Beres (2006) [43], Lu, et al. (2011) [44], Nieminen; Andersson e Holmberg (1989) [45], Ollendorf e Schneider(1999) [46], Randall; Favaro e Frankel (2001) [47], Sander; Tremmel e Wartzack (2011) [48], Stallard; Poulat e Teer (2006) [49], Sveen, et al. (2013) [50], Larsson e Per-Lennart (2013) [51], Xie e Hawthorne (2001) [38]. Segundo a norma ASTM C1624/05 (2010) [52], o ensaio é utilizado para analisar a resistência à adesão e os modos de falha de revestimentos duros (HV≥5 GPa) e finos (≤30 µm), depositados sobre substratos metálicos ou cerâmicos em temperatura ambiente. O método de ensaio baseia-se no contato e deslocamento a uma velocidade constante de um indentador de diamante de geometria definida, como Rockwell C (elemento cônico de ângulo de abertura de 120º e ponta esférica de raio de 200 µm), sobre a superfície de um sistema revestido e sob ação de uma força normal (constante ou progressiva) ao longo de uma distância definida. A figura 4 apresenta um esquema do contato gerado durante o ensaio.

Figura 4 - Esquema do método de ensaio (Scratch test)



Fonte: Adaptado da ASTM C1624/05 (2010) [52].

A falha gerada ao longo do sulco é entendida ao nível macroscópico e em função da carga aplicada. Mais especificamente, os níveis progressivos de falha estão associados ao aumento na carga normal aplicada no indentador, de forma que o nível de carga em que há observação de uma determinada falha no revestimento é denominada carga crítica desta falha [37]. Em

paralelo, o método pode também considerar sinais de força tangencial e emissão acústica como dados de ensaio secundários para identificação de diferentes níveis de falha nos revestimentos.

2.4 APLICAÇÃO DO ENSAIO DE RISCAMENTO NA AVALIAÇÃO DOS REVESTIMENTOS

O método de riscamento associa os valores de carga normal com a observação de falhas no sistema revestido. Assim, o método de ensaio fornece uma medição qualitativa da adesão de um revestimento depositado sobre um substrato [15], a qual depende da interação dos parâmetros de ensaio (propriedades e geometria do indentador [53,54,55], taxa de carregamento [31,43], taxa de deslocamento, etc) e das propriedades do sistema revestimento/substrato (dureza, resistência à fratura, módulo elástico, microestrutura, rugosidade da superfície, espessura [21], tensões residuais no revestimento [24], entre outras). A Tabela 1 apresenta os parâmetros experimentais considerados no ensaio de adesão por riscamento.

Tabela 1- Parâmetros experimentais no ensaio de adesão por riscamento [52]

Propriedades do Revestimento	**Propriedades do Substrato**
Espessura do revestimento	Composição e fases do substrato
Composição e fases do revestimento	Dureza e rugosidade superficial do substrato
Dureza e rugosidade superficial do revestimento	Tamanho de grão/microestrutura/anisotropia
Tamanho de grão/microestrutura/anisotropia	Propriedades Elasto/Plasticos
Propriedades Elasto/Plasticos	Mecanismos de Fratura
Mecanismos de Fratura	Distribuicão e densidade de falhas
Distribuicão e densidade de falhas	Efeitos da tasa de deformação
Efeitos da tasa de deformação	Condição de exposição
Condição de exposição	
Propriedades do sistema e da interface	**Variáveis e procedimento de ensaio**
Energia de adesão	Indentador: Material, geometría, tamanho da ponta, condições de falha
Tensões residuais	
Uniformidade da interface	taxas de carregamento e deslocamento
Modulo de elasticidade equivalente	Sistema de cumprimento -horizontal e vertical
Mecanismos de falha na interface	Precisão do sensor
Falhas e danos na interface	Calibração do equipamento
Condições de exposição	Proximidade ao primeiro risco
	Resolução e qualidade do microscopio óptico
	Variáveis ambientais do corpo de ensaio e do ensaio
	Temperatura do ensaio, contaminação
	Corrosão, efeitos de tratamentos térmicos

Em paralelo, o método de ensaio geralmente não é diretamente aplicável a revestimentos metálicos ou poliméricos, os quais falham de forma dúctil (plástica), já que os mecanismos de

deformação plástica são diferentes aos modos de falha frágil presentes nos revestimentos cerâmicos duros [55,56]. O método de ensaio pode ser aplicável em revestimentos metálicos só se estes apresentarem alta dureza, e modo de falha frágil. Em geral, o ensaio de riscamento é efetivo só se o substrato não apresenta alta deformação plástica [17,18]. A afirmação anterior está condicionada a mudanças em alguns parâmetros de ensaio e critérios e procedimentos de análises da falha.

O método de ensaio não é recomendável em casos de revestimentos com espessuras finas (<0,1 µm) ou maiores a 30 µm [52]. Estes tipos de revestimentos geralmente exigem diferentes geometrias de indentador, taxas de carga e faixas de força normal aplicada para garantir a repetitividade dos resultados.

O ensaio de adesão por riscamento pode ser realizado de dois modos, em carga constante (CL) ou com carga progressiva (PL). A tabela 2 apresenta as vantagens e desvantagens para cada um dos dois modos.

Tabela 2 - Vantagens e desvantagens dos modos de realização do ensaio de riscamento [52]

	Carga Constante (CL) para cada riscamento.	**Carga Progressiva (PL) para um riscamento.**
Vantagens	- Melhor discriminação de diferentes níveis de falha segundo cada nível de carga. - Grande confiança estatística em eventos de falha segundo níveis de carregamento. - É possível discriminar a carga para as não uniformidades de cada revestimento.	-Ensaio mais rápido e com melhor uso do corpo de prova. -Aplicação de força progressiva permite análise de diferentes níveis de carga.
Desvantagens	- Ensaios com incrementos de carga precisam de maiores áreas, corpos de prova e tempo de ensaio. - Incrementos em carga podem encobrir falhas presentes em níveis de carga intermediários.	-As variáveis experimentais (carga e distância) mudam ao mesmo tempo. -Análise estatística limitada das características da falha.
Aplicação	- Identificação da carga específica na avaliação de revestimentos para pesquisa, desenvolvimento de processos e estudos de durabilidade.	Avaliação de blindagens e ensaios de revestimentos para pesquisa, desenvolvimento de processos e estudos de durabilidade.

No modo CL, a carga normal aplicada sobre o indentador é mantida constante durante o deslocamento, enquanto que para o modo PL a carga normal aplicada ao indentador é linearmente incrementada ao longo do deslocamento do indentador. Paralelamente à forma de aplicação da força, a seleção da máxima carga normal requerida no ensaio depende das propriedades do sistema revestimento/substrato a ser ensaiado, mas uma faixa de força de 0-150 N deverá ser o suficiente para realização de ensaios em revestimentos duros utilizando indentador Rockwell C. Em condição de carga progressiva (PL) a mínima taxa de força aplicada deve ser de 5 N/min. Em termos da distância de deslocamento, esta deverá ser de pelo menos 10

mm e a precisão e repetitividade será do 0,5% da faixa mínima de deslocamento ou 50 µm, o que for menor [52].

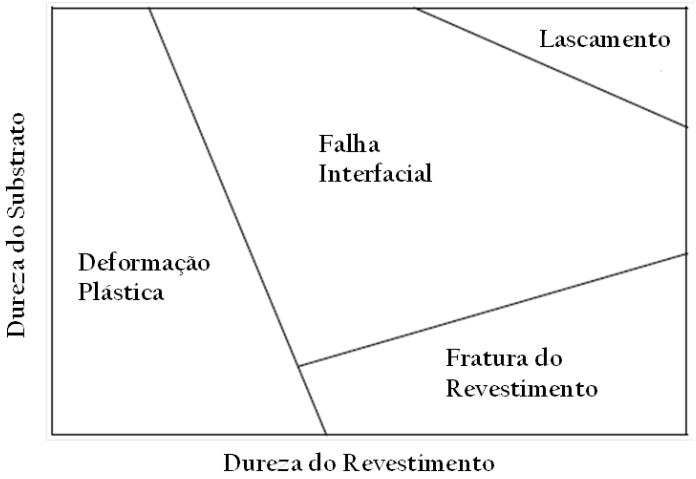
2.5 MODOS DE FALHA DOS SISTEMAS REVESTIDOS NO ENSAIO DE RISCAMENTO

Os modos de falha associados com o ensaio de riscamento têm sido identificados com base em observações e análise do sulco gerado durante o teste [15,16,37,38,42,48,49,51, 53-58]. Desta forma, alguns modos de falha envolvem o destacamento do revestimento do substrato, sendo, portanto, de importância direta durante uso do ensaio de riscamento como avaliação da adesão. Outros tipos de falha no revestimento, tais como trincamento ou fratura ao longo da espessura do revestimento podem determinar o comportamento de um componente em uma aplicação em particular.

Considerando apenas as durezas dos materiais, Bull (1991, 1997) [15,16] organizou em um mapa (figura 5) a influência da dureza do substrato e do revestimento nos tipos de falhas observadas durante o ensaio. No mapa, é possível observar a presença dos modos de falha característicos dos revestimentos duros depositados sobre substratos dúcteis (fratura do revestimento, flambagem, fragmentação e lascamento), além de deformação plástica do conjunto.

Pelo indicado no mapa, se o revestimento é altamente dúctil (mole) quando comparado com o substrato, o filme pode sofrer deformação plástica e a carga crítica definida como aquela necessária para que o substrato fique exposto, será frequentemente baixa. Agora, para o caso de um revestimento duro depositado sobre um substrato dúctil, como é o caso dos revestimentos com fines tribológicos, os modos de falha por flambagem (*Buckling*) e fragmentação (*spallation*) são gerados desde o dobramento do conjunto até a descolagem interfacial. No caso de revestimentos duros depositados sobre substratos duros, observa-se principalmente o fenômento de lascamento (*chipping*), o qual é também observado como falha de materiais cerâmicos volumétricos [15-17].

Figura 5- Representação esquemática dos modos de falha característicos no ensaio de riscamento segundo influência da dureza do substrato e do revestimento.



Fonte: Adaptado de Bull (1997) [16].

A tabela 3 apresenta segundo a norma ASTM C1624 [52], as falhas mais comuns observadas para cada uma das combinações do comportamento mecânico geral (dúctil ou frágil) do revestimento e do substrato.

Tabela 3 - Principais falhas encontradas segundo combinação revestimento-substrato [52]

	Substrato Frágil	**Substrato Dúctil**
Revestimento Frágil	Trincas de tração no revestimento seguidas por fragmentação e lascamento do substrato e do revestimento	Trincas de tração e Hertzianas no revestimento evoluindo para lascamento e fragmentação do revestimento como consquência da deformação do substrato
Revestimento Dúctil	Deformação plástica do revestimento e surgimento de trincas conformes sequidas pelas falhas de flambagem e fragmentação do revestimento, assim como trincamento do substrato	Deformação plástica misturada do substrato e do revestimento, gerando trincas de tração e trincas conformes com falha de flambagem do revestimento

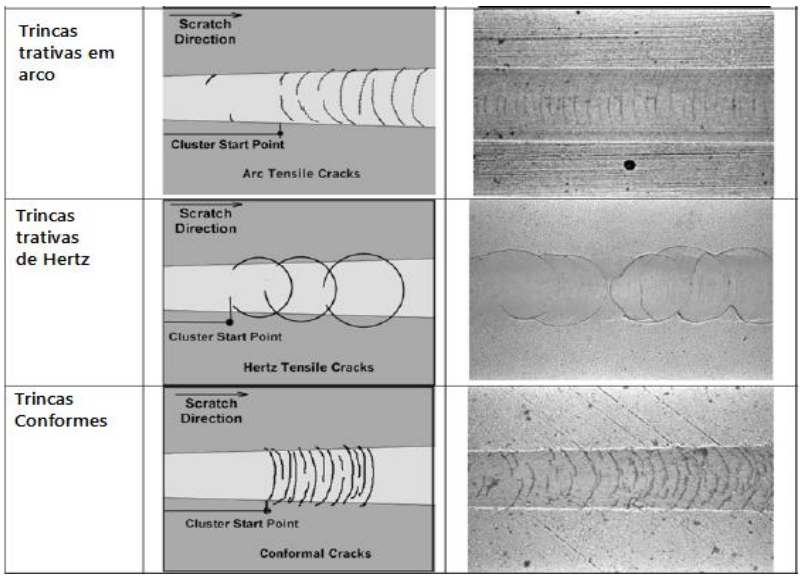
Assim mesmo, as falhas em revestimentos duros, segundo Bull (1997) [16], podem ser divididas em três modos ou categorias:

1. Fratura do revestimento. Este modo de falha apresenta-se no interior do sulco e inclui trincamento por tensões trativas atrás do indentador, trincamento quando o revestimento é dobrado no interior do sulco e trincamento Hertziano (Figura 6).

2. Falha Interfacial, inclui: (i) fragmentação compressiva (*Spallation*) ou flambagem (*Buckling*) e fragmentação na frente do indentador ou (ii) fragmentação atrás do indentador induzida pela recuperação elástica do revestimento (Figura 7).

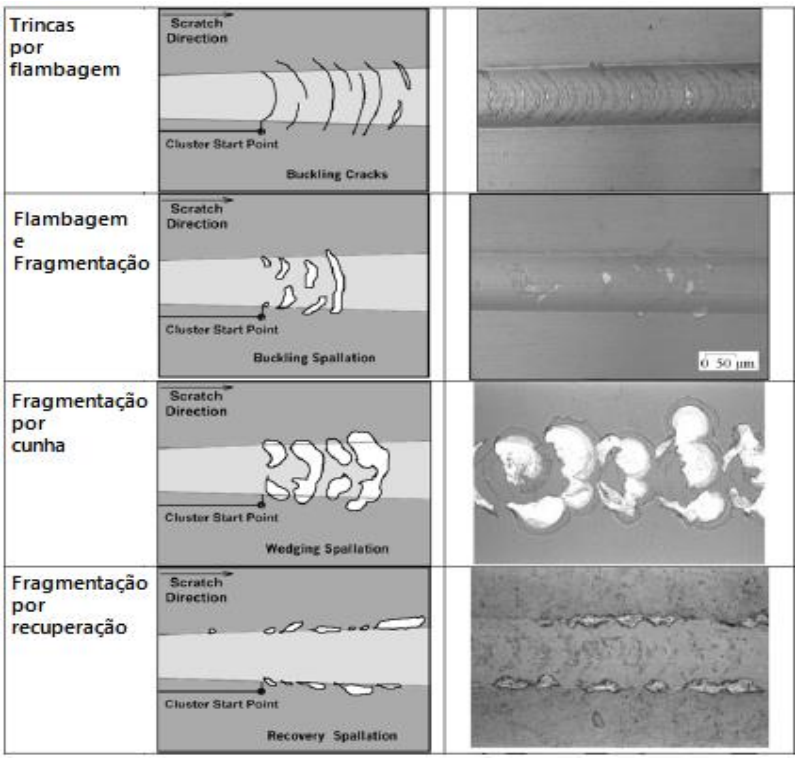
3. Lascamento no revestimento (*Chipping*) (figura 8). Este modo é geralmente observado em sistemas com revestimentos duros e grossos depositados sobre substratos dúcteis

Figura 6- Descrição gráfica e Micrografias do modo de falha da categoria 1.



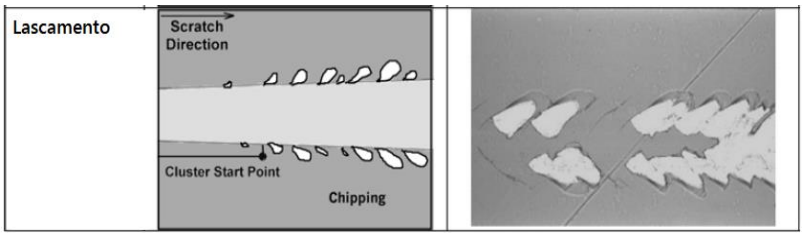
Fonte: ASTM C1624 (2010) [52].

Figura 7 - Descrição gráfica e Micrografias do modo de falha da categoria 2.



Fonte: ASTM C1624 (2010) [52].

Figura 8 - Descrição gráfica e Micrografias do modo de falha da categoria 3.



Fonte: ASTM C1624 (2010) [52].

Os modos de falha relacionados com a adesão dos revestimentos duros, (descolamento de revestimento) estão principalmente relacionados aos fenômenos de flambagem (*Buckling*) e fragmentação (*spallation*). Cada um destes modos de falha apresenta uma série de características, que são apresentadas a seguir.

- Flambagem (*Buckling*). Este modo de falha é normalmente observado em revestimentos finos (<10 µm) [16]. Esta falha é consequência da acumulação de tensões compressivas na frente do indentador durante o movimento. Dois fatores têm direta contribuição na acumulação de tensões na frente do indentador, o atrito presente entre o revestimento e o indentador [49] e a deformação plástica do conjunto (*pile-up*) tanto na frente como nas bordas de contato do indentador [15]. Estes fenômenos acrescentam as tensões compressivas na frente do indentador e favorecem a quebra do revestimento durante o dobramento (*buckle*). A falha do tipo flambagem (*buckling*), apresenta-se na forma trincas ou destacamentos circulares no interior do sulco e se estendem às bordas do mesmo ou em regiões próximas a este.

- Fragmentação (*Spallation*). Este modo de falha ocorre como consequência da nucleação de trincas em regiões de altas tensões trativas e posterior propagação através da espessura do revestimento. Tal como no modo de falha de flambagem (*buckling*), a presença de deformação plástica e acumulação do material na frente do indentador (*pile-up*) favorece a presença da fragmentação. Este modo de falha pode se apresentar de duas formas, que são denominadas fragmentação por cunha (*Wedge Spallation*) e fragmentação por recuperação (*Recovery Spallation*). A primeira forma é comum em revestimentos de espessuras >10µm, nos quais as tensões de compressão geram trincas na região à frente do indentador, que propagam-se da superfície até a interface, geralmente com uma inclinação que atua como cunha. Desta forma, durante o movimento do indentador a cunha causa a propagação de uma trinca interfacial. A segunda forma de falha (recuperação) está associada com a recuperação elástica do revestimento na

parte posterior do indentador, durante o movimento deste. Quando o sistema é descarregado, o revestimento tenta recuperar a parcela elástica de sua deformação, mas a recuperação é impedida pela deformação plástica do substrato, gerando tensões que podem causar propagação de trincas na interface, principalmente nas bordas do sulco gerado.

De forma geral, as falhas presentes nos sistemas compostos por revestimento duro e substrato dúctil (falhas dúcteis), concentram-se no interior do sulco gerado durante a passagem do indentador, enquanto que falhas presentes nos sistemas com revestimento duro e substrato duro (falhas frágeis), comumente se apresentam também em áreas contiguas ao sulco [15].

2.6 SIMULACÃO DE TENSÕES RESPONSÁVEIS PELA FALHA NOS SISTEMAS REVESTIDOS

As tensões geradas ao redor do indentador, durante a movimentação deste, são complexas e parecem não existir modelos analíticos na literatura que descrevam totalmente as condições favoráveis aos tipos de falha observados no ensaio de riscamento. Alguns modelos analíticos parciais foram desenvolvidos por autores como Akono e Ulm (2011) [56], Bull (1997) [16], Xie e Hawthorne (2001a) [38], Xie e Hawthorne (2002b) [59], para: (i) estudo de tensões compressivas e geração do buckling, (ii) tensões, deformações e deslocamentos acontecidos no substrato e no revestimento, especialmente nas bordas do indentador e (iii) análise da energia associada à tenacidade do sistema. A maioria dos estudos, principalmente os de autores como Bull (2006) [17], Fang L. et al (2005) [60], Holmberg et al. (2003) [18], Holmberg et al. (2005) [19], Holmberg et al. (2006a) [20], Holmberg et al. (2006b) [21], Holmberg et al. (2008) [23], Holmberg et al. (2009) [24], Jiang; Browning e Sue (2009) [61], Laukkanen et al. (2006) [22], Li e Beres 2006 [43], Lu et al. (2011) [62], Ranjbar-Far et al. (2010) [63], Xiaoyu; Lauke e Schueller (2002) [31], TKaya et al. (2007) [64], Wredenberg e Larsson (2010) [53, 54], utilizam modelos de simulação por elementos finitos para o mapeamento da distribuição de tensões e deformações, no interior e no exterior do sulco gerado durante ensaio de riscamento.

Segundo Bull (2006) [17], apesar dos modelos de simulação não reproduzirem a totalidade dos fenômenos que ocorrem no ensaio físico de riscamento, estes podem ser utilizados na análise do comportamento mecânico de sistemas revestidos, permitindo a consideração de parâmetros como:

- Dados reais dos materiais, tanto propriedades elásticas como plásticas do revestimento e do substrato.

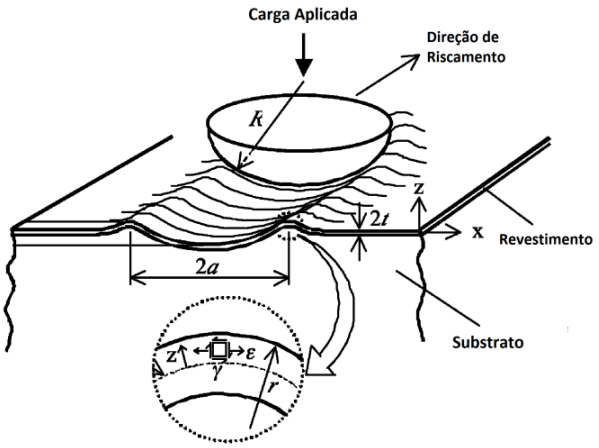
- Condições iniciais de tensões ou presença de trincas ou outros defeitos vindos do processo de deposição no sistema revestido.

- Mudanças do atrito entre indentador e revestimento, que podem produzir mudanças nos valores de tensão.

- Rugosidade das superfícies, tanto na interface como na superfície do sistema, o que pode levar à concentração de tensões.

Porém, condições como relaxamento de tensões, tensões residuais, topografia, defeitos nos materiais, assim como escoamento, encruamento e propriedades correlatas com a fratura de alguns revestimentos não têm sido considerados como dados de entrada em muitos modelos de simulação [20]. Por esta razão, é comum encontrar na literatura misturas entre simulações e análises experimentais, sendo esta uma forma de obtenção de resultados confiáveis. Autores como Bucaille; Felder e Hochstetter (2001) [65] e Bucaille et al (2006) [66], têm analisado o comportamento elasto-plástico dos materiais durante ensaio de riscamento via simulação pelo método dos elementos finitos. Para tanto, desenvolveram modelos tridimensionais (3D) considerando indentador cônico em contato e deslizamento, sem atrito sobre materiais com diferentes módulos elásticos. Estes modelos permitiram estabelecer que materiais altamente elásticos levam à geração de um afundamento na região na frente do indentador (*sink-in*) e uma recuperação elástica na parte de atrás do mesmo. Por outro lado, materiais onde a deformação é principalmente plástica apresentam acumulação de material (*pile-up*) na frente e nas bordas do contato com o indentador, tal como representado por Xie e Hawthorne (2002) [59] (figura 9).

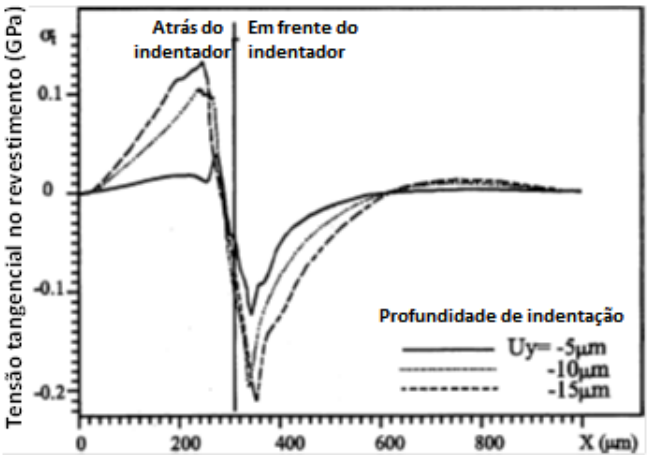
Figura 9 - Ilustração do dobramento do sistema levando à indução de tensões.



Fonte: Xie e Hawthorne (2002) [59].

O ensaio de riscamento não é muito aplicável em sistemas considerando revestimento metálico. Mesmo assim, em termos da análise da influência do aumento da carga de contato, assim como o aumento da plasticidade dos materiais, no comportamento das tensões verticais e tangenciais na interface, cita-se o trabalho de Xiaoyu; Lauke e Schueller (2002) [31], que desenvolveram modelos de simulação tanto 2D como 3D em sistemas Al/Polimero. Os resultados indicaram que quando o indentador está escorregando sobre a superfície do revestimento, as tensões tangenciais atrás do indentador são de caráter trativo, enquanto que as tensões tangenciais na frente do indentador são compressivas. (Figura 10).

Figura 10 - Tensão tangencial na superfície do revestimento para diferentes cargas de ensaio em sistema Al/Polimero.



Fonte: Xiaoyu; Lauke e Schueller (2002) [31]

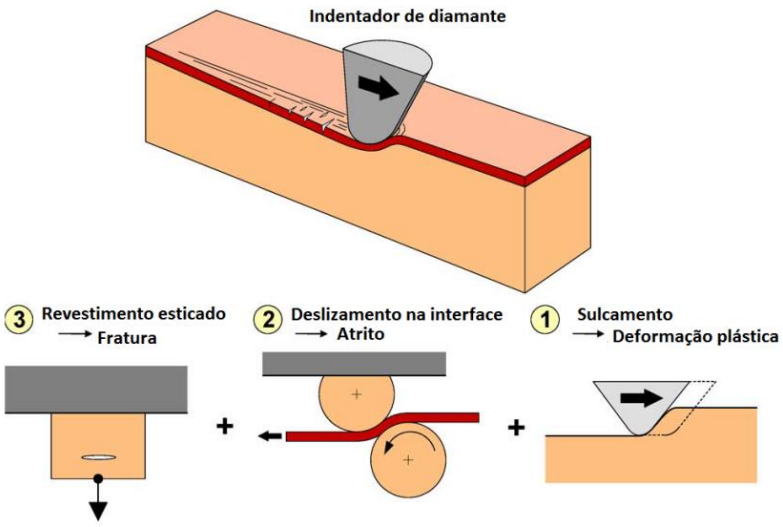
Desta forma, é possível que o acumulo de tensões compressivas contribuam ao surgimento da flambagem (*buckling*) do revestimento, principalmente quando neste ponto pode existir algum defeito na interface. Da mesma forma, a Figura 10 indica que com o aumento da carga aplicada, as tensões tangenciais na interface do sistema revestido aumentaram.

Coincidindo com os resultados de Xiaoyu; Lauke e Schueller (2002) [31], Bull e Berasetegui (2006) [17] apresentaram resultados de simulação do ensaio de riscamento sobre um sistema revestido, composto por revestimento de 2 μm de TiN e substrato de aço inoxidável, indicando aumento de tensões compressivas à frente do indentador e redução atrás deste, segundo a movimentação do indentador. Segundo os autores [17], provavelmente estes resultados são consequência de mudanças na quantidade de flambagem (*buckling*) apresentado no revestimento. Nas regiões de flambagem (dobramento) ao redor do indentador surgem tensões cisalhantes τ_{xy}, as quais aumentam em função da movimentação do indentador. Da mesma forma, tensões perpendiculares à interface são compressivas no ponto central de contato com o indentador e trativas fora desta região, particularmente na região de dobramento.

Na literatura, são igualmente apresentados os mecanismos de deformação gerados durante o contato e deslizamento do indentador. A figura 11 ilustra estes mecanismos presentes no contato e deslizamento do indentador com a superfície do sistema. Na figura, é possível observar três fases, sendo a primeira a representação da deformação plástica do substrato, principalmente na geração do sulco. A segunda fase representa o dobramento do revestimento e a terceira representa o esticamento do revestimento na parte traseira do contato com o indentador [18].

As deformações apresentadas na Figura 11 geram tensões no revestimento. Holmberg et al (2005) [19,20] apresentam o esquema das tensões na superfície do sistema revestido submetido a contato e deslocamento de uma partícula esférica (Figura 12). Os autores explicam que, em um primeiro momento, é gerada uma pequena marca de indentação, de forma que o fluxo do material gere uma borda ao redor do indentador. Em seguida, a ponta do indentador avança gerando um sulco com incremento em profundidade devido ao acréscimo da carga aplicada.

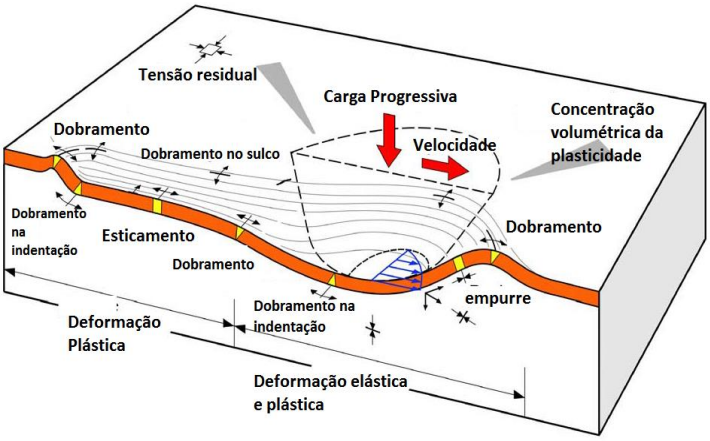
Figura 11 - Ilustração do indentador deslizando sobre o sistema revestido.



Fonte: Holmberg et al. (2003) [18]

Segundo a explicação anterior, no ponto do contato, abaixo do indentador, tem-se deformação elástica e plástica, enquanto que na superfície atrás do indentador somente existe deformação plástica. Finalmente, na parte frontal do indentador, é gerada uma borda ao redor deste.

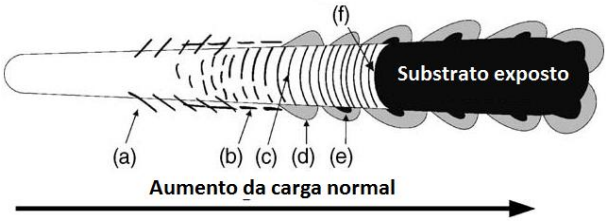
Figura 12 - Representação das tensões na superfície do revestimento durante o contato com o indentador.



Fonte: Holmberg et al. (2005) [19]

O mesmo grupo de pesquisas [18] também apresenta informações sobre os padrões de trincas e sobre o destacamento do revestimento durante ensaio de riscamento. Um esquema destas falhas pode ser observado na figura 13, onde se apresentam padrões de trincas angulares, trincas paralelas, trincas semi circulares, lascamento (*chipping*) e fragmentação (*Spalling*) do revestimento.

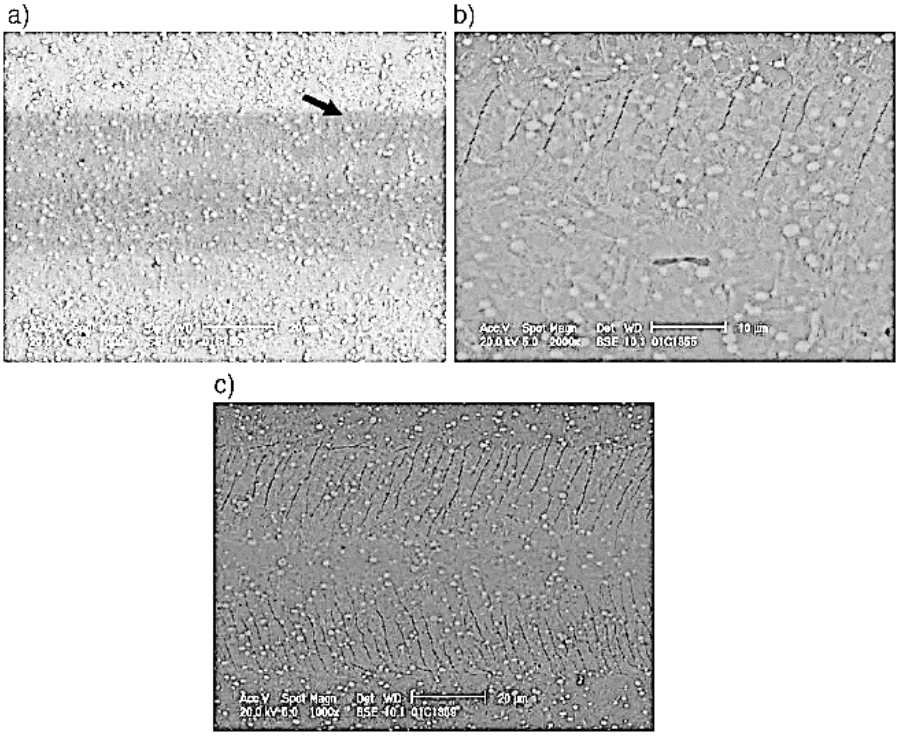
Figura 13 - Padrões de trincas gerados no ensaio de riscamento. (a) Trincas angulares, (b) trincas paralelas, (c) trincas semi circulares, (d) lascamento do revestimento, (e) fragmentação do revestimento, (f) Destacamento do revestimento



Fonte: Holmberg et al (2003) [18].

É importante indicar que, segundo estudos reportardos por Holmberg et al (2006) [20], a primeira trinca gerada é de caráter angular e foi observada a cerca de 1 mm desde o ponto inicial do deslizamento, para a condição de revestimento de TiN de 2 µm de espessura depositado sobre aço rápido (HSS – *High-Speed Steel*). Conforme aumenta a distância de deslizamento sob carregamento progressivo, aumenta-se o número de trincas angulares. Neste trabalho [20], as trincas paralelas surgiram ao redor de 2,3 mm, como apresentado na figura 14.

Figura 14 - Fotografias das trincas observadas no ensaio de riscamento. a) Trinca angular depois de 1,1 mm de deslizamento. b) Arrango de trincas angulares 1,5 mm. c) Trincas angulares e trincas paralelas 2,3 mm.

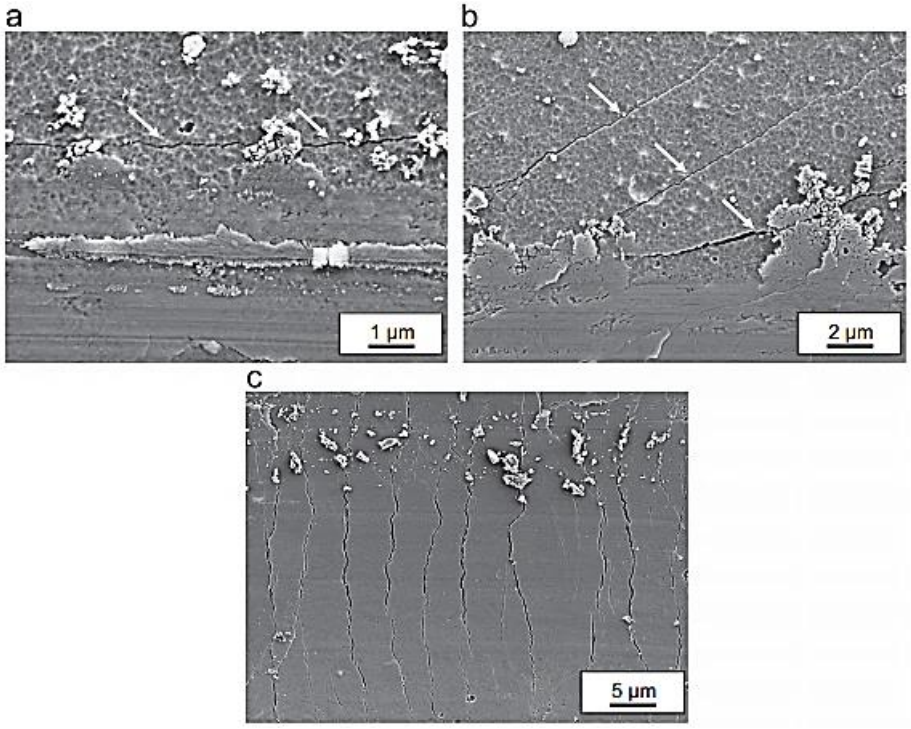


Fonte: Holmberg et al (2006) [20].

Pesquisas recentes [50], associadas ao comportamento mecânico dos sistemas revestidos (TiAlN/HSS), têm reportado que, sob cargas normais baixas (<20N), a resposta ao riscamento é dominada pelas propriedades do revestimento. Neste caso a falha do revestimento ficou restrita à deformação plástica superficial em conjunto com trincamento em regiões onde havia macro partículas, ou seja, não se observaram trincas em regiões próximas e livres de defeitos [44]. Com o aumento da carga normal (>20N), aumenta o grau de deformação do conjunto (revestimento/substrato), permitindo a geração do sulco durante o riscamento.

Sveen et al. (2013) [50] apresentam três tipos de trincas que aparecem a medida que é aumentado o carregamento normal (Figura 15). Neste caso, com o aumento da plasticidade do substrato e da carga normal, o sistema revestido apresenta picos de deformação que geram dobramento do revestimento e altas tensões trativas na direção perpendicular ao sulco, dando origem a trincas paralelas nas bordas deste (Figura 15a). Com cargas normais maiores, a plasticidade do substrato leva à geração de maiores deformações, assim como à tendência de trincamento em forma angular (Figura 15b). Finalmente, ao atingir os maiores valores de carga normal, trincas transversais dentro do sulco são geradas (Figura 15c).

Figura 15 - Modos de falha do revestimento TiAlN depositado sobre aço rápido (HSS - High Speed Steel). (a) Trincas laterais (40N). (b) Trincas angulares (60N). (c) Trincas transversais dentro do sulco apresentadas antes da carga critica (64N).



Fonte: Sveen et al. (2013) [50].

Por outro lado, ao analisar o papel do revestimento nos sistemas revestidos, é importante salientar que os valores das tensões compressivas no ponto de contato entre o indentador e o substrato (sem revestimento) são maiores que aqueles obtidos no caso do sistema revestido. Quanto ao comportamento das tensões ao longo da linha do deslizamento, os resultados de Holmberg et al (2006) [20] permitiram estabelecer a presença campos de tensões trativas complexos na superfície do revestimento, assim como observar que campos de tensões compressivas são comuns abaixo do indentador no ponto de contato.

Uma outra consideração importante tem a ver com a influência do módulo elástico (E) e da espessura do revestimento na distribuição das tensões. Resultados de simulação têm permitido estabelecer que revestimentos duros e grossos depositados sobre substratos dúcteis permitem maior capacidade de suportar carga. Para sistemas compostos por revestimentos de 2 µm e de 5 µm, ambas superfícies ficaram como os mesmos níveis máximos de tensão trativa na superficie. Contudo, para o revestimento mais grosso, algumas regiões próximas à interface apresentaram tensões trativas, enquanto que o revestimento mais fino se manteve com valores compressivos. Da mesma forma, os modelos de simulação indicam que com o aumento do valor do módulo elástico (maior rigidez) o revestimento poderá suportar maiores valores de tensão trativa. Desta forma, os revestimentos rígidos, pelo fato de apresentarem maior capacidade de carga, podem permitir a obtenção de baixos valores de tensões compressivas no substrato no ponto de contato com o indentador [21].

A literatura ainda indica que o valor da tensão residual no revestimento é um outro parâmetro que tem influência na geração de campos de tensões e que tem relação com o modo de falha nos sistemas revestidos. [35,36]. Como seria de se esperar, as tensões residuais térmicas, dependentes da diferença entre os coeficientes de expansão dos materiais (revestimento e substrato), têm influência no comportamento das tensões e na falha do sistema revestido. A literatura apresenta resultados de simulação que indicam que o campo de tensões na superfície do revestimento (cerâmico duro) tem contribuição térmica pelo atrito, o qual tende a gerar tensões trativas no revestimento na linha de deslizamento do indentador. Desta forma, uma redução da carga, assim como da velocidade de ensaio, pode levar a um baixo coeficiente de atrito e consequentemente a uma redução no efeito térmico nas tensões. De igual forma, a redução nas tensões no revestimento pode ser atingida ao utilizar revestimentos grossos ou com alta condutividade térmica.

Holmberg et al. (2009) [24] apresentaram resultados de simulações considerando tensão residual compressiva de 1 GPa em um revestimento de 2 µm depositado sobre substrato com características de aço rápido (HSS - High Speed Steel). Os resultados destes autores indicaram que as tensões máximas principais obtidas no revestimento durante o deslizamento foram reduzidas em função do aumento dos valores compressivos de tensão residual. Desta forma, a possibilidade de escoamento e trincamento na superfície do revestimento ou na interface do sistema revestido pode ser afetada pela magnitude das tensões residuais. Seguindo esta linha, tanto a tendência de fragmentação (*spalling*) e destacamento do revestimento geralmente aumenta com o aumento da espessura e das tensões residuais compressivas do revestimento, como tensões compressivas presentes na superfície do revestimento podem inibir a nucleação e propagação de trincas.

De igual forma, segundo Holmberg et al (2009) [24], é importante considerar que excesso de altas tensões residuais compressivas podem resultar no destacamento do revestimento, especialmente nas bordas ou mesmo nas irregularidades da superfície, quando o revestimento é depositado sobre substratos com superfícies rugosas. O estado de tensões na interface torna-se independente da espessura do revestimento sempre que este tenha uma espessura de ao redor de três vezes a amplitude da rugosidade na interface.

Pelo exposto até o momento, pode-se entender que o ensaio de riscamento fornece uma medição qualitativa [15], ou semi quantitativa [50], da adesão de um revestimento duro e fino depositado sobre um substrato dúctil. O ensaio não mede a resistência à aderência da união entre um revestimento e um substrato, pelo contrário, fornece informação que indica o comportamento das tensões na interface e na superfície do sistema. Por este motivo, os modos de falha (trincamento ao longo do revestimento, fragmentação (*spalling*) e lascamento (*chipping*)), avaliados durante o ensaio de riscamento nos sistemas revestidos, dependem da interação dos parâmetros de ensaio (propriedades e geometria do indentador, taxa de carregamento, taxa de deslocamento, etc) e das propriedades do sistema revestimento/substrato (dureza, resistência à fratura, módulo de elasticidade, microestrutura, rugosidade da superfície, entre outras).

Neste sentido, alguns trabalhos [15,16,17] têm apresentado e explicado os fenômenos responsáveis pelos modos de falha nos sistemas revestidos, incluindo a proposta de um mapa qualitativo da distribuição destes modos de falha, em dependência das propriedades do sistema

revestido (durezas do substrato e do revestimento). Em paralelo, outros autores, entre eles Holmberg [19-24,29,30], têm se preocupado com o estudo do efeito de alguns dos parâmetros de ensaio e das propriedades do sistema revestido na morfología da falha (forma da trinca) gerada durante o contato e deslizamento do indentador. Porém, ainda não foi possível identificar estudos que permitam associar o efeito de algumas variáveis do sistema revestido, as quais têm sido desconsideradas nos estudos encontrados na literatura, tais como o efeito da rugosidade na interface e na superfície do sistema, o efeito da tensão residual volumétrica ou mesmo análise de gradientes de tensão residual do revestimento, com a distribuição qualitativa das falhas, assim como com informação quantitativa de alguns setores ou fronteiras dos mapas de falha de Bull (1997) [16].

Estas considerações levam à hipótese de que análises numéricas, utilizando a simulação pelo método dos elementos finitos, podem ajudar no estudo e distribuição dos modos de falha considerando o efeito das tensões residuais, espessura e rugosidade do revestimento, assim como na quantificação dos mapas de falha de Bull, permitindo a identificação quantitativa dos valores de dureza do revestimento e do substrato que predizem aparição das fronteiras dos respectivos modos de falha.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MODELO DE SIMULAÇÃO

Segundo os objetivos, o trabalho é dedicado à simulação numérica do efeito das variáveis: dureza do revestimento, dureza do substrato, tensão residual, espessura do revestimento, coeficiente de atrito e rugosidade no comportamento à falha dos sistemas revestidos. O modelo foi desenvolvido utilizando o software de elementos finitos ABAQUS 6.12, neste modelo são considerados três passos de análise (carregamento, riscamento e descarregamento).

