

As membranas têxteis são utilizadas para coberturas e fechamentos, em estruturas leves e de grande porte, como tendas, estruturas de apoio aéreo, estádios e telhados. Sua utilização pode ser considerada sustentável, pois possibilita a execução de estruturas adaptáveis, flexíveis, leves, que fazem uso de iluminação e ventilação naturais, e abertas de tal forma que não interferem com a continuidade do local. Foram realizados ensaios de tração biaxial com corpos-de-prova cruciformes, com diferentes razões de carregamento, nos sentidos do urdume e da trama, em membranas de tecido de fibra de poliéster e filme de lona de polietileno. Foram aplicadas NURBS para fornecer uma superfície de resposta suave para o comportamento do material da membrana e os resultados experimentais e numéricos foram comparados. As conclusões deste trabalho podem auxiliar no entendimento do comportamento mecânico destes materiais.

Orientadora: Dra. Marianna Ansiliero de Oliveira
Coelho

Joinville, 2019

ANO
2019



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CAROLINA MACIEL SUZIN | ANÁLISE DE TRAÇÃO BIAXIAL EM MEMBRANAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE DE TRAÇÃO BIAXIAL EM MEMBRANAS

CAROLINA MACIEL SUZIN

JOINVILLE, 2019

CAROLINA MACIEL SUZIN

ANÁLISE DE TRAÇÃO BIAXIAL EM MEMBRANAS

JOINVILLE
2019

CAROLINA MACIEL SUZIN

ANÁLISE DE TRAÇÃO BIAXIAL EM MEMBRANAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof. Dra. Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho

JOINVILLE
2019

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Suzin, Carolina Maciel
ANÁLISE DE TRAÇÃO BIAXIAL EM MEMBRANAS /
Carolina Maciel Suzin. -- 2019.
83 p.

Orientador: Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação , Joinville, 2019.

1. Membranas. 2. Tração Biaxial. 3. Relação Tensão versus
Deformação. 4. Construção Sustentável.. I. Coelho, Marianna
Ansilio de Oliveira . II. Universidade do Estado de Santa Catarina,
Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação . III.
Título.

Análise de Tração Biaxial em Membranas

por

Carolina Maciel Suzin

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL

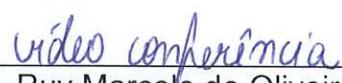
Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA CIVIL
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

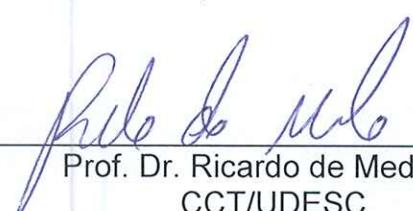
Banca Examinadora:



Prof. Dra. Marianna Ansiliero de
Oliveira Coelho
CCT/UDESC (Orientadora/Presidente)



Prof. Dr. Ruy Marcelo de Oliveira Pauletti
USP



Prof. Dr. Ricardo de Medeiros
CCT/UDESC

Joinville, SC, 29 de maio de 2019.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que esteve ao meu lado, guiando-me em todos os momentos dessa jornada.

À minha orientadora, Marianna Ansiliero de Oliveira Coelho, pela excelente consideração, orientação, conhecimentos compartilhados e amizade durante a elaboração desta pesquisa.

Aos alunos da UDESC Braion, Vitor e Gustavo, pelo auxílio e valiosas colaborações durante esta pesquisa.

Aos meus familiares, que me incentivaram e orientaram a vencer mais uma grande etapa. Sou eternamente agradecida pelo apoio incondicional, sem o qual não alcançaria meus êxitos.

Aos amigos, em especial Ana Flávia, Thamires e Fernanda, que compartilharam esse período comigo, pela amizade sincera, compreensão e gratidão que demonstraram.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa durante o período de realização deste mestrado (Código de Financiamento 001).

À FAPESC (2015TR482), CNPq (457486/2014-7) e Fundo Newton (EP/N002059/1), pelo apoio financeiro para esta pesquisa e para o projeto e execução da máquina de tração biaxial.

E a todos aqueles, que de maneira direta ou indireta, participaram da realização deste trabalho.

“A decisão mais difícil é a de agir, o resto é meramente obstinação. Você pode fazer qualquer coisa que decidir fazer. Você pode realizar mudanças e assumir o controle de sua vida.”

Amelia Earhart

RESUMO

Existe na construção civil uma busca constante por arquiteturas harmoniosas e otimização de materiais. Nesse cenário surgiu um composto têxtil, chamado de membrana têxtil, pois permanece tensionado e separa dois ambientes que se interagem. São amplamente utilizadas para coberturas e fechamentos. Para sua estabilização, as estruturas são pré-tensionadas por cabos ou pela pressão do ar. Em estruturas de membrana atuam apenas esforços de tração e por este motivo o ensaio de tração biaxial é necessário para a caracterização mecânica do material. A utilização de membranas em estruturas pode ser considerada uma construção sustentável, pois possibilita a execução de estruturas adaptáveis, flexíveis, leves, que fazem uso de iluminação e ventilação naturais, e abertas de tal forma que não interferem com a continuidade do local. O objetivo geral dessa pesquisa é analisar o comportamento mecânico de membranas quando submetidas à esforços de tração biaxiais. Foram realizados ensaios de tração biaxial com corpos-de-prova cruciformes, com diferentes razões de carregamento, nos sentidos do urdume e da trama, em membranas de tecido de fibra de poliéster e filme de lona de polietileno. O presente estudo utiliza a aplicação de NURBS para fornecer uma superfície de resposta suave para o comportamento do material da membrana. Foram comparados os resultados experimentais com resultados numéricos. Os resultados alcançados podem auxiliar no entendimento do comportamento mecânico destes materiais e serem utilizados como referência para o desenvolvimento de projetos estruturais.

Palavras-chave: Membranas. Tração Biaxial. Relação Tensão versus Deformação. Construção Sustentável.

ABSTRACT

There is a constant search in the construction industry for harmonious architectures and material optimization. In this scenario came a textile compound, called a fabric, that remains tensioned and separates two environments that interact. They are widely used for coverings and closures. For their stabilization, the structures are pre-tensioned by cables or by air pressure. In membrane structures only tensile forces act and for this reason the biaxial tensile test is necessary for the mechanical characterization of the material. The use of membranes in structures can be considered a sustainable construction because it allows the execution of adaptable, flexible, lightweight structures that make use of natural lighting and ventilation, and they are open in such a way that they do not interfere with the continuity of the place. The main objective of this research is to analyze the mechanical behavior of fabric membranes when submitted to biaxial tensile stresses. Biaxial tensile tests with cruciform samples with different loading ratios, will be performed on membranes of polyester fiber fabric and polyethylene film. The present study uses the application of NURBS to provide a response surface for the behavior of the membrane material. The experimental results were compared with numerical results. The results obtained can help in the understanding of the mechanical behavior of these materials and be used as reference for the development of structural projects.