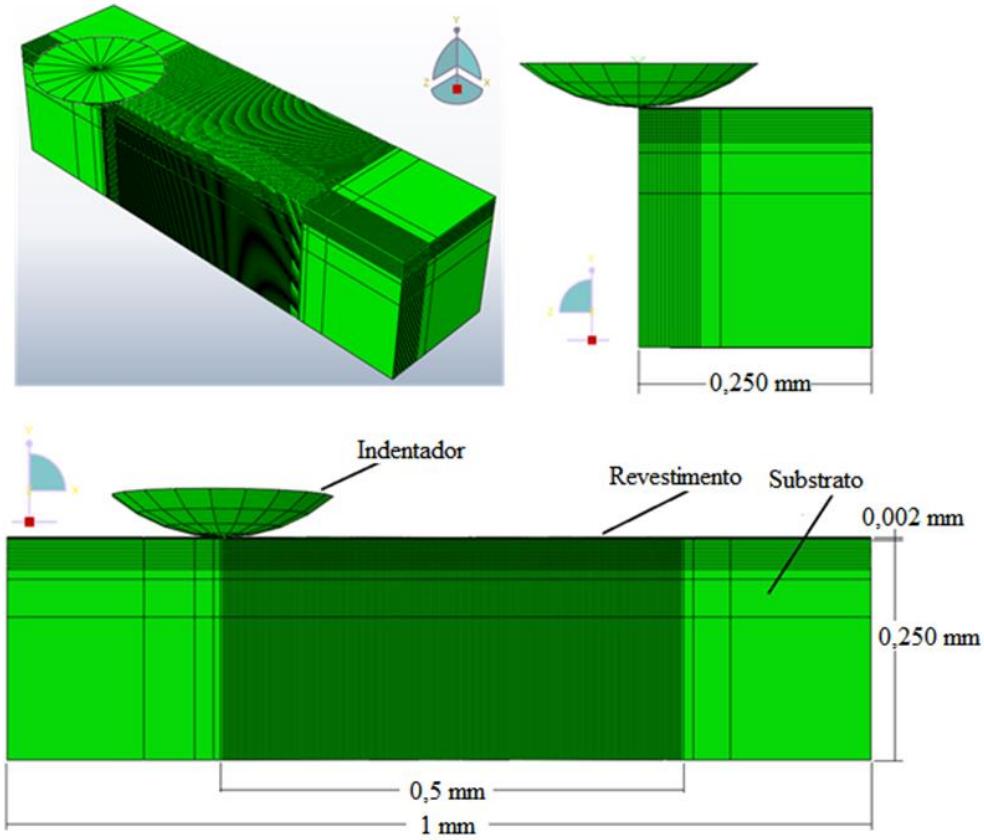
3.1.1 Modelo para análise do comportamento da tensão e falha do sistema revestido.

3.1.1.1 Dimensões

O modelo (Figura 16) consiste de um sistema em 3D, idealmente liso, onde o substrato tem dimensões de 1 mm de comprimento x 0,250 mm largura x 0,250 mm de altura. O modelo, considera também, um revestimento com dimensões de 1 mm de comprimento x 0,250 mm de largura x 0,002 mm – 0,004 mm de espessura.

Para o dimensionamento foram atendidos critérios de Bucaille et al (2006) e normas para ensaio de indentação, onde o corpo de prova deve ter espessura de ao menos 8 vezes a profundidade da marca de indentação. Adicionalmente, a distância desde a borda do corpo de prova até o ponto inicial de contato com o indentador deve ser ao redor de 3 ou 4 vezes o diâmetro da marca de indentação, desta forma, foi configurada a geometria que se apresenta na figura 16. Na figura, apresenta-se o sistema revestido em contato com um indentador rígido de geometria Rockwell C (cone de 120° e ponta com raio de curvatura de 200 µm).

Figura 16 - Esquema do modelo 3D para simulação do ensaio de riscamento.



Fonte: O autor.

3.1.1.2 Força Normal

Em termos de força normal aplicada, Bull (2006) [17] realizou ensaios experimentais e de simulação por elementos finitos de riscamento, sob carregamento de até 18N ao longo de 3 mm para revestimentos de 2 µm de TiN depositado sobre aço inoxidável. Holmberg et al [19-24], através de simulação, consideraram o ensaio de riscamento aplicando até 50N em 10 mm de riscamento, sobre um sistema composto por revestimento de TiN de 2 µm depositado sobre aço rápido (HSS - High Speed Steel). Já, Kataria et al (2010) [40] apresentam resultados em riscamentos de até 3mm e carregamentos de até 12N em sistemas revestidos com TiN depositados sobre aço D9. Para o modelo desenvolvido neste estudo, a força normal aplicada sobre o indentador, será aumentada de forma progressiva (PL), até atingir o valor de 2N numa distância total de riscamento de 0,5 mm. A força normal aplicada e a distância de deslocamento, encontram-se dentro dos parâmetros identificados na literatura e favorecem o custo computacional.

3.1.1.3 Propriedades mecânicas do sistema revestido

Pelo fato de considerar o substrato como material dúctil (comportamento elasto-plástico), no modelo desenvolvido a tensão de escoamento (S_y) foi estabelecida na faixa de 300-800 MPa. Para o comportamento mecânico do revestimento, Holmberg et al (2006) [20] identificou que os valores de tensão obtidos a partir dos dados unicamente elásticos do material, tem levado à obtenção de valores de tensão altos (35000 MPa em simulações de força controlada) nos sistemas submetidos a simulação de riscamento. A justificativa quanto à obtenção desses valores foi proposto pelo Holmberg desde a possível falta de relaxação de tensões, gerada durante o possível trincamento do revestimento. Desta forma, apesar que a maioria dos materiais utilizados como revestimentos em aplicações resistentes ao desgaste apresentam comportamento frágil [30], o modelo de simulação considerará comportamento elasto-plástico para o revestimento, como uma aproximação para análise de tensões em valores comparáveis com os apresentados na literatura. Como apresentado no ANEXO A uma análise de deformação plástica no revestimento foi realizada nas combinações com substrato mais dútil (Sy = 300 MPa) e revestimentos com três valores de tensão de escoamento (Sy = 3000 MPa, 5000 MPa e 7000 MPa), o que levou a estabelecer que embora exista uma região afetada pela deformação plástica, esta não atinge grandes regiões nem altos valores de deformação plástica equivalente (PEEQ) sugerindo o uso de dados elasto- plásticos no modelo de simulação. Neste sentido, Li 2006 [43] reporta a inclusão do valor de tensão de escoamento de 7000 MPa para o material do revestimento no modelo de simulação do ensaio de riscamento utilizando ABAQUS/Standard 6.4.

A resistência dos materiais depositados em revestimentos (TiN, CrN, DLC, entre outros) é comumente reportada em termos da dureza. É assim como a dureza de revestimentos de TiN tem sido apresentada por autores como: Mahieu, Depla e De Gryse (2008) [70] na faixa entre 4 a 18GPa. Wang, Yu e Huang (2014) [71] estabeleceram dureza de 20 a 25 GPa. Wang et al (2015) [72] estabelecem valores de dureza na faixa de 8 a 28 GPa. Igualmente Bull e Berasetegui (2006) [17] consideraram no modelamento por elementos finitos, dureza do revestimento de 8 GPa.

Para o estabelecimento de valores de tensão apartir da dureza, foram selecionadas durezas na ordem de 9GPa-21GPa. Desta forma, considerando a relação ($H \approx 3Sy$) utilizada por Wang, Yu e Huang (2014) [71] e Ma et al (2006) [73] em revestimentos de TiN, é estabelecida uma faixa de 3000 MPa – 7000 MPa como valores próximos ao limite elástico ou tensão de escoamento. É assim como será utilizado o termo tensão de escoamento do revestimento ou simplesmente

tensão do revestimento, como uma maneira de se aproximar ao conceito de dureza em função dos dados de simulação.

Na tabela 4 são apresentadas as propriedades elásticas e plásticas dos materiais no sistema revestido. As propriedades elásticas foram obtidas da literatura [17,18].

Tabela 4 - Propriedades Mecânicas dos materiais

Parte do Modelo	Modulo de Elasticidade	Tensão de Escoamento	Coeficiente de Poisson
Substrato	210 GPa	300 - 800 MPa	0,30
Revestimento	500 GPa	3000 - 7000 MPa	0,25

3.1.1.4 Tensão Residual no revestimento

No modelo, foram considerados valores de tensão residual compressiva. Segundo o Oettel, Wiedemann e Preiβler (1995) [35] os valores de tensão residual compressiva podem atingir valores da ordem de até 10 GPa. Holmberg et al (2009) [24] consideraram o valor de tensão residual de -1GPa durante a simulação numérica do ensaio de riscamento. Soroka (2010) [68] estabelece na revisão da literatura valores de tensão residual, em revestimentos de TiN na faixa de -1GPa a -5GPa e em alguns casos até -17GPa em revestimentos de (Ti,Cr)N. Para o presente modelo de simulação foram consideradas analises sem tensão residual, assim como tensão residual de -3GPa, assumindo-se como consequência do processo de deposição do revestimento ao substrato.

3.1.1.5 Espessura do revestimento

Para análise da influência da espessura do revestimento, foram desenvolvidos modelos com 2 µm e 4 µm de espessura. Em termos das condições de contorno, a base do substrato, estabelecida como uma família de nós, está engastada, enquanto que o substrato e o revestimento apresentam restrições de deslocamentos nas direções “x” e “z”.

3.1.1.6 Coeficiente de Atrito

Da mesma forma, para o modelamento, assumiu-se os valores de 0,1 e 0,2 para o coeficiente de atrito no contato entre o indentador e o revestimento. Autores como Holmberg et al (2005) [19] mediram e simularam valores de coeficiente de atrito de 0,08 em sistemas de TiN sobre

HSS. Xiaoyu; Lauke e Schueller (2002) [31], usaram valor de 0,2 na simulação de TiN sobre aço. Kataria et al (2010) [40] apresentam resultados onde o valor do coeficiente de atrito, esteve na faixa de 0,15-0,25. Harlin, Bexell e Olsson (2009) [67] apresentam que o coeficiente de atrito pode atingir até o valor de 0,5 em sistemas de TiN sobre aço rápido (HSS - High Speed Steel).

3.1.2 Seleção do modelo de simulação

Para a seleção do modelo de simulação mais adequado, foram consideradas inicialmente seis (6) malhas, cada uma utilizando elementos hexagonais do tipo continuo 3D, de oito (8) nós, com integração reduzida C3D8R [74]. Desta forma foram obtidos resultados de tensão Sxx (direção do riscamento "x") e de tempos de processamento computacional para um sistema considerando as características mostradas na tabela 5.

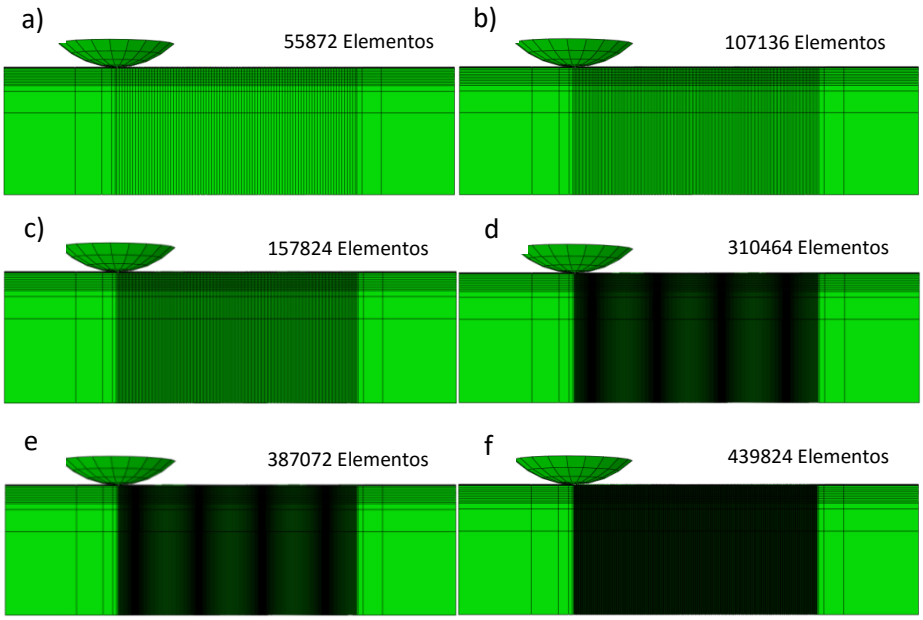
Tabela 5 - Propriedades da simulação para a seleção da malha

Material	Módulo de elasticidade	Tensão de escoamento	Coeficiente de Poisson
Substrato	210 GPa	600 MPa	0,3
Revestimento	500 GPa	6000 MPa	0,25
Carga de riscamento	Progressiva até 2N		
Distância de riscamento	0,5 mm		
Coeficiente de atrito	0,1		
Espessura revestimento	2 µm		

Cada uma das simulações foi reproduzida, num equipamento do tipo WORKSTATION DELL Precision T7610 com processador INTEL XEON E5 2623v2 (Six core, 2,4-3,2 GHz, 15MB), 32 GB de memória RAM DDR3 1866 MHz, processador de vídeo NVIDIA QUADRO K4000 (3GB) e sistema operacional Windows 7 professional 64bits.

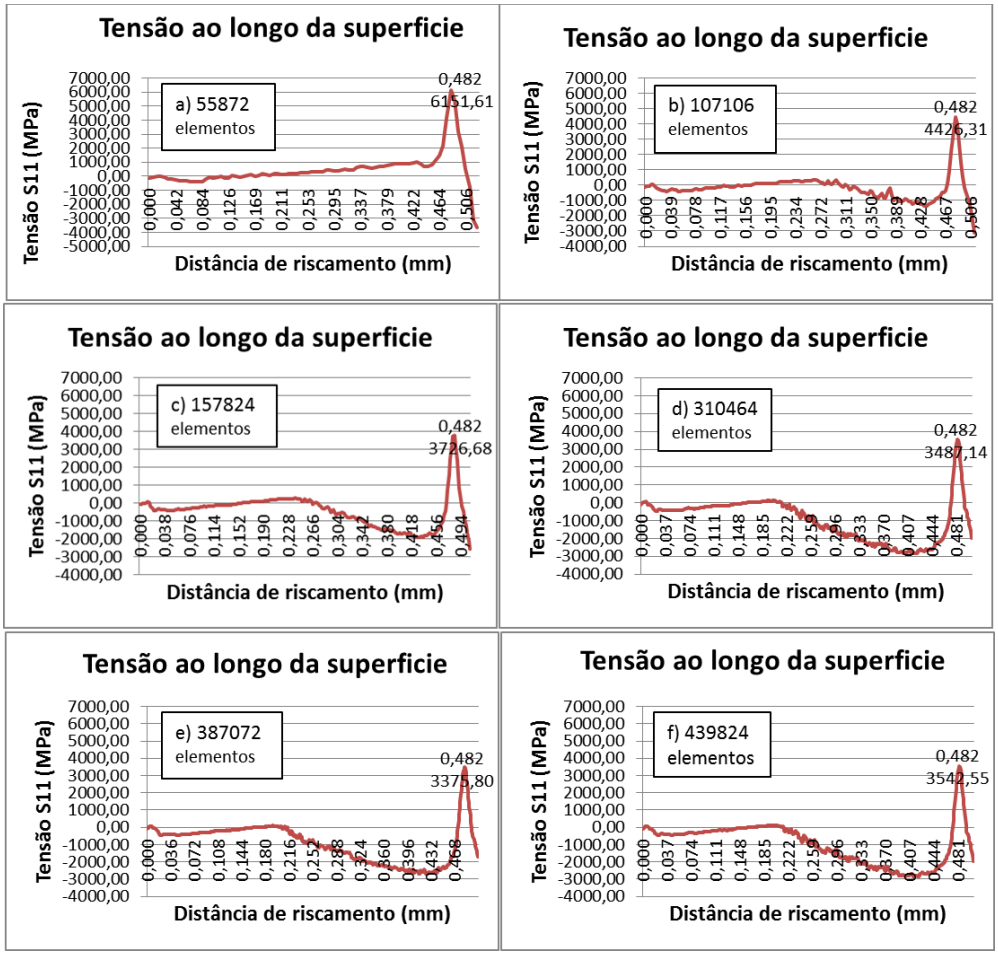
Na figura 17, são apresentadas cada uma das seis malhas utilizadas no modelo, a) 55872 elementos, b) 107136 elementos, c) 157824 elementos, d) 310464 elementos, e) 387072 elementos, f) 439824 elementos. Na figura 18 é apresentado o comportamento da tensão S_{xx} (Direção do riscamento) obtida em cada uma das malhas do modelo. Os máximos valores obtidos em cada malha foram atingidos na distância de riscamento de 0,482 mm.

Figura 17 - Malhas consideradas na análise de convergência.



Fonte: O autor

Figura 18 - Valores de tensão principal Sxx obtidos em cada uma das malhas do modelo.



Fonte: O autor

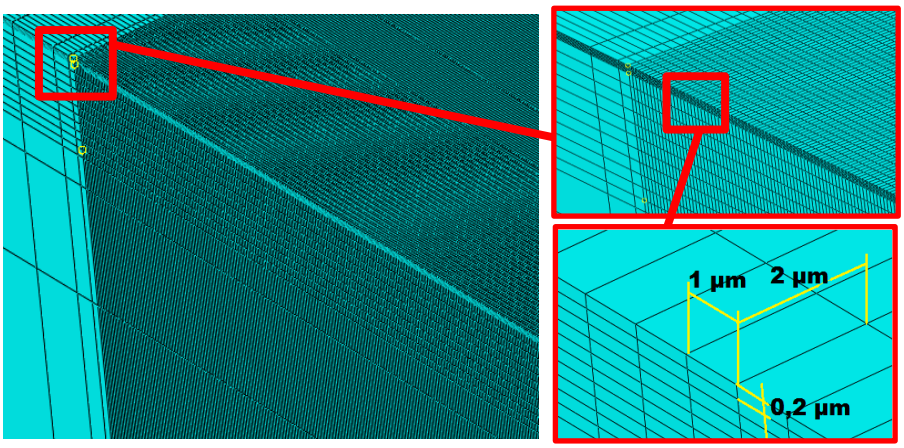
Na tabela 6, apresentam-se os valores de tensão principal S_{xx}, os tempos de processamento computacional, assim como o desvio nos valores de tensão. Segundo os resultados apresentados na tabela, é escolhida a malha 3, com 157824 elementos para a realização das análises já que esta malha, comparada com a malha mais fina (estabelecida como referência) representa um desvio de 5% nos valores de tensão obtidos, da mesma forma, esta malha permite o processamento da simulação em apenas 84,6 horas, o que representa um 11,4% do tempo original demorado pela malha mais fina (742,13 horas).

Tabela 6 – Análise de convergência segundo valores da tensão Sxx e tempos de processamento

Malha	Número de Elementos	Tensão Sxx (MPa)	Desvio Sxx	Tempo de processamento (horas: minutos)
1	55872	6151,61	0,74	11 :46
2	107136	4426,31	0,25	41:20
3	157824	3726,68	0,05	84:36
4	310464	3487,14	-0,02	239:33
5	387072	3375,8	-0,05	496:11
6	439824	3542,55	0	742:08

A malha selecionada igualmente considera refinamento no tamanho dos elementos na região do revestimento, sendo que a espessura foi dividida em 10 elementos, cada um destes com 0,001 mm de comprimento x 0,002 mm de largura e 0,0002 mm de espessura, como se apresenta na figura 19.

Figura 19 - Detalhe do refinamento da malha na região do contato

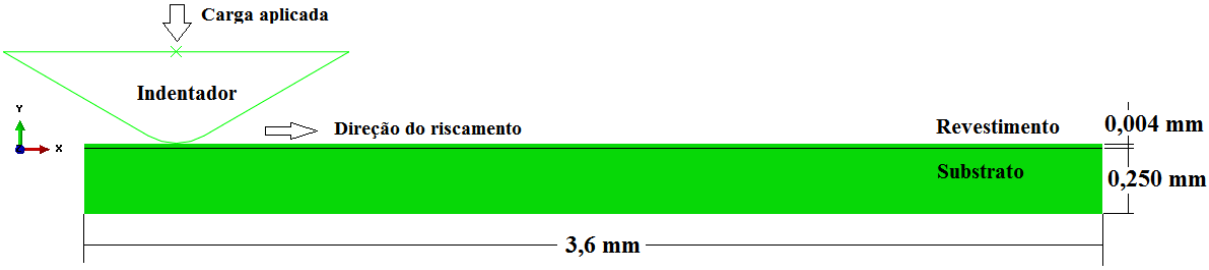


Fonte: O autor

3.1.3 Modelo considerando rugosidade na superfície do sistema revestido

Para este caso, as análises considerando a rugosidade superficial do sistema revestido baseiam-se no desenvolvimento de modelos de simulação em 2D, onde uma partícula com ponta esférica com as características do indentador Rockwell C risca sobre a superfície de um sistema revestido, o qual baseia-se num substrato de 3,6 mm de comprimento x 0,250 mm de altura e um revestimento de 3,6 mm de comprimento x 0,004 mm de altura, como se apresenta na figura 20.

Figura 20 - Esquema do modelo 2D para simulação do riscamento



Fonte: O autor

Com o objetivo de gerar um modelo de simulação comparável com alguns dos modelos encontrados na literatura [19-24, 43, 62], considerou-se uma distância de riscamento de 3 mm, assim como uma carga normal aplicada em condições de carga progressiva (PL) até o valor de 15 N. Assim como para o modelo em 3D, os valores de distância e de carga são coerentes com a literatura. Desta forma, com os valores de distância e deslocamento considerados, procurou-se minimizar os tempos de simulação.

Para a seleção do grau de rugosidade a ser estudado, foi considerada a rugosidade media (Ra) como valor representativo da rugosidade da superfície. Desta forma, foram estabelecidos modelos que permitem a simulação do sistema revestido em condições: idealmente liso, rugosidade Ra de 0,16 μm na superfície do substrato e na superfície do revestimento, assim como rugosidade Ra de 0,35 μm no substrato e na superfície do revestimento. Os valores de rugosidade considerados foram obtidos da literatura, onde Ali et al (2010) [75] reportam rugosidades (Ra) na superfície de revestimentos de TiN, depositados por processo PVD sobre aço ferramenta D2, na ordem de 0,15 μm a 0,62 μm. Da mesma forma, é considerado o mesmo valor de rugosidade média na superfície do substrato quanto para a superfície do revestimento,

entendendo que a rugosidade do substrato é reproduzida quase na totalidade na superfície do revestimento [76].

Os valores de rugosidade (Ra) considerados para o substrato e para a superfície do revestimento (0,16 µm e 0,35 µm) foram obtidas após polimento com lixas de SiC e com alumina numa superfície de aço. Para a medição foi utilizado um rugosimetro Mitutoyo SJ-201 e o perfil de rugosidade foi exportado para o software CAD Solidworks e depois para o software de elementos finitos ABAQUS. Na figura 21, é possível observar os três modelos estabelecidos para as simulações com variações de rugosidade.

Figura 21 - Modelos 2D segundo rugosidade no sistema revestido. a) Ra=0 b) Ra= 0,16µm c) Ra= 0,35 µm

Fonte: O autor

Na tabela 7 são apresentadas as propriedades dos materiais no modelo. As propriedades elásticas e plásticas dos materiais correspondem a uma das combinações revestimento/substrato, das análises em 3D, e foram obtidas da literatura [17,18].

Tabela 7 - Propriedades dos materiais utilizados na simulação 2D do riscamento.

Parte do Modelo	Módulo de Elasticidade	Tensão de Escoamento	Coeficiente de Poisson
Substrato	210 GPa	300 MPa	0,3
Revestimento	500 GPa	5000 MPa	0,25

Na tabela 8, apresenta-se o valor de rugosidade e o número de elementos da malha para cada um dos três modelos simulados segundo as rugosidades, assim como os tempos de processamento. Os elementos utilizados no projeto da malha são do tipo CPS4R (Quadrilátero para estado plano de tensões) [74].

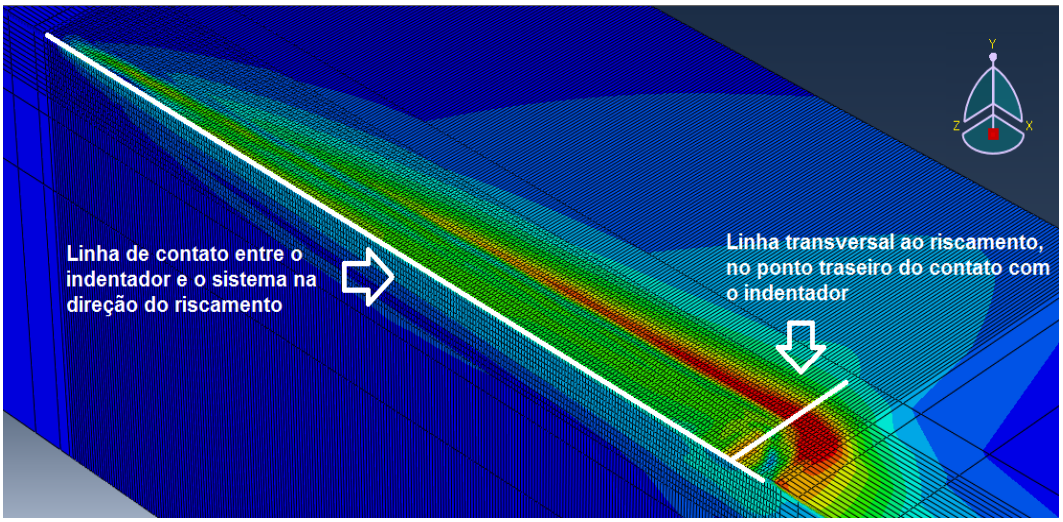
Tabela 8 - Numero de elementos e tempos de processamento para os modelos rugosos

Modelo 1	Rugosidade	Número de Elementos	Tempo de processamento
Substrato	Liso	109500	8,9 horas
Revestimento	Liso		
Modelo 2	Rugosidade	Número de Elementos	Tempo de processamento
Substrato	0,16 µm	153300	29,2 horas
Revestimento	0,16 µm		
Modelo 3	Rugosidade	Número de Elementos	Tempo de processamento
Substrato	0,35 µm	242500	65,42 horas
Revestimento	0,35 µm		

4. RESULTADOS

De forma geral, as falhas presentes nos sistemas compostos por revestimento duro e substrato dúctil (falhas dúcteis), concentram-se no interior e nas bordas do sulco gerado durante a passagem do indentador sobre o sistema revestido [15]. Desta forma, pela natureza dúctil do substrato nas diferentes combinações (revestimento/substrato) aqui estudadas, é importante analisar o comportamento da tensão Sxx gerada ao longo da linha de contato na direção do riscamento, assim como da tensão Szz na direção transversal no ponto de máxima tensão na parte traseira do indentador (Figura 22).

Figura 22 - Linha de contato para a obtenção da tensão Sxx e Szz



Fonte: O autor

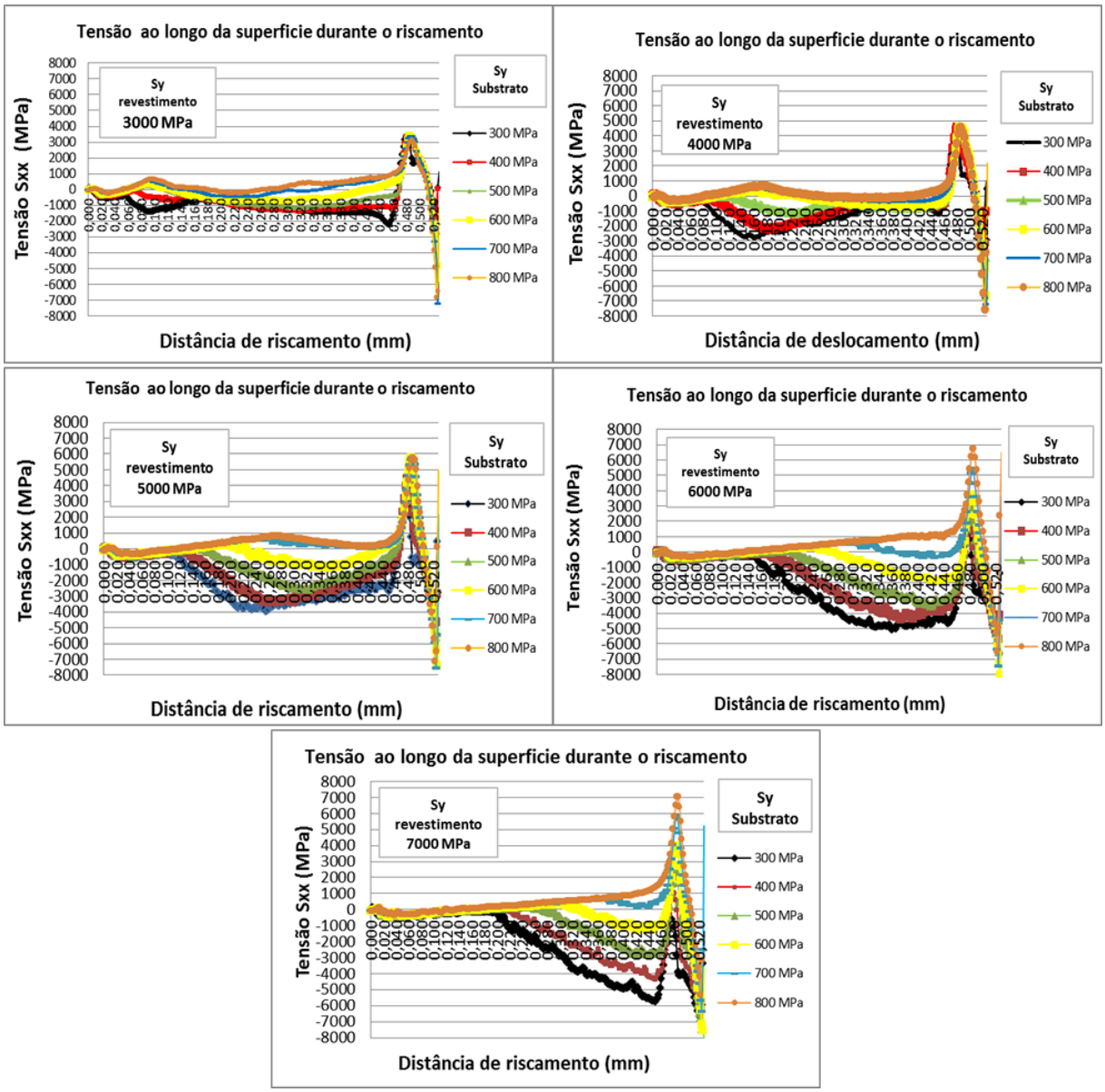
As distribuições das tensões serão apresentadas para as seguintes condições: Na superfície do sistema revestido durante o riscamento, na superfície depois de liberada a carga (após descarregamento), na interface do lado do revestimento durante o riscamento, assim como depois do riscamento, na interface do lado do substrato durante e depois o riscamento. Em alguns casos, será apresentado em detalhe o pico de tensão obtido para combinaçãoes revestimento/substrato.

4.1 INFLUÊNCIA DA DUREZA DO REVESTIMENTO E DO SUBSTRATO, NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES Sxx, Szz NOS SISTEMAS REVESTIDOS.

Os modelos para este item, consideram espessura do revestimento de 2 µm e atrito durante o contato de 0,1 para a totalidade das combinações revestimento/substrato. Na figura 23

apresentam-se o comportamento da tensão Sxx ao longo da linha de contato, para cada uma das combinações revestimento/substrato. Na figura 24, observa-se em detalhe o pico de tensão atingido na parte de trás do indentador em cada combinação revestimento/substrato. Na figura 25 apresenta-se o comportamento da tensão Szz ao longo da linha transversal na região traseira do indentador no ponto de máxima tensão.

Figura 23 - Tensão Sxx ao longo da superfície do sistema durante o riscamento.



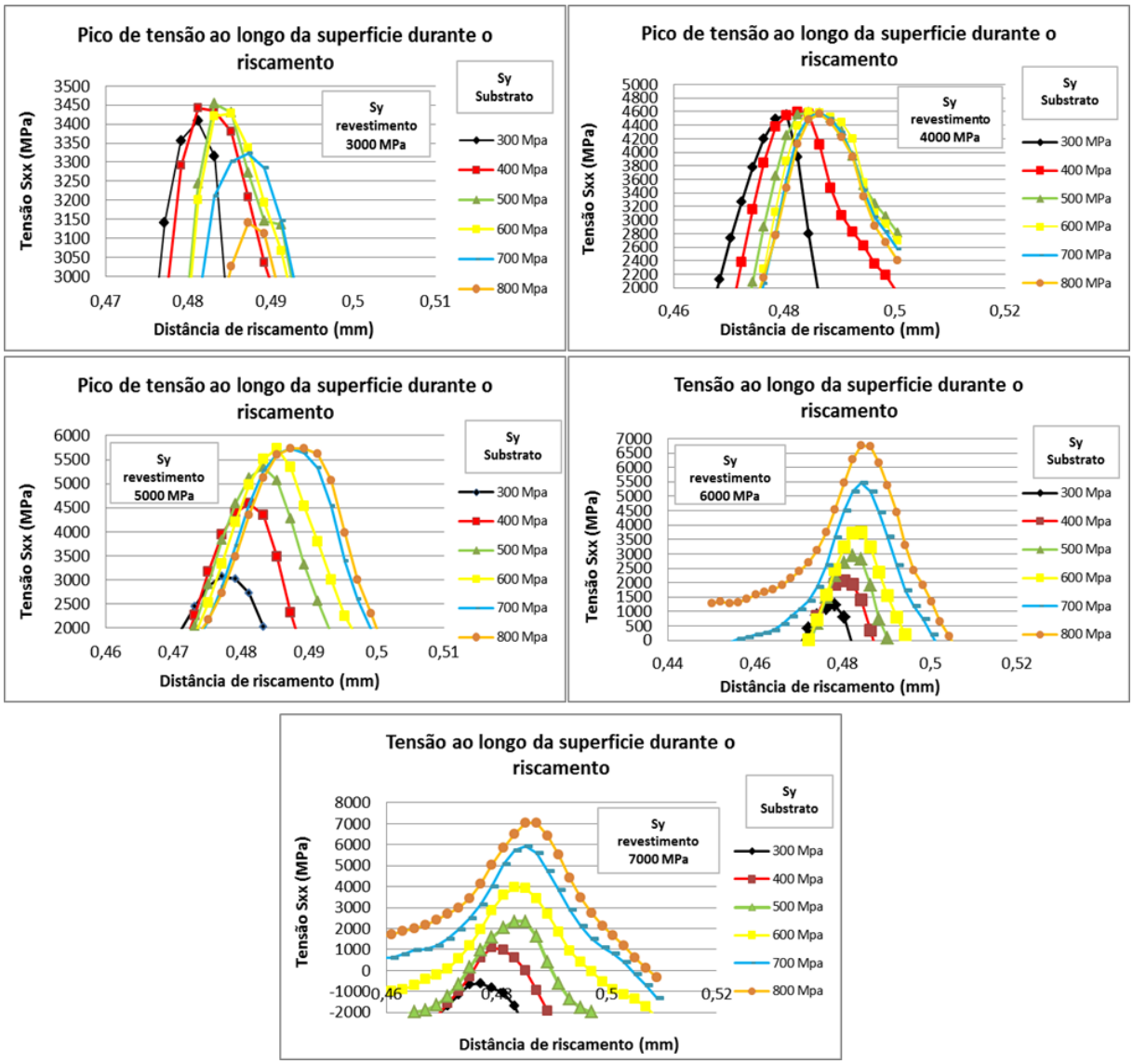
Fonte: O autor

Da figura 23 é possível observar que os substratos com menor tensão de escoamento, levam à obtenção de valores compressivos na superfície do sistema, assim mesmo os substratos de maior tensão de escoamento levam sempre à obtenção de tensões de caráter trativo na

superfície. No caso do revestimento, é possível observar como, com o aumento da tensão de escoamento do revestimento, incrementa-se na distância à qual a tensão na superfície torna-se compressiva para a combinação com os substratos de menor tensão de escoamento (mais dúcteis), assim como incrementa-se a distância na qual é atingido o máximo valor de tensão trativa ao longo do sulco, até antes do pico máximo, para os substratos de maior tensão de escoamento (mais resistentes).

Na figura 24, apresenta-se em detalhe o pico de tensão atingido na superfície durante o riscamento. Com o aumento da tensão de escoamento do revestimento, observa-se que a maior tensão Sxx é obtida para substratos de maior tensão de escoamento.

Figura 24 - Detalhe do pico de tensão principal Sxx ao longo da superfície do sistema durante o riscamento.

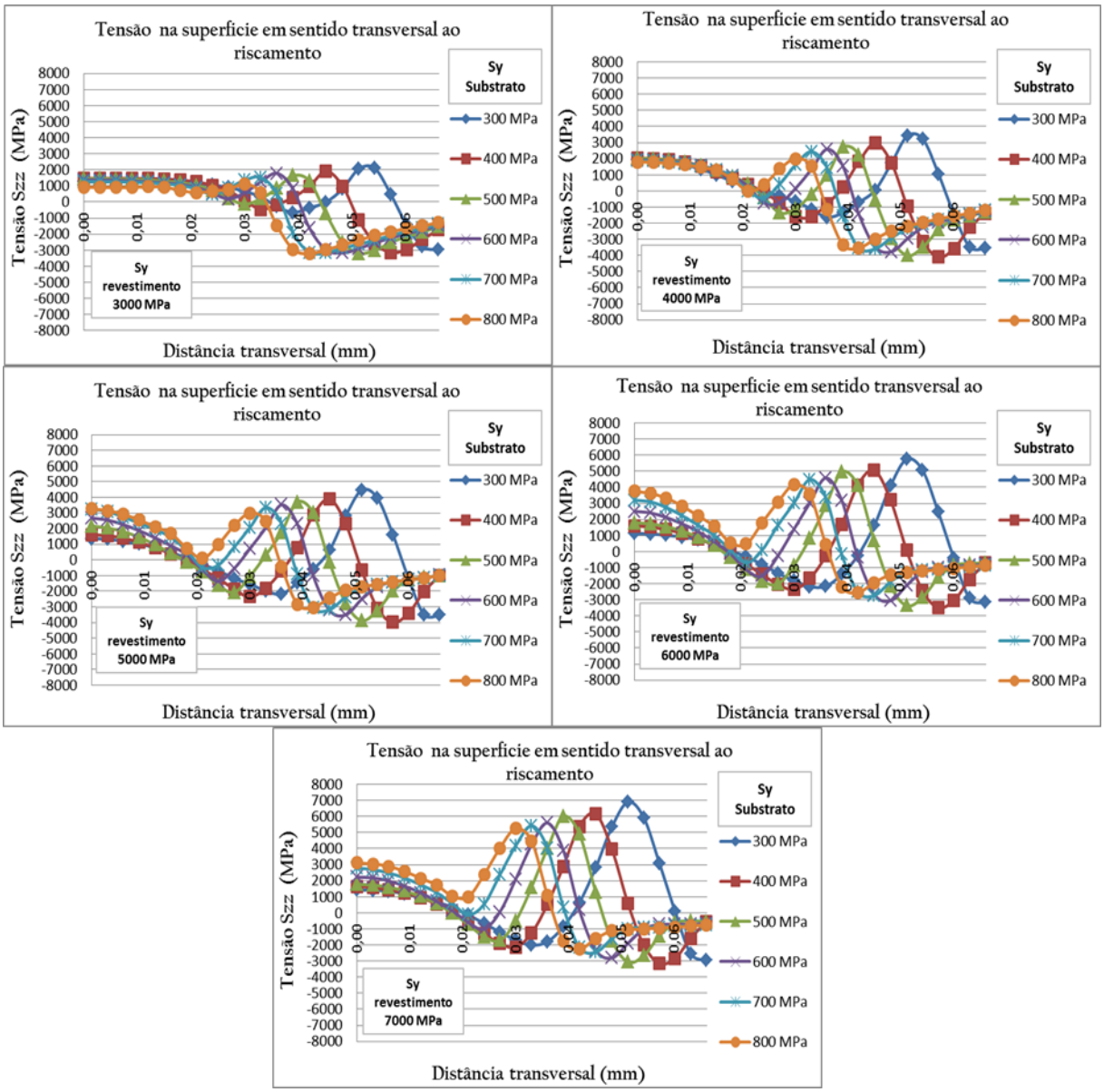


Fonte: O autor

De outro lado, nos casos onde a tensão de escoamento do revestimento é de 3000 MPa e 4000 MPa todas as combinações com substratos ultrapassam o valor da tensão do revestimento. No caso em que a tensão de escoamento do revestimento é de 5000 MPa, o valor da tensão de escoamento é atingido para substratos de 500 MPa, 600 MPa, 700 MPa e 800 MPa. No caso da tensão de escoamento do revestimento de 6000 MPa e 7000 MPa, o valor é atingido unicamente no caso com o substrato de 800 MPa.

Na figura 25, observa-se a tensão Szz ao longo da linha transversal à linha de riscamento.

Figura 25 - Tensão Szz na superfície ao longo da linha transversal atrás do indentador

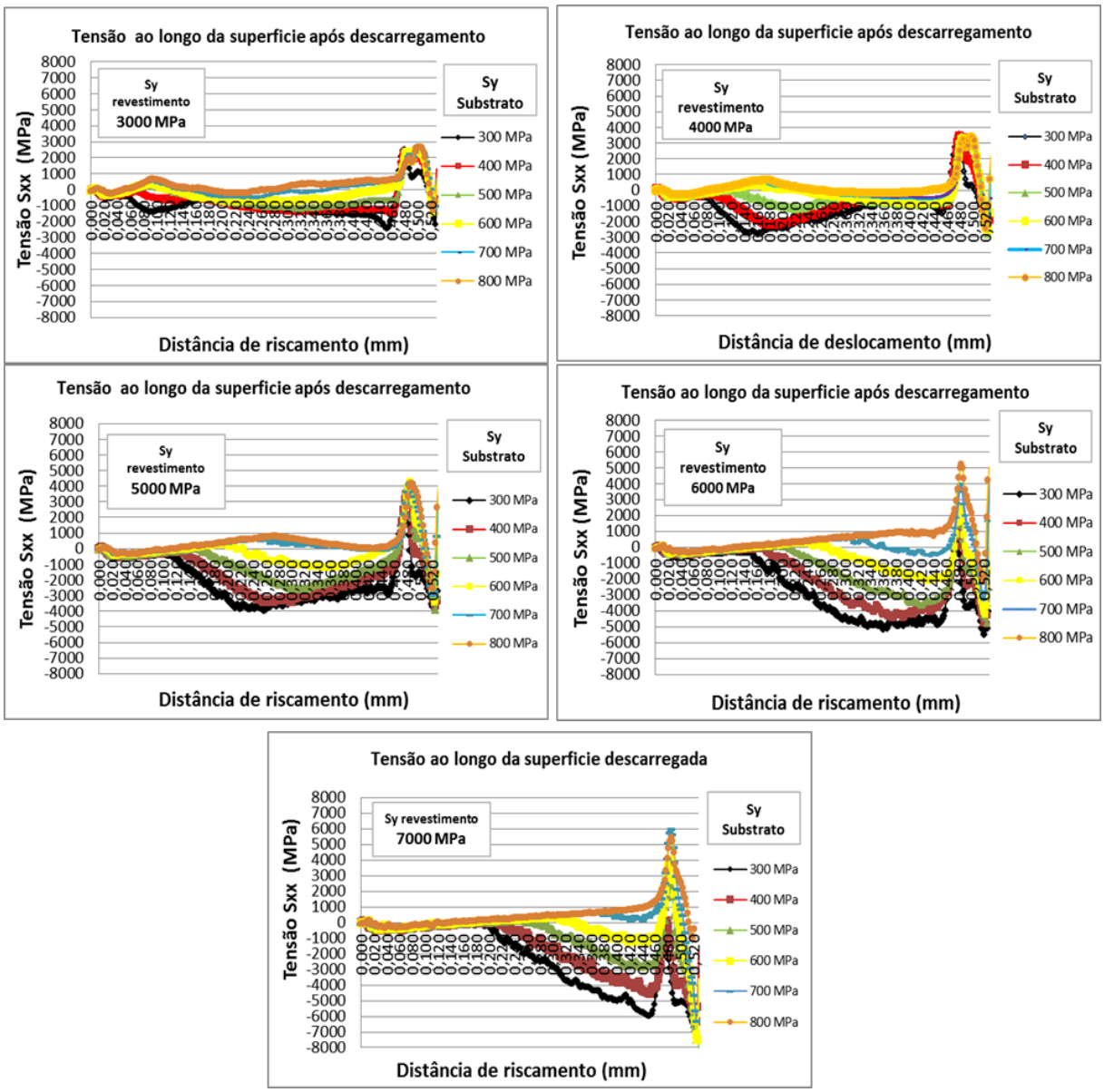


Fonte: O autor

Na figura observa-se que segundo aumenta o valor da tensão (tensão de escoamento) do revestimento, também aumentam os valores de tensão atingidos na borda do sulco em cada combinação com os substratos. Igualmente é possível observar o efeito da dureza do substrato, desta forma quanto mais duro o substrato menor é o valor de tensão atingido e quanto mais dúctil o substrato, maior é o valor de tensão atingido na superfície do conjunto.

Na figura 26, é apresentado o comportamento da tensão Sxx na superfície dos conjuntos (revestimento/substrato) após o descarregamento.

Figura 26 - Tensão Sxx ao longo da superfície do sistema após o descarregamento

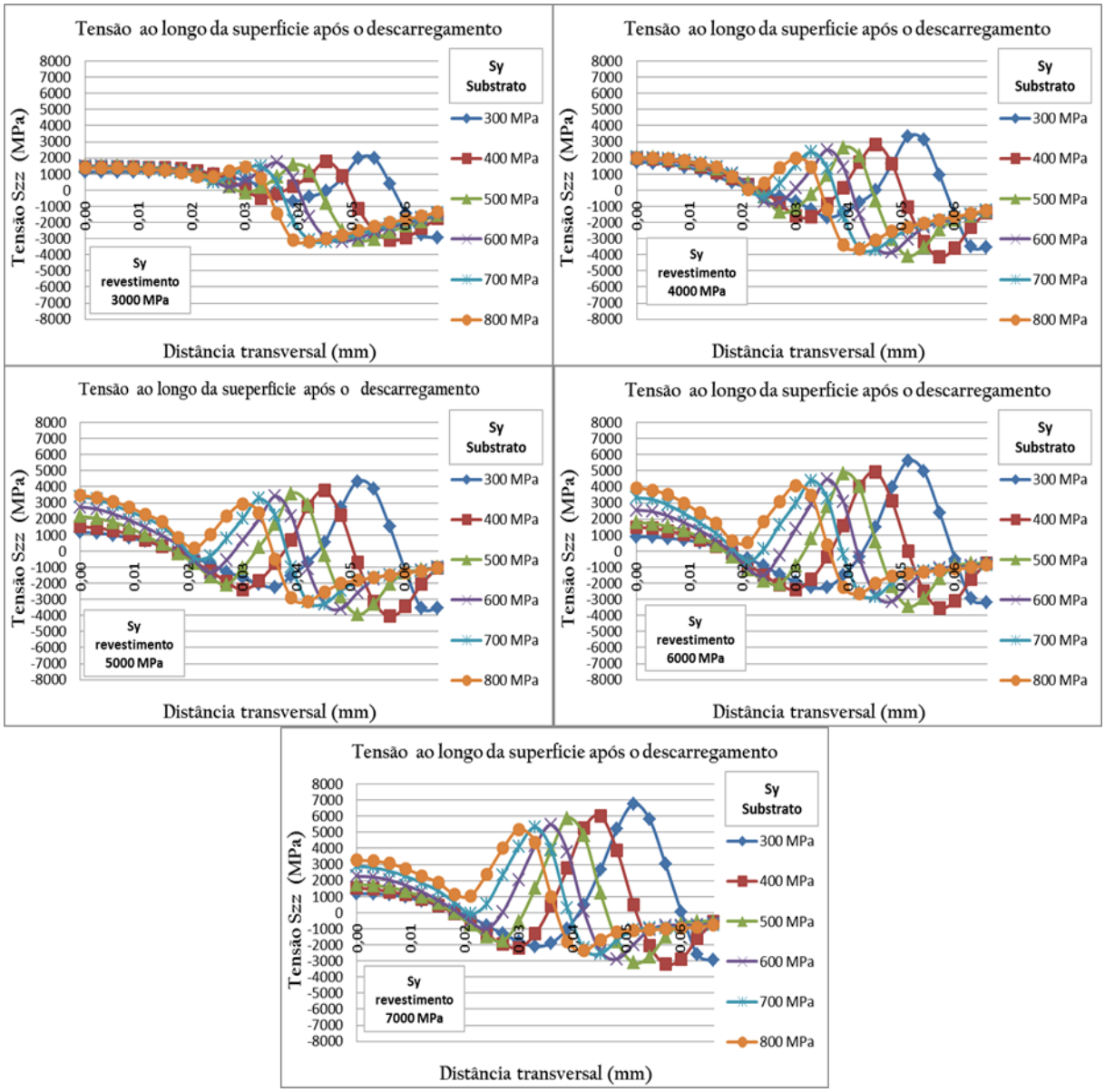


Fonte: O autor

Em cada uma das figuras, da figura 26 observa-se como os picos de tensão máxima Sxx atingidos em cada combinação, não ultrapassam o valor de tensão de escoamento do revestimento. Da mesma forma, é interessante observar que depois do descarregamento o comportamento da tensão na superfície, conserva-se praticamente igual ao obtido ao longo do sulco durante o riscamento.

A figura 27 apresenta o comportamento da tensão Szz após o descarregamento do contato do indentador com a superfície dos conjuntos (revestimentos/substratos).

Figura 27 - Tensão Szz ao longo da superfície do sistema após o descarregamento

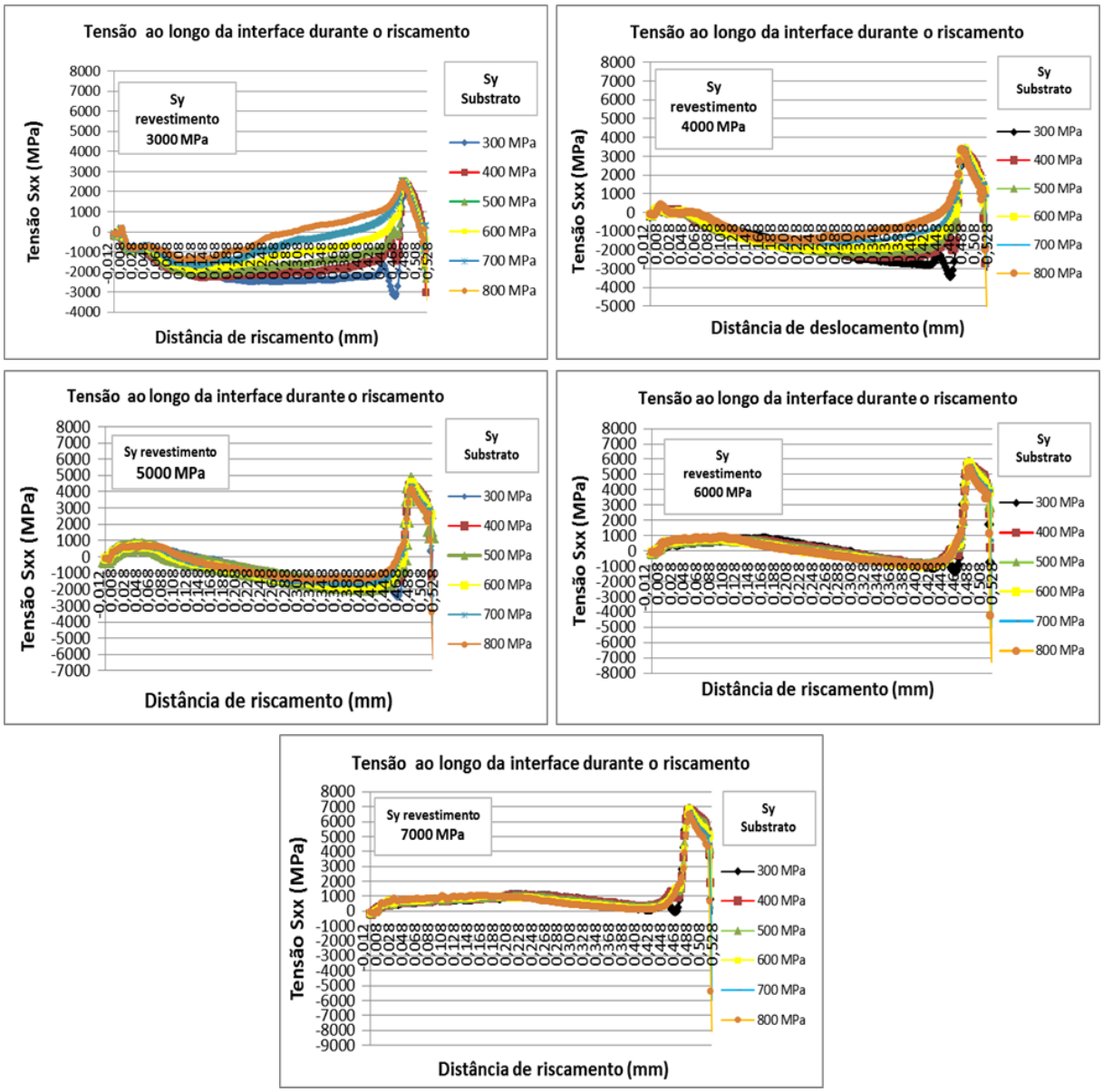


Fonte: O autor

Da figura é possível observar que não existem mudanças no comportamento da tensao Szz depois de descarregado o sistema.

A figura 28 apresenta o comportamento da tensão Sxx, na interface do sistema, especialmente do lado do revestimento. Observa-se que, na medida em que vai aumentando a tensão de escoamento do revestimento, vai-se reduzindo a diferença entre os valores da tensão obtidos segundo cada substrato, levando até a convergência do comportamento ao longo da interface.

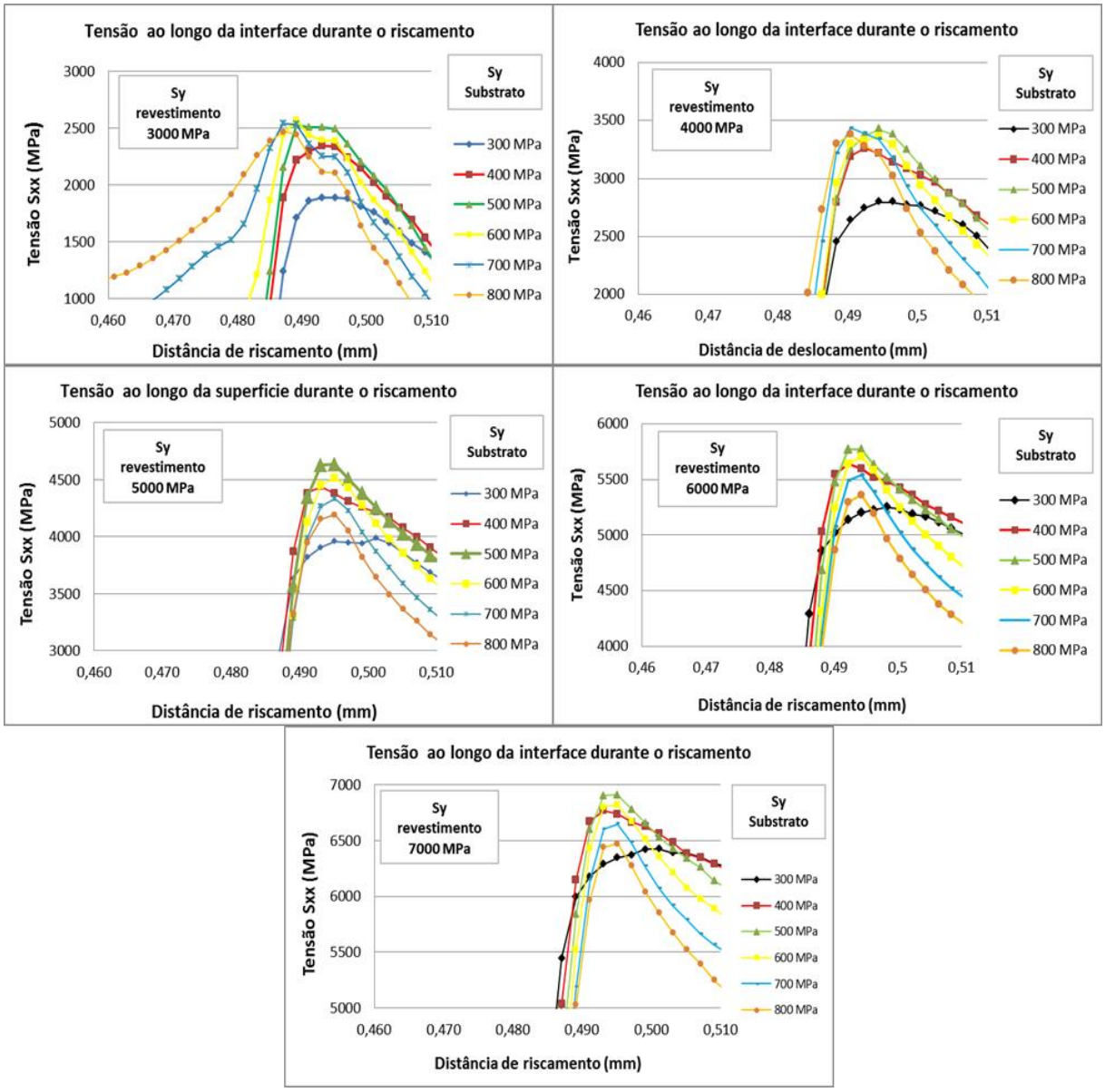
Figura 28 - Tensão Sxx ao longo da interface revestimento/substrato durante o riscamento



Fonte: O autor

Na figura 29, pode ser observado em detalhe o pico da tensão, obtido na interface, do lado do revestimento. Da figura é possível ver que nenhum dos picos de tensão presentes na interface, segundo as combinações de revestimentos/substratos, atinge o valor da tensão de escoamento do revestimento. Igualmente, é interessante observar que o substrato que sempre leva à obtenção do maior valor de tensão Sxx na interface durante o riscamento é aquele com dureza intermediária (tensão de escoamento de 500 MPa).

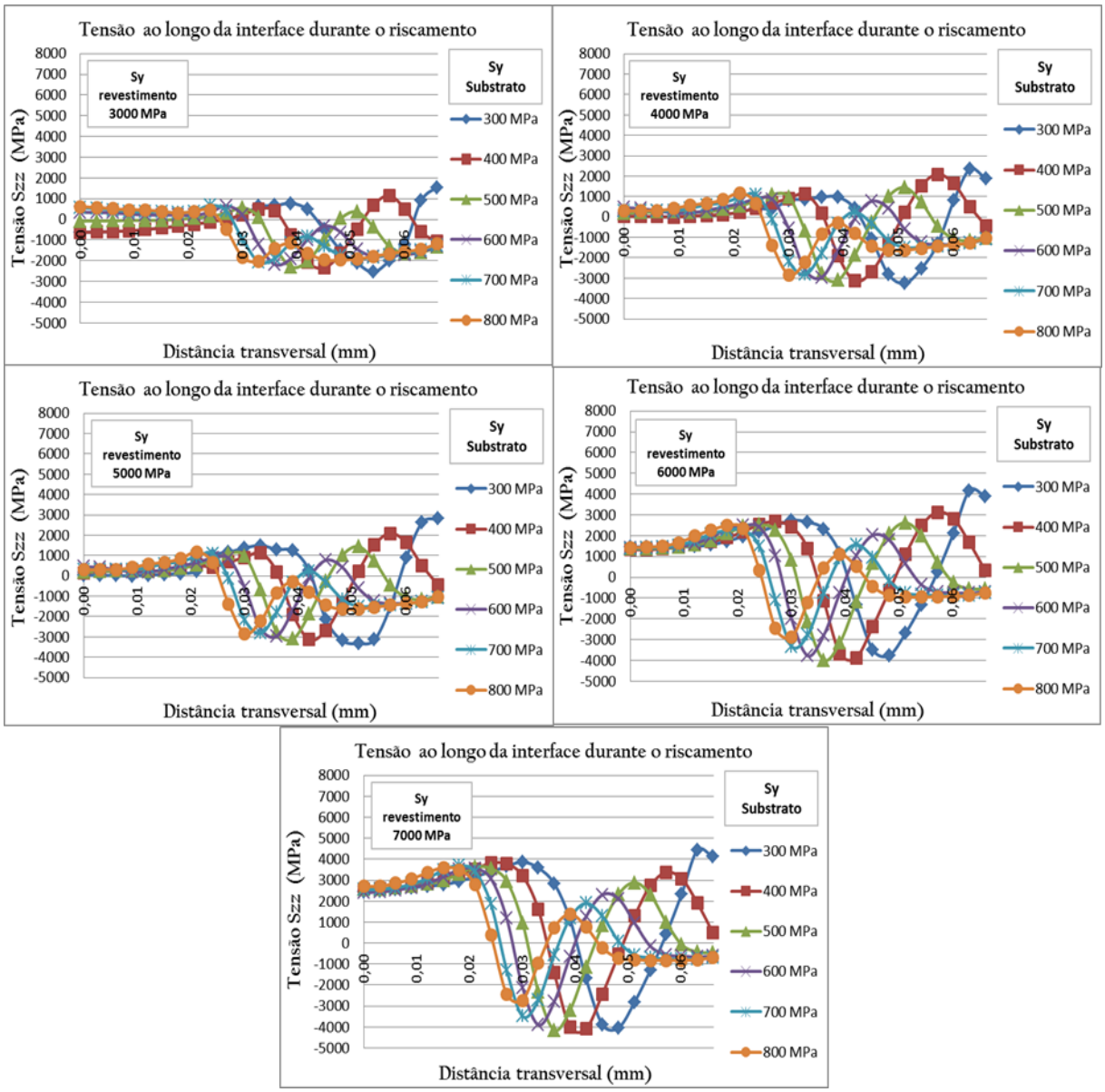
Figura 29 - Detalhe do pico de tensão principal Sxx ao longo da interface revestimento/substrato durante o riscamento



Fonte: O autor

Na figura 30 apresenta-se o comportamento da tensão Szz na interface das diferentes combinações de sistemas revestidos.

Figura 30 - Tensão Szz ao longo da interface revestimento/substrato durante o riscamento



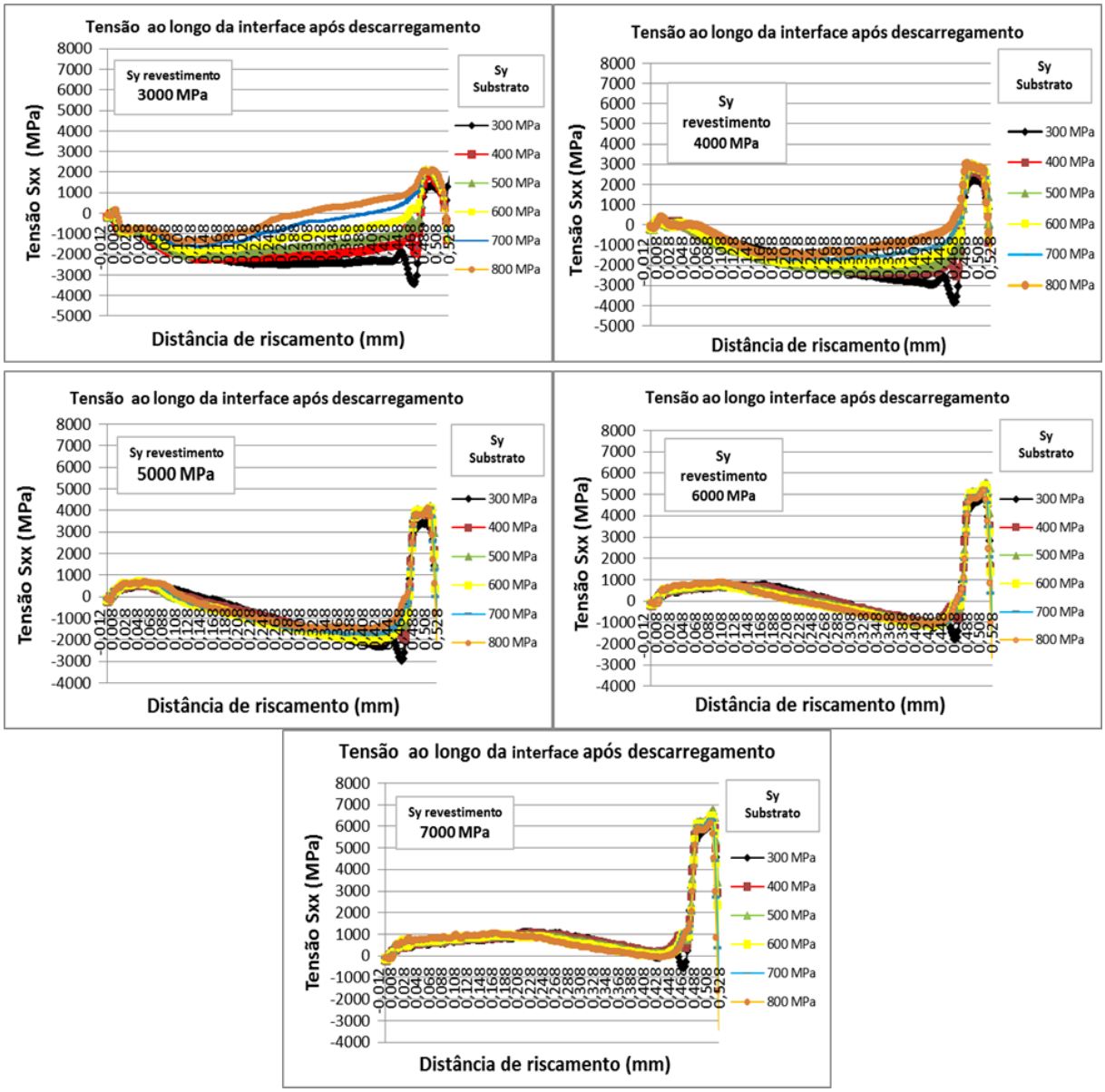
Fonte: O autor

Diferente do comportamento da tensão Sxx, pelo qual com aumento do valor da tensão do revestimento, os valores das tensões Szz obtidas nos diferentes substratos levam a um mesmo comportamento. Neste caso, cada substrato leva à obtenção de valores de tensão diferentes, de forma que os substratos mais dúcteis (moles) levam à obtenção dos maiores valores de tensão Szz. Da mesma forma, observa-se que segundo aumenta o valor da tensão de escoamento do revestimento, maiores valores de tensão na superfície são atingidos. Porém, em nenhuma das

combinações é atingido o valor da tensão do revestimento, sugerindo a baixa possibilidade de falha na interface dos sistemas durante o riscamento.

Na figura 31. é apresentado o comportamento da tensão Sxx na interface do sistema depois do descarregamento. Observa-se que, na medida em que vai aumentando a tensão de escoamento do revestimento, vai-se reduzindo a diferença entre os valores ao longo da distância de riscamento obtidos para cada substrato. Da mesma forma, em nenhuma das combinações é atingido o valor da tensão do revestimento.

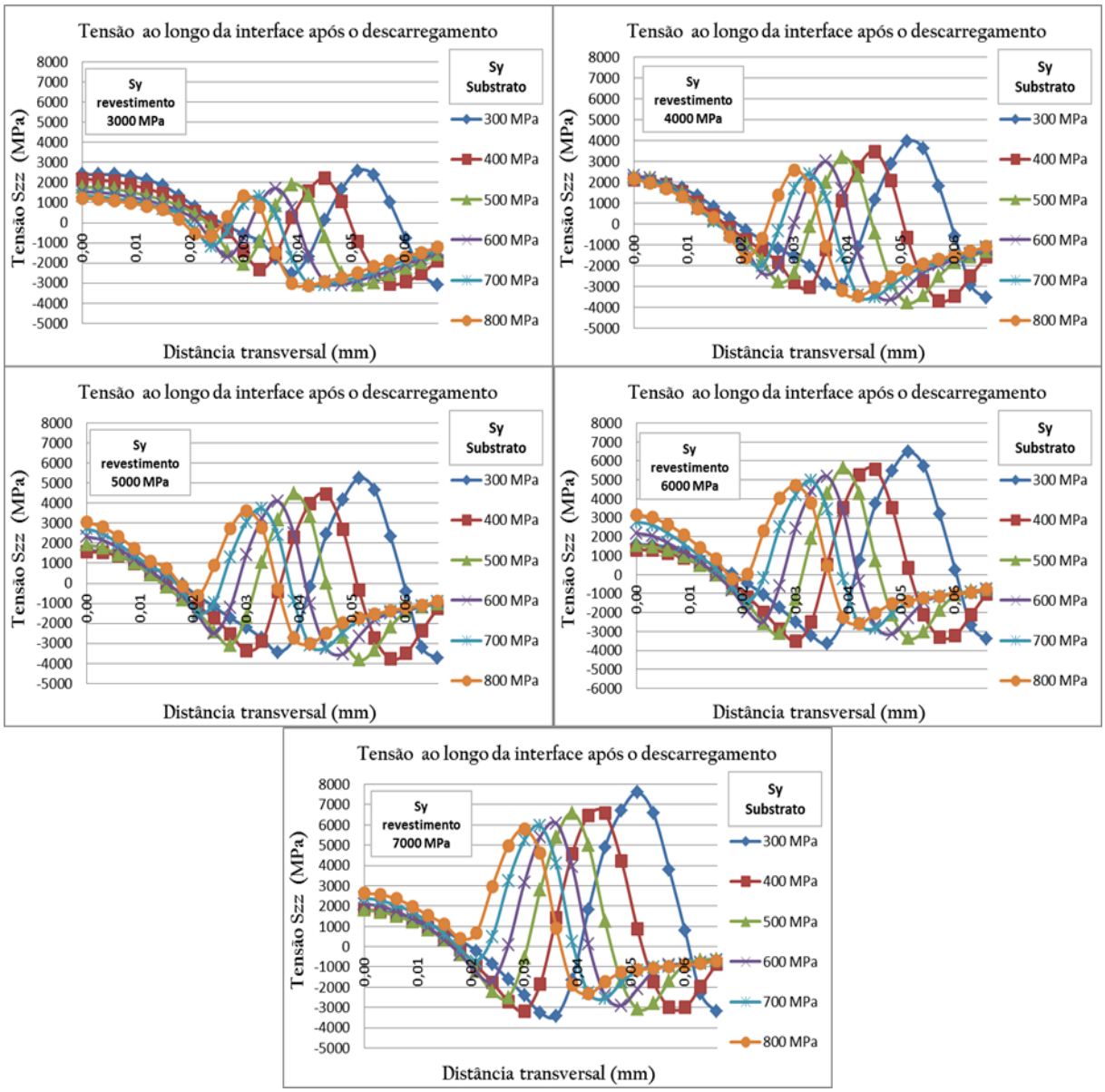
Figura 31 - Tensão Sxx ao longo da interface revestimento/substrato após o descarregamento.



Fonte: O autor

A figura 32, apresenta o comportamento da tensão Szz na interface do sistema depois do descarregamento.

Figura 32 - Tensão Szz ao longo da interface revestimento/substrato após o descarregamento.

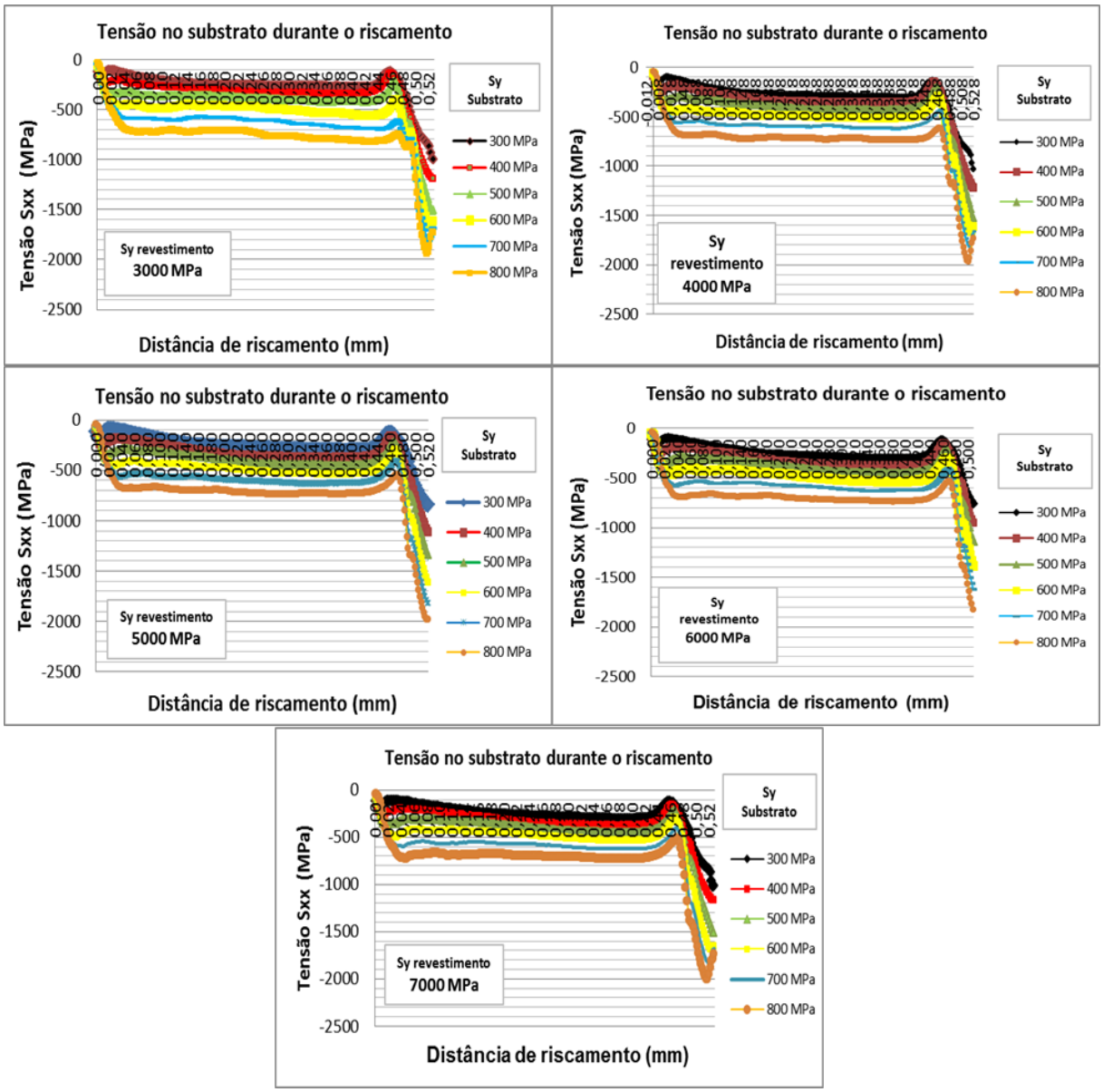


Fonte: O autor

Da figura 32 é possível identificar que o descarregamento tem papel importante na tensão Szz na interface, indicando que nas combinações com maior tensão de escoamento no revestimento, o substrato mais dúctil leva à obtenção de valores que ultrapassam o valor de tensão de escoamento do revestimento. Este comportamento apresenta-se a partir do revestimento com tensão de escoamento de 5000 MPa.

Na figura 33, observa-se o comportamento da tensão Sxx na interface, em particular na superfície do substrato, durante o riscamento. Em todos os casos observa-se que a superfície do substrato adquire valores de tensão compressiva ao longo do riscamento, assim como os valores menos compressivos são obtidos nas combinações com os substratos mais dúcteis, enquanto que as tensões mais compressivas são obtidas para os substratos mais duros (maior tensão de escoamento).

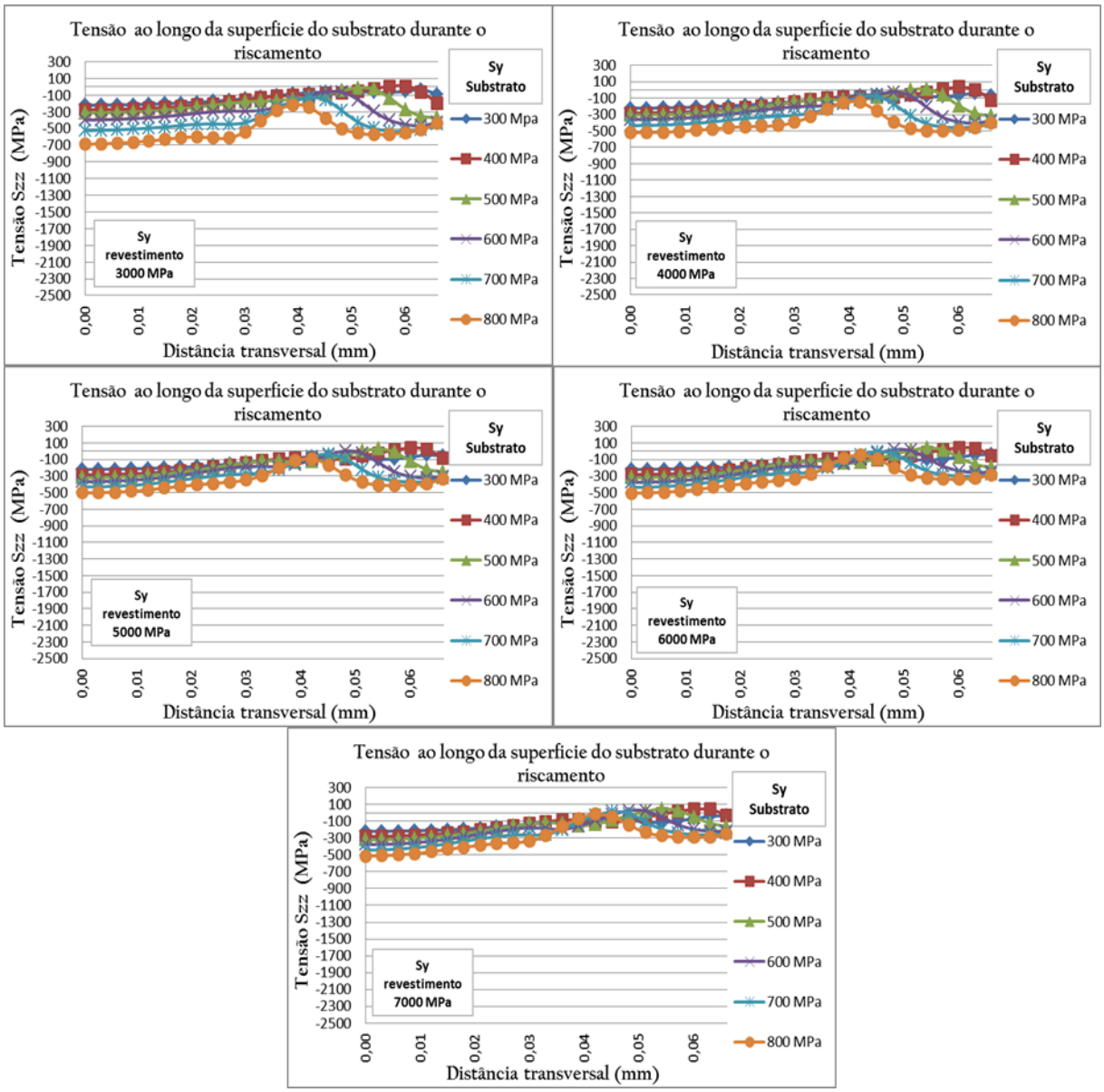
Figura 33 - Tensão Sxx ao longo da interface do lado do substrato durante o riscamento



Fonte: O autor

Na figura 34 apresenta-se o comportamento da tensão Szz na interface na superfície do substrato.

Figura 34 - Tensão Szz ao longo da interface, na superfície do substrato durante o riscamento



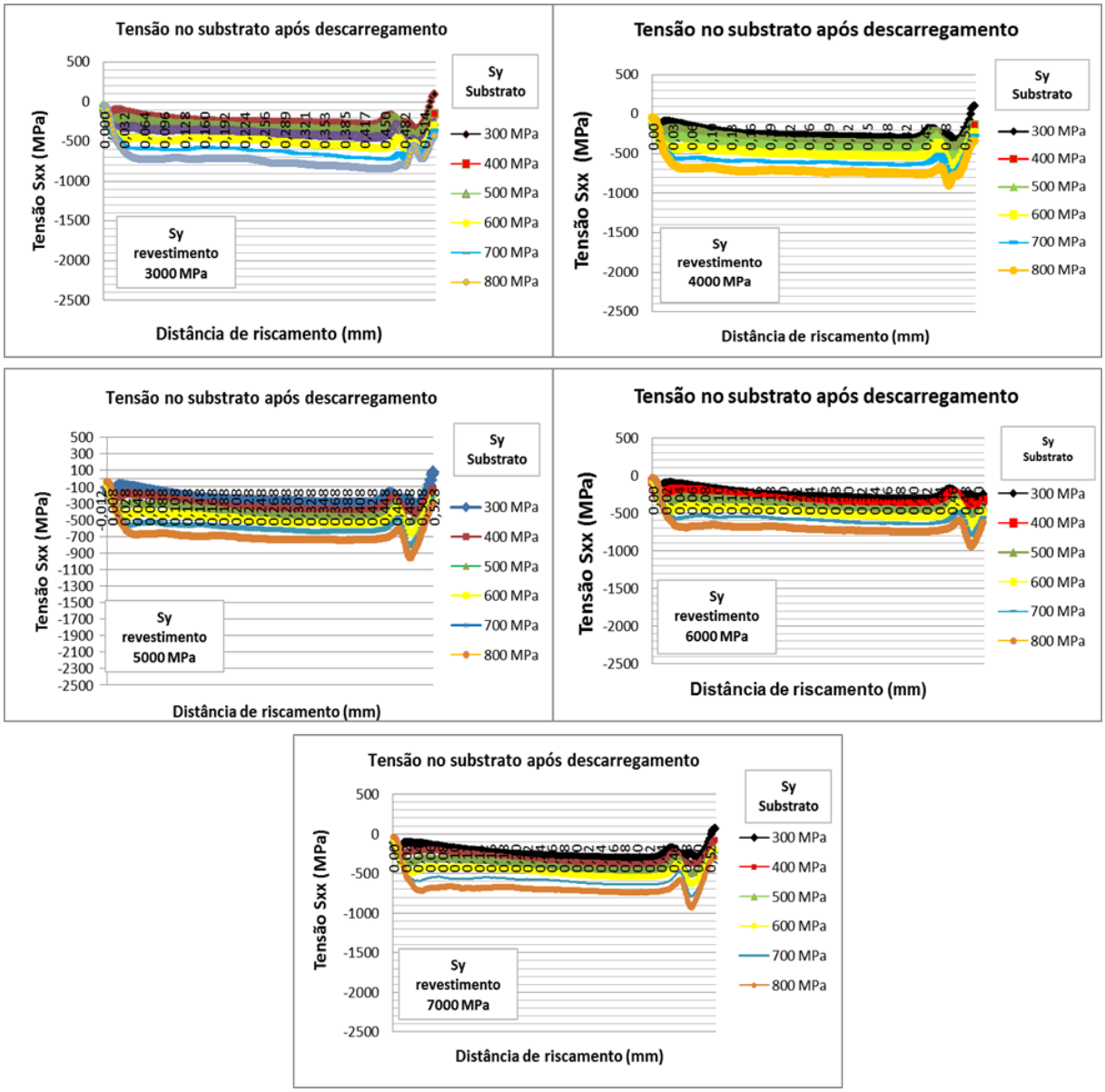
Fonte: O autor

Na figura observa-se que na superfície do substrato apresentam-se valores compressivos no ponto central do contato assim como valores rapidamente trativos na borda do sulco gerado. Observa-se a pouca influência da tensão de escoamento do revestimento, assim como a influência do substrato, onde a presença de substratos com maior tensão de escoamento (duros) leva à obtenção de valores Szz mais compressivos que nos casos de substratos mais dúcteis.

A figura 35 apresenta o comportamento da tensão Sxx na superfície do substrato durante o descarregamento do sistema. Assim como o comportamento na figura 33, os valores de tensão

obtidos são de caráter compressivo ao longo da distância de riscamento. Porém, observa-se que na frente do contato com o indentador é obtido um pequeno pico de tensão ligeiramente trativa, sugerindo recuperação elásto-plástica do material do substrato. Esse comportamento apresenta-se em todas as combinações revestimentos/substratos analisados.

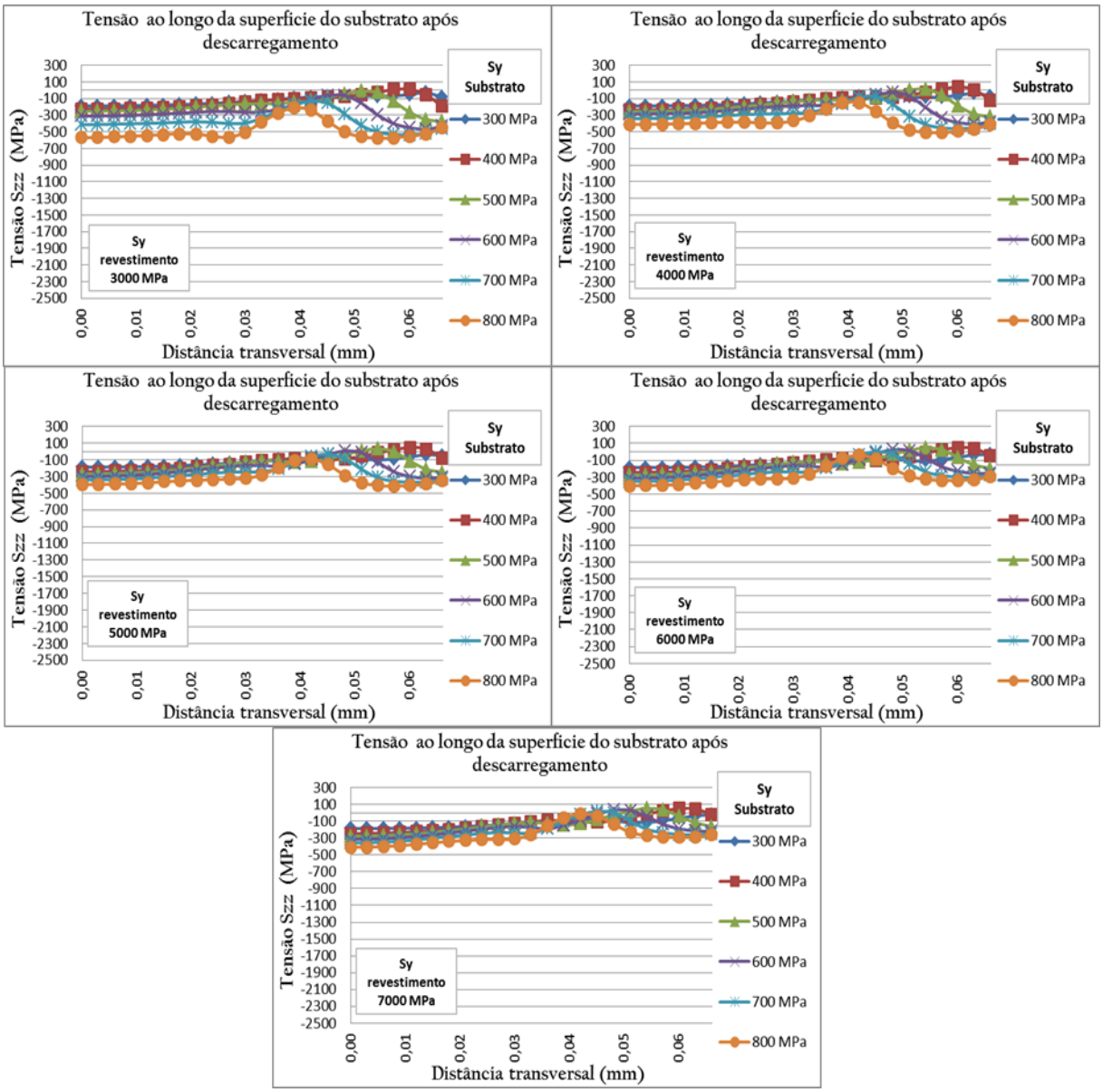
Figura 35 - Tensão Sxx ao longo do substrato depois do descarregamento



Fonte: O autor

Finalmente, a figura 36 apresenta a distribuição da tensão Szz na superfície do substrato na interface, depois de descarregado o sistema. Ao comparar com a figura 34 é possível identificar que durante o descarregamento do sistema não existem mudanças perceptíveis nos valores de tensão obtidos na superfície do substrato durante o riscamento.