Keywords: Membranes. Biaxial Tensile. Stress Strain Relation. Sustainable Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tendas	17
Figura 2: Complexo Olímpico, Munique	18
Figura 3: Tipos de Estruturas de Membranas	19
Figura 4: Memorial dos Povos, Belém do Pará – Estrutura na Forma de Paraboloides Hiperbólicos	19
Figura 5: Hajj Terminal, Arábia Saudita – Estrutura com Superfície Gerada.....	20
Figura 6: Laboratório M&G, Itália – Estrutura com Superfície Modificada.....	20
Figura 7: Pavilhão de Fiji, Osaka- Estrutura Inflada	21
Figura 8: Estádio de Vancouver, Canadá - Estrutura Suportada pelo Ar	21
Figura 9: Arranjos de fios em um tecido padrão de membranas estruturais	23
Figura 10: Curvas de Tensão x Deformação	25
Figura 11: Curva de Tensão versus Deformação.....	25
Figura 12: Geometria do Corpo-de-Prova Cruciforme.....	27
Figura 13: Gráfico da Relação tensão versus deformação de tração biaxial com diferentes razões de carregamento	28
Figura 14: Montagem experimental do método DIC	29
Figura 15: Representação Esquemática das Etapas da Metodologia.....	31
Figura 16: Representação Esquemática das Etapas do Ensaio Biaxial	33
Figura 17: Esquema dos Corpos-de-Prova Cruciformes	34
Figura 18: Símbolo Padrão das direções do Urdume e Trama	34
Figura 19: Equipamento de Tração Biaxial	35
Figura 20: Agarras de Fixação dos Corpos-de-Prova.....	35
Figura 21: Ruptura do Corpo-de-Prova	36
Figura 22: Deformação Máxima do Equipamento	36
Figura 23: Tela do Software de Tração Biaxial.....	37
Figura 24: Exemplo dos Gráficos	37
Figura 25: Exemplo Planilha de Dados	38
Figura 26: Equipamento DIC	39
Figura 27: Calibração do DIC	39
Figura 28: Disposição da montagem dos equipamentos	40
Figura 29: Representação Esquemática da Modelagem em Superfícies NURBS	41

Figura 30: Nuvem de Pontos	41
Figura 31: Superfícies de Resposta NURBS	42
Figura 32: Malha, Geometria e Condições de Contorno da Membrana.....	42
Figura 33: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:1	44
Figura 34: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:1	44
Figura 35: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão	45
Figura 36: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão	45
Figura 37: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova pré-tensão:1	45
Figura 38: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova pré-tensão:1	46
Figura 39: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:2	46
Figura 40: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:2	46
Figura 41: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 2:1	47
Figura 42: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 2:1	47
Figura 43: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:3	47
Figura 44: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:3	48
Figura 45: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 3:1	48
Figura 46: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 3:1	48
Figura 47: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:1	49
Figura 48: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:1	50
Figura 49: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão...50	50
Figura 50: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão.....50	50
Figura 51: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova pré-tensão:1...51	51
Figura 52: Curva Tensão versus Deformação das Trama no Corpo-de-Prova pré-tensão:151	51
Figura 53: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:2	51
Figura 54: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:2	52
Figura 55: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 2:1	52
Figura 56: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 2:1	52
Figura 57: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:3	53
Figura 58: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:3	53

Figura 59: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 3:1	53
Figura 60: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 3:1	54
Figura 61: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 1 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido do Urdume	55
Figura 62: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 1 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido da Trama	55
Figura 63: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 2 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido do Urdume	56
Figura 64: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 2 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido da Trama	56
Figura 65: Curva Tensão de Cisalhamento versus Deformação de Cisalhamento.....	57
Figura 66: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 1 do Corpo-de-Prova 1:1	58
Figura 67: Curva Tensão de Cisalhamento versus Deformação de Cisalhamento.....	58
Figura 68: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 2 do Corpo-de-Prova 1:1.....	59
Figura 69: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:1 x Trama 1:1	60
Figura 70: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 2:1 x Trama 1:2	60
Figura 71: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:pré-tensão x Trama pré-tensão:1	61
Figura 72: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:1 x Trama 1:1	61
Figura 73: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:pré-tensão x Trama pré-tensão:1	62
Figura 74: Comparativo Experimental Urdume, Experimental Trama e Numérico 1:1	63
Figura 75: Comparativo Experimental Urdume, Experimental Trama e Numérico 1:pré-tensão e pré-tensão: 1	63
Figura 76: Comparativo Experimental Urdume e Numérico 1:2	64
Figura 77: Comparativo Experimental Trama e Numérico 1:2	64
Figura 78: Comparativo Experimental Urdume e Numérico 2:1	65
Figura 79: Comparativo Experimental Trama e Numérico 2:1	65
Figura 80: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 1	71
Figura 81: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 2	72
Figura 82: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 3	72

Figura 83: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 4	73
Figura 84: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 5	74
Figura 85: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 6	74
Figura 86: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 7	75
Figura 87: Preparação do Corpo-de-Prova - Cortes	76
Figura 88: Preparação do Corpo-de-Prova - Pintura	77
Figura 89: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:1	78
Figura 90: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:pré-tensão.....	78
Figura 91: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova pré-tensão:1	79
Figura 92: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:2	79
Figura 93: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 2:1	79
Figura 94: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:3	80
Figura 95: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 3:1	80
Figura 96: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:1	81
Figura 97: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:pré-tensão.....	81
Figura 98: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova pré-tensão:1	82
Figura 99: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:2	82
Figura 100: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 2:1	82
Figura 101: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:3	83
Figura 102: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 3:1	83

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CARAT++	<i>Computer Aided Research Analysis Tool</i>
DIC	<i>Digital Image Correlation</i>
Dtex	Decitex
MSR	Método de Superfície de Resposta
NURBS	B-spline Racional Não Uniforme
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Cloreto de Polivinila
UV	Ultravioleta
%	Porcentagem
°C	graus Celsius
Kgf/5cm	Quilograma-força por cinco centímetros
mm	Milímetros
mm/min	Milímetros por minuto
MPa	Mega Pascal
N	Newton

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO	17
2.1 Desenvolvimento Histórico	17
2.2 Tipos e Exemplos de Estruturas de Membranas.....	18
2.3 Materiais	21
2.3.1 Poliéster/PVC	24
2.3.2 Vidro/PTFE	24
2.3.3 ETFE.....	24
2.4 Ensaio de Tração	24
2.5 Ensaio de Tração Biaxial.....	26
2.6 Método de Superfície de Resposta (MSR)	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais	32
3.2 Análise Experimental	32
3.3 Análise Numérica	40
4.1 Ensaio de Tração Biaxial.....	44
4.2 Análise do Campo de Deformações	54
4.3 Cisalhamento	56
4.2 Comparativos.....	59
4.4 Simulação Numérica.....	62
5 CONCLUSÕES.....	66

REFERÊNCIAS	68
APÊNDICE A – PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA	71
APÊNDICE B – PERFIS DE CARGA MATERIAL 1	78
APÊNDICE C – PERFIS DE CARGA MATERIAL 2	81

1 INTRODUÇÃO

A engenharia tem como função usar racionalmente conhecimentos científicos e tecnológicos, visando acompanhar e amparar o aprimoramento das condições de vida do ser humano. O que a engenharia civil é hoje se deve ao fato de agregar técnicas por mais de 10.000 anos da arte de construir moradias, templos, estádios, teatros, aquedutos, pontes, barragens, portos, canais e túneis. Todo esse conhecimento adquirido se fez fundamental para se chegar ao atual estágio da engenharia civil (LINDENBERG NETO, 2002).

Nesse cenário, existe na construção civil uma busca constante por arquiteturas harmoniosas e otimização de materiais. Surge então um composto têxtil, comumente chamado de membrana têxtil, pelo fato desse material permanecer tensionado e separar dois ambientes que se interagem.

As membranas têxteis são amplamente utilizadas para coberturas e fechamentos, em estruturas leves e de grande porte, como tendas, estruturas de apoio aéreo, estádios e telhados. Para sua estabilização, as estruturas são geralmente pré-tensionadas, ou retesadas, o que pode ser feito por cabos ou pela pressão do ar.

A utilização de membranas em estruturas pode ser considerada uma construção sustentável, pois possibilita a execução de estruturas adaptáveis, flexíveis, leves, que fazem uso de iluminação e ventilação naturais, e abertas de tal forma que não interferem com a continuidade do local.

Em estruturas de membranas, devido sua espessura muito fina, atuam apenas esforços de tração, deste modo, não oferecem resistência à esforços de compressão ou flexão. Quando retesadas, as membranas são solicitadas biaxialmente. Além disso, cargas como o vento, neve e água produzem tensões que agem em duas direções, portanto é necessário que sejam realizados testes de tração biaxial para estimar o comportamento real, a confiabilidade de uma estrutura de membrana e a caracterização mecânica desse material.