Figura 36 - Tensão Szz ao longo do substrato depois do descarregamento



Fonte: O autor

4.2 INFLUÊNCIA DA TENSÃO RESIDUAL DO REVESTIMENTO NO COMPORTAMENTO DAS TENSOES Sxx, Szz NOS SISTEMAS REVESTIDOS.

As simulações consideraram -3 GPa como valor de tensão residual compressiva no revestimento com o objetivo de simular tensão residual gerada no processo de deposição. Esse valor é considerado em cada uma das combinações dos conjuntos revestimento/substrato. Segundo observado no item 4.1, o descarregamento do indentador não leva a mudanças significativas nos valores de tensão, razão pela qual serão apresentadas as seguintes condições: Distribuição das tensões Sxx e Szz na superfície do sistema revestido, na interface do lado do revestimento, na

interface do lado do substrato, todos durante o riscamento. Em alguns casos será apresentado em detalhe o pico de tensão obtido.

Na figura 37, apresenta-se o efeito que têm a tensão residual compressiva, na distribuição da tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos. A distribuição da tensão é apresentada para cada um dos valores da tensão de escoamento do revestimento e suas combinações com os diferentes substratos. Nas imagens da esquerda apresenta-se o comportamento da tensão, sem tensão residual compressiva, enquanto que, as imagens da direita apresentam o comportamento da tensão nas diferentes combinações, levando tensão residual de -3GPa no revestimento.

Na figura é possível observar que no caso das combinações sem tensão residual, o valor inicial da tensão Sxx no início do contato é zero (0 MPa), enquanto que para as combinações com tensão residual o valor da tensão inicial atinge -2 GPa. O fato de considerar -3 GPa e de registrar unicamente -2 GPa pressupõe uma relaxação de tensão residual sob carregamento do sistema, tal como concluído por Holmberg et al (2009) [24]. Da mesma forma, observa-se que os valores de tensão Sxx mais compressivos são atingidos pelos substratos com menor tensão de escoamento, assim como os valores de tensão mais trativos são obtidos nos casos de substratos com maior tensão de escoamento.

Na figura 38 são apresentados em detalhe os picos de tensão Sxx obtidos ao longo da superfície dos sistemas sem tensão residual, assim como para as combinações com tensão residual. É possível observar que, no caso das combinações sem tensão residual, a tensão Sxx atinge o valor da tensão de escoamento do revestimento nas combinações que consideram tensão de escoamento do revestimento de 3000 MPa, 4000 MPa e 5000 MPa, já para 6000 MPa e 7000 MPa unicamente é atingida essa tensão na combinação com o substrato de maior tensão de escoamento (800 MPa). No caso com tensão residual, observa-se que a tensão de resistência do revestimento é atingida em todas as combinações (revestimento/substrato) para tensão de escoamento do revestimento de 3000 MPa e 4000 MPa. No caso do revestimento com 5000 MPa, a tensão Sxx atinge o valor da tensão de escoamento do revestimento, unicamente na combinação com substratos de 700 MPa e 800 MPa. No caso de revestimento com 6000 MPa e 7000 MPa, a tensão obtida não atingiu em nenhuma combinação o valor de tensão do revestimento, indicando que a tensão residual têm importância na proteção dos sistemas na parte superficial.

Na figura 39, é apresentado o comportamento da tensão Szz ao longo da distância transversal ao riscamento, na superfície do sulco e na borda do contato. Na figura, observa-se que a inclusão de tensão residual compressiva no revestimento, leva à obtenção de valores de tensão Szz menores no ponto central de contato que aqueles atingidos para os sistemas sem tensão residual. Da mesma forma, observa-se que a tensão residual leva à obtenção de valores mais compressivos do que os sistemas sem tensão residual. Na região das tensões trativas (borda do sulco), os valores de tensão Szz permanecem com os mesmos valores com e sem tensão residual.

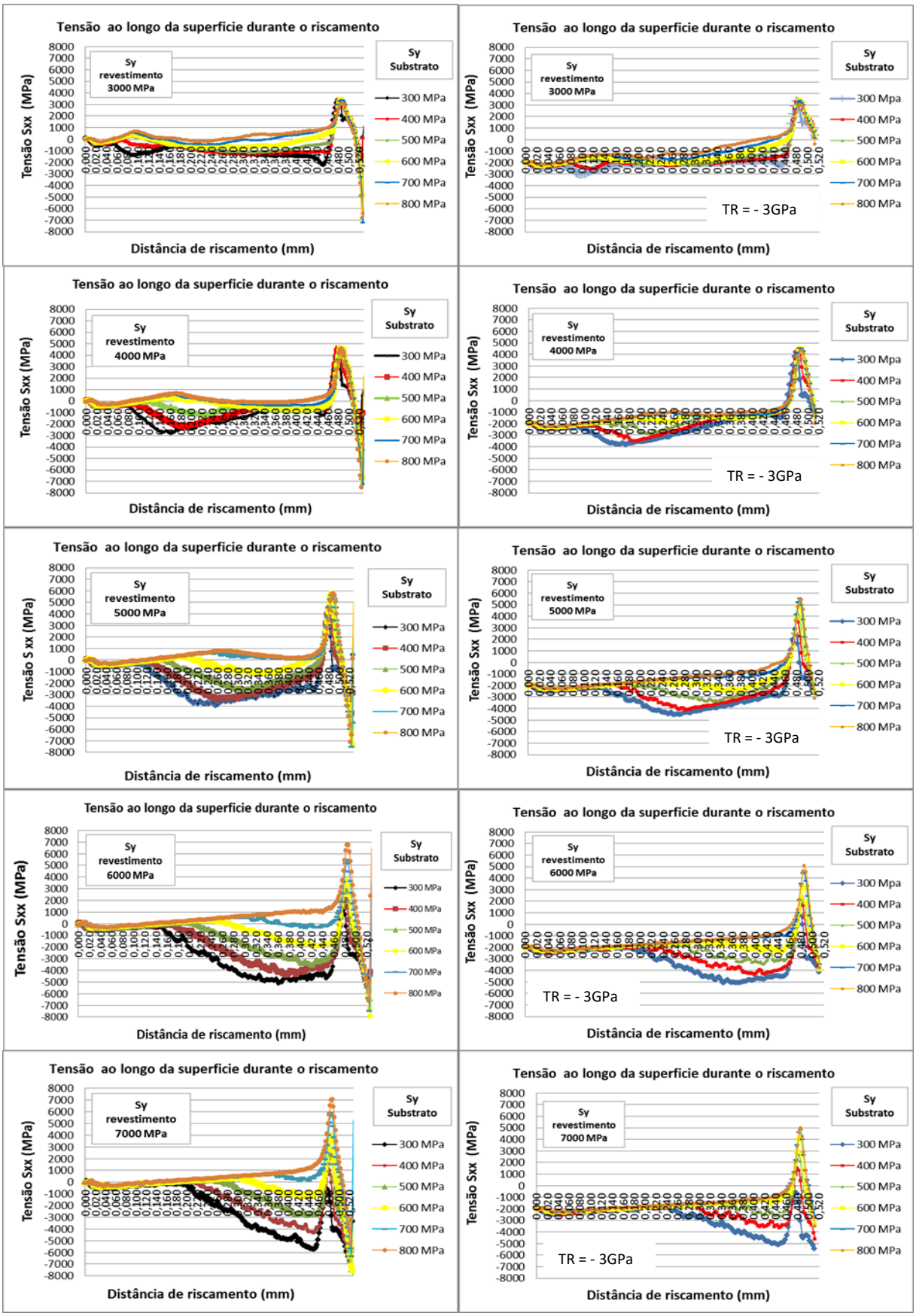
Na figura 40, apresenta-se o efeito da tensão residual no comportamento da tensão Sxx na interface do sistema revestido durante o riscamento. Na figura 41, apresenta-se em detalhe os picos de tensão Sxx obtidos ao longo da interface na região do revestimento. Nas figuras, observa-se que nenhuma das combinações revestimento/substrato atinge na interface a tensão do revestimento, sendo próxima a essa, a tensão da combinação entre o revestimento com 7000 MPa e o substrato com 500 MPa.

Na figura 42 observa-se o efeito da tensão residual do revestimento na distribuição da tensão Szz na interface dos sistemas revestidos. Identifica-se que a partir do revestimento com tensão de 4000 MPa a tensão residual tem influência na obtenção de tensões, no ponto central de contato, rapidamente menores que aquelas obtidas para os sistemas sem tensão residual. Igualmente identifica-se que a tensão residual faz com que os valores compressivos sejam mais compressivos e aqueles trativos fiquem sendo rapidamente menos trativos.

A figura 43 apresenta o comportamento da tensão Sxx na superfície do substrato durante o riscamento. Em todos os casos (sem e com tensão residual), observa-se que a superfície do substrato sempre apresenta valores de tensão compressiva, assim como, não são observadas diferenças na tensão entre as duas condições.

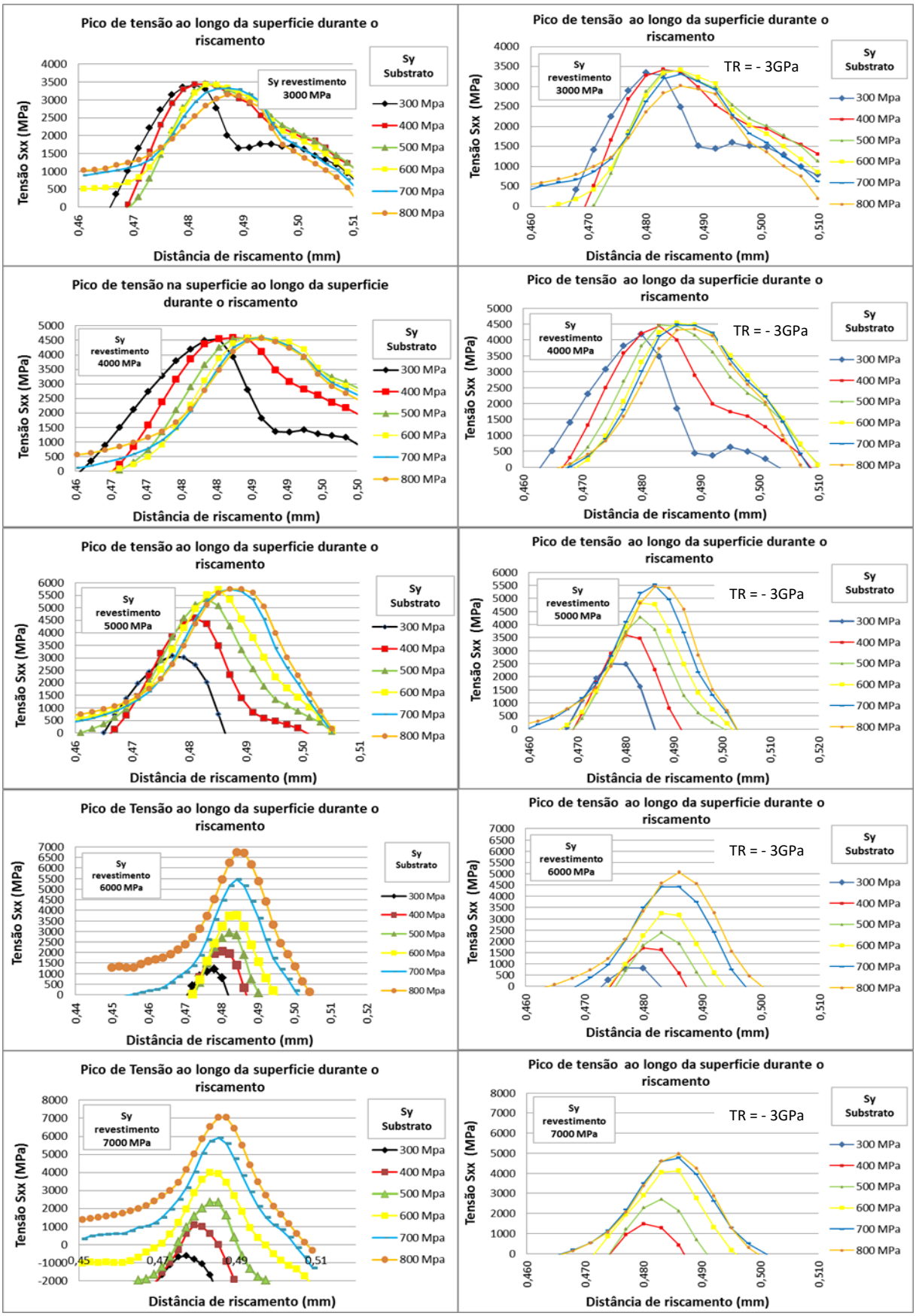
Finalmente, a figura 44 permite identificar o comportamento da tensão Szz, ao longo da linha transversal, da superfície do substrato. Na figura é possível ver que a tensão residual faz que no ponto de contato o valor da tensão seja mais compressivo. Esta situação apresenta-se em todas as combinações analisadas. Da mesma forma, identifica-se que em nenhuma das combinações são atingidos valores que ultrapassam o valor trativo de 100 MPa na superfície.

Figura 37 - Influência da tensão residual na tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos



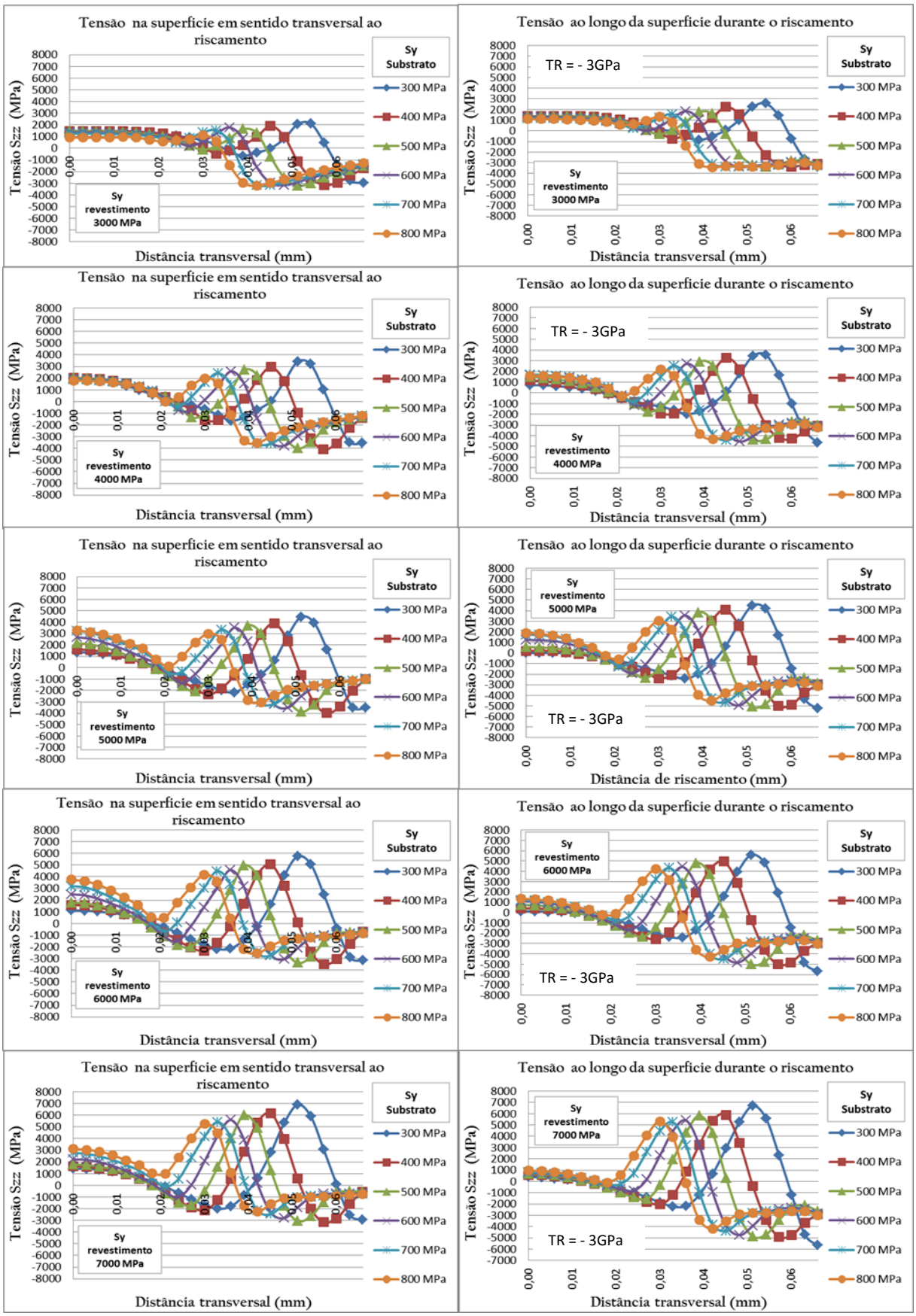
Fonte: O autor

Figura 38 - Detalhe do efeito da tensão residual do revestimento no pico de tensão ao longo da superfície



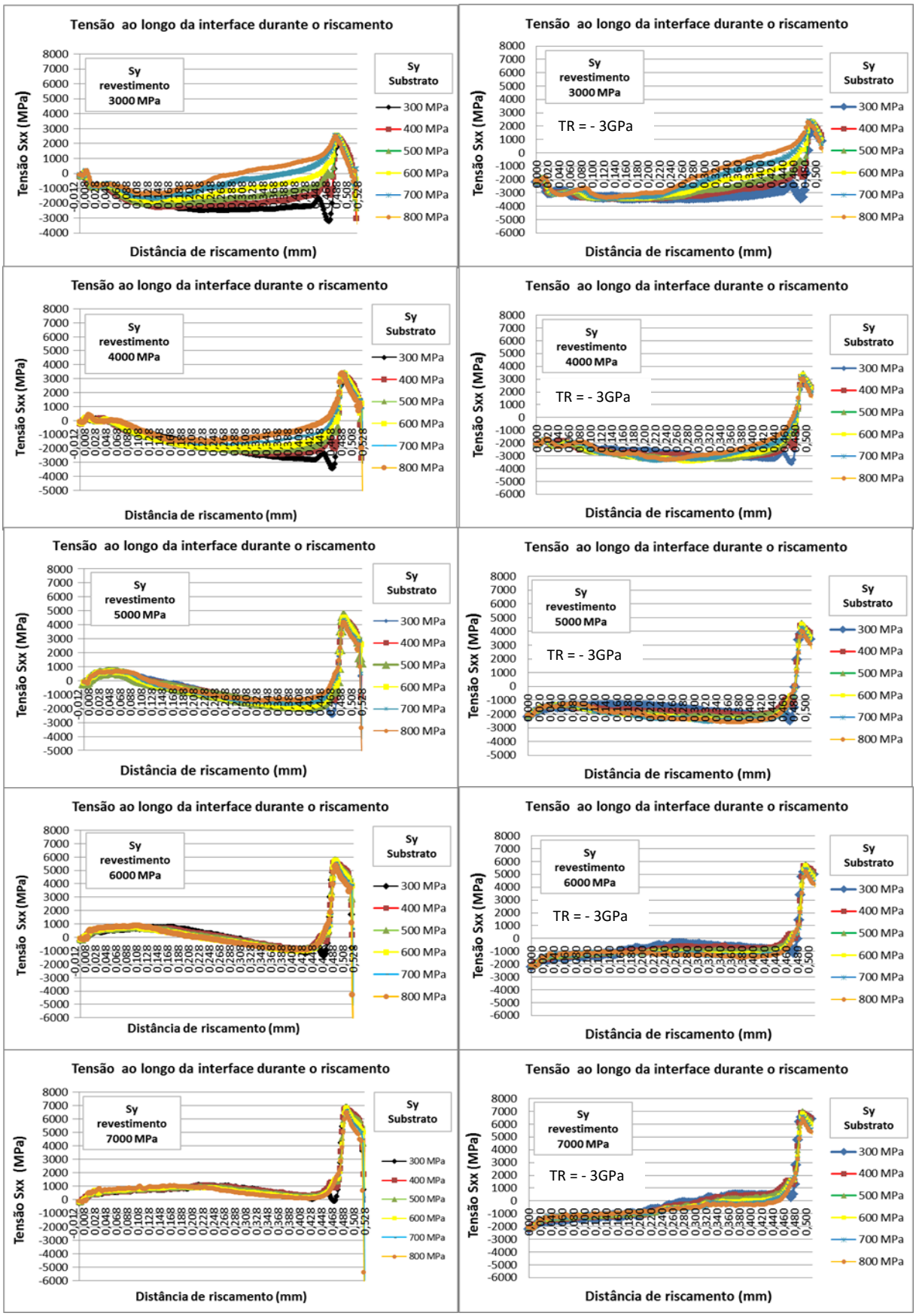
Fonte: O autor

Figura 39 - Influência da tensão residual na tensão Szz na superfície, na direção transversal ao riscamento.



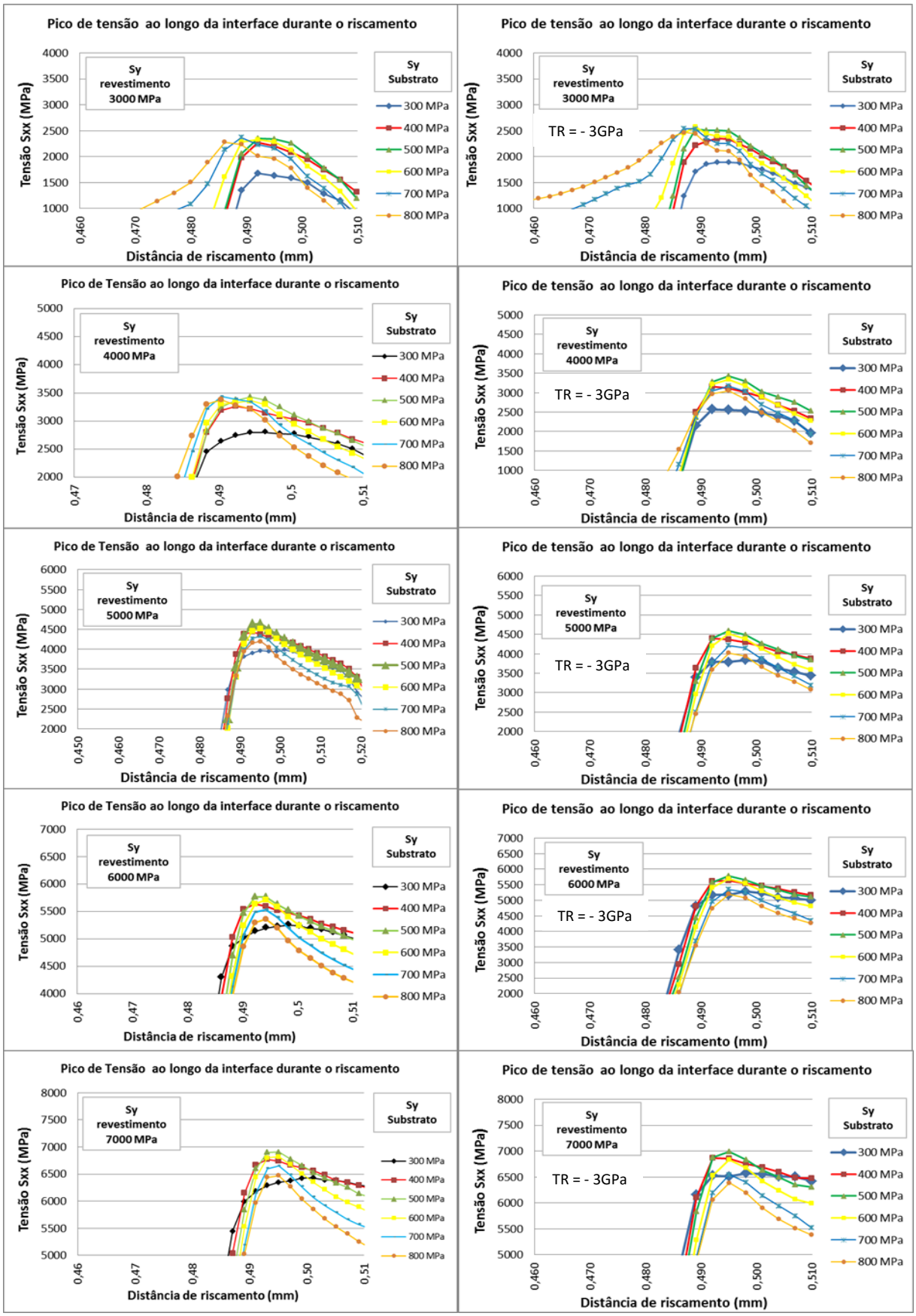
Fonte: O autor

Figura 40 - Influência da tensão residual na tensão Sxx ao longo da interface durante o riscamento



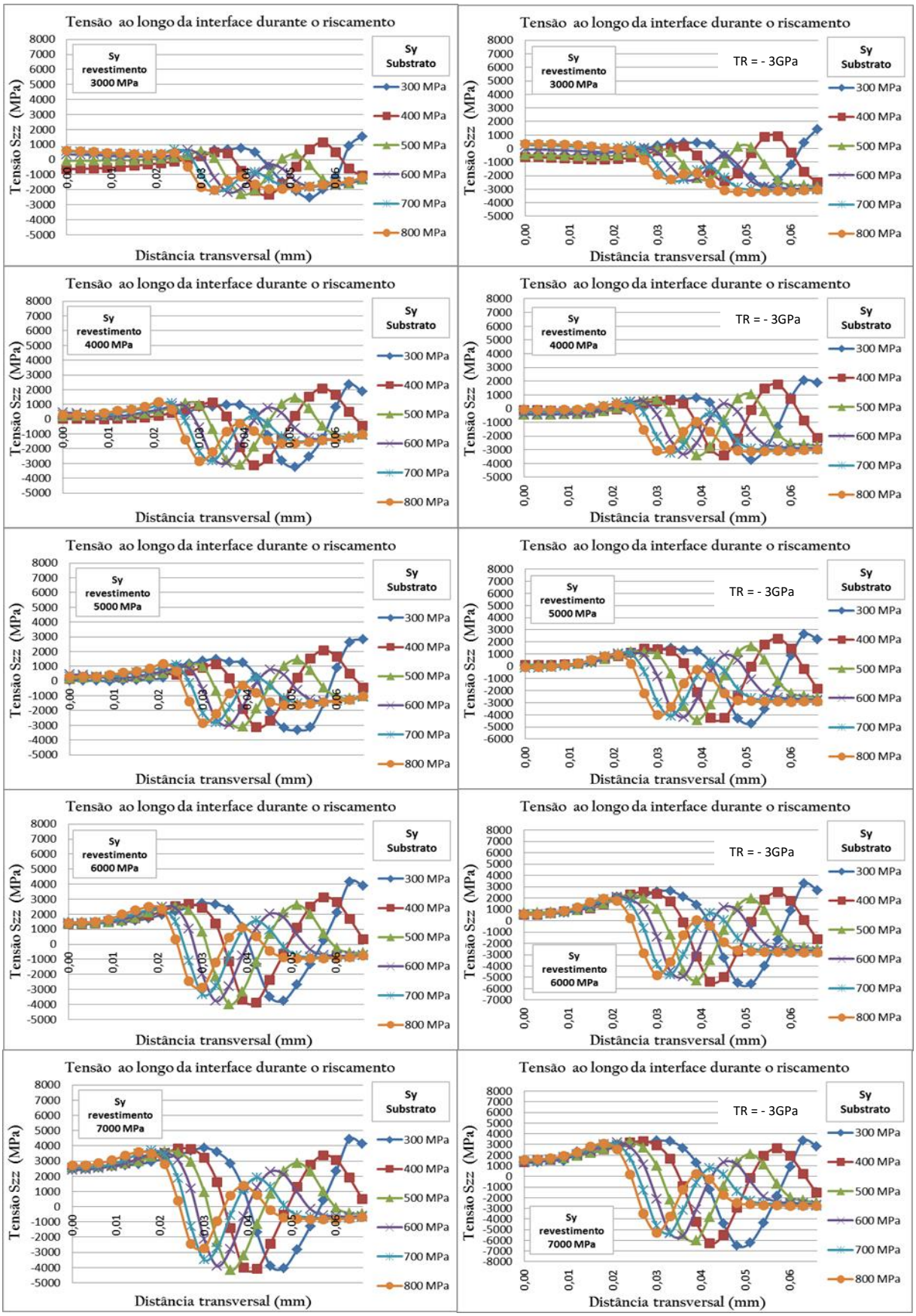
Fonte: O autor

Figura 41 - Detalhe do efeito da tensão residual do revestimento, no pico de tensão Sxx ao longo da interface



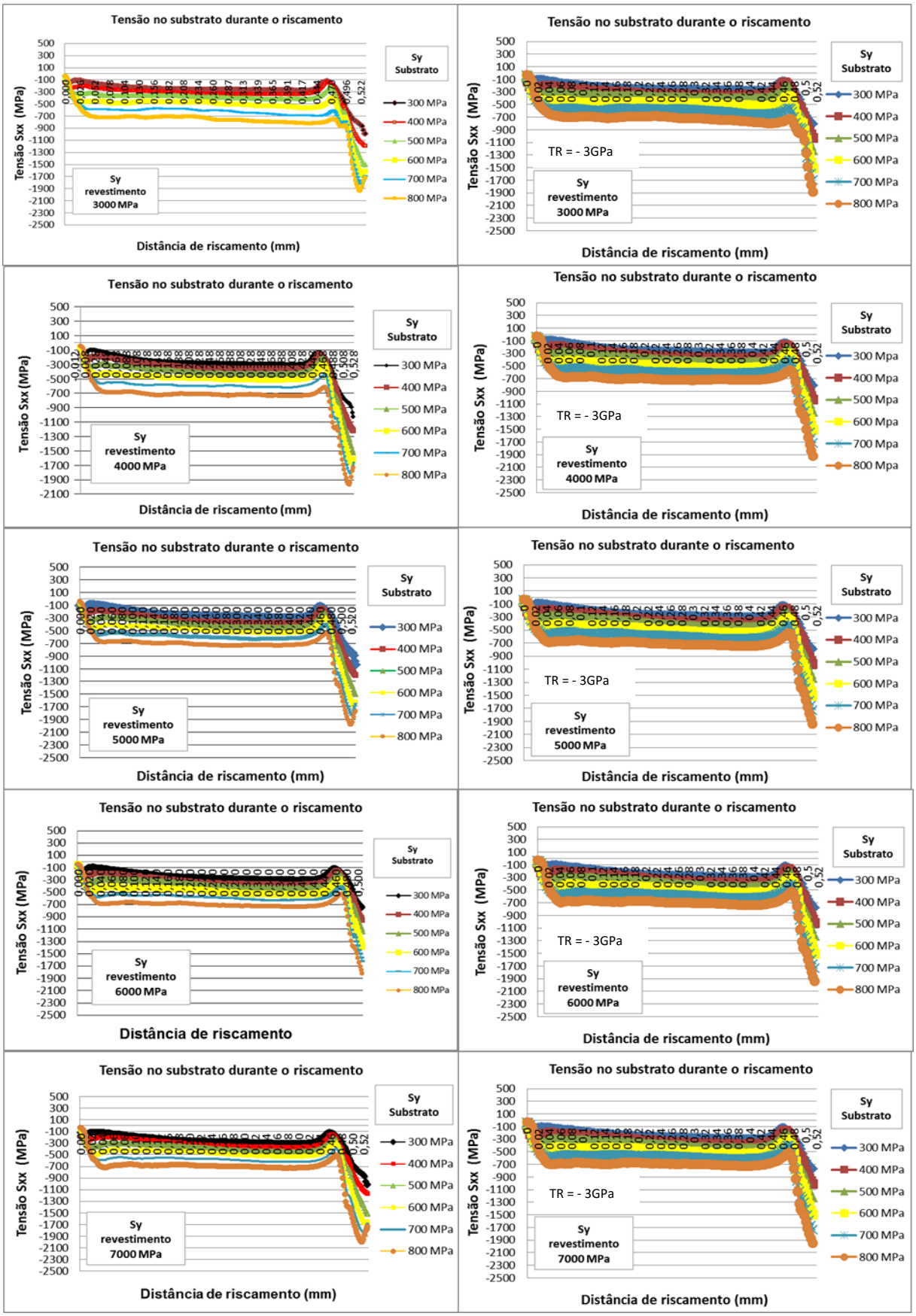
Fonte: O autor

Figura 42 - Influência da tensão residual na tensão Szz na interface, na direção transversal ao riscamento.



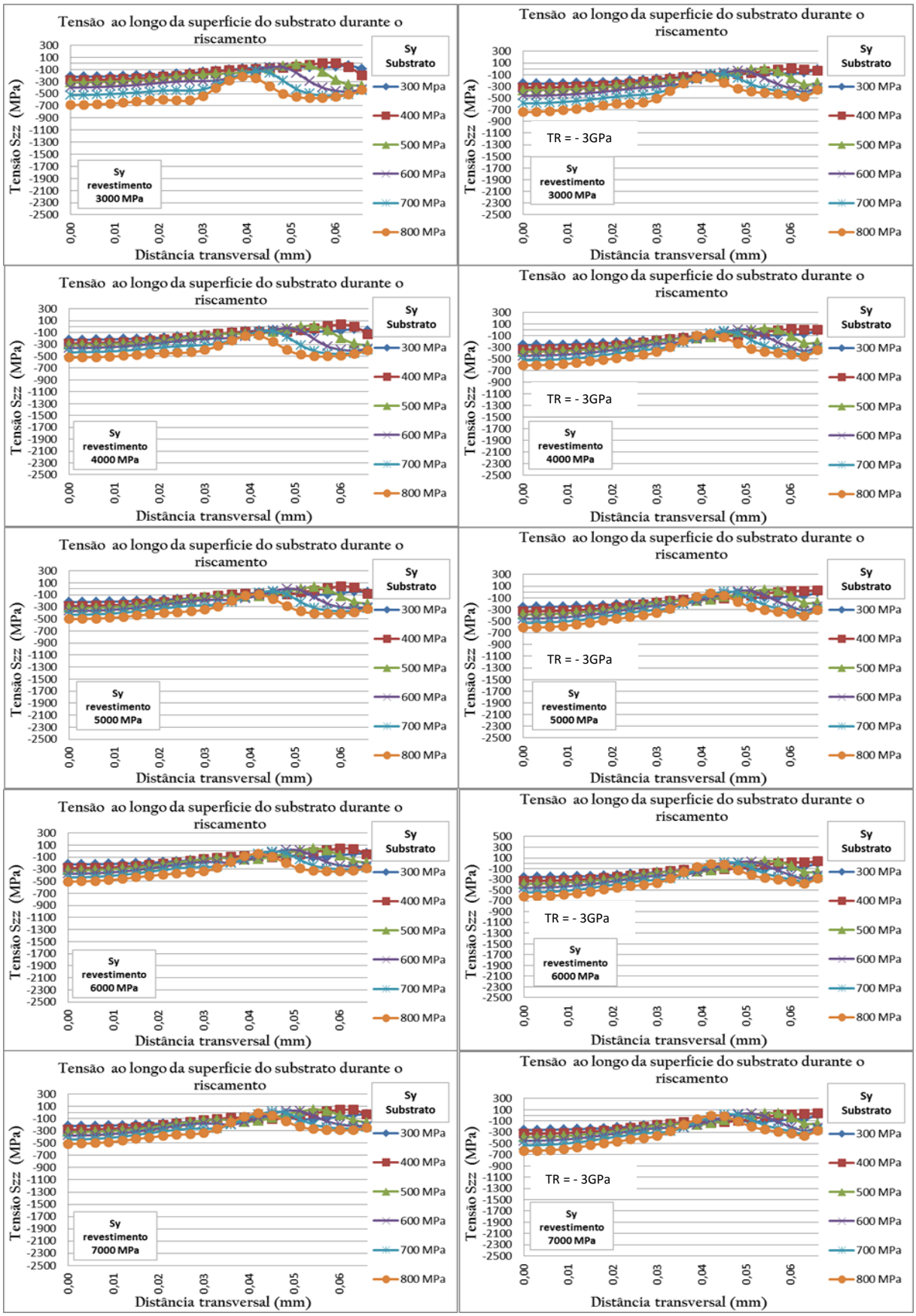
Fonte: O autor

Figura 43 - Influência da tensão residual na tensão Sxx no substrato ao longo da direção do riscamento.



Fonte: O autor

Figura 44 - Influência da tensão residual na tensão Szz no substrato, na direção transversal ao riscamento.



Fonte: O autor

4.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES Sxx, Szz.

As simulações consideraram dois valores de espessura do revestimento. Estes valores são de 2 μm e 4 μm e são considerados nas análises dos revestimentos com tensão de escoamento de 3000 MPa, 4000 MPa, 5000 MPa, 6000 MPa e 7000 MPa.

Na figura 45, apresenta-se o comportamento da tensão principal Sxx ao longo da superfície do sistema revestido, em cada uma das duas espessuras. Da figura é possível observar que para os revestimentos com tensão de escoamento de 3000 MPa e 4000 MPa, os valores da tensão Sxx na superfície do sistema são bastante próximos sem importar o valor da tensão de escoamento dos diferentes substratos, já no caso do revestimento com tensões de escoamento de 5000 MPa, 6000 MPa e 7000 MPa, observa-se que os substratos com menor tensão de escoamento levam à tensão Sxx compressiva, enquanto que os substratos de maior tensão de escoamento levam a tensão Sxx levemente trativa.

Na figura 46 são apresentados em detalhe os picos de tensão obtidos na figura 45, neste caso, observa-se em todas as combinações de substratos com os revestimentos com tensão de escoamento de 3000 MPa e 4000 MPa, que o valor da tensão Sxx atinge o valor da tensão do revestimento. No caso do revestimento com tensão de escoamento de 5000 MPa, unicamente a combinação com substrato de tensão de 800 MPa gera tensão Sxx que ultrapassa o valor da tensão do revestimento. Finalmente, no caso dos revestimentos com tensão de escoamento de 6000 MPa e 7000 MPa, nenhuma das combinações atinge o valor da tensão do mesmos.

A figura 47 apresenta o comportamento da tensão Szz ao longo da linha transversal na superfície dos sistemas revestidos. Observa-se que, o aumento na espessura do revestimento leva em todos os casos à obtenção de valores de tensão inferiores a aqueles obtidos com espessura de 2 μm. Igualmente, observa-se que para os sistemas considerando revestimento com tensão de ate 5000 MPa, o aumento na espessura leva a obter valores de tensão no ponto central de contato de até 2000 MPa, enquanto que revestimentos com maior valor de tensão leva à obtenção de valores compressivos no ponto central de contato.

No caso da figura 48, apresenta-se o comportamento da tensão Sxx na interface do sistema revestido durante o riscamento. Observa-se que para o revestimento com espessura de 4 μm os

valores são mais compressivos ao longo da distância de riscamento, da mesma forma, existe pouca diferença entre os gráficos da distribuição da tensão Sxx para cada substrato.

Na figura 46, apresenta-se em detalhe os picos de tensão Sxx obtidos ao longo da interface na região do revestimento. É possível observar que nos casos em que o revestimento tem tensão de escoamento de 3000 MPa, 4000 MPa e 5000 MPa, nenhuma das combinações dos substratos atingem o valor da tensão de resistência do revestimento. Para o caso dos revestimentos com tensão de escoamento de 6000 MPa e 7000 MPa a tensão do revestimento é atingida para a combinação com o substrato mais dúctil (tensão de escoamento de 300 MPa).

Na figura 47, apresenta-se o comportamento da tensão Szz na superfície dos sistemas revestidos, ao longo da linha transversal. Observa-se que, o aumento na espessura do revestimento leva em todos os casos à obtenção de valores de tensão inferiores a aqueles obtidos com espessura de 2 μm. Igualmente, observa-se que para os sistemas considerando revestimento com tensão de até 5000 MPa, o aumento na espessura leva a obter valores de tensão no ponto central de contato de até 2000 MPa, enquanto que revestimentos com maior valor de tensão levam à obtenção valores inferiores no ponto central de contato, atingido nos casos com revestimentos de alto valor de tensao, valores compressivos.

A figura 48 apresenta o comportamento da tensao Sxx na interface dos sistemas revestidos. Observa-se que para o revestimento com espessura de 4 μm em comparação com o revestimento de 2 μm os valores tornam-se mais compressivos ao longo da distância de riscamento, assim como minimiza-se a diferença entre os gráficos da distribuição da tensão Sxx para cada substrato.

Na figura 49, apresentam-se em detalhe os picos de tensão Sxx obtidos ao longo da interface na região do revestimento. É possível observar que nos casos em que o revestimento tem tensão de 3000 MPa, 4000 MPa e 5000 MPa, nenhuma das combinações dos substratos atingem o valor da tensão do revestimento. Para o caso dos revestimentos com tensão de escoamento de 6000 MPa e 7000 MPa a tensão do revestimento é atingida para a combinação com o substrato mais dúctil (tensão de escoamento de 300 MPa).

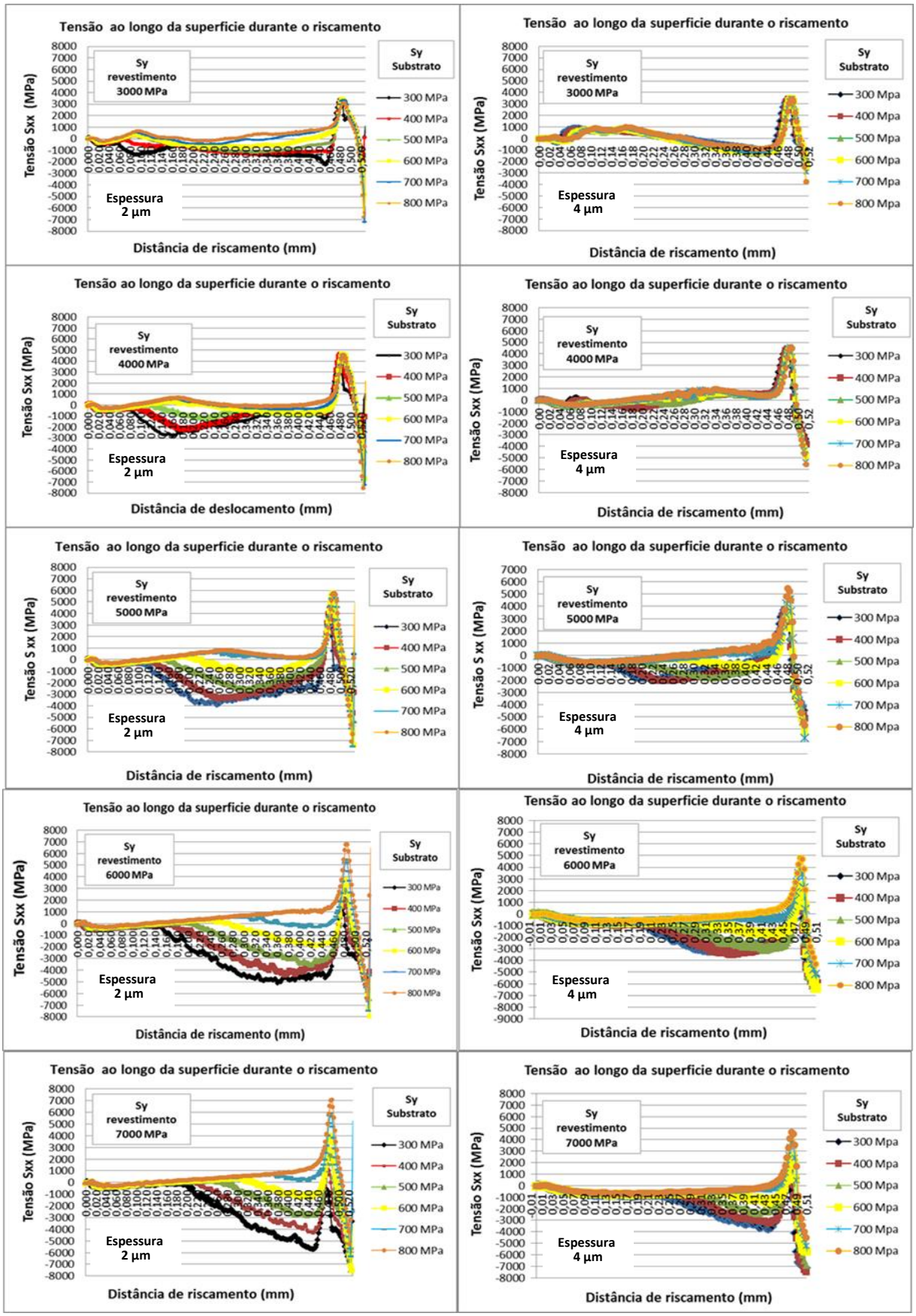
Na figura 50, é possível identificar o comportamento da tensão Szz na linha transversal de contato na interface dos sistemas revertidos. Observa-se que o aumento na espessura do revestimento leva à redução nos valores de tensão trativa obtidos na borda do contato, da

mesma forma leva à obtenção de alta convergência nos valores de tensão obtidos no ponto central do contato. Esses valores são de caráter compressivo nas combinações com o revestimento de menor tensão e tornam se trativos nas combinações com revestimentos de maior valor de tensão.

A figura 51 permite observar que o aumento da espessura do revestimento faz que, os valores de tensão Szz ao longo da distância de riscamento sejam menos compressivos, atingindo principalmente, para as combinações com substratos mais dúcteis, valores trativos de até 100 MPa.

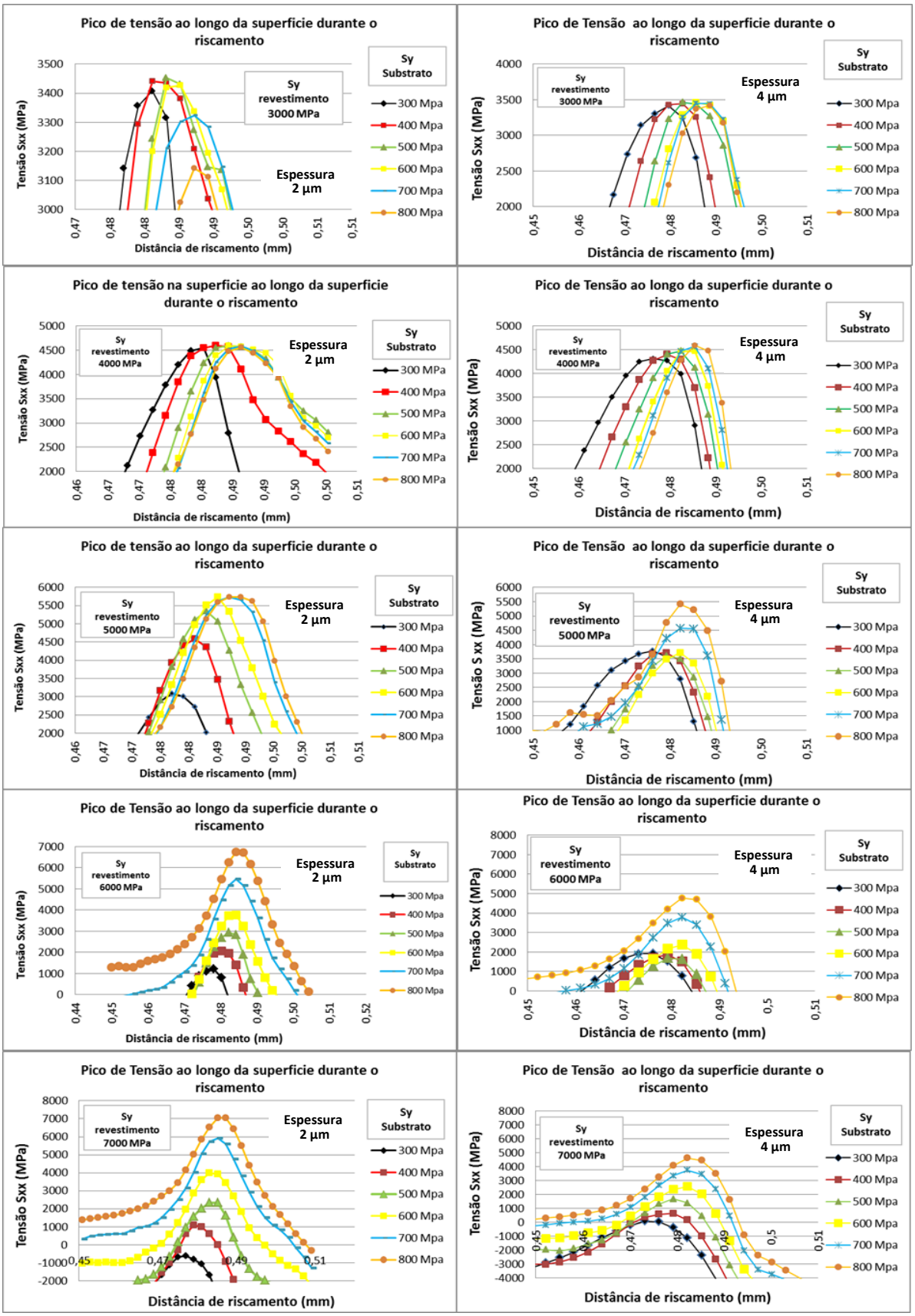
A figura 52 apresenta o comportamento da tensão Szz ao longo da linha transversal ao sulco, na interface do sistema do lado da superfície do substrato. Da figura é possível indicar que não existem mudanças consideráveis no comportamento da tensão como consequência do aumento na espessura do revestimento.

Figura 45 - Efeito da espessura do revestimento na tensão principal Sxx ao longo da superfície



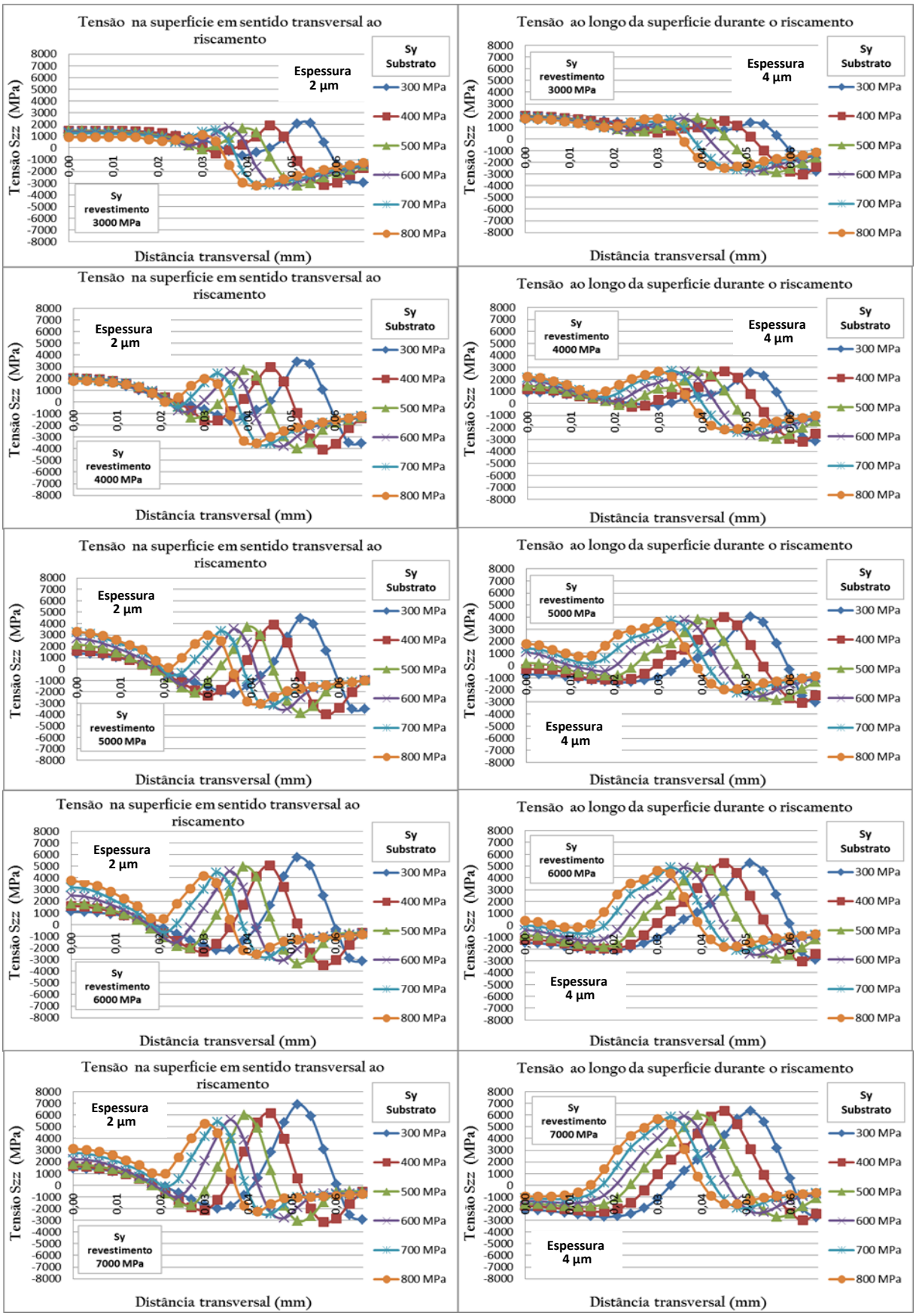
Fonte: O autor

Figura 46 - Detalhe do efeito da espessura do revestimento no pico de tensão principal Sxx ao longo da superfície



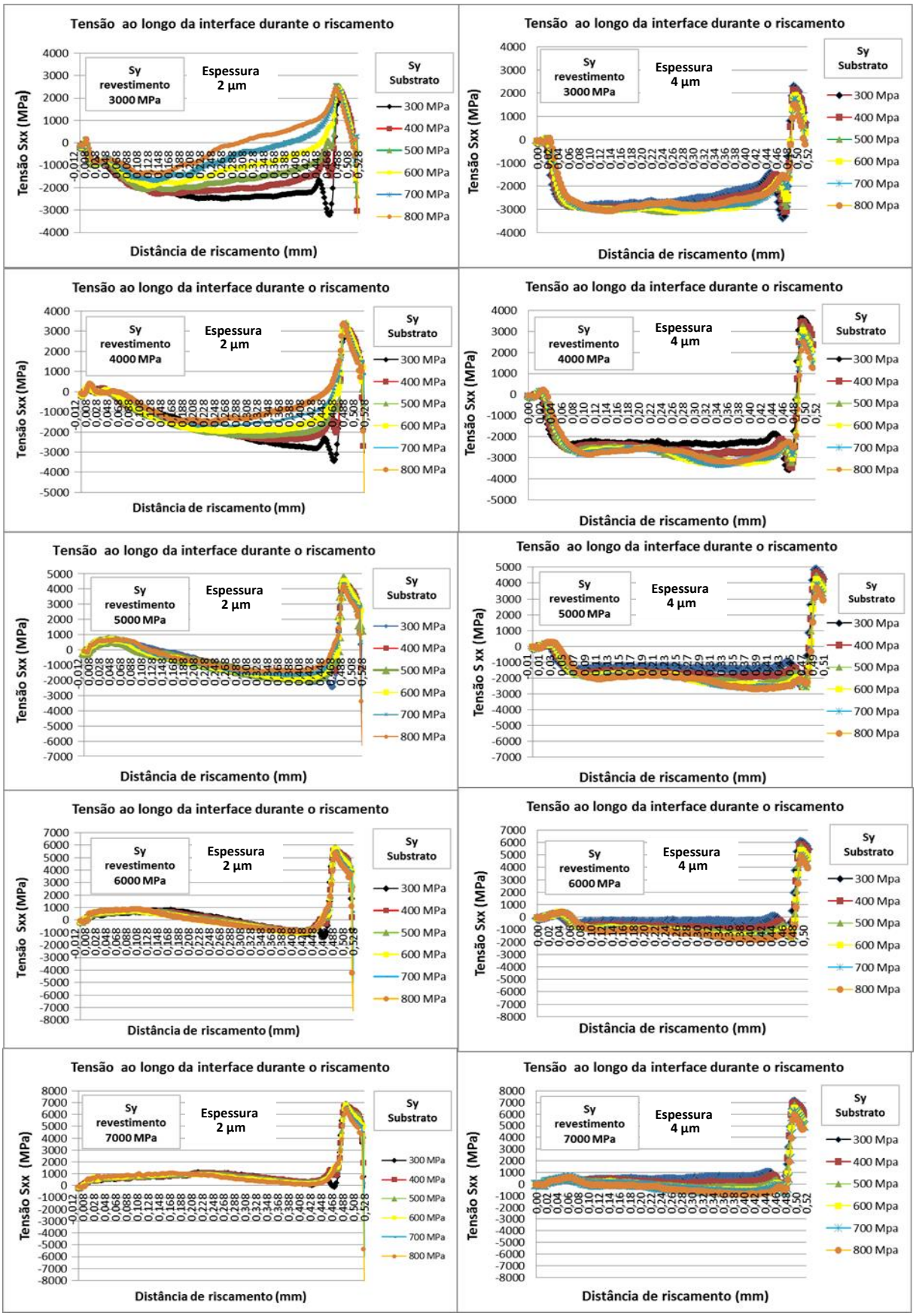
Fonte: O autor

Figura 47 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Szz na superfície dos sistemas revestidos



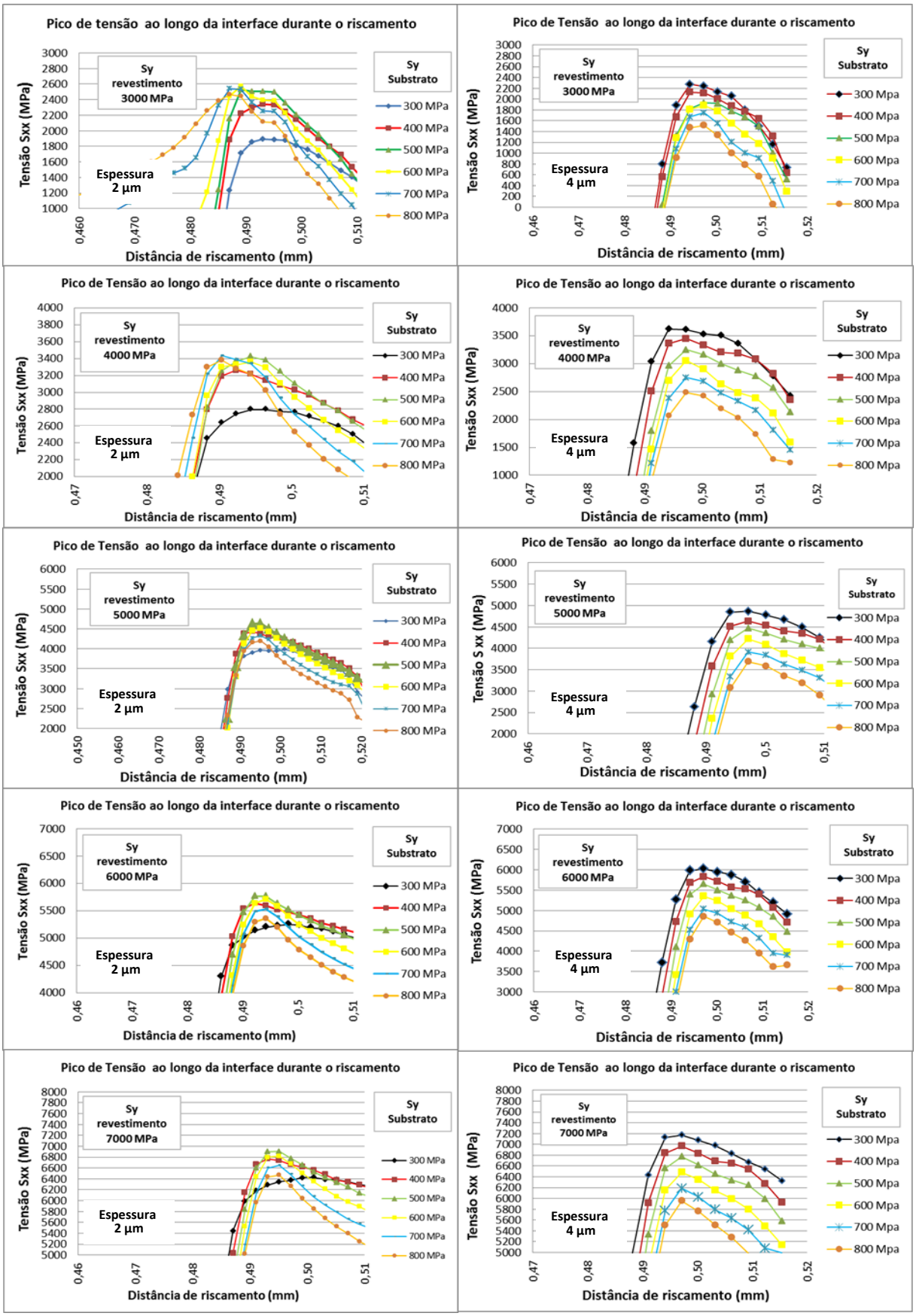
Fonte: O autor

Figura 48 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Sxx ao longo da interface do sistema.



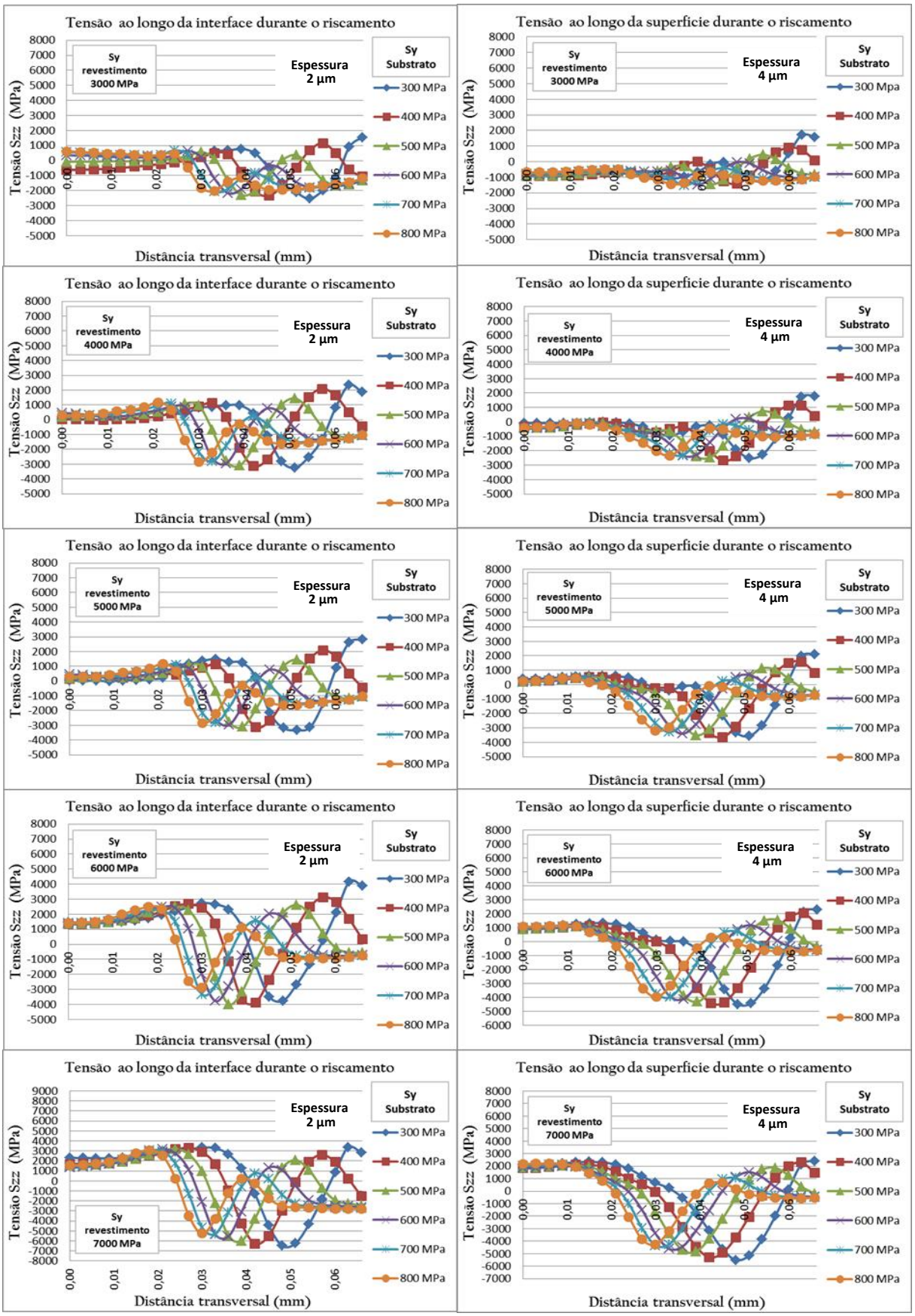
Fonte: O autor

Figura 49 - Detalhe do efeito da espessura do revestimento no pico de tensão principal Sxx ao longo da interface



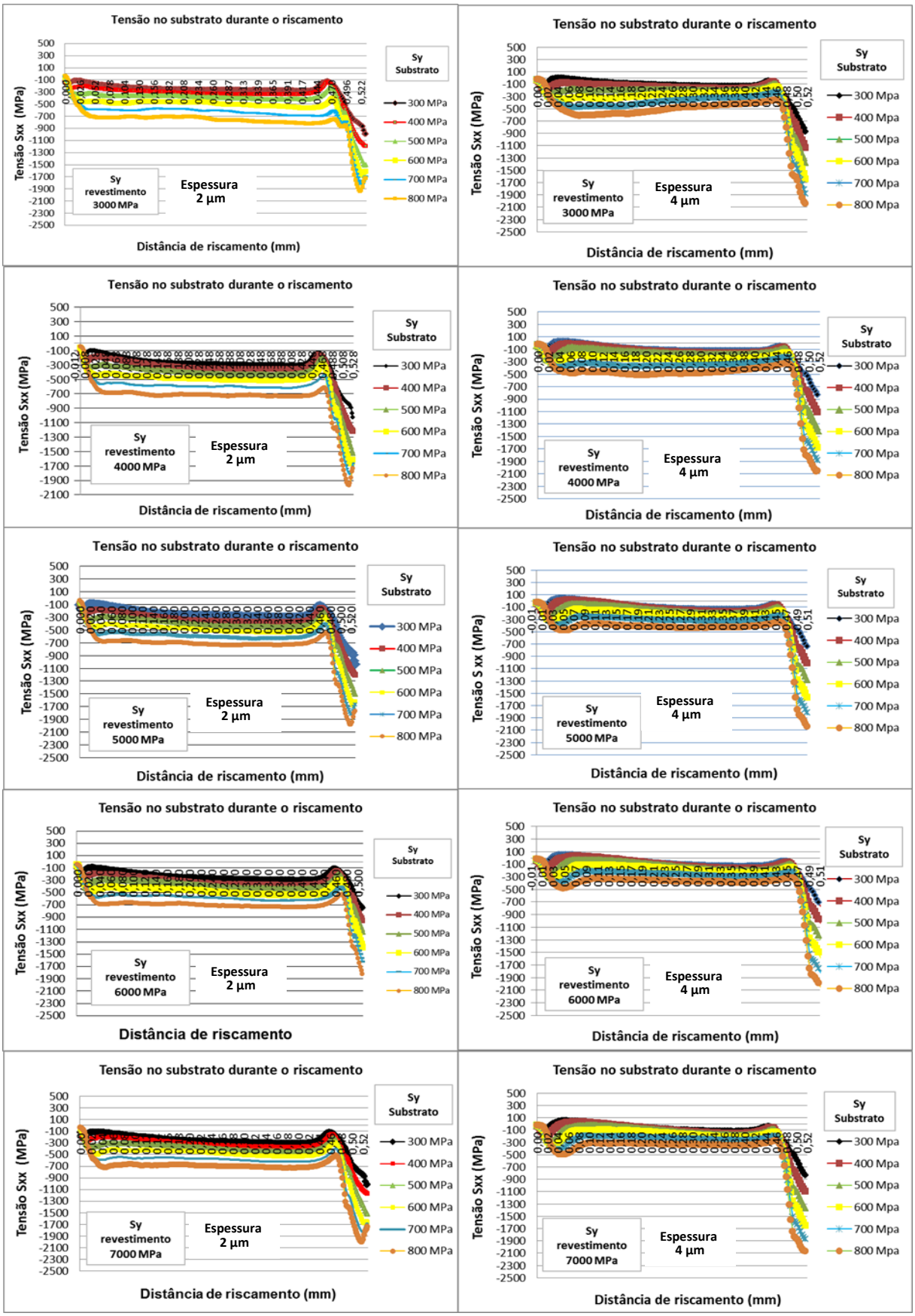
Fonte: O autor

Figura 50 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Szz na interface dos sistemas revestidos



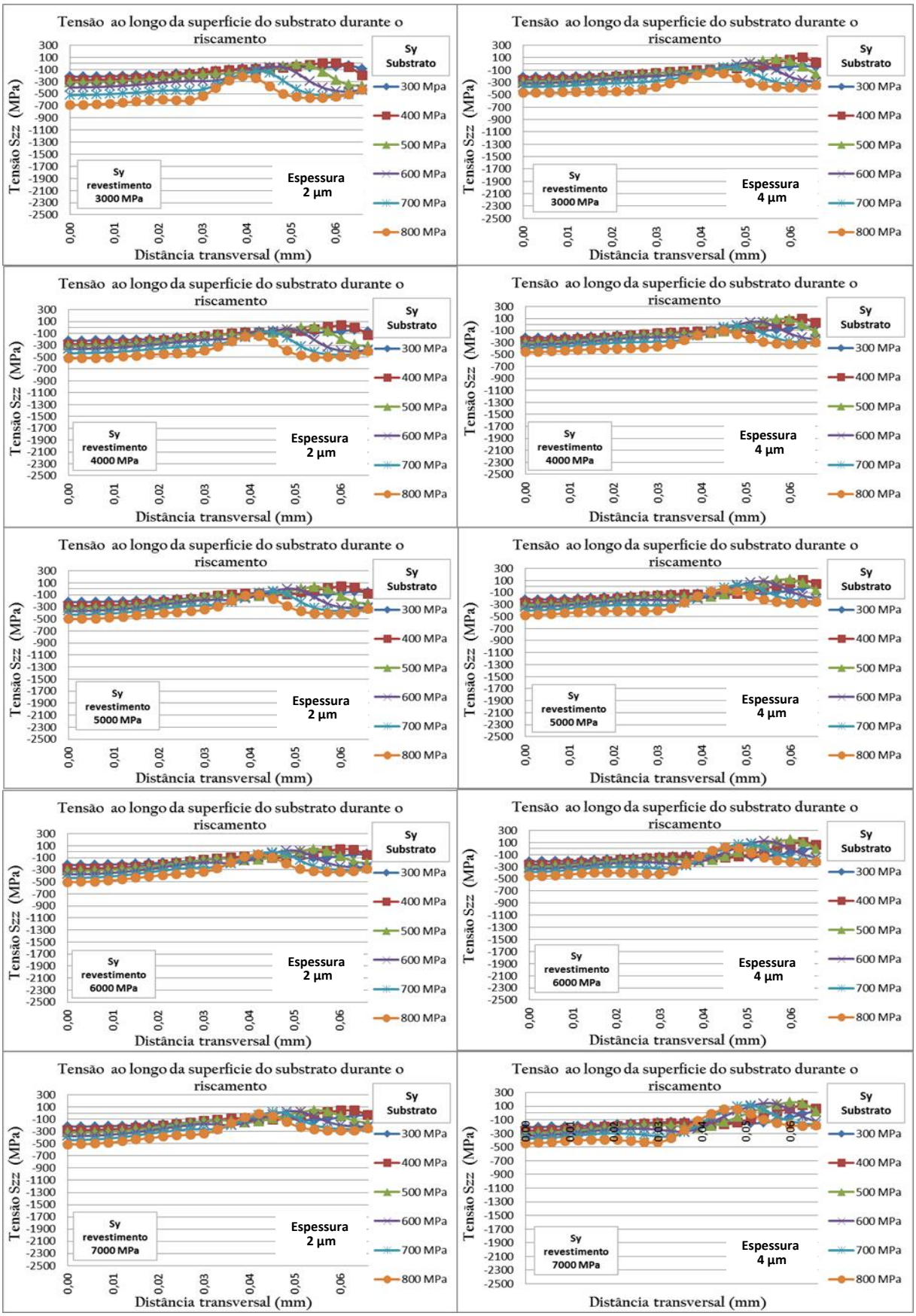
Fonte: O autor

Figura 51 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Sxx ao longo da superfície do substrato



Fonte: O Autor

Figura 52 - Efeito da espessura do revestimento na tensão Szz ao longo da superfície do substrato



Fonte: O Autor

4.4 INFLUÊNCIA DO COEFICIENTE DE ATRITO ENTRE O INDENTADOR E O SISTEMA REVESTIDO NO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES Sxx, Szz.

As simulações para analise desta variável consideraram o uso do coeficiente de atrito nos valores de 0,1 e 0,2 para cada uma das combinações (revestimento/substrato).

Na figura 53, apresenta-se o comportamento da tensão Sxx ao longo da superfície do sistema revestido. Nas figuras da coluna esquerda apresentam-se os gráficos da tensão Sxx considerando atrito de 0,1, enquanto que as figuras da coluna direita da figura, apresentam a distribuição da tensão Sxx considerando atrito de 0,2. Das figuras, observa-se que para o caso do atrito de 0,2 os valores de tensão Sxx, obtidos na superfície, são preferentemente trativos em todas as combinações dos revestimentos com os diferentes substratos, exceto para a combinação com os substratos mais dúcteis (300 MPa e 400 MPa), nos quais, com o aumento da tensão de escoamento do revestimento, as tensões tornam-se cada vez mais compressivas.

Na figura 54 são apresentados em detalhe os picos de tensão Sxx obtidos na figura 53. É possível observar que para todos os sistemas nas combinações com revestimento de 3000 MPa e 4000 MPa com atrito de 0,1 a tensão atingida na superfície do sistema ultrapassa o valor da tensão do revestimento, enquanto que para o revestimento de 3000 MPa e atrito de 0,2 unicamente é atingido o valor da tensão do revestimento na combinação com os substratos mais dúcteis (300 MPa e 400 MPa). No caso da tensão do revestimento de 4000 MPa o valor é atingido nas combinações com substratos de 300 MPa, 400 MPa, 500 MPa, 600 MPa e 700 MPa. No caso do revestimento com 5000 MPa e atrito de 0,1 o valor da tensão de resistência do revestimento é atingido para o caso dos susbstratos com 500 MPa, 600 MPa, 700 MPa e 800 MPa. Com atrito de 0,2, o valor de resistência é atingido com os substratos de 300 MPa, 400 MPa, 500 MPa, 600 MPa e 800 MPa. Para o revestimento com 6000 MPa e atrito de 0,1 o valor de resistência é atingido unicamente para o substrato com 800 MPa, já para atrito de 0,2 o valor de resistência é atingido para os substratos com 500 MPa, 700 MPa e 800 MPa. Para o revestimento com 7000 MPa e atrito de 0,1 a tensão de resistência é atingida para o substrato com 800 MPa enquanto que para atrito de 0,2 o valor de resistência do revestimento é atingido para os substratos com 600 MPa, 700 MPa e 800 MPa. Os resultados sugerem que com o aumento da resistência do revestimento e o aumento do atrito, aumenta a possiblidade de falha para os substratos de maior tensão de escoamento.

Na figura 55 observa-se que a partir da combinação utilizando revestimento com tensão de 5000 MPa o coeficiente de atrito leva à obtenção de valores de tensão Szz na região próxima ao ponto central de contato muito próximos independente da combinação utilizada. Na figura 56, apresenta-se o comportamento da tensão Sxx ao longo da interface durante o riscamento. Da figura observa-se que para os revestimentos com tensão de escoamento de 3000 MPa, 4000 MPa e 5000 MPa, segundo aumenta o atrito aumentam os valores de tensão trativa na interface para todos os casos dos substratos. Nos casos dos revestimentos mais resistentes (6000 MPa e 7000 MPa) a tensão ao longo da interface para todos os substratos atinge valores muito próximos de caráter trativo.

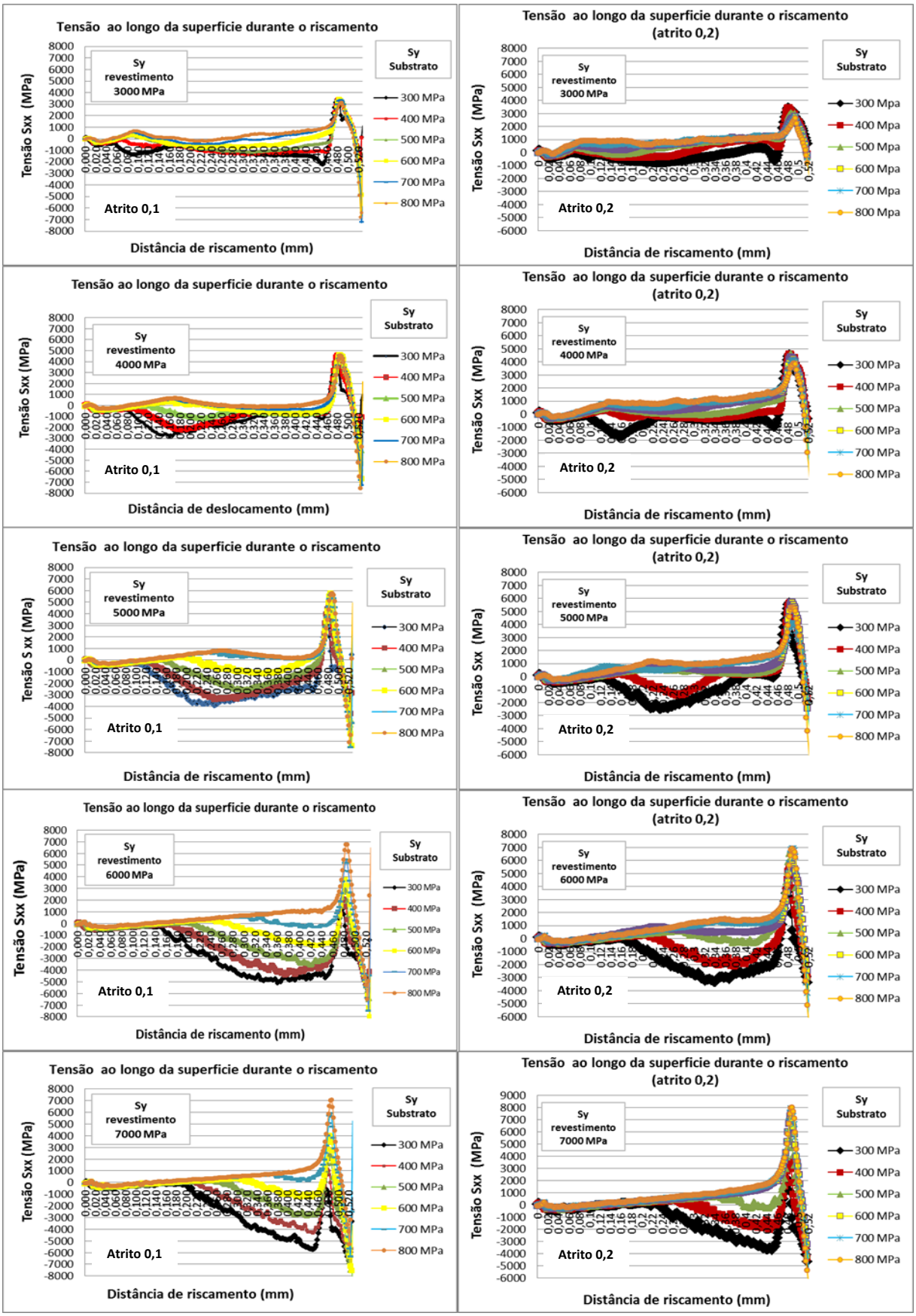
Na figura 57, apresenta-se em detalhe os picos de tensão Sxx da figura 56. Observa-se que com aumento do atrito para o valor de 0,2 no caso do revestimento de 3000 MPa a combinação com substrato de 500 MPa atinge o valor da tensão do revestimento. Da mesma forma, o aumento do atrito leva a que os sistemas com revestimentos de 6000 MPa e 7000 MPa seja atingido o valor da tensão do revestimento nos casos de substratos com 400 MPa e 500 MPa respectivamente. Estes resultados indicam que o aumento no coeficiente de atrito leva ao incremento na tensão na interface nos casos com os revestimentos mais resistentes em combinação com substratos mais dúcteis.

A figura 58 apresenta o efeito do atrito na tensão Szz na interface dos sistemas revestidos. Na figura é possível observar que o incremento no atrito leva à obtenção de diferenças nos valores de tensão no ponto central do contato nas combinações com 3000 MPa, 4000 MPa, 5000 MPa e 6000 MPa. Da mesma forma, identifica-se que para os casos dos revestimentos de 5000 MPa, 6000 MPa e 7000 MPa em todas as combinações com substratos, são obtidas tensões que ultrapassam o valor da tensão do revestimento.

Na figura 59 apresenta-se, o comportamento da tensão Sxx na superfície do substrato durante o riscamento. Identifica-se, ao comparar com os resultados em função do atrito de 0,1, que esta variável leva à obtenção de valores de tensão mais compressivos do que no caso de referência.

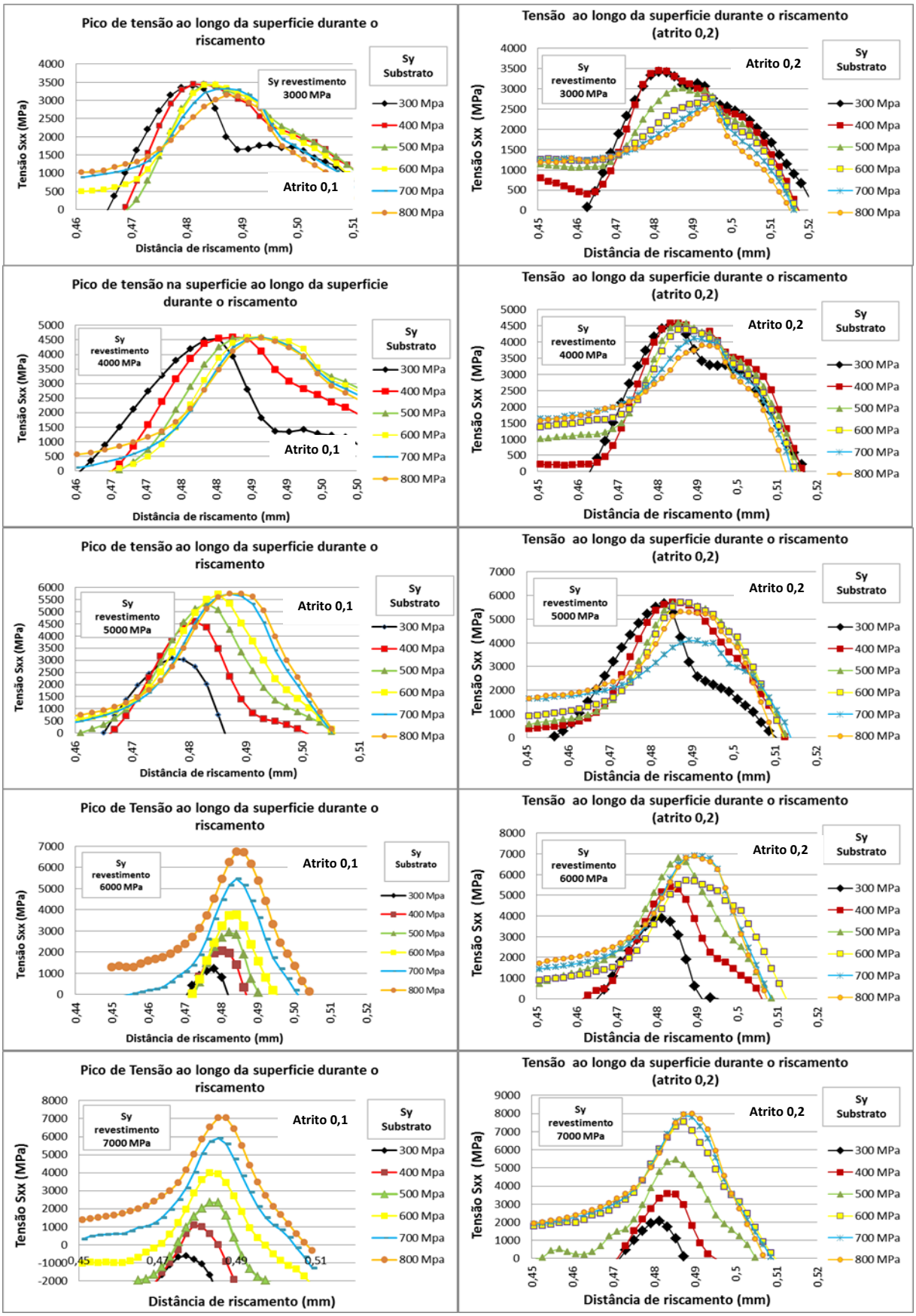
Finalmente, a figura 60 apresenta o comportamento da tensão Szz ao longo da linha transversal ao sulco de riscamento, na superfície do substrato. Neste caso o atrito não leva à obtenção de grandes diferenças nos valores de tensão na superfície do substrato segundo as combinações de estudo.

Figura 53 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Sxx ao longo da superfície.