O presente estudo realiza ensaios de tração biaxial em membranas de dois tipos de materiais, a fim de obter suas curvas de tensão versus deformação, e a caracterização mecânica desses materiais.

Nesse estudo foi utilizada a aplicação de Curvas B-spline Racional Não Uniforme (NURBS) para fornecer uma superfície de resposta suave para o comportamento do material da

membrana. As superfícies NURBS são baseadas em dois eixos de deformação e um eixo de tensão. Também são comparados os resultados experimentais com os resultados numéricos.

O dimensionamento destas estruturas é avaliado como recente, e a principal barreira de sua utilização em larga escala pode ser considerada a dificuldade de dimensionamento. A caracterização mecânica desse material é fundamental e justifica o desenvolvimento desta pesquisa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o comportamento mecânico de membranas quando submetidas à esforços de tração biaxial.

1.2.2 Objetivos Específicos

Esta pesquisa tem como objetivos específicos os seguintes itens:

- a) Caracterizar as membranas selecionadas;
- b) Confeccionar corpos-de-prova adequados para ensaios de tração biaxial;
- c) Obter as relações tensão-deformação das membranas submetidas a diferentes razões de carregamentos, a partir dos ensaios de laboratório realizados;
- d) Analisar e validar os resultados através do Método de Superfícies de Resposta NURBS;
- e) Comparar os resultados experimentais com resultados numéricos.

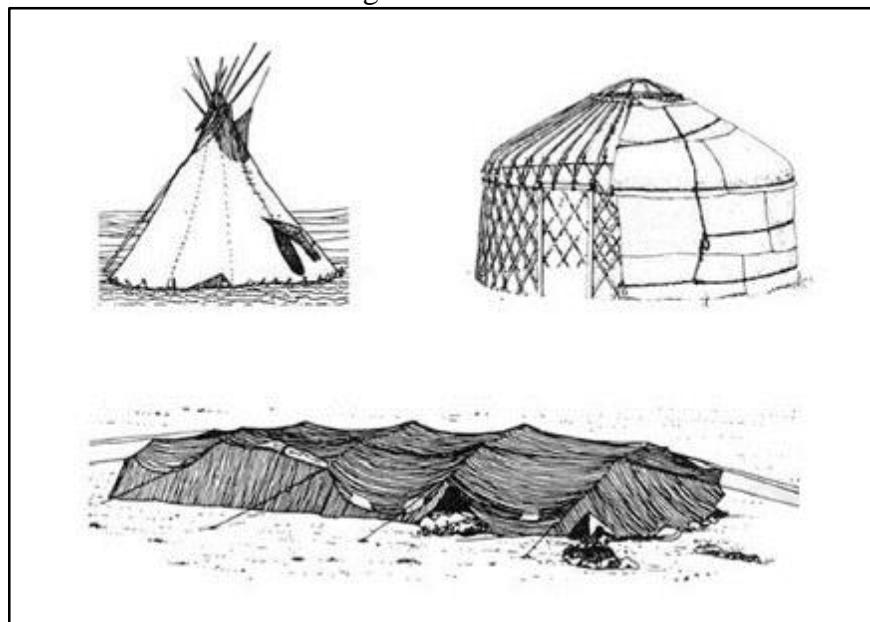
2 REVISÃO

2.1 Desenvolvimento Histórico

A forma mais elementar de estruturas de membrana é a tenda, inventada pelo homem inspirado na natureza. Tendas de dimensões consideráveis remontam a pelo menos dois mil anos. Tendas feitas de peles de animais ou materiais tramados foram utilizadas ao longo da história por povos nômades, pois esses necessitam de coberturas portáteis, conforme Figura 1 (ROBBIN, 1996; SILVA, 2006).

A estrutura pneumática que inaugurou a era moderna das tenso-estruturas foi uma proteção para antena de radar nos Estados Unidos, projetada e executada por Walter Bird em 1946. Frei Otto, especialista alemão em estruturas retesadas, construiu em 1967 o Pavilhão da Alemanha na Exposição de Montreal e em 1971 o Complexo Olímpico de Munique, conforme Figura 2 (SILVA, 2006).

Figura 1: Tendas



Fonte: Silva (2006).

Figura 2: Complexo Olímpico, Munique



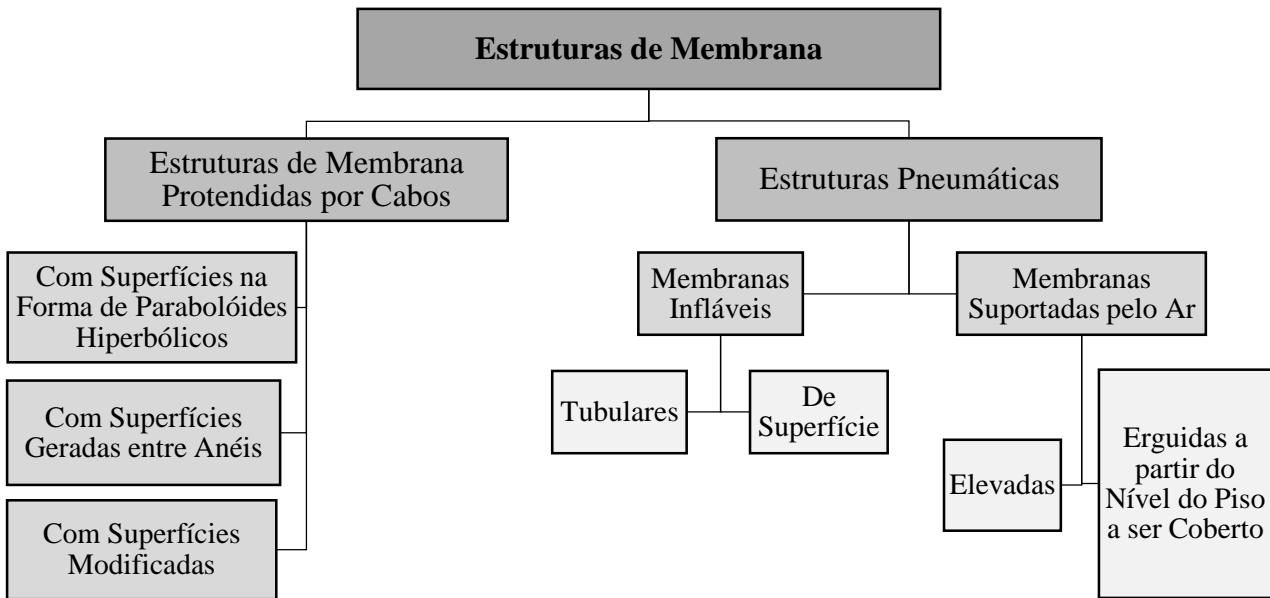
Fonte: Silva (2006).

O termo "tenso-estrutura", de uso já estabelecido no campo das coberturas de cabos e membranas, é um anglicismo que introduz, nas línguas latinas, uma séria ambiguidade: se o termo *tension* designa, em inglês, os estados de tensão de tração aos quais as estruturas esticadas estão sujeitas, em línguas latinas o termo "tensão" inclui, sem distinção, os estados de aplicação interna de tensão ou compressão. Portanto o termo mais indicado seria retesado (PAULETTI, 2011).

2.2 Tipos e Exemplos de Estruturas de Membranas

De acordo com Oliveira (2001), as estruturas de membranas podem ser divididas em dois grupos, estruturas de membranas protendidas por cabos ou estruturas pneumáticas, conforme Figura 3.

Figura 3: Tipos de Estruturas de Membranas



Fonte: A autora, adaptado de Oliveira (2001).

As estruturas de membrana pretendida por cabos são estabilizadas pelo estiramento dos cabos tensores, como pode ser visualizado nas Figuras 4, 5 e 6. Esses cabos são parte do sistema estrutural de suporte, que pode ser executado em estrutura metálica, concreto ou madeira (VANDERBERG, 1996).