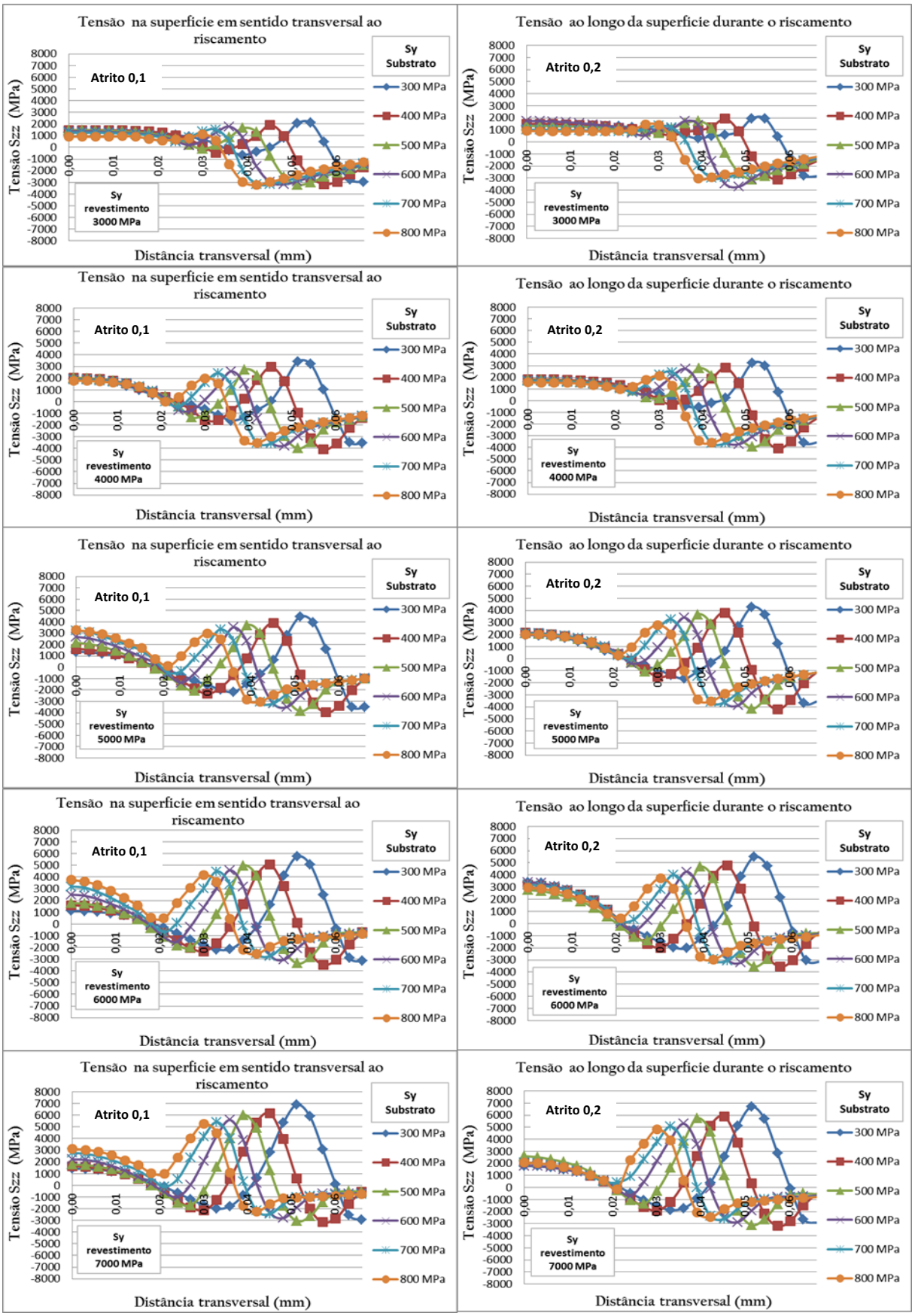
Fonte: O autor

Figura 54 - Detalhe do efeito do atrito no contato no pico de tensão Sxx ao longo da superfície



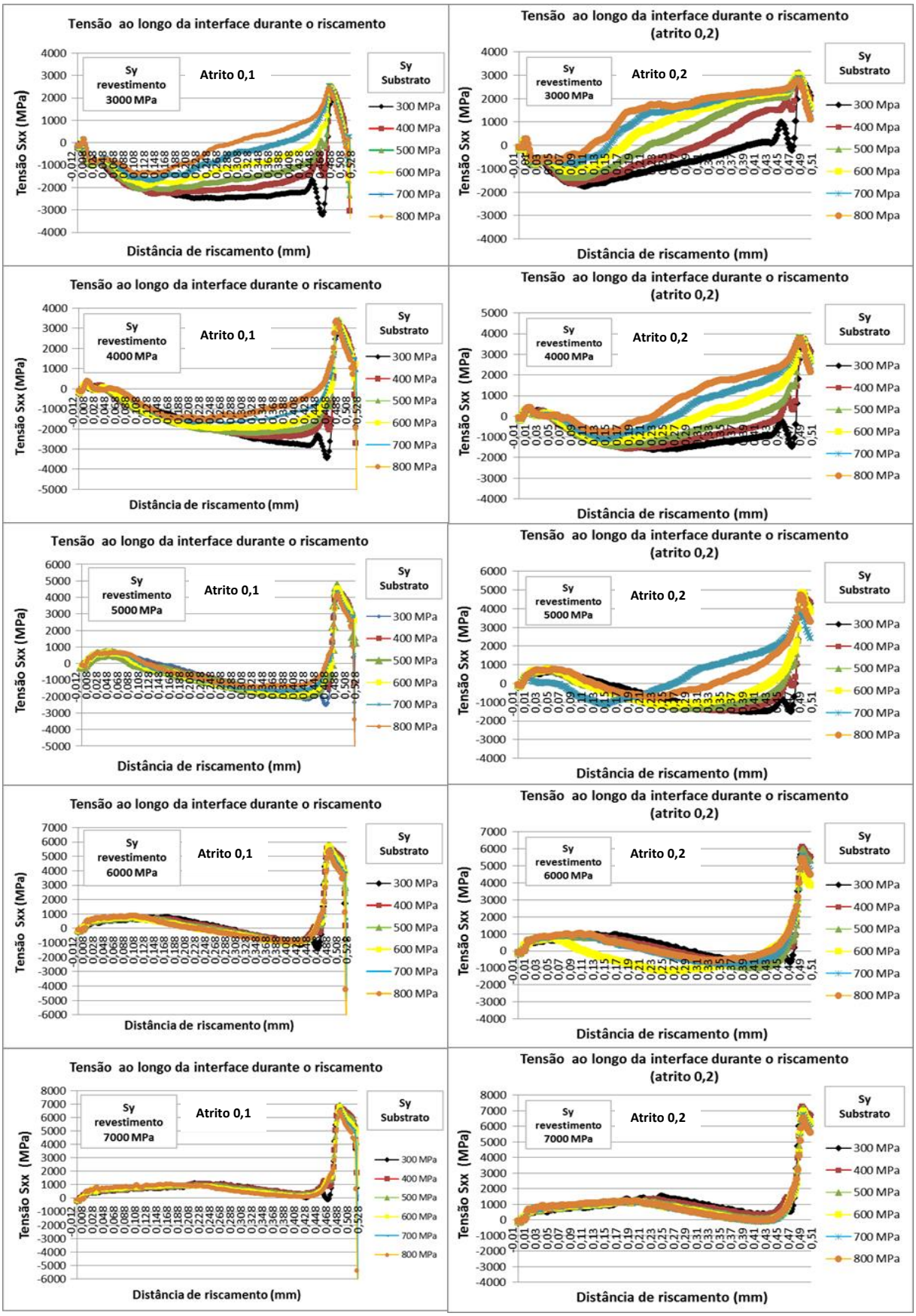
Fonte: O autor

Figura 55 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Szz ao longo da superfície dos sistemas revestidos



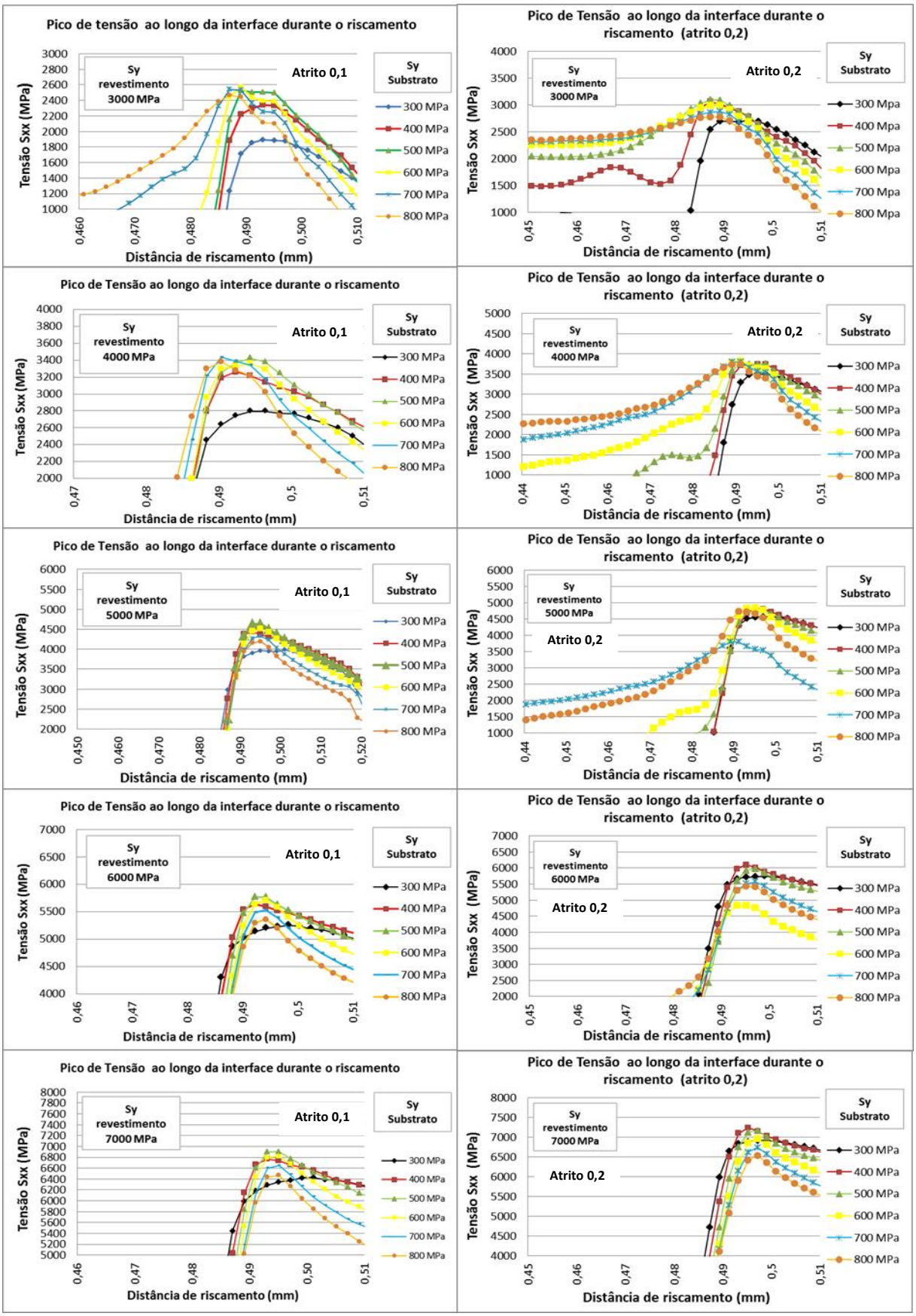
Fonte: O autor

Figura 56 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Sxx ao longo da interface



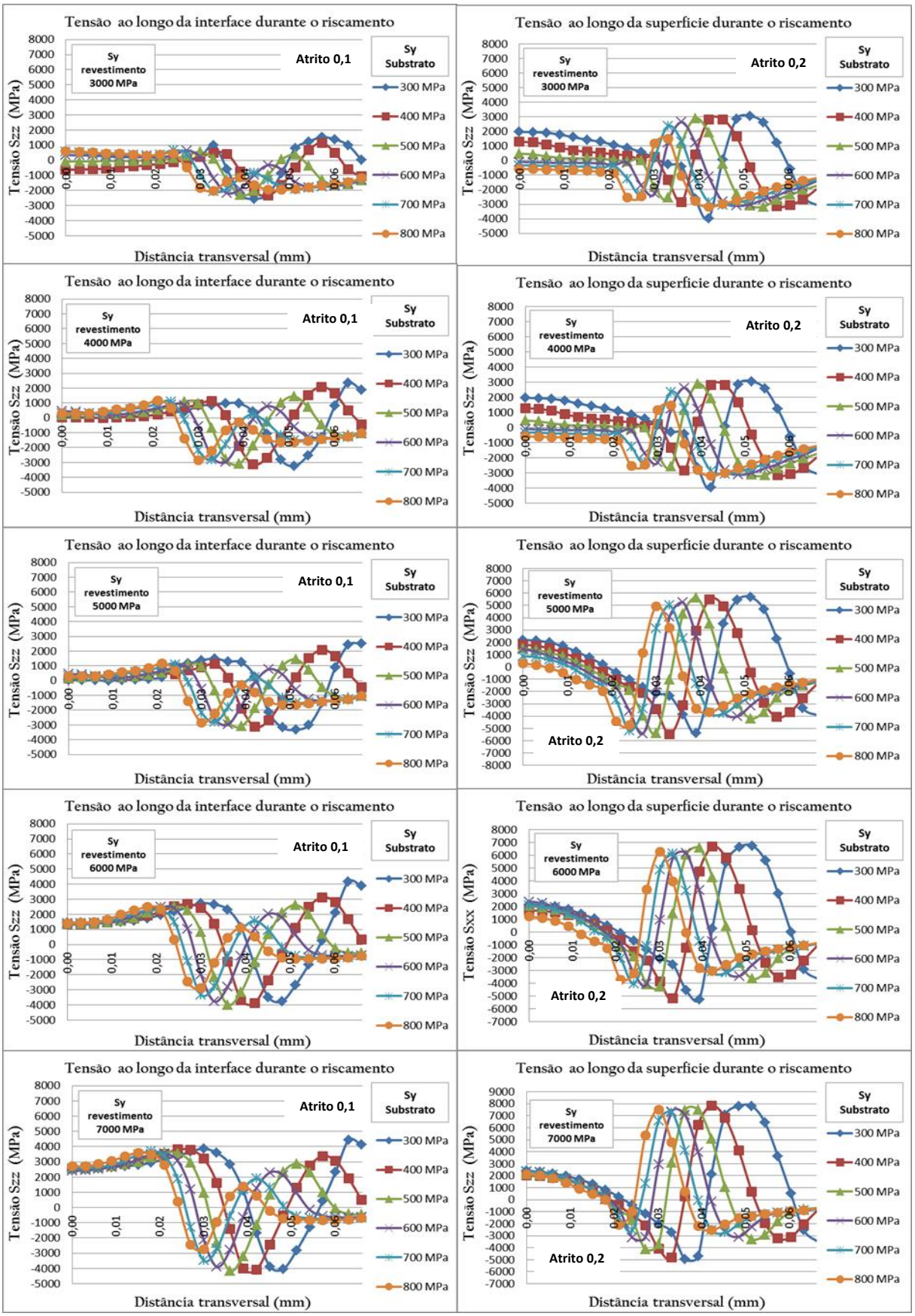
Fonte: O autor

Figura 57 - Detalhe do efeito do atrito no contato no pico de tensão Sxx ao longo da interface



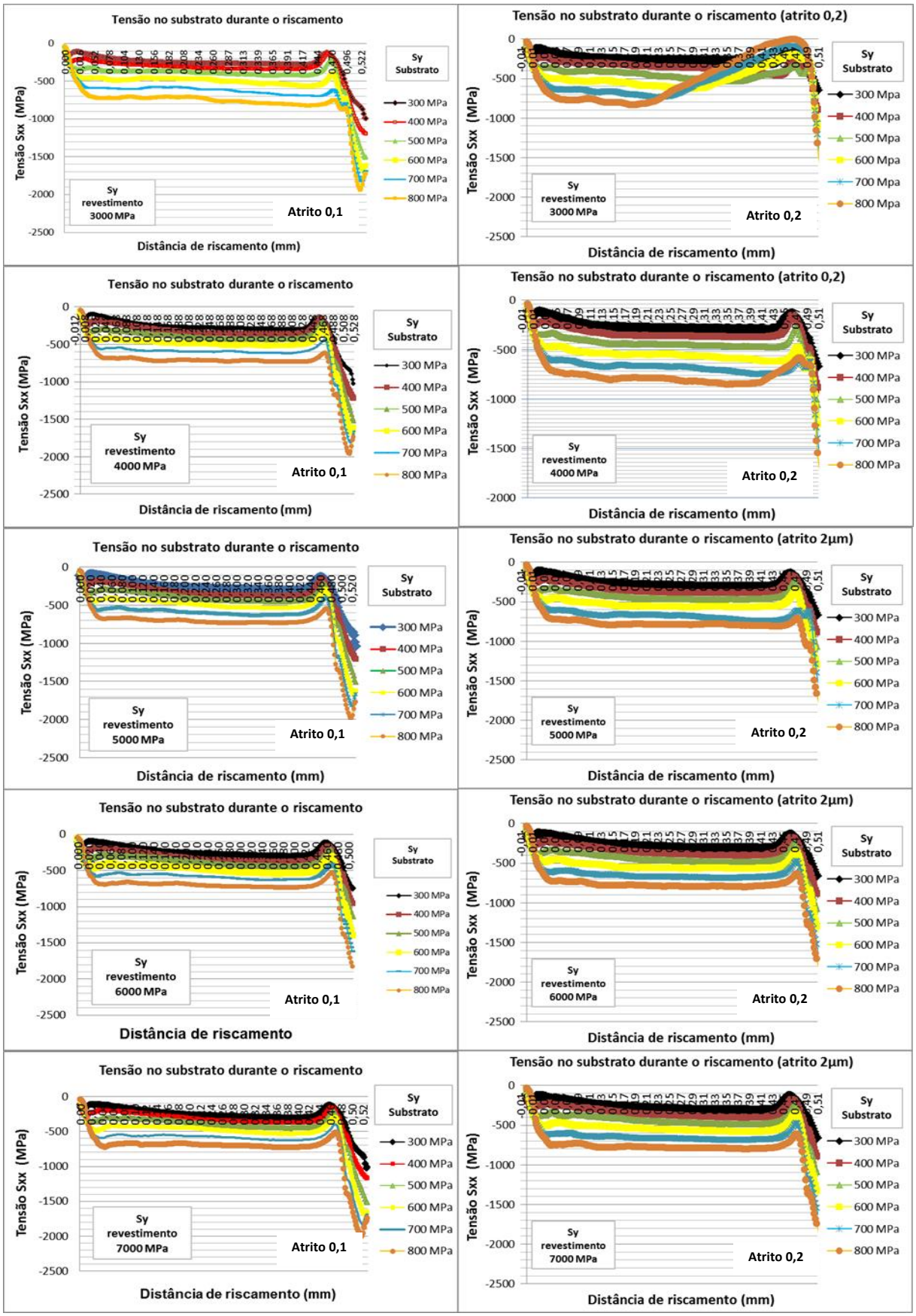
Fonte: O autor

Figura 58 - Efeito do atrito na tensão Szz na interface dos sistemas revestidos



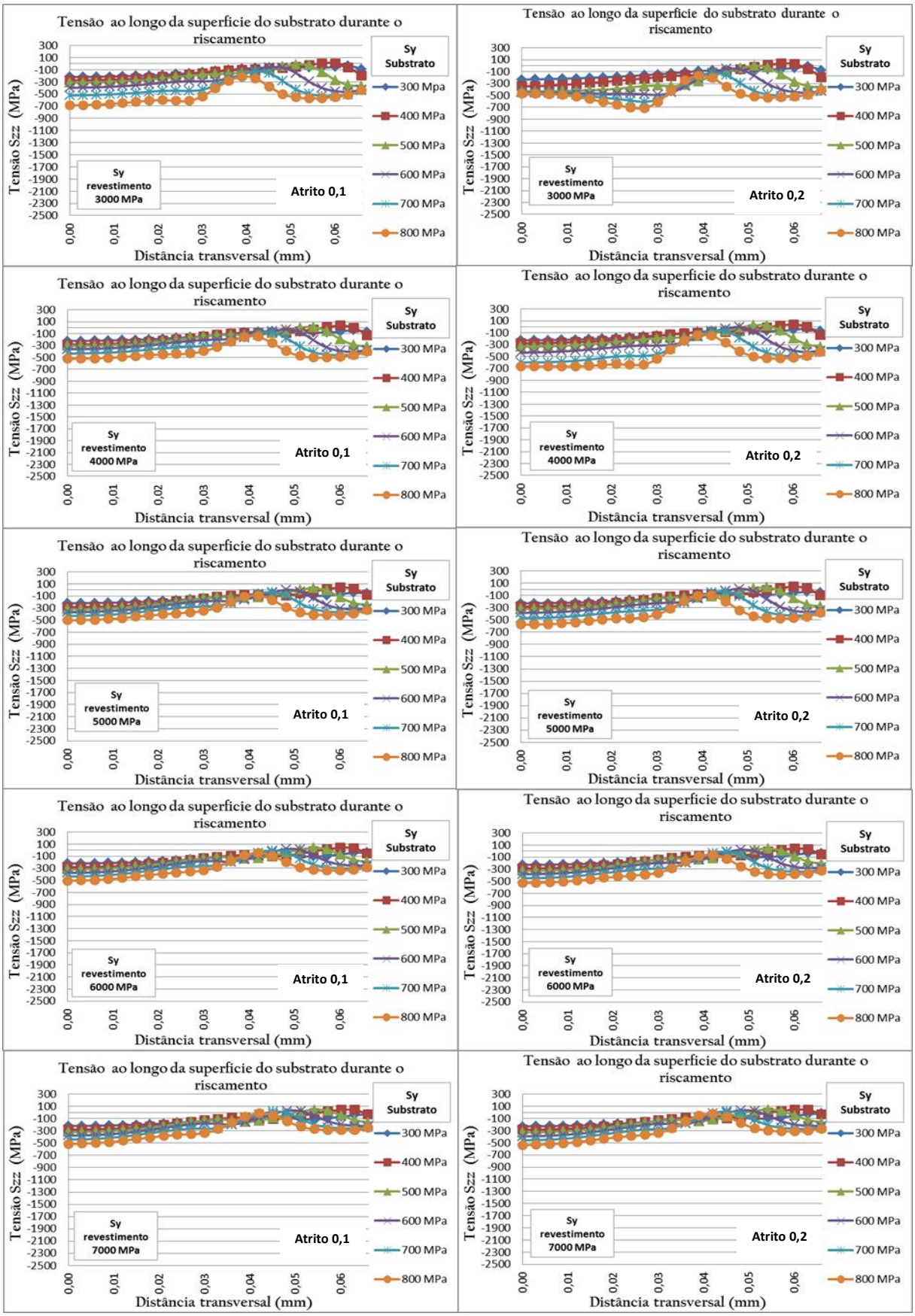
Fonte: O autor

Figura 59 - Efeito do coeficiente de atrito na tensão Sxx na superfície do substrato durante o riscamento



Fonte: O autor

Figura 60 - Efeito do atrito na tensão Szz ao longo da superficie do substrato.



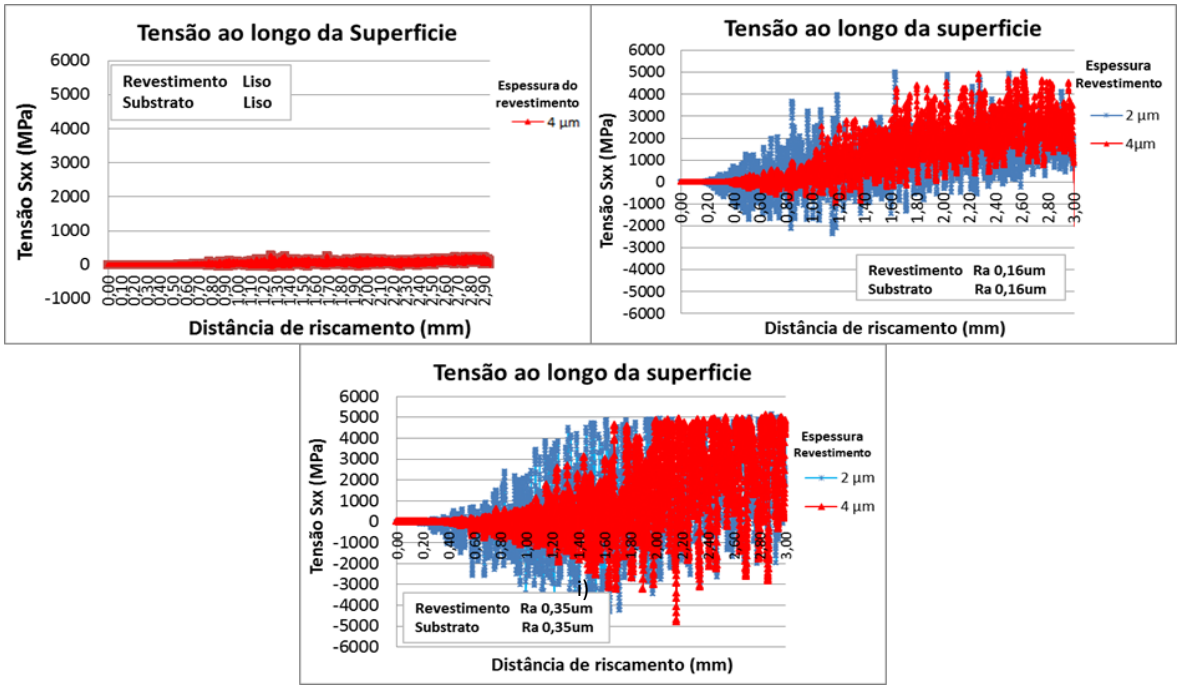
Fonte: O autor

4.5 INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE DO SISTEMA REVESTIDO NO COMPORTAMENTO DA TENSÃO Sxx

Para análise da influência da rugosidade serão apresentados os resultados do modelo desenvolvido para condições de superfícies idealmente lisas e com rugosidades de Ra= 0,16 μm e Ra=0,35 μm (Figuras 20 e 21). Pela condição 2D do modelo de simulação, os resultados apresentados baseiam-se, unicamente, na análise da tensão Sxx no interior do sulco de riscamento de um sistema revestido e não em combinações revestimentos/substratos. Como apresentado na tabela 7 o sistema está composto por revestimento com comportamento elásto-plástico, predominantemente elástico (E=500 GPa, ν=0,25, Sy=5000 MPa), da mesma forma que por um substrato de comportamento elasto-plástico (E=210 GPa, ν=0,3, Sy=300 MPa).

A figura 61 apresenta a distribuição da tensão Sxx ao longo da superfície, em cada um dos modelos estabelecidos na tabela 8. Os resultados indicam que a tensão ao longo da superfície no sistema liso-liso, atinge unicamente 300 MPa. Para o caso do sistema com rugosidade Ra=0,16 μm, é atingido o valor de 5000 MPa (tensão do revestimento) à distância de 1,65 mm para caso de revestimento com espessura de 2 μm, assim como à distância de 2,2 mm para revestimento de 4 μm.

Figura 61 - Comportamento da Tensão Sxx ao longo da superfície para sistemas rugosos.

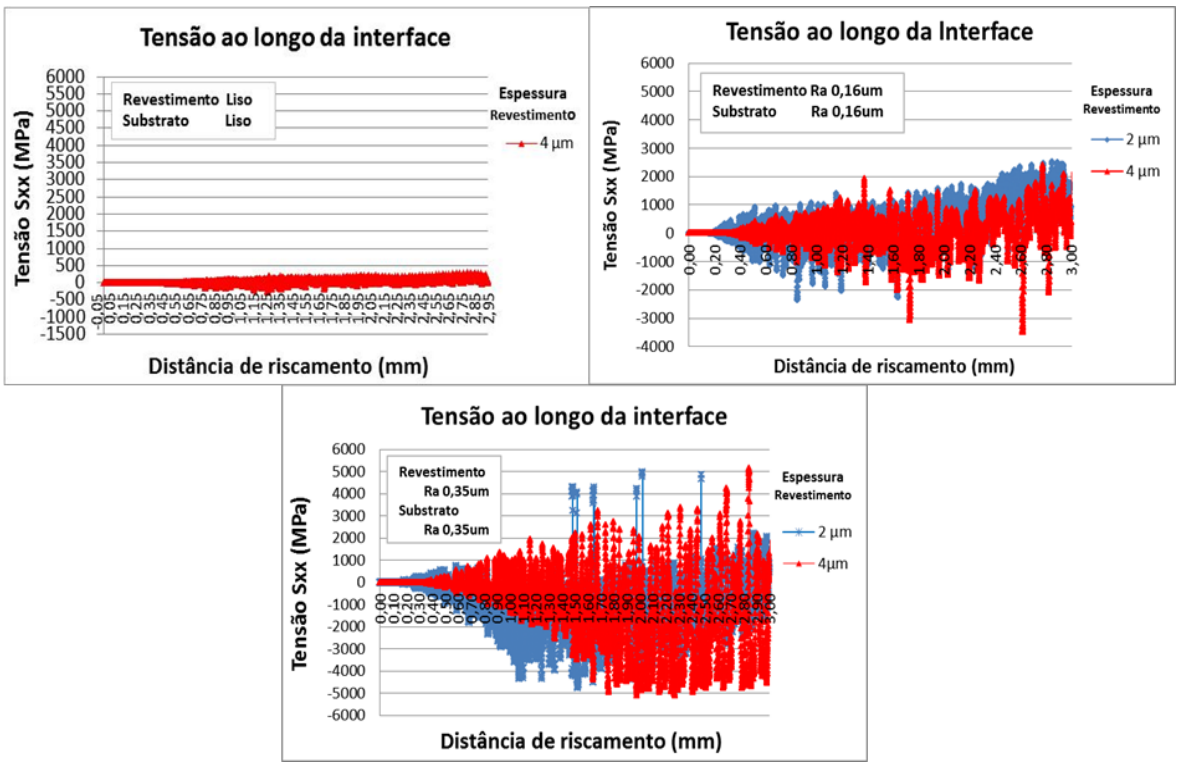


Fuente: O autor

Da mesma forma, para a rugosidade Ra=0,35 µm, é atingido o valor de 5000 MPa à distância de 1,60 mm para caso de revestimento com espessura de 2 µm, e à distância de 2 mm para revestimento de 4 µm.

Na figura 62, apresenta-se a distribuição da tensão Sxx ao longo da interface do sistema. É importante observar que os valores na interface para o sistema considerando rugosidades de 0,16 µm não atingem o valor da tensão do revestimento, enquanto que no caso das rugosidades com 0,35 µm, em particular para o revestimento de 2 µm de espessura, é obtido o valor da tensão do revestimento na distância de 2 mm de riscamento, assim como para o revestimento de 4 µm o valor da tensão de 5000 MPa é obtido em 2,85 mm de riscamento.

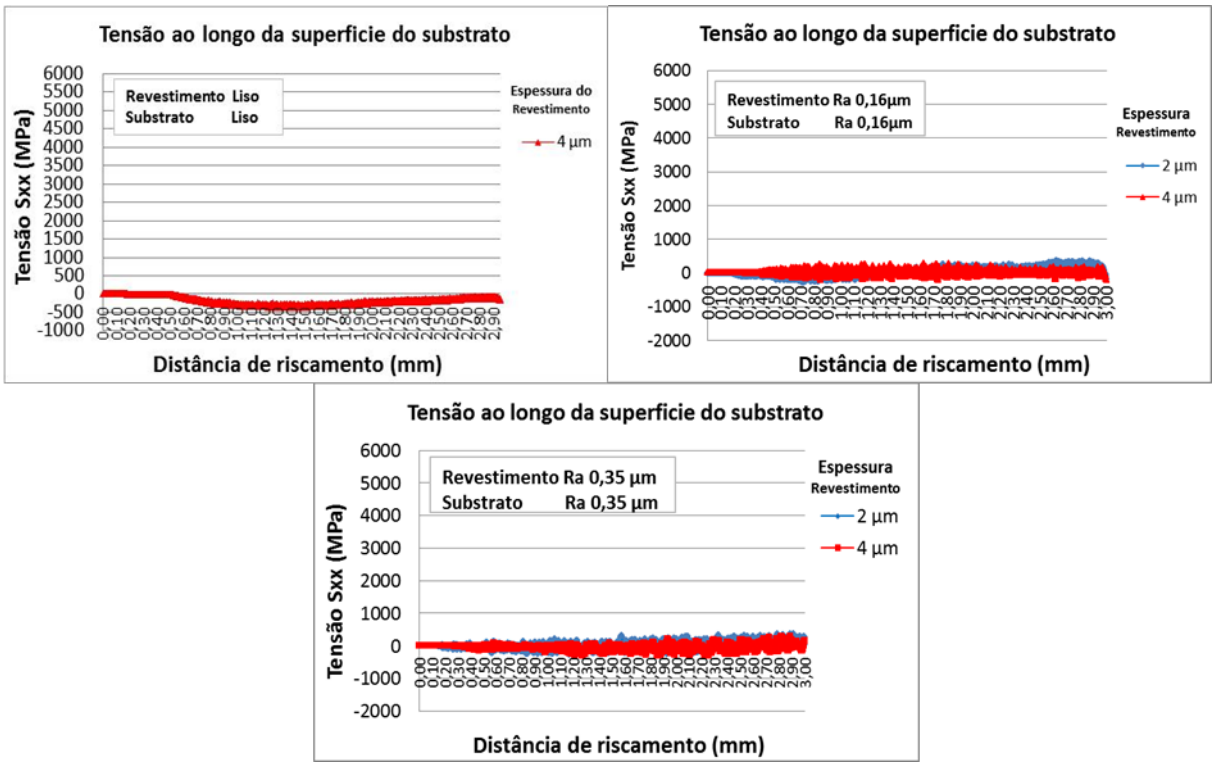
Figura 62 - Comportamento da Tensão Sxx ao longo da interface para sistemas rugosos.



Fonte: O autor

Na figura 63 é apresentado o comportamento na interface do lado da superfície do substrato. Na figura, observa-se que os valores de tensão Sxx obtidos são baixos e em nenhum dos casos atingem a tensão do revestimento.

Figura 63 - Comportamento da Tensão Sxx ao longo da superfície do substrato para sistemas rugosos



Fonte: O autor

4.6 FALHA DOS SISTEMAS REVESTIDOS

Dos resultados obtidos nos itens anteriores, nos quais analisou-se a influência da tensão de escoamento do revestimento e do substrato (como uma forma de apresentar a dureza em função de tensão), da tensão residual do revestimento, da espessura do revestimento e do coeficiente de atrito entre o indentador e o sistema revestido, é possível estabelecer que em cada condição de estudo, algumas combinações revestimento/substrato, atingiram o valor da tensão do revestimento, indicando que, nessas condições pode existir a opção de falha na superfície ou na interface do revestimento nos sistemas. Desta forma nas tabelas 9 até 12, é apresentada como F a combinação que atingiu o valor de tensão do revestimento sugerindo maior possibilidade de falha no sistema, assim como NF à combinação que não atingiu a tensão do revestimento. Essas condições são obtidas a partir dos resultados das tensões Sxx e Szz para a superfície como para a interface dos sistemas revestidos.

A tabela 9 apresenta como F ou NF as combinações revestimento/substrato. A tabela é obtida a partir dos resultados das tensões Sxx e Szz do item 4.1 (Influência da dureza dos materiais). Da mesma forma, a tabela 10 apresenta os resultados das tensões Sxx e Szz nas combinações

revestimento/substrato sob consideração de tensão residual no revestimento (resultados do item 4.2). A tabela 11, apresenta ao resultados das tensões segundo combinações considerando espessura de 4 μm do revestimento (item 4.3). Finalmente a tabela 12 apresenta os resultados das tensões quando o sistema considera coeficiente de atrito de 0,2 no contato (item 4.4).

Tabela 9 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Dureza dos materiais)

TENSÃO DO REVESTIMENTO 3000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F

TENSÃO DO REVESTIMENTO 4000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F

TENSÃO DO REVESTIMENTO 5000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	F	F	F	F

TENSÃO DO REVESTIMENTO 6000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	NF	NF	NF	F

TENSÃO DO REVESTIMENTO 7000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	NF	NF	NF	F

Na tabela é possível identificar que todas as combinações de tensão de escoamento de 3000 MPa e 4000 MPa do revestimento, com os diferentes substratos levam a valores que ultrapassam o valor da tensão do revestimento. Da mesma forma para os revestimentos com os maiores valores de tensão, as combinações com substrato com tensão de escoamento de 800 MPa ultrapassam o valor da tensão do revestimento.

Tabela 10 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Tensão residual -3GPa)

TENSÃO RESIDUAL NO REVESTIMENTO DE -3 GPa					
TENSÃO DO REVESTIMENTO 3000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 4000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 5000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	NF	NF	F	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 6000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	NF	NF	NF	NF
TENSÃO DO REVESTIMENTO 7000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	NF	NF	NF	NF

Da tabela 10, é possível observar que ao assim como no caso anterior, para os revestimentos de tensão de 3000 MPa e 4000 MPa todas as combinações com os substratos levam à obtenção de valores que ultrapassam a tensão do revestimento. Da mesma forma, os revestimentos de maior valor de tensão levam à obtenção de valores que não ultrapassam o tensão deste. Igualmente, é possível observar o efeito da tensão residual aplicada no revestimento, já que em comparação com a tabela 9, no caso dos revestimentos com maior tensão, em nenhuma das combinações com os substratos são obtidos valores que ultrapassem o valor da tensão do revestimento.

Tabela 11 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Espessura 4 µm)

ESPESSURA DO REVESTIMENTO (4 µm)					
TENSÃO DO REVESTIMENTO 3000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 4000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 5000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
NF	NF	NF	NF	NF	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 6000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	NF	NF	NF	NF	NF
TENSÃO DO REVESTIMENTO 7000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	NF	NF	NF	NF	NF

Da tabela é possível observar que o aumento na espessura do revestimento apresenta importância para o sistema com revestimento de tensão de 5000 MPa, já que unicamente com a combinação com o substrato de 800 MPa foi ultrapassado o valor de tensão. De outo lado, os sistemas com os revestimentos mais resistentes (6000 MPa e 7000 MPa) apresentaram valores de tensão Szz (substrato com tensão de escoamento de 300 MPa), que atingiram o valor da tensão do revestimento.

Tabela 12 - Combinações tensão do revestimento/tensão de escoamento do substrato (Atrito 0,2)

COEFICIENTE DE ATRITO (0,2)					
TENSÃO DO REVESTIMENTO 3000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	NF	NF	**NF**
TENSÃO DO REVESTIMENTO 4000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	NF
TENSÃO DO REVESTIMENTO 5000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	**F**	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 6000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	**F**	F	F
TENSÃO DO REVESTIMENTO 7000 MPa					
Tensão de escoamento do Substrato					
300 MPa	400 MPa	500 MPa	600 MPa	700 MPa	800 MPa
F	F	F	F	F	F

Dos resultados apresentados na tabela 12 é possível identificar o efeito do coeficiente de atrito no contato com o sistema revestido, já que o aumento no atrito para o valor de 0,2 leva à obtenção de valores da ordem da tensão do revestimento na totalidade das combinações de substratos com os revestimentos de 5000 MPa, 6000 MPa e 7000 MPa.

5. DISCUSSÃO

O ensaio de riscamento é uma das técnicas tradicionalmente usadas para caracterização mecânica de sistemas revestidos. O ensaio não permite a medição quantitativa da resistência à adesão e união entre o revestimento e o substrato, mas permite análise do comportamento coesivo ou adesivo dos sistemas. Estes comportamentos dependem da interação de parâmetros do ensaio (carga, geometrias, taxas de deslocamento, etc) e das propriedades do sistema revestido (dureza, resistência à fratura, modulo de elasticidade, microestrutura, rugosidade, etc) [52]. O método de ensaio é mais comumente aplicado em sistemas contendo revestimento de alta dureza (resistência) que em sistemas contendo revestimentos de alta plasticidade.

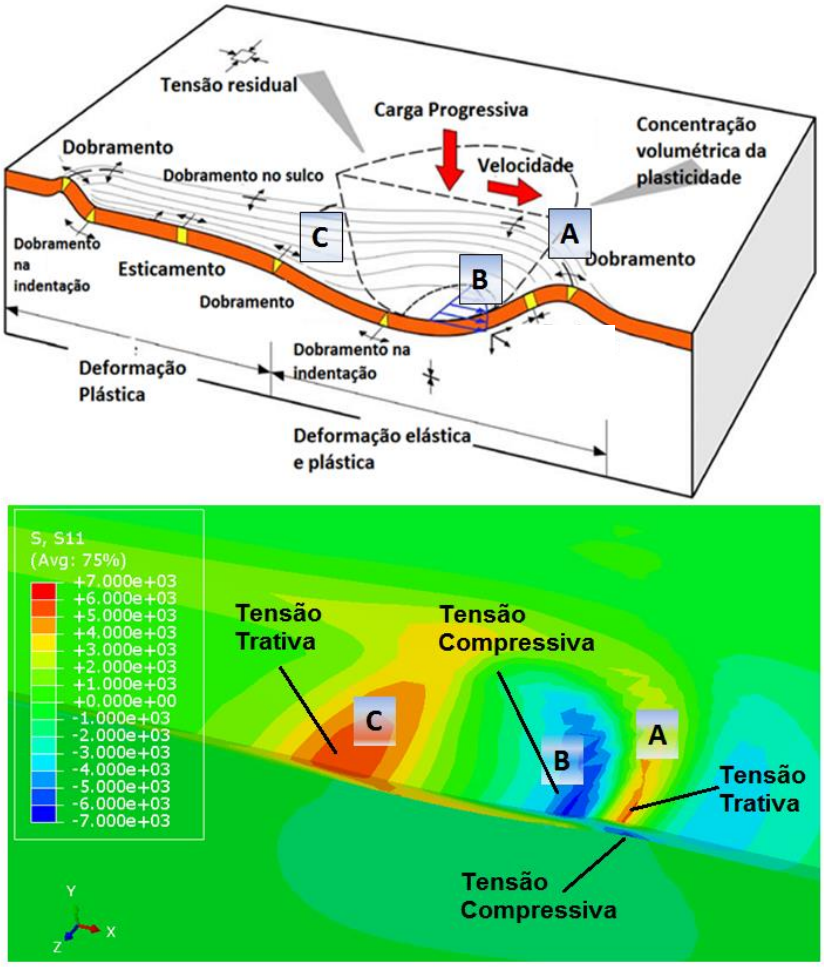
O objetivo deste estudo centra-se na análise da evolução das tensões e modos de falha de sistemas revestidos submetidos a ensaio de riscamento, com a finalidade de conhecer e analisar o efeito de variáveis como dureza (resistência) dos materiais, tensão residual do revestimento, espessura, atrito e rugosidade. Este estudo objetiva, ainda, avaliar a importância da dureza na possível quantificação na elaboração de um mapa de falha. O objetivo é estabelecido apesar da afirmação de Bull (2001) [78], que declarou que a quantificação dos valores de tensão, baseados em dados de ensaio de riscamento é praticamente impossível.

No capítulo anterior, foram apresentados os resultados de simulações referentes ao ensaio de riscamento sobre sistemas revestidos compostos por revestimento com propriedades mecânicas de alta resistência e substratos dúcteis. Os resultados focaram a distribuição das tensões Sxx e Szz, as quais são de importância, já que agem na direção da movimentação do indentador, assim como de forma transversal a este, e são responsáveis por alguns dos modos de trincamento na superfície e na interface do revestimento no interior e bordas do sulco [15-17,52]. Esses modos de falha têm sido organizados em mapas, permitindo a identificação de regiões ou fronteiras entre cada um deles. Os trabalhos de Bull (1991, 1997, 2006) [17-19] fornecem elementos para o entendimento das regiões, mas a informação nestes casos é só de caráter qualitativo.

Em termos dos resultados deste estudo, é inicialmente importante ressaltar que os contornos de tensão obtidos nas simulações são coerentes com os resultados de simulação dos modelos desenvolvidos e reportados por Xie e Hawthorne (2002) [59], Li e Beres (2006) [43], Holmberg et al (2005, 2006a, 2006b, 2009) [20-24]. Na figura 64 apresenta-se o contorno da tensão Sxx

obtida na combinação Revestimento (Sy=5000 MPa)/Substrato (Sy=800 MPa). Na figura, identifica-se tensão compressiva no interior do sulco na região frontal do contato entre o indentador e o material acumulado durante a movimentação (B). Da mesma forma, identifica-se tensão de caráter trativo nas regiões do dobramento do sistema na frente do contato com o indentador (A), e na parte traseira contato (C).

Figura 64 - Contornos da tensão Sxx no sentido de riscamento.

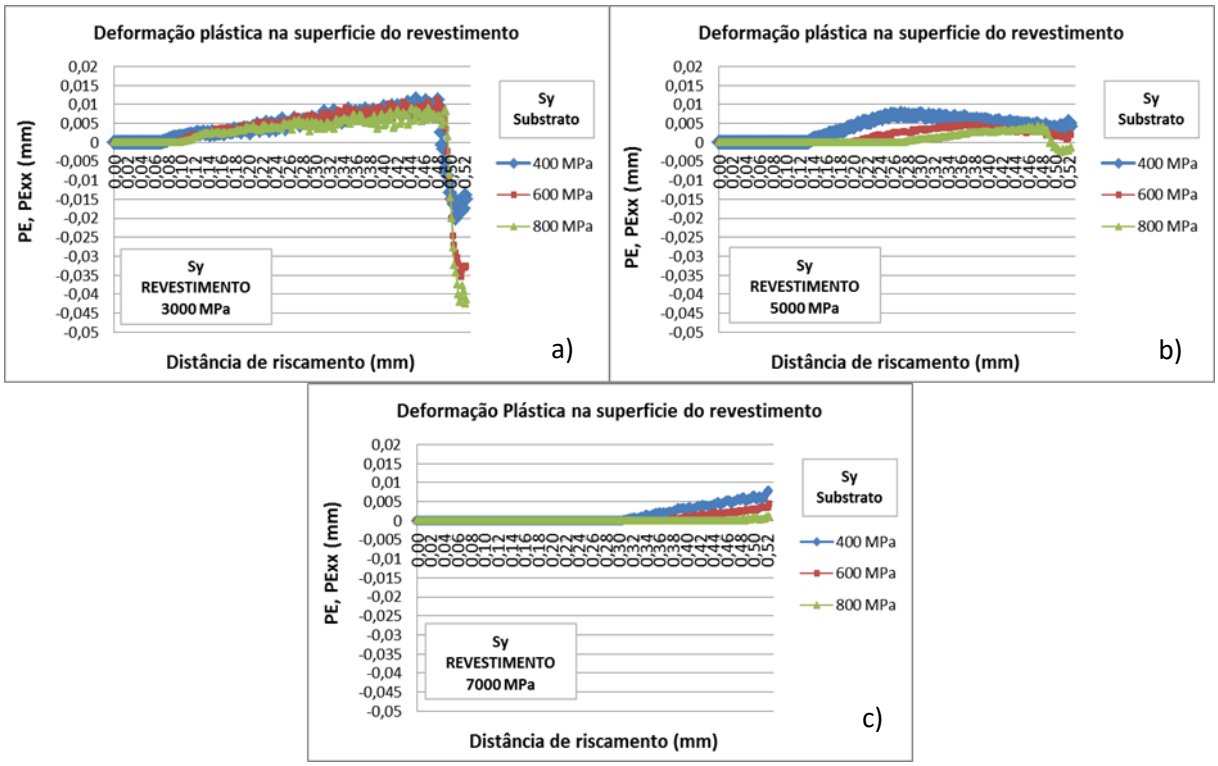


Fonte: O autor

Os resultados também indicam que é possível estabelecer que para sistemas revestidos considerando revestimentos com tensão na ordem de 3000 MPa e 4000 MPa, o efeito da resistência do substrato é nula, já que nestes casos a deformação do revestimento leva a valores de tensão na superfície que atingem a tensão do revestimento. Em particular, a tensão Sxx pressupõe falha no interior do sulco durante o riscamento (Figuras 23 e 24), já que a tensão Szz (Figura 25) não atinge estes valores. Uma possível justificativa deste resultado tem relação com a análise de indentação em sistemas revestidos. Gan et al (1996) [77] estabeleceram que a

distribuição de tensões no revestimento submetido a indentação é afetada pela relação (E/Sy) entre o modulo de Young (E) e a tensão de escoamento (Sy) do material do revestimento. Desta forma, os revestimentos com tensão de escoamento baixos, como pode ser o caso de 3000 MPa apresentam relação alta, o que leva à obtenção de maior deformação plástica. Similarmente, o revestimento com tensão de escoamento de 7000 MPa apresenta a relação mais baixa, o que leva a um menor escoamento global durante o contato. Este comportamento apresenta-se na figura 65, que mostra o nível de deformação plástica na direção "x" em função da distância. Na figura é ratificado que o revestimento com menor tensão de escoamento apresenta maior deformação plástica (Figura 65a), enquanto que o revestimento com maior tensão de escoamento apresenta a menor deformação na superfície (Figura 65c).

Figura 65 - Comportamento da deformação plástica na superfície do sistema revestido



Fonte: O autor

Desta forma, segundo analisado da tabela 9, em conjunto com a figura 65, como o riscamento é feito com o mesmo valor de carregamento em todas as combinações, então para revestimentos com maiores valores de tensão de escoamento a deformação é menor levando a menores valores de tensão durante o contato, sugerindo maior capacidade de carga. Igualmente, as diferentes combinações com substratos dúcteis evitam surgimento de tensões que ultrapassam o valor do revestimento, tornando os sistemas mais confiáveis. Uma justificativa deste comportamento

pode ser que, embora, o substrato dúctil leva maior grau deformação ao revestimento é experimentada maior tensão,

Na análise da influência da dureza (traduzida como tensão de escoamento) dos materiais, é importante salientar que para as condições estudadas os resultados de simulação sugerem que o surgimento de falhas (trincas) é provável na superfície durante o riscamento pela ação da tensão Sxx, mas não pela ação da tensão Szz (Figuras 23-25). Depois de liberada a carga de riscamento existe uma parcela de recuperação no interior do sulco, levando a que as tensões Sxx na superfície não atinjam o valor da tensão do revestimento (Figura 26). Porém, não parece existir recuperação das tensões Szz na borda do sulco durante o descarregamento (Figura 27). O fenômeno pode ser justificado pela deformação plástica do substrato, a qual é dada no riscamento nas bordas do sulco. Assim como, na interface são obtidos valores de tensão Sxx que não atingem o valor da tensão do revestimento e durante o descarregamento esses valores são em parte reduzidos. A tensão Szz na interface não atinge os valores da tensão dos revestimentos durante o riscamento, mas durante o descarregamento esses valores, em especial para combinações com o substrato mais dúctil, atingem os valores de tensão do revestimento, indicando que existe alta opção de falha (surgimento de trincas) na interface. Este resultado demostra o efeito da recuperação elástica, que tenta gerar o revestimento durante o descarregamento e o efeito da deformação plástica do substrato (Figuras 33-36), a qual permanece constante em cada substrato sem importar as combinações com os revestimentos. Desta forma a plasticidade concentrada nas bordas do sulco impede a recuperação do conjunto nesta região.

Por outro lado, ao comparar os resultados obtidos considerando unicamente a influência da resistência dos materiais com os resultados da influência do uso de tensão residual no revestimento, é possível estabelecer que os revestimentos com menor tensão de escoamento (3000 MPa e 4000 MPa), atingem na superfície o valor da tensão do revestimento com ou sem tensão residual e sem importar a combinação com os substratos. A possível justificativa foi apresentada no parágrafo anterior, onde revestimentos com baixos valores de tensão de escoamento levam à obtenção de maior deformação e maiores valores de tensão que ultrapassam a tensão do revestimento (maior possibilidade de falha). Segundo o presente estudo, a tensão residual tem grande aporte no caso de proteção dos sistemas revestidos, particularmente nos casos de revestimentos com valores de tensão Sy≥5000MPa (Figuras 37 e 38), sugerindo que a mistura entre tensão residual e aumento da tensão de escoamento reduzem

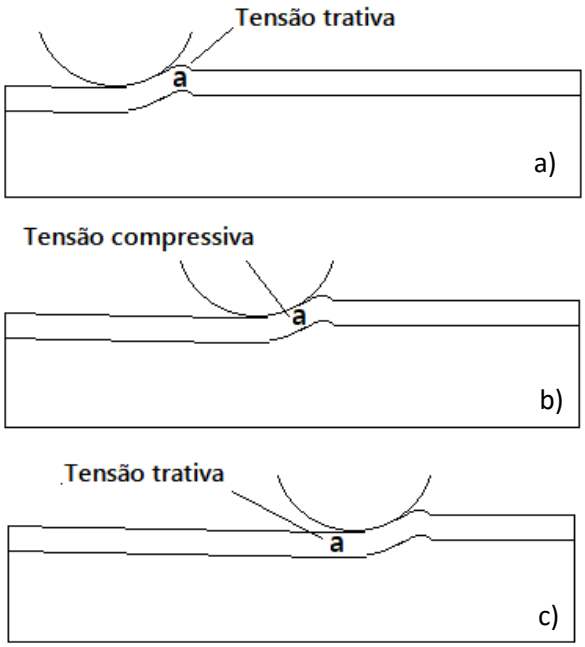
a capacidade de deformação da superfície do revestimento, indicando que o sistema tem maior capacidade de suporte de carga. Já segundo o estabelecido por Holmerg et al (2009) [24], os sistemas revestidos contendo tensão residual no revestimento experimentam relaxação de tensões pela ação do contato com o indentador [24]. O relaxamento para a tensão Sxx nos casos em que Sy<5000MPa, explica-se já que na superfície os valores de tensão trativa gerados, em particular pelo dobramento na frente do indentador durante o riscamento, levem a que a tensão compressiva seja relaxada e que o efeito da tensão residual não tenha muita influência no valor de tensão atingido na parte traseira do contato com o indentador. No caso da tensão Szz, pela deformação nas bordas a tensão residual é igualmente relaxada, e não apresenta influência nos valores obtidos no pico de tensão obtido segundo cada substrato (Figura 39). No caso da interface (Figuras 40-42), pelo menor dobramento do revestimento apresentam-se picos de tensão Sxx e Szz que em nenhum dos casos atingem o valor da tensão de escoamento do revestimento. Da mesma forma, essa condição de relaxamento pode ser entendida com base no papel que exerce o substrato no conjunto e com base no comportamento das tensões atingidas segundo as Figuras 43 e 44. Durante o contato, o substrato experimenta deformação plástica fazendo com que durante o riscamento, apesar do intento de recuperação elástica do revestimento, o substrato impede essa possível recuperação.

As análises considerando a espessura do revestimento indicam que, assim como na análise do efeito da resistência dos materiais e da tensão residual, ao se passar a espessura de 2 µm para 4 µm não há proteção à possível falha (ultrapassagem da tensão do revestimento) nos casos onde o revestimento apresenta Sy < 5000MPa. A importância no aumento na espessura do revestimento é significativa para os revestimentos com resistência Sy ≥ 5000MPa. Ao comparar o efeito das duas variáveis anteriormente consideradas (tensão residual e espessura) para os casos em que o revestimento apresenta Sy ≥ 5000MPa, é possível dizer que o aumento da espessura até 4 µm é um fator que atrasa, em maior grau que a tensão residual de -3GPa, a combinação de variáveis que levam ao valor da tensão do revestimento. Segundo Holmberg et al (2006), o aumento na espessura do revestimento duro sobre um substrato dúctil, leva à maior capacidade de suporte de carga.

Outra variável de alta importância para a análise do comportamento da tensão nos sistemas revestidos é o valor do coeficiente de atrito. Para os revestimentos de menor resistência (3000 MPa e 4000 MPa) o atrito não tem um efeito de alta incidência nas tensões obtidas, mas para os sistemas com revestimentos mais resistentes (Sy ≥5000 MPa), em particular para os

casos dos revestimentos com 6000 MPa e 7000 MPa, o atrito leva, na maioria das combinações com os substratos, à obtenção da tensão do revestimento, sendo esta a variável de estudo que leva ao maior número de vezes que é atingida a tensão do revestimento. Um resultado semelhante, publicado por Perez; Negrín e Souza (2015) [78] indicou que o coeficiente de atrito é a variável que gera maior valor de tensão de Mises na superfície dos sistemas revestidos. Uma explicação deste resultado pode ser entendida com a ajuda da figura 66, já que o material na superfície foi submetido a alta tensão trativa (Figura 66a) pela formação do pile-up, o atrito gera depois tensão compressiva (Figura 66b), como consequência da força compressiva durante o contato e finalmente gera alta tensão trativa como consequência do esticamento da superfície do sistema (Figura 66c).

Figura 66 - Esquema representativo da tensão na superfície segundo a movimentação do indentador



Fonte: O autor

Além das variáveis já apresentadas, a rugosidade torna-se uma variável de bastante interesse, mas não tem sido considerada e analisada nos modelos de simulação presentes na literatura. Dos resultados obtidos, é possível identificar que os valores de tensão Sxx, responsáveis pelas falhas no interior do sulco do riscamento, têm uma forte relação com a rugosidade e com o aumento desta. Ao aumentar a rugosidade do sistema, aumenta a possibilidade de falhas na superfície e na interface do conjunto (figura 61 e 62). Em paralelo, a espessura do revestimento conjugada com a rugosidade é importante, já que baixas espessuras, pela menor capacidade de suporte de carga, permitem a obtenção de valores que ultrapassam o valor de resistência do

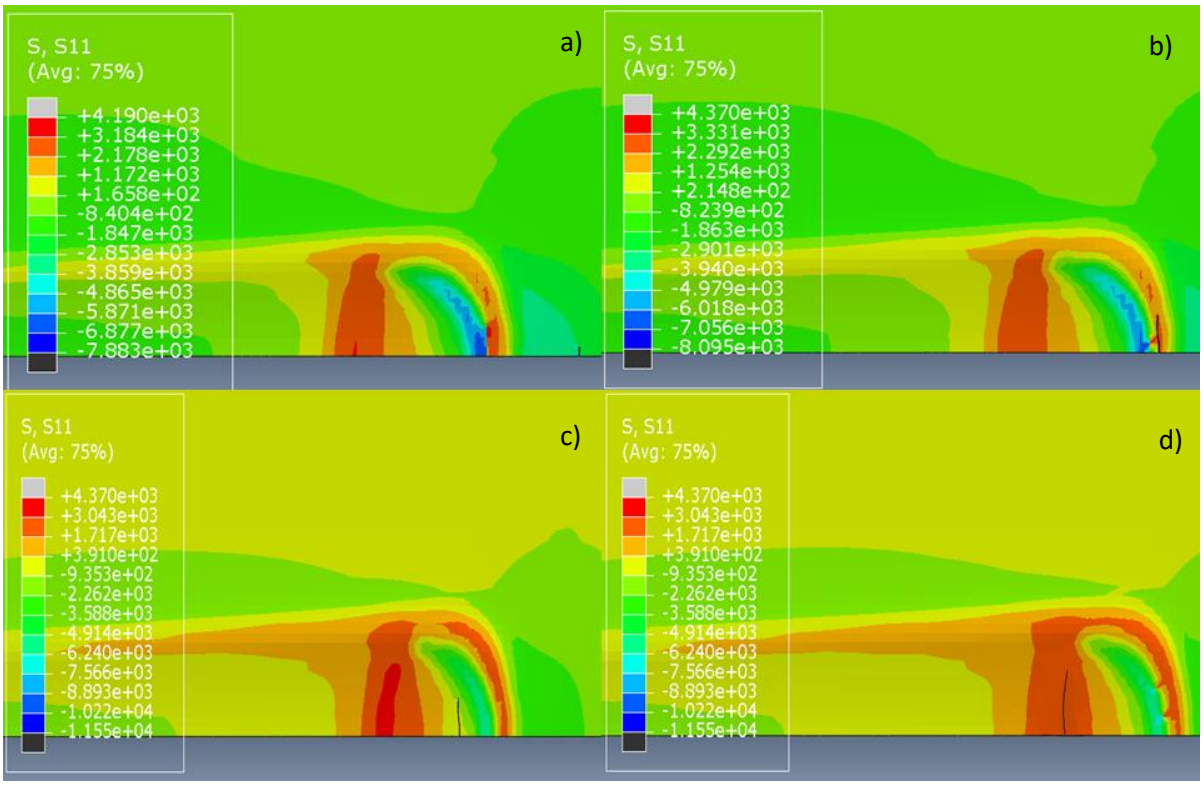
revestimento, levando à possibilidade de surgimento de trincas. Os altos valores de tensão Sxx presentes nos sistemas considerando rugosidade podem ser consequência dos contínuos contatos com as asperezas do material.

Depois de analisar os resultados das tensões Sxx e Szz e assim obter, na tabela 9, as combinações que ultrapassam o valor da tensão de escoamento do revestimento, é possível estabelecer que a tensão residual no revestimento e o aumento na espessura levam à redução de combinações que atingem a tensão do revestimento. Em paralelo, observou-se que a dureza (traduzida em tensão de escoamento) e o coeficiente de atrito, são os parâmetros que favorecem à maior obtenção de picos de tensão. A tensão Sxx ultrapassa na maioria das combinações o valor da tensão de escoamento do revestimento, então se pressupõe a possibilidade de ocorrência de trincas, em grande maioria, no interior do sulco. Este tipo de condição pode ser considerado dentro dos modos de falha [15,16,52] como: Fratura do revestimento, o qual inclui trincas trativas em arco, trincas trativas de Hertz e trincas trativas conformes.

Para verificação da propagação de um defeito e sua respectiva comparação com a morfologia estabelecida nos modos de falha (figura 6), foi imposta uma trinca de dimensões 0,002 mm (comprimento) x 0,0005 mm (profundidade), posicionada na superfície do revestimento. Para isto, foi utilizada a opção de ABAQUS XFEM, a qual permite a imposição de defeitos e gera um padrão de propagação. Desta forma, foi incluido um valor de tenacidade à fratura do revestimento característico em TiN de K_{IC}=2,8 MPa $\sqrt{m}$ [24,71]. O valor da tensão de escoamento foi considerado de 3000 MPa e de 4000 MPa, já que em estes valores sempre foi obtida a condição "F" (tensão que ultrapassa a tensão de escoamento do revestimento). Na figura 67 se apresenta numa vista superior da simulação, a evolução de uma trinca na superfície do sistema composto por revestimento (Sy=3000 MPa) e substrato (Sy=600 MPa). Na figura 67a apresenta-se como a trinca propaga- se no ponto da tensão trativa Sxx gerada pelo acúmulo de material à frente do indentador (Figura 67b), da mesma forma a trinca mantem seu comprimento na região do contato com o indentador (Figura 67c), a continuação ao atingir o máximo ponto de tensão trativa na parte traseira do indentador a trinca propaga-se até atingir seu comprimento final (Figura 67d).

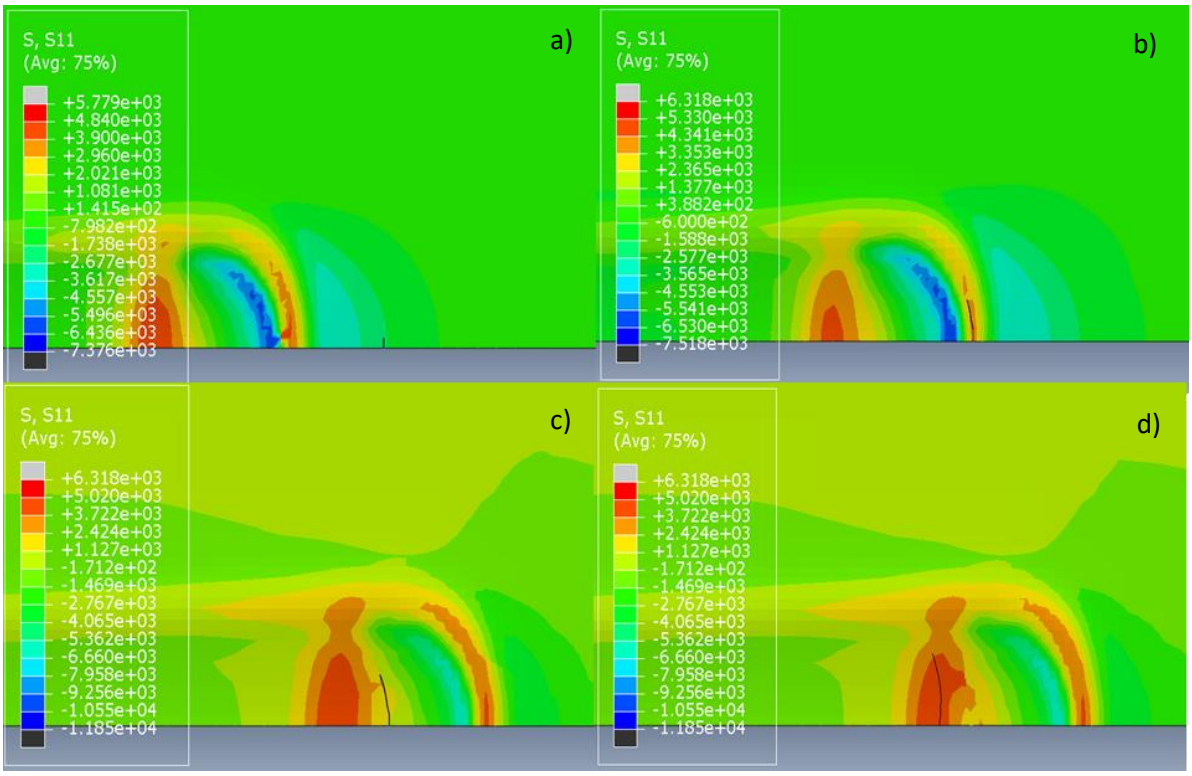
Na figura 68 encontra-se em vista superior do sulco, a propagação da trinca imposta no sistema com revestimento (Sy=4000 MPa) e substrato (Sy=600 MPa). As figuras a, b, c, d apresentam a mesma sequência que na figura 67.

Figura 67 - Propagação de trinca imposta no sistema revestimento (Sy=3000 MPa) substrato (Sy=600 MPa)



Fonte: O autor

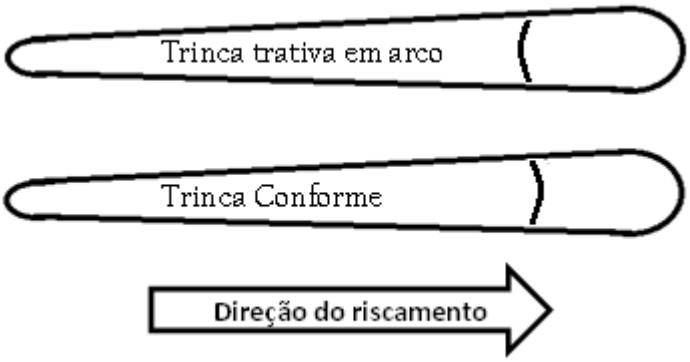
Figura 68 - Propagação de trinca imposta no sistema revestimento (Sy=4000 MPa) substrato (Sy=600 MPa)



Fonte: O autor

Como apresentado por Bull [15,16], as falhas dúcteis são geralmente observadas em sistemas contendo substratos dúcteis, enquanto que a falha frágil é associada com substrato de maior dureza. Neste caso, ao comparar os resultados das figuras 67 e 68 com a morfologia das trincas da figura 6, é possível a elaboração do esquema da figura 69, na qual se apresenta o nome de cada trinca, obtida em função do valor de tensão do revestimento.

Figura 69 - Representação esquemática do tipo de trinca segundo a combinação revestimento/substrato



Fonte: O autor

O tipo de trinca obtida no caso da figura 67, apresenta a morfologia de uma trinca em arco, assim como para o caso da figura 68 a trinca apresenta uma morfologia de trinca conforme. Devido à formação do sulco nos sistemas contendo substratos dúcteis, é possível estabelecer que a carga aplicada sobre o indentador leva ao dobramento do revestimento na parte frontal do contato durante o riscamento. Desta forma, dois fatores tem influência na concentração de tensões na frente do indentador, são eles, o pile-up (deformação) na frente e nas bordas do contato, e o atrito entre o indentador e a superfície do revestimento, o que causa máxima tensão nesta região. Igualmente, durante o riscamento o indentador passa sobre a trinca e comprime esta contra o sulco. Todo esse fenômeno leva ao trincamento do revestimento.

5.6.1 Elaboração de mapa e análise semi quantitativa segundo resultados das tensões Sxx e Szz nas diferentes combinações revestimento/substrato.

Bull (1991, 1997) [15,16] organizou no mapa da figura 5 a influência da dureza do substrato e do revestimento nos tipos de falhas observados durante o ensaio. Como apresentado no item 2.5, no caso de revestimentos duros, depositados sobre materiais dúcteis, os modos de falha dividem-se em três categorias: (i) Trincamento do revestimento, que inclui trincas de tensão

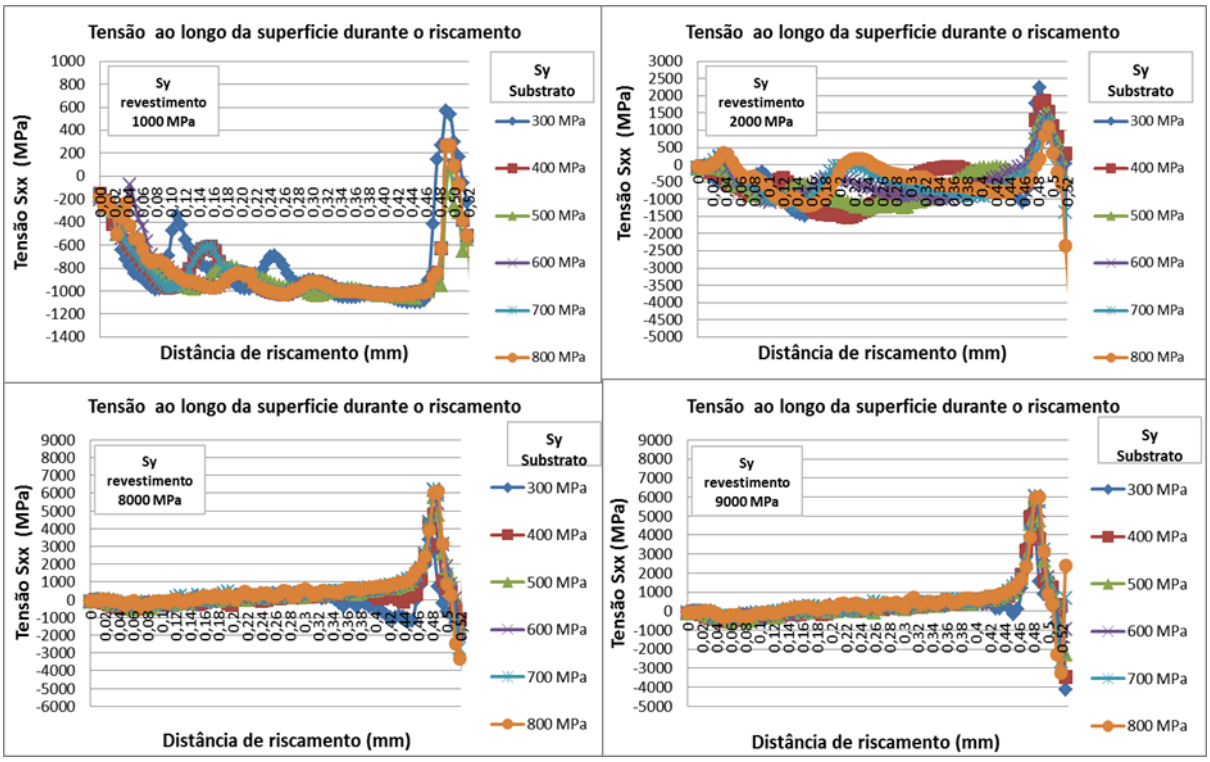
atrás do indentador, trincas conformes obtidas durante o dobramento do revestimento e trincas de Hetz. (ii) Falha interfacial, que inclui flambagem (Buckling) na frente do indentador ou fragmentação atrás do indentador por recuperação elástica do revestimento. (iii) Lascamento do revestimento (Bull, 2001) [79].

É importante ressaltar que para revestimentos duros depositados sobre substratos dúcteis, a deformação do substrato é predominantemente plástica, enquanto que o revestimento pode se deformar plasticamente ou fraturar uma vez que é dobrado no interior do sulco gerado pela deformação do substrato. De forma geral, o ensaio de riscamento é mais efetivo quando o substrato não apresenta deformação plástica em grande extensão.

Baseado nos resultados obtidos neste estudo (item 5.1) e traduzindo dureza dos materiais em função da tensão de escoamento, a figura 70, apresenta as combinações revestimento/substrato de um complemento de simulações para revestimentos com 1000 MPa, 2000 MPa, 8000 MPa, 9000 MPa, e substratos com 300 MPa, 400 MPa, 500 MPa, 600 MPa, 700 MPa e 800 MPa, na superfície e na interface (Figura 71).

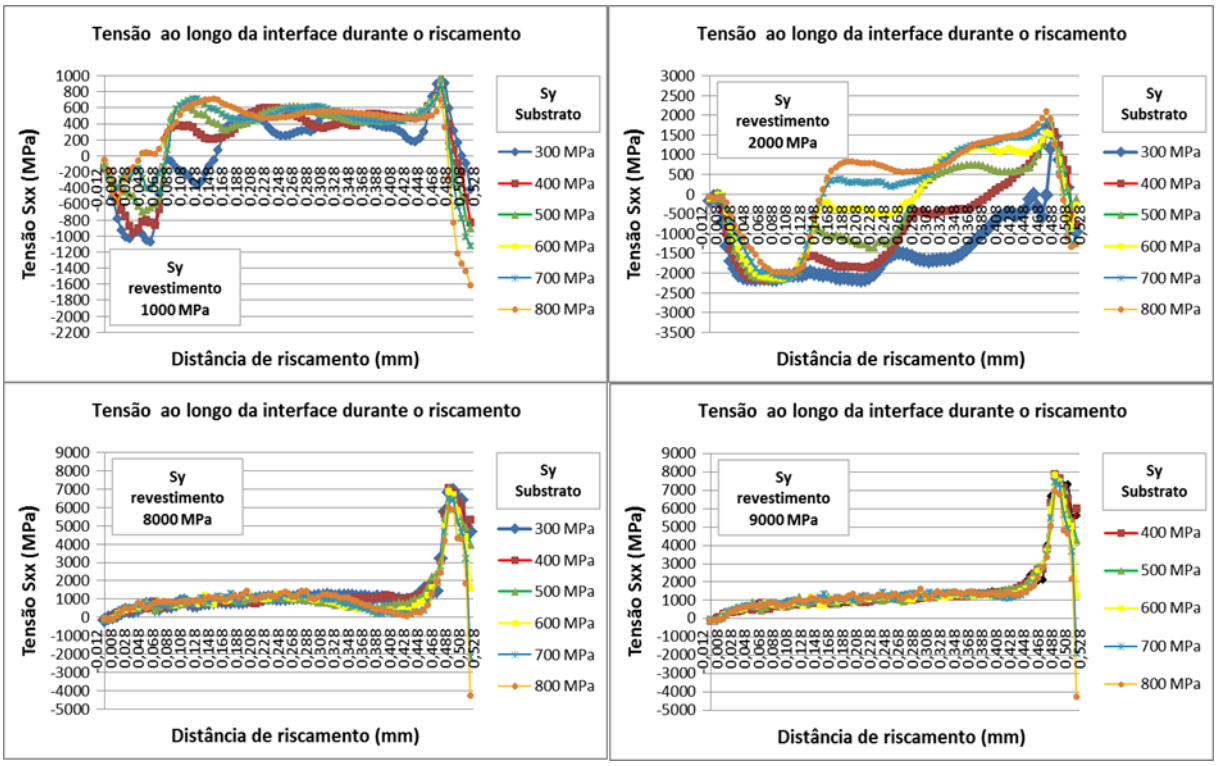
É importante observar que nas combinações de substratos com o revestimento de 1000 MPa de tensão de escoamento, o máximo valor de tensão Sxx atingido foi de 600 MPa e, neste caso o valor foi obtido na combinação com substrato de 300 MPa. Para o caso do revestimento de 2000 MPa, o máximo valor atingido foi de 2300 MPa aproximadamente, e foi apresentado na combinação do substrato com 300 MPa. Nas combinações restantes para revestimentos com Sy>8000 MPa não foi atingido o valor da tensão do revestimento, o que indica que os sistemas revestidos com alto valor de tensão de escoamento do revestimento, não favorecem presença de falhas sob as condições de contato utilizadas.

Figura 70 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos complementarios



Fonte: O autor

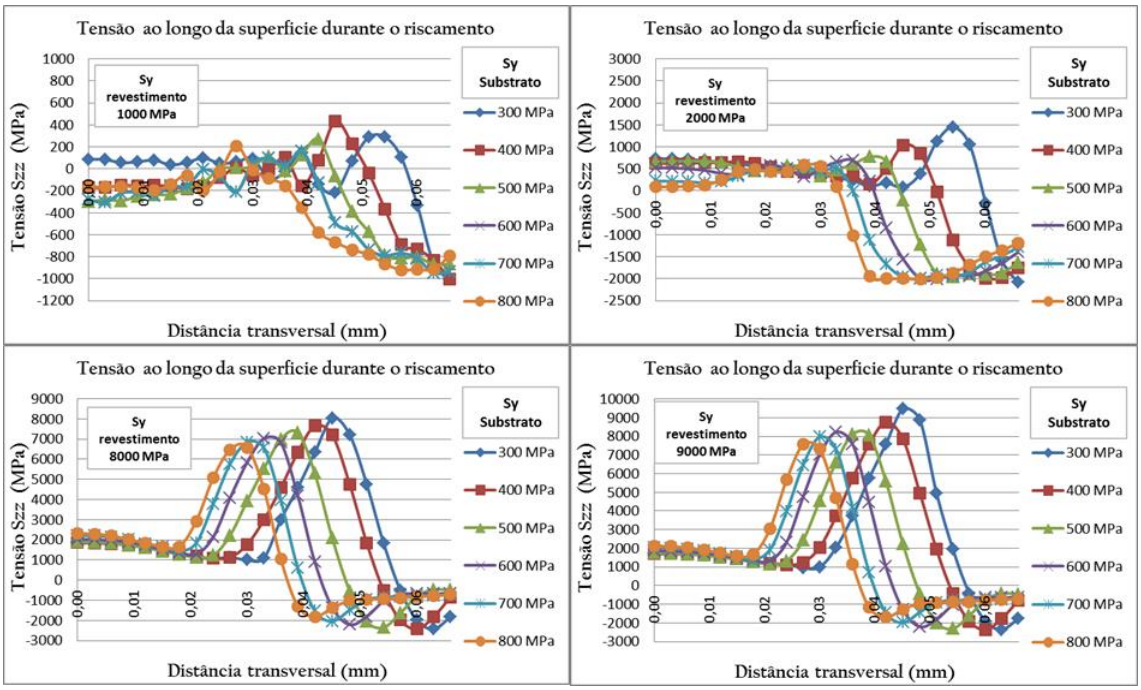
Figura 71 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da interface dos sistemas revestidos complementarios



Fonte: O autor

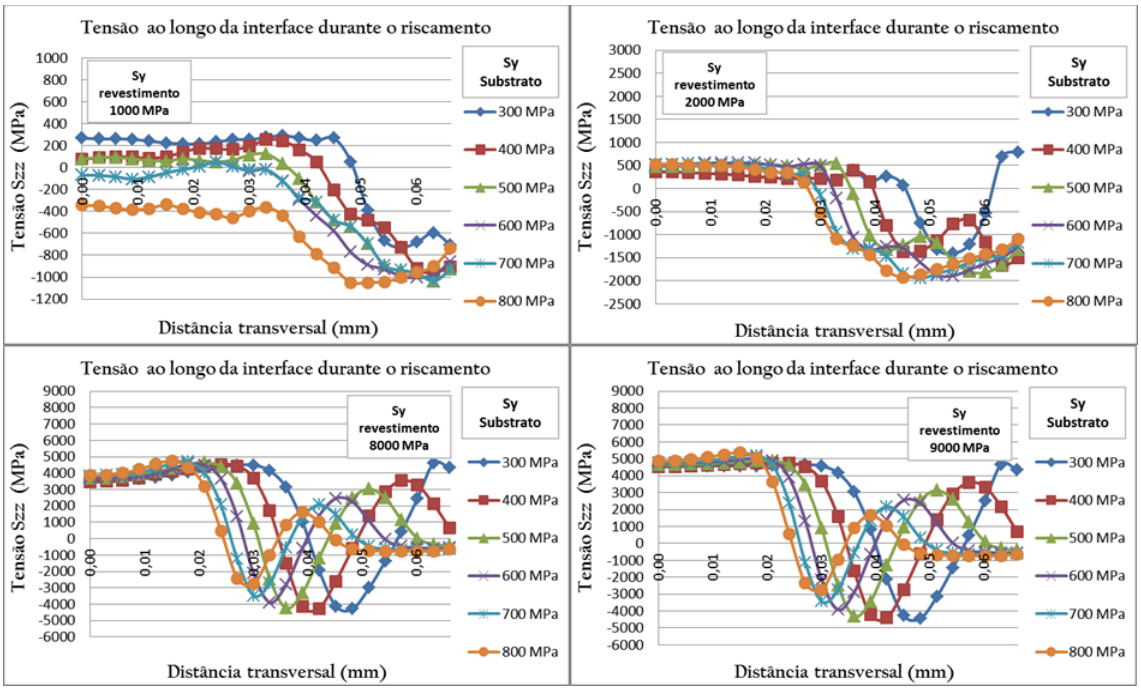
Nas figuras 72 e 73 é possível observar o comportamento na superfície e na interface, respectivamente, da tensão Szz em função das combinações complementares.

Figura 72 - Comportamento da tensão Szz ao longo da superfície dos sistemas revestidos complementários



Fonte: O autor

Figura 73 - Comportamento da tensão Szz ao longo da interface dos sistemas revestidos complementários



Fonte: O autor

Das figuras 70 e 71 é possível identificar que unicamente na combinação revestimento Sy=2000 MPa e substrato Sy=300 MPa é obtido valor de tensão Sxx que ultrapassa o valor da tensão do revestimento em sua superfície, unicamente a combinação revestimento Sy=2000 MPa e substrato Sy=800 MPa atinge o valor da tensão do revestimento na interface. No caso da tensão Szz das figuras 72 e 73 observa-se que nas combinações revestimento Sy=8000 MPa e substrato Sy=300 MPa e revestimento Sy=9000 MPa e substrato Sy=300 MPa na superfície é ultrapassado o valor da tensão do revestimento. Na interface observa-se que em nenhuma das combinações foi atingido o valor da tensão do revestimento.

Ao fazer comparação do mapa qualitativo de falhas elaborado por Bull (figura 6) com os resultados numéricos deste estudo, é possível a elaboração de um mapa semiquantitativo que indica para as diferentes combinações revestimento/substrato a possibilidade de ocorrência de falha, segundo a magnitude da tensão (Sxx e Szz) obtida e comparada com a tensão do revestimento, tanto na superfície como na interface. A tabela 13 é elaborada apartir da análise da dureza dos materiais.

Tabela 13 - Possibilidade de falha nas combinações revestimento/substrato segundo a dureza dos materiais

Tensão de Escoamento do Substrato									
800 MPa	NF	F2	F1	F1	F1	F1	F1	NF	NF
700 MPa	NF	NF	F1	F1	F1	F1	F3	NF	NF
600 MPa	NF	NF	F1	F1	F1	F1	NF	NF	NF
500 MPa	NF	NF	F1	F1	F1	NF	NF	NF	NF
400 MPa	NF	NF	F1	F1	NF	NF	NF	NF	NF
300 MPa	NF	F1	F1	F1	F4	F4	F4	F3	F3
	1000 MPa	2000 MPa	3000 MPa	4000 MPa	5000 MPa	6000 MPa	7000 MPa	8000 MPa	9000 MPa

Tensão de escoamento do revestimento

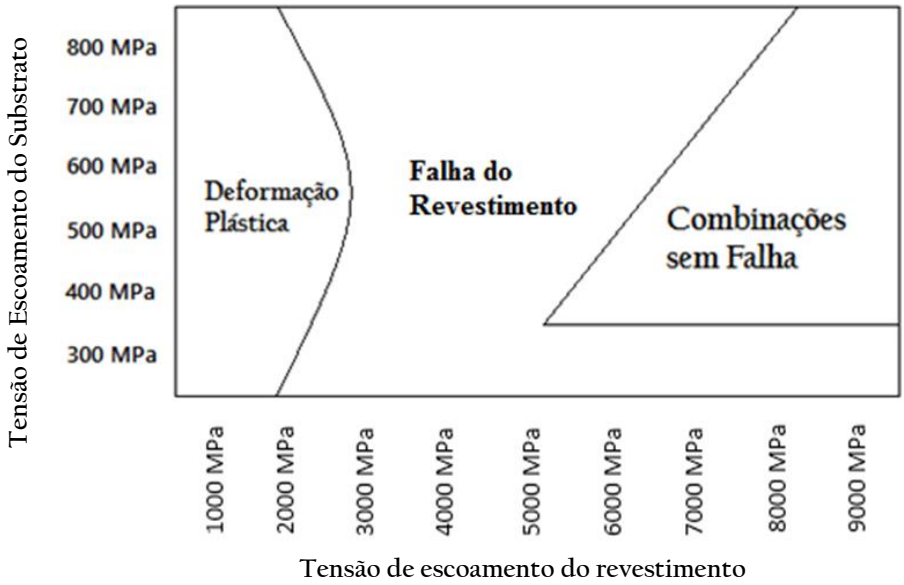
NF = tensão Sxx na superfície que não atinge a tensão do revestimento
F1 = tensão Sxx na superfície que atinge a tensão do revestimento
F2 = tensão Sxx na interface que atinge a tensão do revestimento
F3 = tensão Szz na superfície que atinge a tensão do revestimento
F4 = tensão Szz na interface que atinge a tensão do revestimento

É possível identificar que nas combinações com revestimentos de baixa tensão de escoamento (1000 MPa e 2000 MPa), é comum que as tensões Sxx e Szz não atinjam a tensão de escoamento do revestimento. Da mesma forma, é interessante observar que os revestimentos na faixa de

3000 MPa – 4000 MPa de tensão de escoamento são aqueles que levam à obtenção unicamente de tensões Sxx que ultrapassam o valor da tensão de escoamento do revestimento, enquanto que os revestimentos com altos valores de tensão de escoamento (mais duros) não levam, em alta porcentagem à obtenção de tensões Sxx que atinjam os valores da tensão do revestimento. Igualmente, dos resultados da tabela é possível identificar que a falha na interface devida à tensão Sxx se apresenta na combinação de substrato de alta tensão de escoamento, e revestimento com baixa tensão de escoamento. Assim como a falha na interface devido à tensão Szz, apresenta-se nas combinações entre o substrato de menor tensão de escoamento e revestimentos com tensão de escoamento intermediárias.

Um possível mapa dos modos de falha, considerando o comportamento das tensões Sxx e Szz, poderia ser aquele que se apresenta na figura 74. Ao fazer comparação do mapa de falhas (figura 5) com os resultados da figura 74, é possível identificar que para as combinações com os revestimentos mais dúcteis (menor tensão de escoamento) o fato de não obter falha na superfície dos sistemas, sugere uma alta deformação plástica do conjunto. Esta condição coincide com a região de deformação plástica do mapa elaborado por Bull. Igualmente, para os resultados, identifica-se que na faixa da tensão de escoamento de 3000 MPa até 6000 MPa, existe um conjunto de combinações, principalmente com os substratos de maior tensão de escoamento, que levam ao surgimento de falha na superfície. Esta região intermediária igualmente coincide com a região intermediária do mapa de Bull, na qual se estabelece falha na interface e fratura na superfície do revestimento. Porém, no caso das combinações com revestimentos de alta tensão de escoamento (alta dureza) as combinações não apresentaram condições de atingir a tensão do revestimento, sugerindo a diferença do mapa de Bull a opção de uma região sem falhas.