Figura 4: Memorial dos Povos, Belém do Pará – Estrutura na Forma de Paraboloides Hiperbólicos



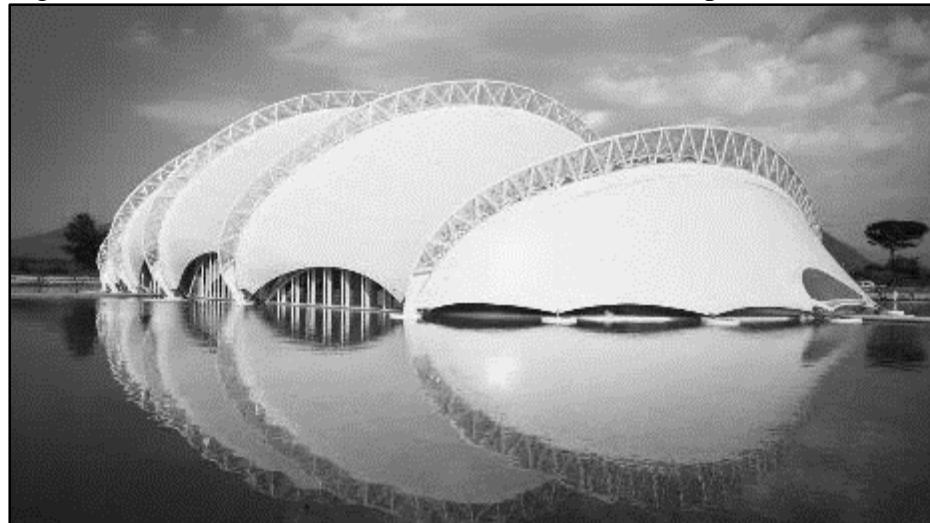
Fonte: Oliveira (2001).

Figura 5: Hajj Terminal, Arábia Saudita – Estrutura com Superfície Gerada entre Anéis



Fonte: Oliveira (2001).

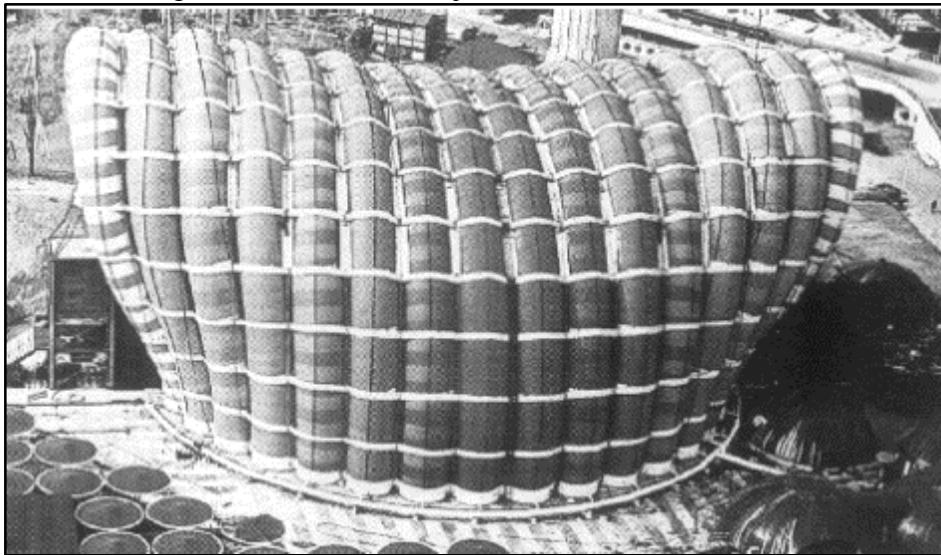
Figura 6: Laboratório M&G, Itália – Estrutura com Superfície Modificada



Fonte: Oliveira (2001).

As estruturas de membrana pneumáticas são formas estruturais estabilizadas, pela atuação de pressão de gases na estrutura, de acordo com as Figuras 7 e 8. (OTTO; TROSTEL, 1967).

Figura 7: Pavilhão de Fiji, Osaka- Estrutura Inflada



Fonte: Oliveira (2001).

Figura 8: Estádio de Vancouver, Canadá - Estrutura Suportada pelo Ar



Fonte: Oliveira (2001).

2.3 Materiais

De acordo com Araújo *et al.* (2000), membranas têxteis são materiais compósitos, isto é, materiais fabricados com a finalidade de obter propriedades distintas das propriedades que os materiais constituintes apresentam quando analisados separadamente.

Callister (2008, p. 423) define materiais compósitos como "qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de modo tal que é obtida uma melhor combinação das propriedades".

Para Askeland, Phulé (2008), os materiais compósitos surgem quando são utilizados juntos dois ou mais materiais ou fases para resultar combinações de propriedades incomuns e que não podem ser obtidas de outra maneira. Entre essas propriedades estão rigidez, resistência mecânica, peso, desempenho à altas temperaturas, resistência à corrosão, dureza e condutividade. Os materiais compósitos atuam em sinergia, ou seja, apresentam propriedades melhores às de seus componentes.

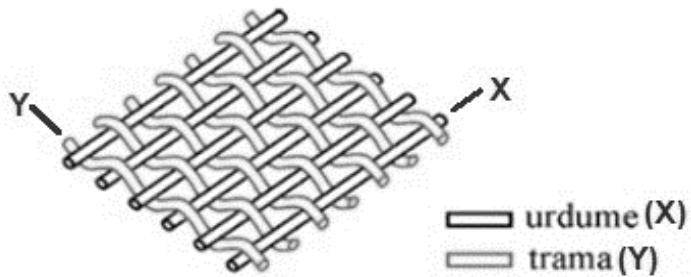
Segundo Borges Filho (2006), membranas estruturais são compósitos que consistem de um arranjo plano de fios imersos em uma matriz de revestimento. Os fios são feitos de fibras. Algumas membranas contam com a aplicação de algumas camadas de revestimento superficial de materiais de proteção. As membranas são geralmente produzidas em faixas retangulares de aproximadamente 30 metros de comprimento e 3 a 5 metros de largura.

Os tecidos são um conjunto de cabos interlaçados com ângulos retos, e seguem uma determinada sequência, padrão ou tela. A unidade formadora do cabo, ou mecha, são as fibras ou filamentos. Em um cabo podem ter de 200 a 12000 filamentos. Os cabos são caracterizados pelo peso em gramas em 1000 metros, pela torção e acabamento superficial (NETO; PARDINI, 2006).

Os tecidos são os elementos básicos de reforço, formados de compósitos naturais. Podem ser híbridos, constituídos por dois tipos de fibras ou fibras com atividades superficiais diferentes. O tipo de tela vai determinar as propriedades mecânicas desse tecido, e a facilidade com que ele se ajusta a superfícies complexas (NETO; PARDINI, 2006).

A fiação das membranas se dá geralmente em duas direções principais: o urdume e a trama, conforme Figura 9. No processo de fiação do tecido, os fios do urdume são mantidos retos e retesados, e os fios da trama são passados alternadamente por cima e por baixo dos fios do urdume, o que faz com que estes tenham uma ondulação mais acentuada. Dessa forma, resultam propriedades mecânicas anisotrópicas para a membrana, pois seu comportamento dependerá da orientação dos esforços em relação às direções dos fios, sendo necessário um ensaio que simule tração em ambas as direções simultaneamente, isto é, um ensaio de tração biaxial (CHIVANTE, 2009).

Figura 9: Arranjos de fios em um tecido padrão de membranas estruturais



Fonte: A autora, adaptado de Borges Filho (2006).

As fibras mais utilizadas nas membranas estruturais são de quatro tipos: nylon, poliéster, vidro e aramida (*kevlar*). Atualmente, a fibra de vidro e o poliéster são os materiais predominantes. Quando comparado a outras fibras utilizadas em membranas, o poliéster tem um alto módulo de elasticidade e quando revestido tem uma maior resistência à degradação por ação da radiação ultravioleta. As fibras de vidro possuem um elevado módulo de elasticidade e alta resistência à tração. A principal desvantagem da fibra de vidro é sua fragilidade. Para diminuir essa fragilidade, as fibras são feitas em diâmetros muito pequenos, entretanto elas ainda são sujeitas a danos por flexão repetida. Cuidados especiais são necessários com o envio e montagem da estrutura. Em geral, dada a sua fragilidade, as membranas de fibra de vidro não são empregadas em estruturas temporárias ou aquelas que são frequentemente montadas e desmontadas. O vidro não se deteriora por ação da radiação ultravioleta, essa é uma característica especialmente interessante para instalações permanentes (BORGES FILHO, 2006).

As principais matrizes de revestimento em membranas estruturais são o Cloreto de Polivinila (PVC) e o Politetrafluoretileno (PTFE). Quando comparamos as matrizes de revestimento em membranas, o PVC é um material macio flexível compatível com as formas assumidas pelas estruturas. Ele é resistente à radiação ultravioleta e pode ser fornecido em uma grande variedade de cores. Comumente o PVC é utilizado com membranas de nylon ou poliéster. Por outro lado, o PTFE é um material quimicamente inerte, com pouca deterioração por envelhecimento e resistente à umidade e aos microorganismos (BORGES FILHO, 2006).

A seguir, seguem alguns materiais utilizados nas estruturas retesadas.

2.3.1 Poliéster/PVC

Entre as membranas, são os tecidos de menor custo. Têm baixa resistência à ação dos raios ultravioletas. Sua durabilidade média é de 10 a 15 anos, por isso são geralmente escolhidos para estruturas de caráter temporário (PASQUAL, 2011).

2.3.2 Vidro/PTFE

Esse tecido é o mais aplicado quando necessária alta resistência estrutural, ou quando destinada para grandes vãos. Sua cor padrão é o branco. Tem boa resistência ao fogo. Sua durabilidade mínima é de 30 anos. Sua maior desvantagem é a pouca flexibilidade (OBATA, 2010).

2.3.3 ETFE

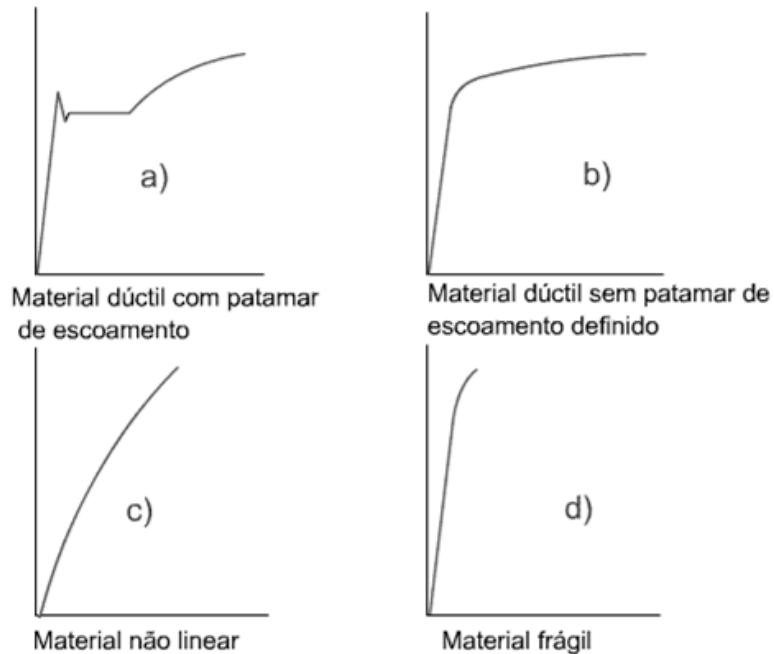
O filme de etileno fluoretileno (ETFE), diferente dos demais, não é formado por um tecido com cobertura, e sim por um filme plástico extrudado de superfície extremamente lisa, de mesma origem química do Teflon. É indicado quando necessário transparência e translucidez. É um material resistente a adesão de pó e sujeiras. Sua principal desvantagem é a baixa resistência ao corte. Muito utilizado em estruturas pneumáticas (OBATA, 2010).

2.4 Ensaio de Tração

Segundo Askeland e Phulé (2008), os ensaios de tração são bastante difundidos e medem a resistência de um material a um carregamento mecânico estático ou aplicado lentamente. A força F, também denominada de carga, é a medida da resistência à deformação apresentada pelo material. Utiliza-se um extensômetro para medir o deslocamento em relação ao comprimento inicial. Desse ensaio resultam-se curvas de tensão-deformação, conforme exemplos nas Figuras 10 e 11.

Em um ensaio de tração, pode ocorrer o carregamento, descarregamento e recarregamento. Durante o recarregamento de um material elástico, ocorre a continuidade da curva tensão versus deformação original. Esse processo de descarregamento e carregamento é repetido até que o material se torne frágil e rompa (UGURAL, 2009).

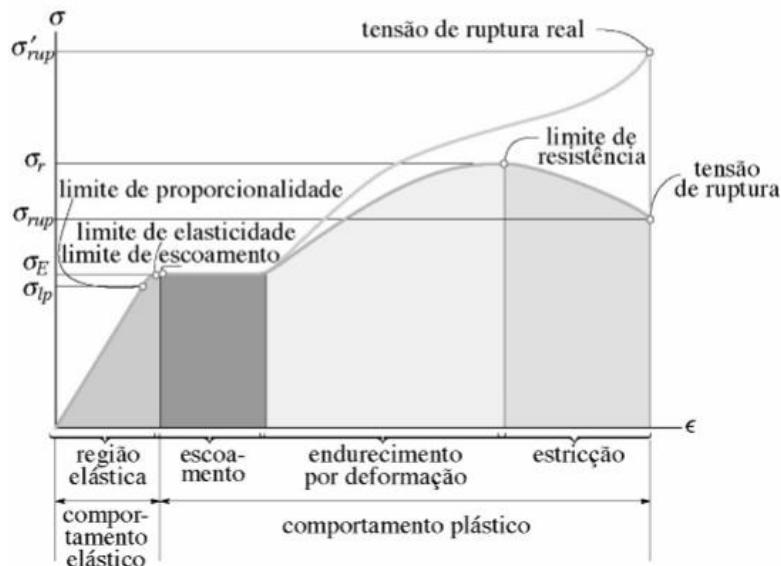
Figura 10: Curvas de Tensão x Deformação



Fonte: A autora, adaptado de Askeland e Phulé (2008).

Um material frágil não deforma plasticamente antes da ruptura. Um material dúctil tem um limite elástico além da deformação permanente. A capacidade desse material de resistir à deformação plástica é medida pela tensão de escoamento. A tensão de escoamento é determinada pela relação entre a força que inicia a deformação permanente e a área de seção reta (VAN VLACK, 2008).

Figura 11: Curva de Tensão versus Deformação



Fonte: A autora, adaptado de Askeland e Phulé (2008).

A característica de um material que suporta deformações além daquela associada ao limite elástico é chamada de plasticidade. Nas curvas de tensão versus deformação, a região elástica é seguida pela região plástica. Nessa região plástica, não ocorre a recuperação total das dimensões e forma do material (UGURAL, 2009).

O limite de resistência à tração é calculado dividindo-se a carga máxima suportada pela área da seção reta inicial. É expresso em unidades de tensão. Os materiais dúcteis podem sofrer uma redução de área quando solicitados pela carga máxima. Portanto, o limite de ruptura pode ser inferior ao limite de resistência (VAN VLACK, 2008).

A deformação permanente, ou inelástica ocorre na região plástica de um material. Essa deformação plástica depende do estado de tensão existente desde o início do carregamento. Um material que apresente um diagrama de tensão-deformação ideal é designado como elástico perfeitamente plástico ou elastoplástico ideal (UGURAL, 2009).