Figura 74 – Mapa de representação semi quantitativa dos modos de falha segundo a dureza dos materiais

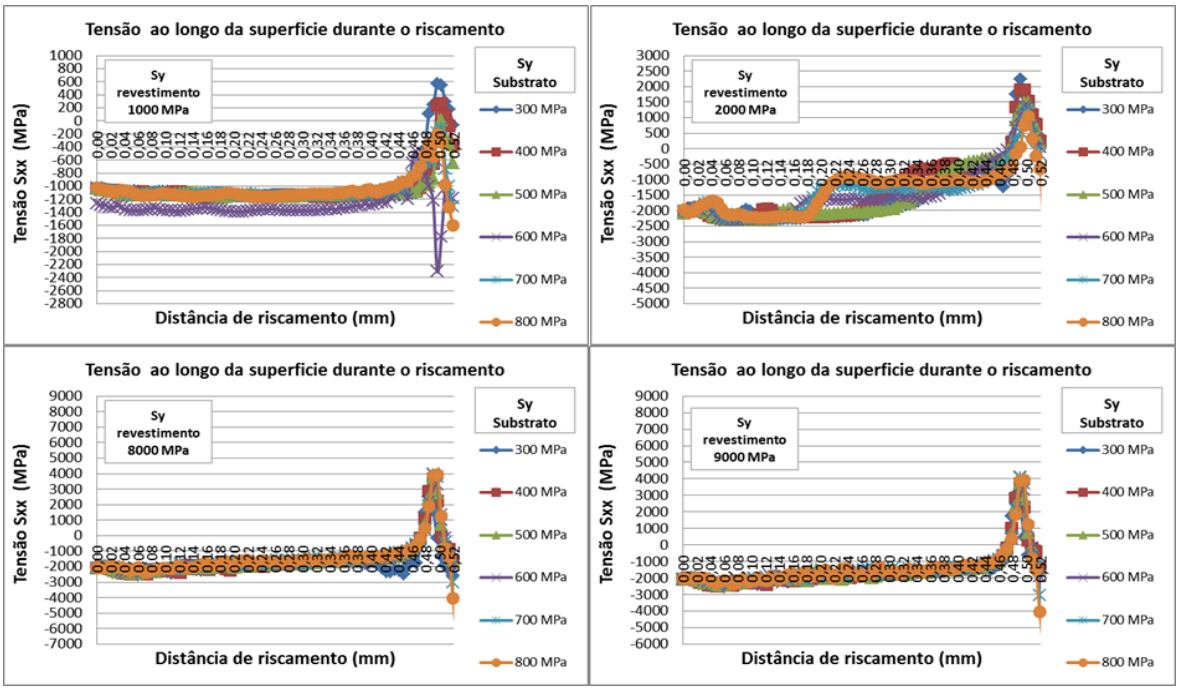


Fonte: O autor

Como é observado, o resultado da simulação computacional por elementos finitos considerando só a dureza como variável de estudo, leva à obtenção de um mapa que, embora coincide com algumas regiões, é diferente ao mapa estabelecido na literatura por Bull [15, 16]. O mapa da figura 74 permite estabelecer combinações entre valores de tensão de escoamento do revestimento e do substrato que levam à obtenção da condição de falha ou não, mas essas combinações entre o revestimentos e substratos, parecem precisar de faixas de tensão de escoamento menores tanto para o substrato como para o revestimento para a obtenção de valores que permitam a confecção de mapas em maior detalhe dos modos de falha.

Uma variável que segundo os resultados tem um papel de proteção dos sistemas revestidos é a tensão residual no revestimento. Desta forma, nas figuras 75 a 78 apresentam-se os resultados de simulações complementares em função da tensão Sxx na superfície e na interface, assim como Szz na superfície e na interface, respectivamente.

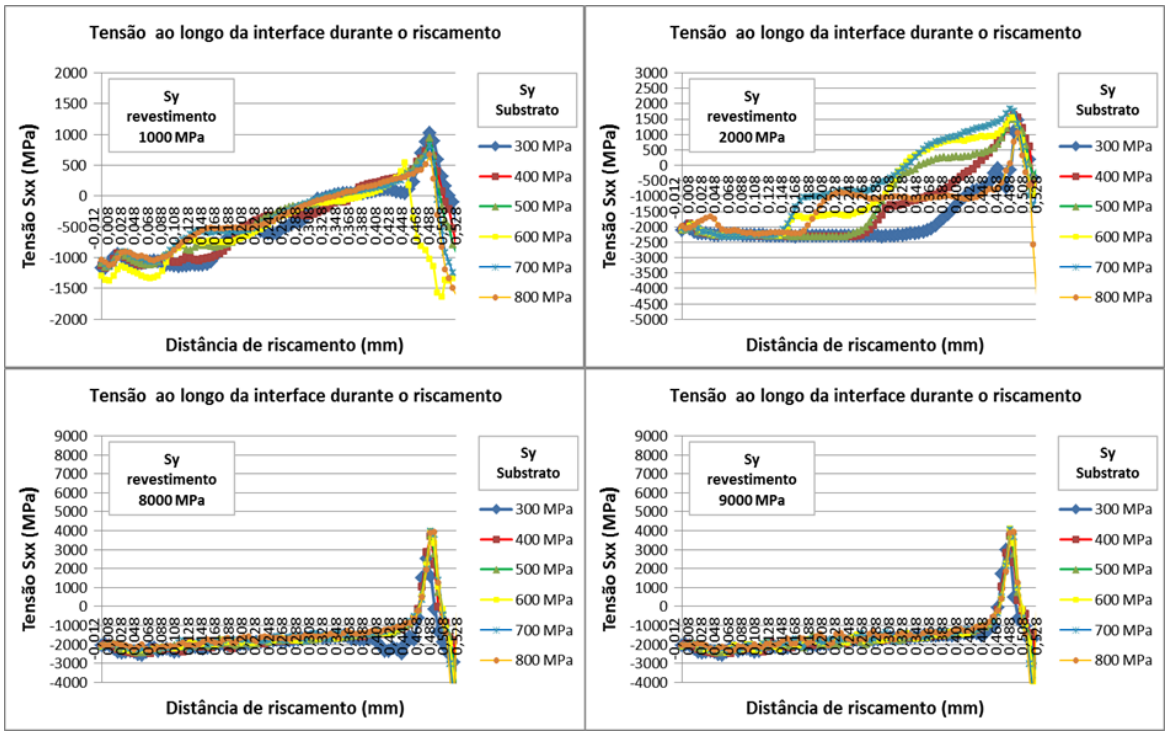
Figura 75 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da superfície dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa



Fonte: O autor

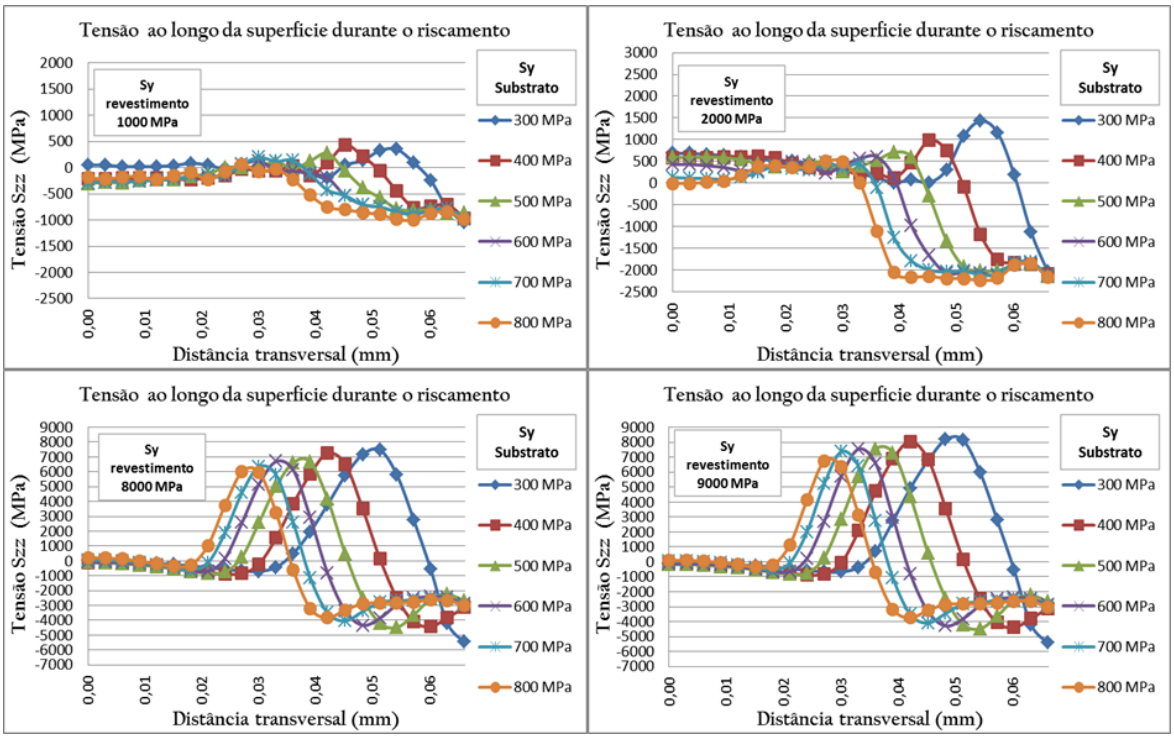
Das figuras 75 e 76 é possível identificar que unicamente na combinação revestimento Sy=2000 MPa e substrato Sy=300 MPa é obtido valor de tensão Sxx que ultrapassa o valor da tensão do revestimento na superfície. Similarmente, unicamente a combinação revestimento Sy=1000 MPa e substrato Sy=300 MPa atinge o valor da tensão do revestimento na interface. No caso da tensão Szz das figuras 77 e 78 observa-se que em nenhuma das combinações revestimento/substrato na interface do sistema são atingidos valores da ordem da tensão de escoamento do revestimento.

Figura 76 - Comportamento da tensão Sxx ao longo da interface dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa



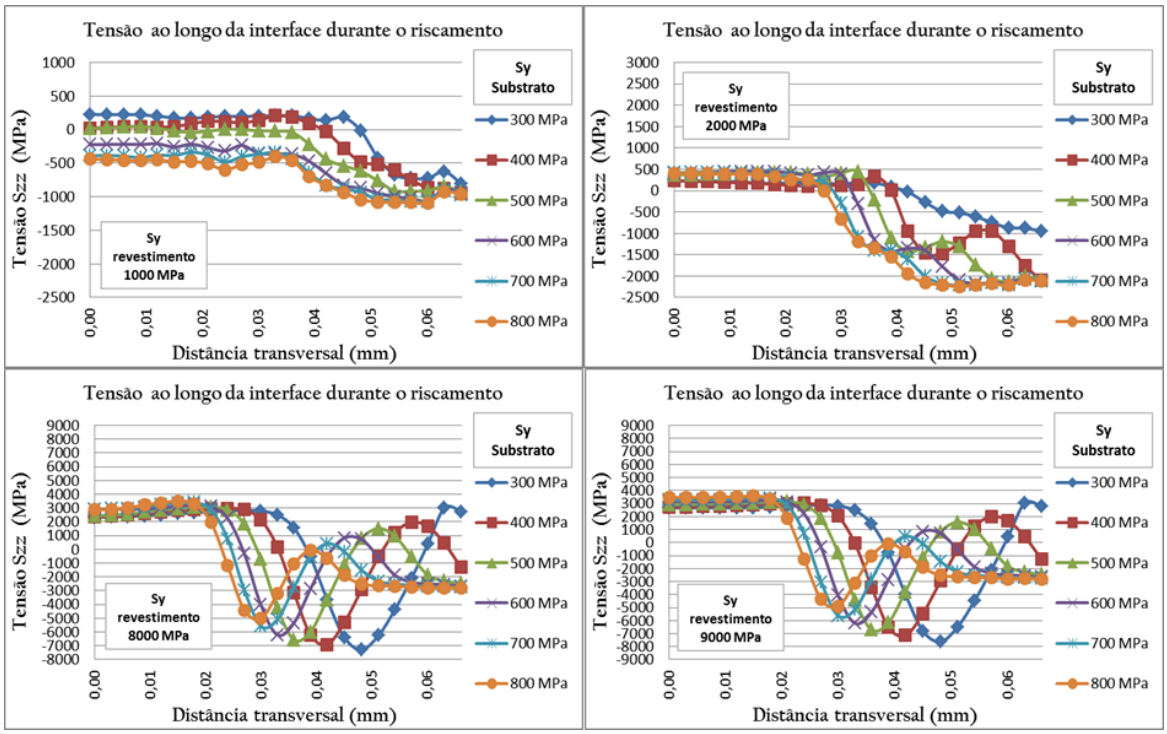
Fonte: O autor

Figura 77 - Comportamento da tensão Szz ao longo da superfície dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa



Fonte: O autor

Figura 78 - Comportamento da tensão Szz ao longo da interface dos sistemas revestidos com tensão residual de -3GPa



Fonte: O autor

Desta forma, é possível a tabulação (tabela 14) e elaboração do mapa da figura 79 para entender o efeito da tensão residual no comportamento das tensões Sxx e Szz.

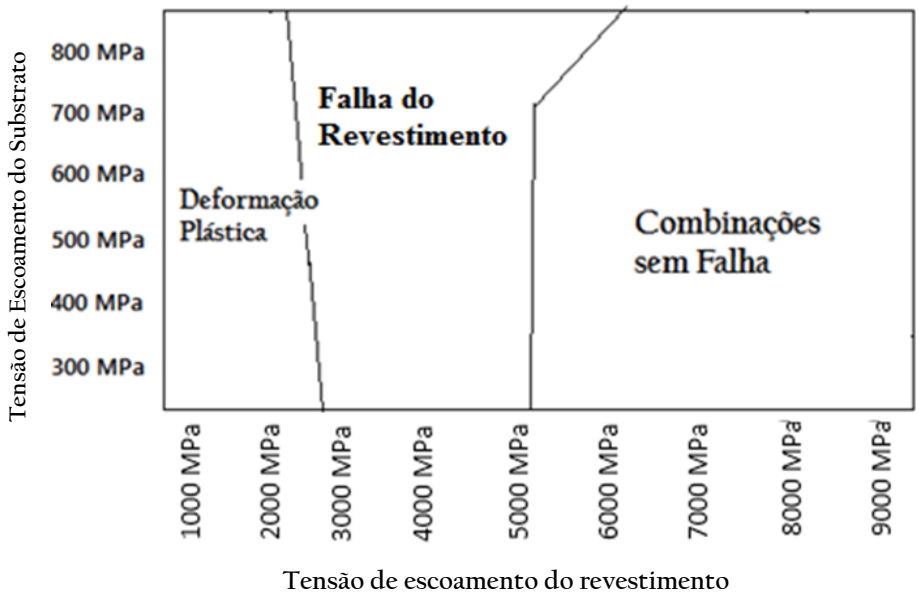
Tabela 14 - Possibilidade de falha nas combinações revestimento/substrato segundo a tensão residual -3GPa

Tensão de Escoamento do Substrato									
800 MPa	NF	NF	F1	F1	F1	NF	NF	NF	NF
700 MPa	NF	NF	F1	F1	F1	NF	NF	NF	NF
600 MPa	NF	NF	F1	F1	NF	NF	NF	NF	NF
500 MPa	NF	NF	F1	F1	NF	NF	NF	NF	NF
400 MPa	NF	NF	F1	F1	NF	NF	NF	NF	NF
300 MPa	F2	NF	F1	F1	NF	NF	NF	NF	NF
	1000 MPa	20000 MPa	3000 MPa	4000 MPa	5000 MPa	6000 MPa	7000 MPa	8000 MPa	9000 MPa

Tensão de escoamento do revestimento

NF = tensão Sxx na superfície que não atinge a tensão do revestimento
F1 = tensão Sxx na superfície que atinge a tensão do revestimento
F2 = tensão Sxx na interface que atinge a tensão do revestimento
F3 = tensão Szz na superfície que atinge a tensão do revestimento
F4 = tensão Szz na interface que atinge a tensão do revestimento

Figura 79 – Mapa de representação semi quantitativa dos modos de falha segundo o efeito da tensão residual



Fonte: O autor

Como argumentado por Bull (2001) [79], o ensaio de riscamento tem sido utilizado para avaliar a adesão de revestimentos finos e duros. Trata-se de uma ferramenta útil para o desenvolvimento de revestimentos de alta qualidade, mas o ensaio tem influência de um alto número de variáveis, que experimentalmente não são totalmente medidas nem avaliadas. Este número de variáveis leva a uma grande dificuldade de obter mapas quantitativos com informação exata para estabelecer as fronteiras nos modos de falha.

Ao analisar os mapas das figuras 74 e 79 é possível estabelecer que, assim como nos mapas de Bull, existe uma região sem falha dos sistemas revestidos, associada possivelmente à deformação plástica do conjunto. Esta região, apresenta-se nas combinações com revestimentos de baixa tensão de escoamento. Da mesma forma, a existência de uma região de falha dos sistemas nos casos em que os revestimentos tem tensão de escoamento com valores intermediários. Dos mapas obtidos, é igualmente possível identificar a influência da tensão residual (variável de estudo) já que se evidencia a mudança nas fronteiras das regiões obtidas. Deferente do mapa da figura 74, no mapa da figura 79 é importante estabelecer a importância e proteção da tensão residual no revestimento, especialmente nas combinações com revestimentos com tensão de escoamento alta e substrato com tensão de escoamento baixa, já que em essas combinações não é atingida falha.

Os resultados obtidos utilizando modelos de simulação, através dos elementos finitos, tem facilitado o estudo do comportamento das tensões Sxx e Szz ao longo do ensaio de riscamento. Neste estudo, a pesar da complexidade da reprodução dos fenômenos presentes no ensaio de riscamento, foram obtidos resultados em função das tensões normais Sxx e Szz que tem permitido a elaboração de mapas semi quantitativos de falha. A importância destes novos mapas, centra-se no entendimento do efeito de variáveis isoladas como a dureza, traduzida como tensão de escoamento dos materiais, assim como o efeito que tem a tensão residual no revestimento, na obtenção de regiões de deformação plástica e de falha, assim como a mudança nas fronteiras dessas regiões.

Porém, a confecção de mapas totalmente exatos ou suficientemente quantitativos para indicar, de forma segura as fronteiras nos modos de falha, sugere a necessidade de considerar um maior número de variáveis como por exemplo microestrutura, anisotropia, tamanhos de grão, defeitos internos, rugosidade, tensão residual, atrito, entre outros, em forma conjugada, e não simplesmente analise de variáveis isoladas como apresenta se na literatura.

6. CONCLUSÕES

No presente estudo foram desenvolvidos modelos de simulação pelo método dos elementos finitos para análise do comportamento das tensões Sxx e Szz, em função de variáveis intrínsecas associadas às propriedades mecânicas dos materiais e tensão residual, assim como a fatores extrínsecos como espessura e coeficiente de atrito. Igualmente foi estruturado e analisado mapas com informação de combinações revestimentos/substratos e sua condição de falha.

- Os resultados obtidos considerando a influência da dureza, traduzida como tensão de escoamento, indicaram que para um ensaio de riscamento ao longo de 0,5 mm sob carga de 2 N, as combinações de revestimento com tensão de escoamento baixa (1000 MPa e 2000 MPa) levam a deformação plástica do conjunto sem experimentar tensões tão altas como a tensão de escoamento do revestimento. Da mesma forma, o aumento no valor da tensão de escoamento do revestimento leva a que seja reduzida a possibilidade de presença de trincas nos sistemas revestidos.

- O uso de tensão residual de -3 GPa no revestimento, não representa importância significativa para sistemas contendo revestimentos com baixo valor de tensão de escoamento (dúcteis), já que nessas condições são obtidos valores de tensão que sugerem a alta possiblidade de surgimento de trincas na superfície. Desta forma, a tensão residual tem grande importância na proteção à falha dos sistemas revestidos, em particular nos casos em que a tensão do revestimento é Sy≥5000MPa

- As análises considerando a espessura do revestimento indicaram, que o incremento na espessura não é um fator de proteção à falha para todas as combinações revestimentos/substratos. A importância no aumento na espessura é significativa para os revestimentos com resistência Sy≥5000MPa.

- O aumento na tensão residual do revestimento e o aumento da espessura são condições que favorecem a resistência dos sistemas revestidos, mas parece ser que o aumento da espessura em 4 µm é um fator de maior grau de proteção a trincas que a tensão residual de -3GPa.

- O efeito do coeficiente de atrito no contato entre o indentador e a superfície do sistema revestido, não parece ser de alta incidência na tensão obtida nos sistemas considerado combinações com revestimentos de baixa tensão de escoamento (dúcteis), mas para os sistemas com revestimentos mais resistentes (Sy ≥5000 MPa) o atrito leva à obtenção de valores de tensão (Sxx ou Szz) suficientemente altos na maioria das combinações com os substratos, sendo esta, a variável de estudo que leva ao maior número de vezes que é atingido o valor da tensão de escoamento do revestimento.

- A rugosidade é um parâmetro que não tem sido ainda devidamente explorado na literatura. Dos resultados obtidos, é possível identificar que os valores de tensão Sxx, responsáveis por possíveis falhas no interior do sulco de riscamento tem relação direta com esta variável. Desta forma, ao aumentar a rugosidade do sistema aumenta a possibilidade de ultrapassar os valores da tensão dos revestimentos na superfície e na interface do conjunto.

- A espessura do revestimento conjugada com a rugosidade são parâmetros muito importantes, já que baixas espessuras permitem a obtenção de valores de tensão que ultrapassam o valor da tensão de escoamento do revestimento, sugerindo geração de trincas. Os altos valores de tensão (Sxx, Szz) presentes nos sistemas considerando rugosidade podem ser consequência dos contínuos contatos com os picos da superfície.

- Os resultados de simulação permitiram evidenciar a propagação de uma trincas durante dobramento do conjunto na parte frontal do contato com o indentador, assim como a total propagação da mesma na parte de alta tensão trativa na região traseira do contato com o indentador, obtendo para as condições deste estudo trincas de caráter dúctil.

- A importância do novos mapas de falha obtidos no estudo, centra-se no entendimento do efeito de variáveis isoladas como a dureza, traduzida como tensão de escoamento dos materiais, assim como o efeito que tem a tensão residual no revestimento, na obtenção de regiões de deformação plástica e de falha, assim como a mudança nas fronteiras dessas regiões.

- Pela complexidade do número de variáveis que afetam o ensaio de riscamento, parece ser bastante improvável a obtenção de mapas de falha quantitativos a partir de analises experimentais. Igualmente, o uso da simulação numérica, pelo método dos elementos finitos, simulando unicamente as propriedades mecânicas dos materiais, ainda que facilita identificar

as combinações de valores de tensão de escoamento entre revestimentos e substratos que podem induzir trincas nos sistemas, e identificar o efeito da tensão residual do revestimento, não permite a obtenção de dados totalmente confiáveis pela omissão da totalidade de variáveis e a dependência entre elas.

- A simulação numérica sugere que, a pesar de que a literatura utiliza frequentemente os mapas qualitativos de Bull para estudos dos sistemas revestidos, o fato de analisar unicamente a dureza dos materiais como variável isolada, não permite a reprodução de um mapa de falhas confiável.

REFERÊNCIAS

[1] Submaniam, C.; Strafford, K.N.; Wilks, T.P.; Ward, L.P. On the design of coating systems: metallurgical and other considerations. **J. Mat. Process. Technol.,** v. 56, p. 385-397, 1996.

[2] Holmberg, K.; Matthews, A.; Ronkainen H. Coatings tribology – contact mechanisms and surface design. **Tribology International.**, v. 31, n. 1-2, p. 107-120, 1998.

[3] Brotzen, F.R. Mechanical testing of thin films. **Int. Mat. Review.,** v. 39, p. 24-45, 1994.

[4] Begley, M.R.; Evans, A.G.; Hutchinson, J.W. Spherical Impression of Thin Elastic Films on Elastic-Plastic Substrates. **Int. J. Solids and Structures.,** v. 36, p. 2773-2788, 1999.

[5] Komvopoulos, K. Elastic-Plastic finite element analysis of indented layered media. **Trans. of the ASME-J.Tribology., v.** 111, p.430-439, 1998.

[6] Djabella, H.; Arnell, R.D. Finite element analysis of the contact stresses in an elastic coating on an elastic substrate. **Thin Solid Films.,** v. 213, p. 205-219, 1992.

[7] _____ . Finite element analysis of the contact stresses in elastic coating/substrate under normal and tangential load. **Thin Solid Films.,** v. 223, p. 87-97, 1993.

[8] Souza, R.M. **Finite element modeling of contact stresses during the indentation of wear resistant coatings on soft substrates**. 1999. PhD Thesis -Colorado School of Mines, 1999.

[9] Souza, R.M.; Mustoe, G.G.W.; Moore, J.J. Finite Element modeling of the stresses, fracture and delamination during the indentation of hard elastic films on elastic-plastic soft substrate. **Thin Solid Films.,** v. 392, p. 65-74, 2001.

[10] Souza, R.M.; Sinatora, A.; Mustoe, G.G.W.; Moore J.J. Numerical and experimental study of the circular cracks observed at the contact edges of the indentations of coated systems with soft substrates. **Wear.,** v. 251, p. 1337-1346, 2001.

[11] Pérez R, E.A.; Souza, R.M. Finite element analysis on the effect of indenter diameter and load on the contact stresses during indentation of coated systems. **Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials**. v.20–21, p. 763, 2004.

[12] _____. Numerical and experimental analyses on the contact stresses developed during single and successive indentations of coated systems. **Surface & Coatings Technology.,** v. 188–189, p. 572–580, 2004.

[13] Piana, L.A.; Pérez R, E.A.; Souza, R.M.; Kunrath, A.O.; Strohaecker, T.R. Numerical and experimental analyses on the indentation of coated systems with substrates with different mechanical properties. **Thin Solid Films.,** v. 491 p. 197 – 203, 2005.

[14] Pérez R, E.A. **Estudo das tensões de contato durante sucessivas indentações de sistemas contendo filmes resistentes ao desgaste e substratos com diferentes propriedades mecânicas.** Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

[15] Bull, S.J.; Failure modes in scratch adhesion testing. **Surf. Coat. Technol.,** v. 50 p. 25-32, 1991.

[16] Bull, S.J.; Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test. **Tribology International.,** v. 30, n. 7, p. 491-498, 1997.

[17] Bull, S.J.; Berasetegui, E.G. An overview of the potential of quantitative coating adhesion measurement by scratch testing **Tribology International**, v. 39, p. 99–114, 2006.

[18] Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S. A model for stresses, crack generation and fracture toughness calculation in scratched TiN-coated steel surfaces. **Wear.,** v. 254, p. 278–291, 2003.

[19] Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Ronkainen, H Wallin, K. Tribological analysis of fracture conditions in thin surface coatings by 3D FEM modelling and stress simulations. Tribology International., v. 38, p. 1035–1049, 2005.

[20] Holmberg, K.; Laukkanen, A.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S.; Koskinen, J. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface Part I: Modelling stresses and strains. **Surface & Coatings Technology.,** v. 200 p. 3793 – 3809, 2006.

[21] _____ . Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface Part II: Material deformations, influence of coating thickness and Young's modulus. **Surface & Coatings Technology.,** v. 200, p. 3810 – 3823, 2006.

[22] Laukkanen, A.; Holmberg, K.; Koskinen, J.; Ronkainen, H.; Wallin, K.; Varjus, S. Tribological contact analysis of a rigid ball sliding on a hard coated surface, Part III: Fracture toughness calculation and influence of residual stresses. **Surface & Coatings Technology.,** v. 200, p. 3824 – 3844, 2006.

[23] Holmberg, K.; Ronkainen, H Laukkanen, A.; Wallin, K.; Erdemir, A.; Eryilmaz, O. Tribological analysis of TiN and DLC coated contacts by 3D FEM modelling and stress simulation. **Wear.,** v.264, p. 877–884, 2008.

[24] Holmberg, K.; Ronkainen, H Laukkanen, A.; Wallin, K.; Hogmark, S.; Jacobson, S.; Wiklund, U.; Souza, R.M.; Stahle, P. Residual stresses in TiN, DLC and MoS2 coated surfaces with regard to their tribological fracture behavior. **Wear.,** v. 267, p. 2142–2156, 2009.

[25] Zum Gahr, K. **Microstructure and Wear of Materials**. Tribology Series, Amsterdam 1987

[26] Hutchings, I.M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** Edward Arnold, London, 1992

[27] Rabinowicz, E. **Friction and Wear Materials**. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1995

[28] Pugh, B. **Friction and Wear**. Butterworth and Co. Ltd, London, 1973

[29] Holmberg, K. Reliability aspects of tribology. **Tribology International.,** v. 34, p. 801–808, 2001.

[30] Holmberg, K.; Ronkainen, H.; Matthews, A. Review Tribology of thin coatings. **Ceramics International.,** v. 26, p. 787-795, 2000.

[31] Xiaoyu, J.; Lauke, B.; Schueller T. Frictional contact analysis of scratch test for elastic and elastic–plastic thin-coatingysubstrate materials. **Thin Solid Films.,** v. 414, p. 63-71, 2002

[32] Stratford, K.N.; Subramanian, C. Surface engineering: An enabling technology for manufacturing industry. **Journal of Materials Processing Technology.,** v. 53, p. 393-403, 1995.

[33] Hogmark, S.; Jacobson, S.; Larsson, M. Design and evaluation of tribological coatings. **Wear.,** v. 246, p. 20–33, 2000.

[34] Machunze, R.; Janssen G.C.A.M. Stress and strain in titanium nitride thin films. **Thin Solid Films.,** v. 517, p. 5888–5893, 2009.

[35] Oettel, H.; Wiedemann, R. Preiβler, S. Residual stresses in nitride hard coatings prepared by magnetron sputtering and arc evaporation. **Surface and Coatings Technology.,** v. 74-75, p. 273-278, 1995.

[36] Oettel, H.; Wiedemann, R. Residual stresses in PVD hard coatings. **Surface & Coatings Technology.,** v. 76-77, p. 265-273, 1995

[37] Perry, A. J. Scratch adhesion testing of hard coatings. **Thin Solid Films.,** v. 107, p. 167-180, 1983.

[38] Xie, Y.; Hawthorne, H.M. A model for compressive coatings stresses in the scratch adhesion test. **Surface & Coatings Technology.,** v. 141, p. 15-25, 2001.

[39] Swain, M.V. Mechanical property characterization of small volumes of brittle materials with spherical tipped indenters, **Mat, Sci, Eng.,** v. A253, p. 160-166, 1998

[40] Kataria, S.; Kumar, N.; Dash, S.; Ramaseshan, R.; Tyagi, A.K. Evolution of deformation and friction during multimode scratch test on TiN coated D9 steel. **Surface & Coatings Technology.,** v. 205, p. 922–927, 2010.

[41] Jacobs, R. et al. A certified reference material for the scratch test. **Surface and Coatings Technology.**, v. 174 –175, p. 1008–1013, 2003.

[42] Kamminga, J.D.; Alkemade, P.F.A.; Janssen, G.C.A.M. Scratch test analysis of coated and uncoated nitrided steel. **Surface and Coatings Technology.**, v. 177 –178 p. 284–288, 2004.

[43] Li, J.; Beres. W. Three-dimensional finite element modelling of the scratch test for a TiN coated titanium alloy substrate. **Wear.,** v. 260, p. 1232–1242, 2006.

[44] Lu, P.; Xiao, X.; Lukitsch, M.; Sachdev, A.; Chou, Y.K. Interface characterizations of diamond-coated tools by scratch testing and simulations. **Surface & Coatings Technology.**, v. 206, p. 1860–1866, 2011.

[45] Nieminen, I.; Andersson, P.; Holmberg, K. Friction measurement by using a scratch test method. **Wear**., v. 130, p. 167 – 178, 1989.

[46] Ollendorf, H.; Schneider, D. A comparative study of adhesion test methods for hard coatings. **Surface and Coatings Technology.,** v. 113, p. 86–102, 1999.

[47] Randall, N.X.; Favaro, G.; Frankel, C.H. The effect of intrinsic parameters on the critical load as measured with the scratch test method. **Surface and Coatings Technology.**, v. 137 p. 146-151, 2001.

[48] Sander, T.; Tremmel, S.; Wartzack, S. A modified scratch test for the mechanical characterization of scratch resistance and adhesion of thin hard coatings on soft substrates. **Surface & Coatings Technology**., v. 206, p. 1873–1878, 2011.

[49] Stallard, J.; Poulat, S.; Teer, D.G. The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester. **Tribology International.**, v. 39, p. 159–166, 2006.

[50] Sveen, S.; Andersson, J.M.; M'Saoubi, R.; Olsson, M. Scratch adhesion characteristics of PVD TiAlN deposited on high speed steel, cemented carbide and PCBN substrates. **Wear.**, v. 308 p. 133–141, 2013.

[51] Larsson, Per-Lennart. On the correlation of scratch testing using separated elastoplastic and rigid plastic descriptions of the representative stress. **Materials and Design.**, v. 43, p. 153–160, 2013.

[52] ASTM C1624/05: Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing, 2010.

[53] Wredenberg, F.; Larsson, Per-Lennart. On the stress distribution at scratching of thin film structures. **J. Coat. Technol. Res.,** v.7, p. 623–635, 2010.

[54] Wredenberg, F.; Larsson, Per-Lennart. On the effect of substrate deformation at scratching of soft thin film composites. **International Journal of Mechanical Sciences.**, v. 52, p. 1008–1014, 2010.

[55] Ichimura, H.; Ishii, Y. Effects of indenter radius on the critical load in scratch testing. **Surface and Coatings Technology.,** v. 165, p. 1–7, 2003.

[56] Akono, A.T.; Ulm, F.J. Scratch test model for the determination of fracture toughness. **Engineering Fracture Mechanics**., v. 78, p. 334–342, 2011.

[57] Borrero-López, O.; Hoffman, M.; Bendavid, A.; Martin, P.J. The use of the scratch test to measure the fracture strength of brittle thin films. **Thin Solid Films.,** v. 518, p. 4911–4917, 2010.

[58] Beake, B.D.; Vishnyakov, V.M.; Harris, A.J. Relationship between mechanical properties of thin nitride-based films and their behaviour in nano-scratch tests. **Tribology International.,** v. 44, p. 468–475, 2011.

[59] Xie, Y.; Hawthorne, H.M. Effect of contact geometry on the failure modes of thin coatings in the scratch adhesion test. **Surface and Coatings Technology.,** v. 155, p. 121–129, 2002.

[60] Fang L. et al. FEM computation of groove ridge and Monte Carlo simulation in two-body abrasive wear. **Wear.,** v. 258, p. 265–274, 2005.

[61] Jiang, H.; Browning, R.; Sue, H.J. Understanding of scratch-induced damage mechanisms in polymers. **Polymer.,** v. 50 p. 4056–4065, 2009.

[62] Lu, P.; Xiao, X.; Lukitsch, M.; Sachdev, A.; Chou, Y.K. Interface characterizations of diamond-coated tools by scratch testing and simulations. **Surface & Coatings Technology.**, v. 206 p. 1860–1866, 2011.

[63] Ranjbar-Far; Absi, J.; Mariaux, G.; Dubois, F. Simulation of the effect of material properties and interface roughness on the stress distribution in thermal barrier coatings using finite element method. **Materials and Design**., v. 31 p. 772–781, 2010.

[64] Tkaya M.B. et al. The effect of damage in the numerical simulation of a scratch test. **Wear.,** v. 263, p. 1533–1539, 2007.

[65] Bucaille, J.L.; Felder, E.; Hochstetter, G. Mechanical analysis of the scratch test on elastic and perfectly plastic materials with the three-dimensional finite element modeling. **Wear.,** v. 249, p. 422–432, 2001.

[66] Bucaille, J.L.; Gauthier, C.; Felder, E.; Schirrer, R. The influence of strain hardening of polymers on the piling-up phenomenon in scratch tests: Experiments and numerical modelling. **Wear.,** v. 260 p. 803–814, 2006.

[67] Harlin, P., Bexell, U., Olsson, M. Influence of surface topography of arc-deposited TiN and sputter-deposited WC/C coatings on the initial material transfer tendency and friction characteristics under dry sliding contact conditions, **Surface and Coatings Technology.,** v. 203, p. 1748-1755, 2009.

[68] Soroka, O.B. Evaluation of residual stresses in PVD-coatings. part 1. Review, **Strength of Materials**., v. 42, p. 287-296, 2010

[69] Hutchings, I. M. The contributions of David Tabor to the science of indentation hardness, **J. Mater. Res**., v. 24, p. 581-589, 2009

[70] Mahieu, S., Depla, D., De Gryse, R. Characterization of the hardness and the substrate fluxes during reactive magnetron sputtering of TiN, **Surface & Coatings Technology.**, v. 202, p. 2314-2318, 2008

[71] Wang, A.N., Yu, G.P, Huang, J.H. Fracture toughness measurement on TiN hard coatings using internal energy induced cracking, **Surface & Coatings Technology**., v. 239, p.20–27, 2014

[72] Wang, A.N., Huang, J.H., Hsiao, H.W., Yu, G.P., Chen, H. Residual stress measurement on TiN thin films by combing nanoindentation and average X-ray strain (AXS) method, **Surface & Coatings Technology.**, v. 280, p. 43-49, 2015

[73] Ma, C.H., Huang, J.H., Chen, H. Nanohardness of nanocrystalline TiN thin films, **Surface & Coatings Technology**., v.200, p.3868-3875, 2006

[74] SIMULIA, Abaqus 6.12, User´s Manual

[75] Ali, M., Hamzah, E., Qazi, I.A., Toff, M.R.M. Effect of cathodic arc PVD parameters on roughness of TiN coating on steel substrate, **Current Applied Physics.,** v. 10, p.471–474, 2010

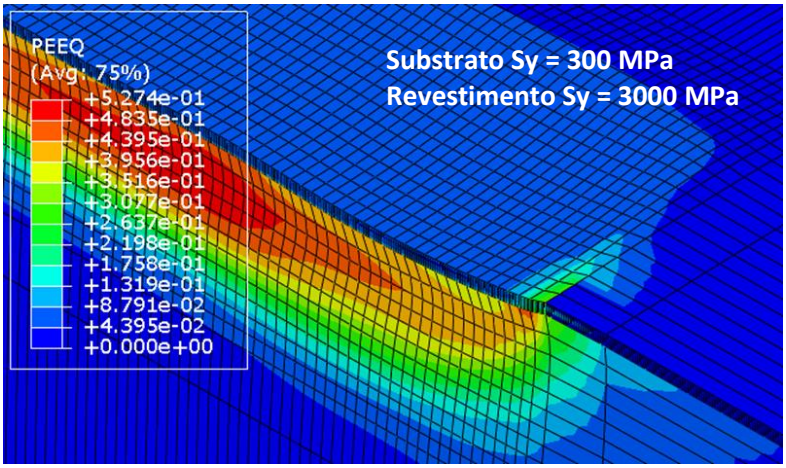
[76] Huang, R.X., Qib, X.B., Sunb, P., Wang, Z.C., Wu, C. Influence of substrate roughness on structure and mechanical property of TiAlN coating fabricated by cathodic arc evaporation, **Physics Procedia.,** v. 18, p.60–167, 2011

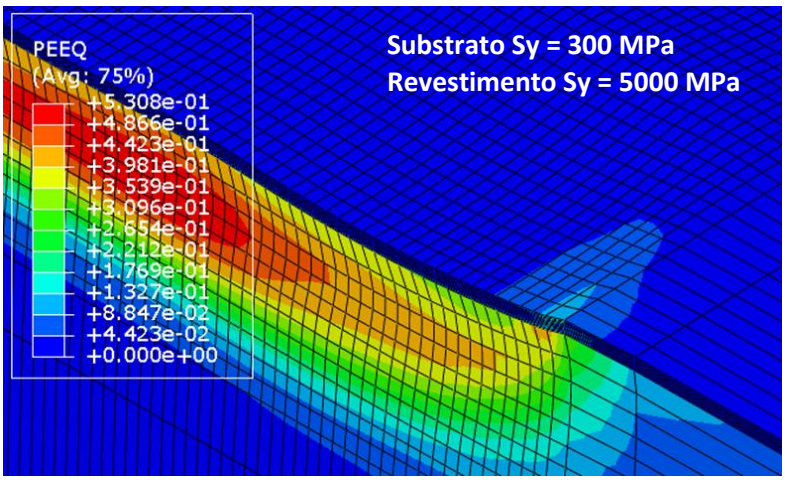
[77] Gan, L., Ben-Nissan, B., Ben-David, A., Modelling and finite element analysis of ultra-microhardness indentation of thin films, **Thin Solid Films,** v. 290-291, p.362-366, 1996

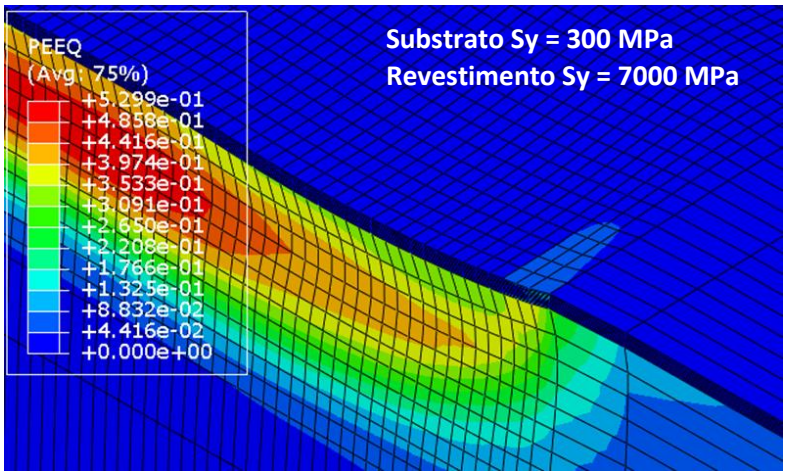
[78] Pérez Ruiz, E.A, Negrín Hernández L.I, Martins de Souza, Roberto. Estudio del comportamiento mecánico de un Sistema recubierto mediante simulación computacional del ensayo de rayado, **Ingeniería Mecánica**, v.18, n.2, p.80-86, 2015

[79] Bull, S.J. Can the scratch adhesion test ever be quantitative?, **Adhesion Mearurement of Films and Coatings**, v.2 p.107-130, 2001

ANEXO A – MAPA DA DISTRIBUIÇÃO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO.







TRABALHOS DERIVADOS DO PROJETO

ARTIGOS EM REVISTA

EDUARDO-A. PÉREZ-RUIZ, LUIS-IVÁN NEGRÍN-HERNÁNDEZ, ROBERTO MARTINS-DE-SOUZA "Influencia del espesor y la rugosidad interfacial en los esfuerzos longitudinales en un sistema recubierto" ***Ingeniería Mecánica***, ISSN: 1815-5944, Vol. 19, N.2, (2016) p. 103-109

EDUARDO-A. PÉREZ-RUIZ, LUIS-IVÁN NEGRÍN-HERNÁNDEZ, ROBERTO MARTINS-DE-SOUZA "Estudio del comportamiento mecánico de un sistema recubierto mediante simulación computacional del ensayo de rayado", ***Ingeniería Mecánica***, ISSN: 1815-5944, Vol. 18, N.2, (2015) p. 80-86

EDUARDO A. PÉREZ-RUIZ, GERMAN E. MUÑOZ-TOVAR, ROBERTO M. SOUZA, LUIS-IVAN NEGRÍN-HERNÁNDEZ. "Simulación de un sistema tribológico formado por sustrato y recubrimiento rugoso usando métodos numéricos", ***Ingeniería Mecánica***, ISSN: 1815-5944, Vol. 17, N.1, (2014) p. 48-56

TRABALHOS EM CONGRESSOS

EDUARDO A. PÉREZ-RUIZ, GERMAN E. MUÑOZ T., ROBERTO M. SOUZA, "FEM Simulation on the Stresses Behavior on the Coated System Roughness" ***First International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology - AMDM 2012***

E.A. PÉREZ R, L.I. NEGRÍN, R.M. SOUZA. "Numerical Analyses on the behavior stress during successive scratch on a coated system", ***Third International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology - AMDM 2016***

E. PÉREZ R., LUIS O. TAFUR., R.M. SOUZA., "Simulación (MEF) del deslizamiento de una partícula sobre una superficie de ingeniería - efecto de la forma", ***Congreso Nacional de Ingeniería Aplicada CNIA2012***, **ISSN: 2322-9632** Ibagué, Colombia. http://issuu.com/logistica2010/docs/memorias_cnia

E.A. PÉREZ R., G. MUÑOZ T., R.M. SOUZA., "Modelo de simulación (MEF) del fenómeno de desgaste en acero 1045", ***Congreso Nacional de Ingeniería Aplicada CNIA2012***, ISSN: 2322-9632 Ibagué, Colombia. http://issuu.com/logistica2010/docs/memorias_cnia

E.A. PÉREZ R., C.A. PARRA., R.M. SOUZA., "Simulación del efecto de la fricción en el deslizamiento de una partícula", ***Congreso Nacional de Ingeniería Aplicada CNIA2012***, ISSN: 2322-9632 Ibagué, Colombia. http://issuu.com/logistica2010/docs/memorias_cnia