2.5 Ensaio de Tração Biaxial

Anteriormente, os ensaios de tração uniaxiais eram utilizados em membranas têxteis, porém são menos indicados pois não levam em consideração as propriedades ortotrópicas ou anisotrópicas do material.

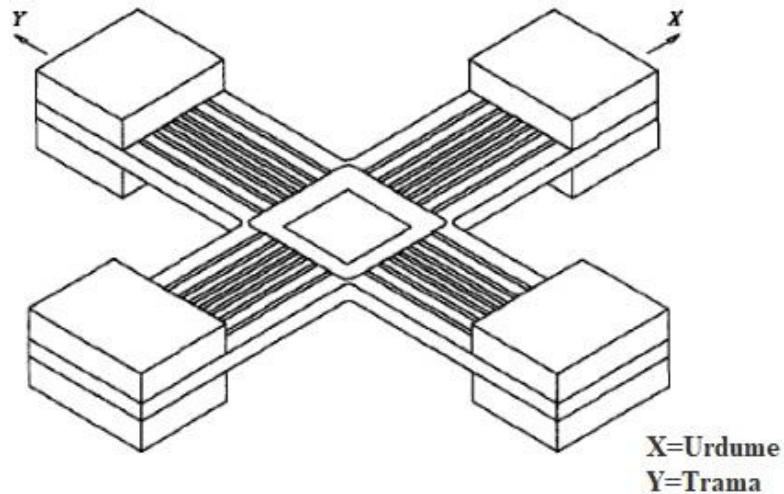
Segundo Reinhardt (1975), existem três métodos de ensaio de tração biaxial: o teste de ruptura (esfera), teste de cilindro e teste plano biaxial com corpo-de-prova cruciforme, sendo este último o que apresentou os melhores resultados em seu estudo.

Os métodos convencionais de teste, com base no método uniaxial, não dever ser usados dentro do propósito do projeto usando membranas (EN 17177, 2018).

O método mais utilizado atualmente é o ensaio biaxial plano com corpo-de-prova cruciforme tracionado nas duas direções principais das fibras de tecido, conforme Figura 12. Através do monitoramento das forças aplicadas e medição dos deslocamentos é possível obter as relações tensão-deformação do material (CHIVANTE, 2009).

De acordo com a Norma EN 17177:2018, em um ensaio de tração biaxial, um corpo-de-prova de forma cruciforme é carregado biaxialmente no plano do tecido. As cargas são aplicadas cicличamente nas direções do urdume e da trama simultaneamente. Medições de tensão e deformação são utilizadas para avaliar as propriedades biaxiais do tecido.

Figura 12: Geometria do Corpo-de-Prova Cruciforme



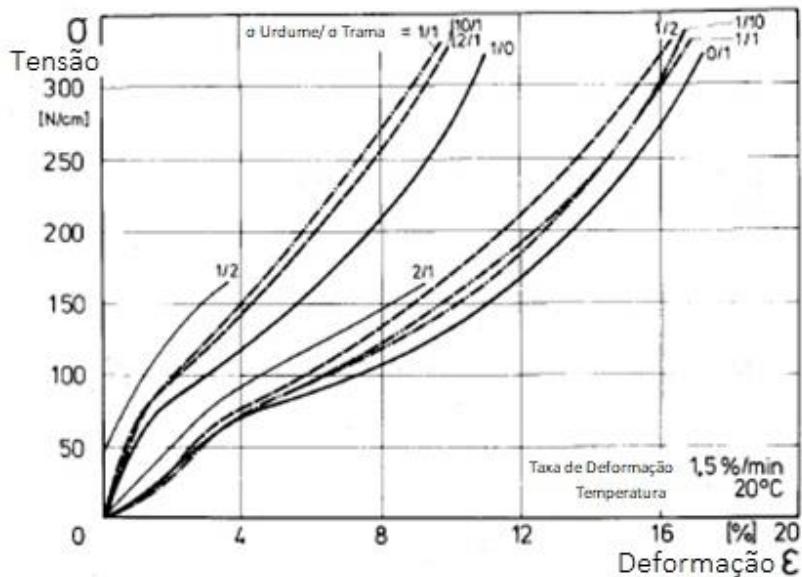
Fonte: A autora, adaptado de Chivante (2009).

Segundo Pargana *et al.* (2007), quando submetida a uma solicitação biaxial, a resposta mecânica da membrana recoberta é uma combinação da resposta dos fios do urdume e da trama sujeito às forças normais, com a resposta do material de recobrimento sujeito à esforços normais e de cisalhamento. O material do recobrimento possui rigidez menor que os fios da trama.

Outro fator que deve ser considerado na escolha de um ensaio biaxial é a anisotropia ou ortotropia do material. Desse modo, a adequação de um material a determinado modelo está delimitada na existência de eixos de simetria elástica.

No estudo de tração biaxial de membranas apresentado por Reinhardt (1975), foram utilizadas razões de carregamento nos sentidos principais do material, sendo esses o urdume e a trama e então elaborados gráficos conforme figura 13, para melhor visualização das relações tensão-deformação em cada razão de carregamento.

Figura 13: Gráfico da Relação tensão versus deformação de tração biaxial com diferentes razões de carregamento



Fonte: A autora, adaptado de Reinhardt (1975).

2.6 Correlação Digital de Imagem

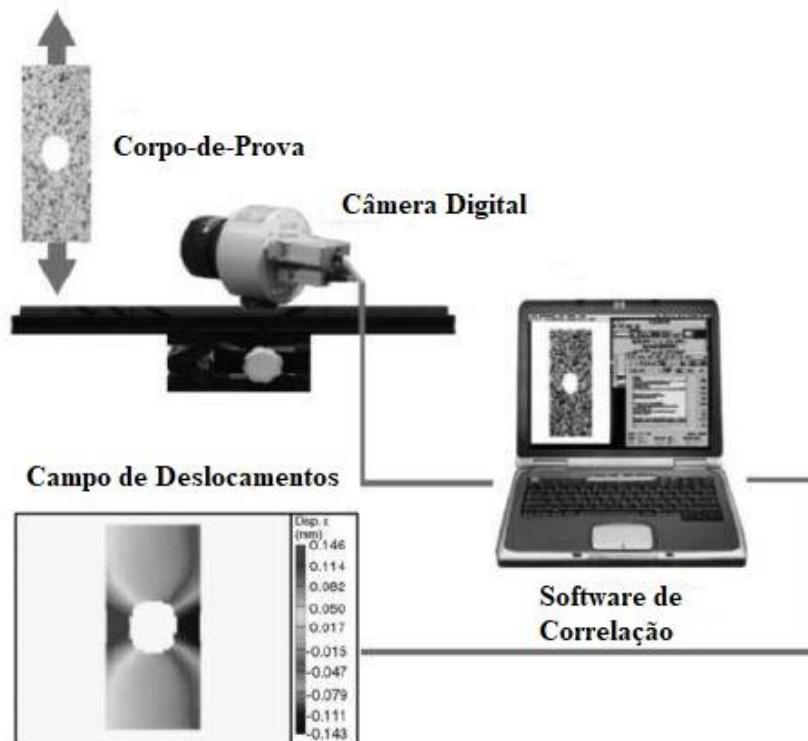
Para obtenção dos dados de deslocamento, pode-se utilizar a técnica de Correlação Digital de Imagem, ou do inglês *Digital Image Correlation* (DIC).

Este método surgiu na década de 1980, desenvolvido pela Universidade da Carolina do Norte, permitindo fazer análises das deformações de um objeto, em duas ou três dimensões, de forma flexível, sem necessidade de contato físico com o corpo-de-prova e com boa adaptabilidade a diferentes tipos de materiais e situações (PETERS; RANSON, 1982).

O método analisa vários pontos na superfície de um corpo-de-prova através da correlação entre a capturas de imagens e um algoritmo. É feita a equivalência destes entre duas imagens consecutivas, sendo uma antes e outra após os deslocamentos, ou neste caso, as deformações (PETERS; RANSON, 1982).

Para implementar esta técnica, deve-se preparar um corpo-de-prova, adquirir e analisar os dados. O procedimento pode ser implementado utilizando, de forma genérica, uma câmera fotográfica, um computador com *software* de correlação digital de imagem e um corpo-de-prova para realização de testes experimentais, conforme Figura 14 (BELEZA, 2017).

Figura 14: Montagem experimental do método DIC



Fonte: A autora, adaptado de Beleza (2017).

2.6 Método de Superfície de Resposta (MSR)

De acordo com Comparini *et al.* (2009) a metodologia de superfície de resposta são técnicas estatísticas e matemáticas utilizadas para desenvolvimento, melhora e otimização de processos. Também tem aplicações importantes em planejamentos, desenvolvimento e formulação de novos produtos, e melhoria dos projetos e produtos existentes.

Também pode ser definida como uma técnica estatística amplamente utilizada para a modelagem e análise de problemas nos quais a variável resposta é influenciada por fatores e tem como objetivo a otimização dessa resposta (COMPARINI *et al.*, 2009).

O método de superfície de resposta (MSR), ou RSM do inglês *Response Surface Methodology*, foi desenvolvido para chegar em condições ótimas ou níveis ótimos dos fatores de controle que podem interferir na resposta de um sistema. Foi criado por George Box, da Universidade de Princeton - Estados Unidos, com a colaboração de outros autores, na década de 1950 (MYERS *et al.*, 1989).

2.8 NURBS

Curvas B-spline Racional Não Uniforme (NURBS) são utilizadas em computação gráfica na indústria para representar objetos complexos, pois são flexíveis o suficiente para projetar uma grande variedade de formas (MINETTO, 2003).

Estudos prévios empregaram superfícies de resposta baseadas em NURBS para obter uma relação direta tensão-deformação para tecidos têxteis sob condições biaxiais. Estudos indicam que, além de fornecer uma correlação suave, as NURBS representam fortes gradientes e descontinuidades nos dados. Um extenso programa de testes comprovou a validade do modelo (COELHO *et al.*, 2016).

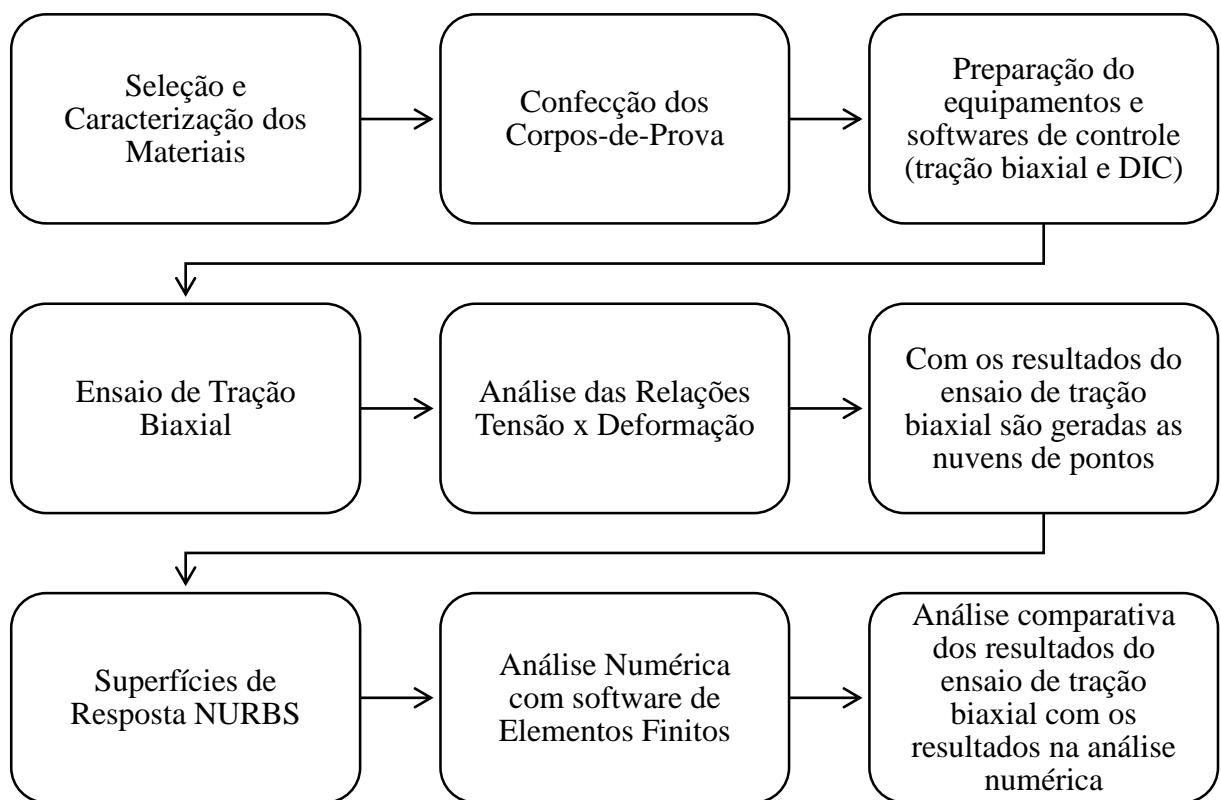
O modelo do material utilizado neste trabalho usou as superfícies de resposta em NURBS de acordo com os trabalhos de Coelho (2012) e Coelho *et al.* (2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A abordagem utilizada neste trabalho foi quantitativa experimental, sendo seu delineamento descritivo, analítico e exploratório. Trata-se de uma pesquisa em laboratório, com execução de ensaios e análises.

Na Figura 15, pode-se observar todas as etapas que compõe a metodologia deste trabalho, sendo este dividido em duas etapas principais: análise experimental e análise numérica.

Figura 15: Representação Esquemática das Etapas da Metodologia



Fonte: A autora (2018).

3.1 Materiais

Neste trabalho, foram analisados dois materiais, sendo o **Material 1** um tecido têxtil e o **Material 2** um filme. Seguem os materiais:

a) **Material 1: tecido de fibra de poliéster**, com as seguintes informações:

- Nome do Produto: UNISOL;
- Tecido de Base: Poliéster de Alta Tenacidade;
- Tipo de fio: 920 Dtex (Urdume/Trama);
- Resistência a Tração: Urdume: 115 Kgf/5cm / Trama: 105Kgf/5cm;
- Aditivos: AntiUV e Anti-fungos;
- Soldável e Costurável;
- 100% Impermeável.

b) **Material 2: lona de polietileno**, com as seguintes informações:

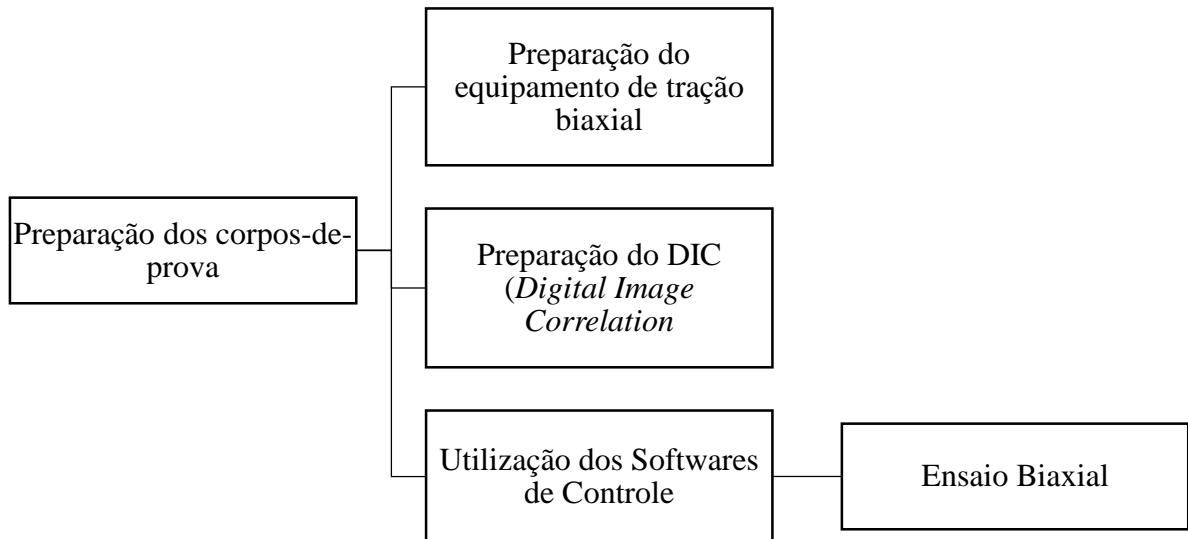
- Nome do Produto: Lona Plástica;
- Material: Polietileno de Baixa Densidade;
- Pigmentação: Cinza Médio;
- Aditivo: AntiUV.

3.2 Análise Experimental

Na análise experimental, para a realização dos ensaios de tração biaxial, foram realizadas as etapas que podem ser visualizadas na Figura 16.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).

Figura 16: Representação Esquemática das Etapas do Ensaio Biaxial

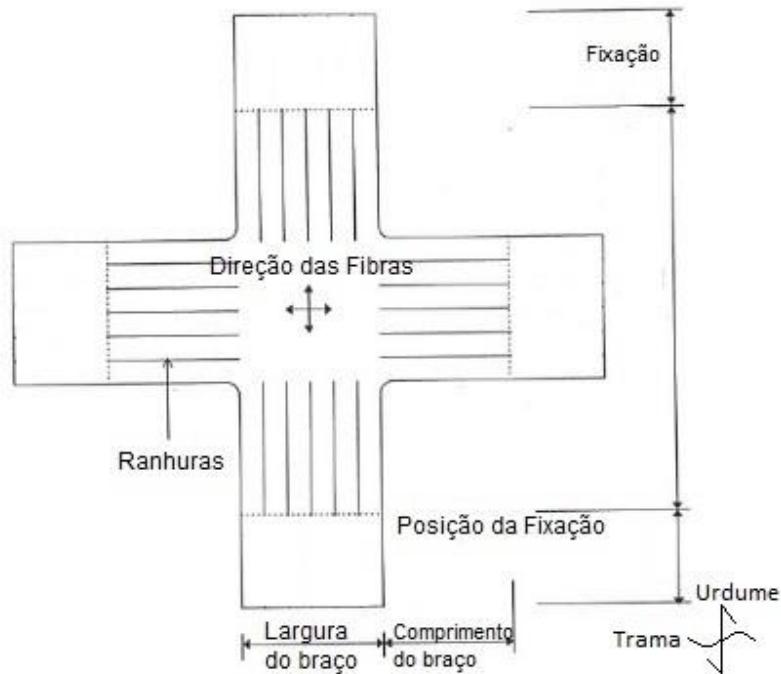


Fonte: A autora (2018).

Foram ensaiados sete corpos-de-prova de cada material. Os corpos-de-prova foram cruciformes, com os braços orientados nos sentidos do urdume e da trama. O centro dos corpos-de-prova apresentava as dimensões de 150 mm x 150mm. O comprimento deixado para os braços foi de 280mm. Para evitar a concentração de tensões, os cantos foram arredondados com raio de 13mm. A fim de eliminar tensões de cisalhamento no centro dos corpos-de-prova, foram cortadas ranhuras longitudinais nos braços com 80mm de comprimento e 15mm de largura. Deixou-se um comprimento de 200mm nos braços para a construção da bainha, na qual os corpos-de-prova foram fixados ao equipamento por agarras. Esta geometria pode ser verificada na Figura 17.

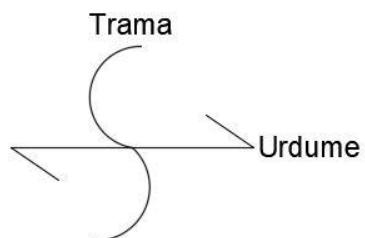
No material 1, foram feitas marcas nas direções do urdume e da trama, usando um símbolo padrão, apresentado na Figura 18, posicionando o lado com os fios mais visíveis virado para cima - isto facilitou a identificação dos fios. No material 2, identificou-se como urdume o sentido que apresentava menor deformação e trama o sentido que apresentava maior deformação. O método utilizado para confecção dos corpos-de-prova pode ser visualizado no Apêndice A.

Figura 17: Esquema dos Corpos-de-Prova Cruciformes



Fonte: A autora, adaptado de Blenkinsop (2015).

Figura 18: Símbolo Padrão das direções do Urdume e Trama



Fonte: A autora (2019).

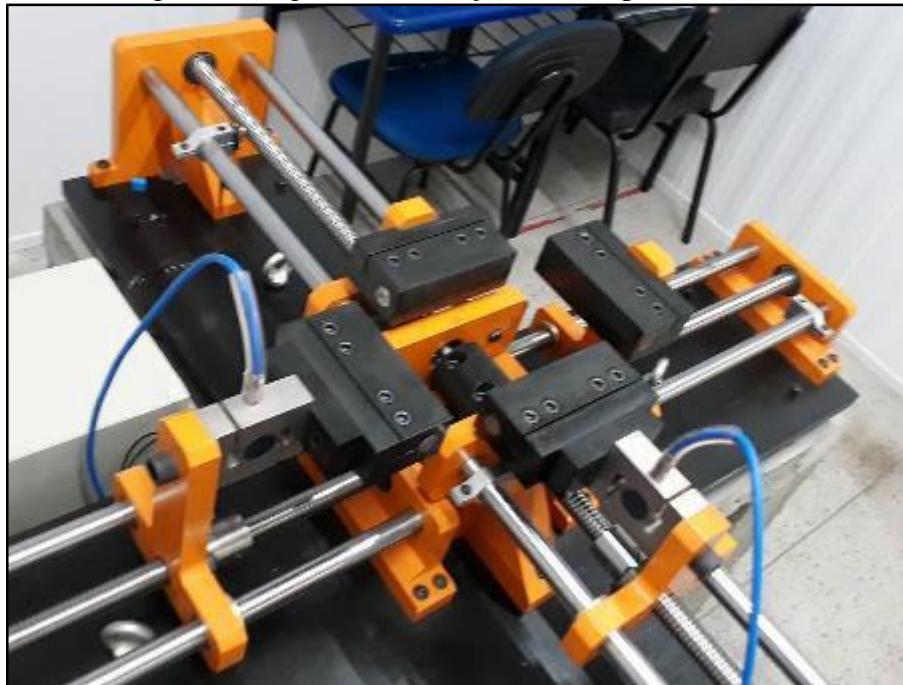
Os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de tração biaxial no equipamento que pode ser visualizado na Figuras 19 e 20. Este equipamento permite que uma área do corpo-de-prova seja carregada em duas direções, independentemente do mesmo ser perfeitamente ortogonal.

Figura 19: Equipamento de Tração Biaxial



Fonte: A autora (2018).

Figura 20: Agarras de Fixação dos Corpos-de-Prova



Fonte: A autora (2018).

O ensaio de tração biaxial foi cíclico com diferentes razões de carregamento. As razões de carregamento estão relacionadas à tração no sentido do urdume : sentido da trama.

Foram ensaiadas as seguintes razões de carregamentos: **1: pré-tensão, pré-tensão:1, 1:1, 1:2, 2:1, 1:3 e 3:1**, selecionados a partir da Norma Europeia EN 17117-1 (2018) e do protocolo Japonês (MSAJ/M-02-1995). Neste trabalho, para cada razão de carregamento foi

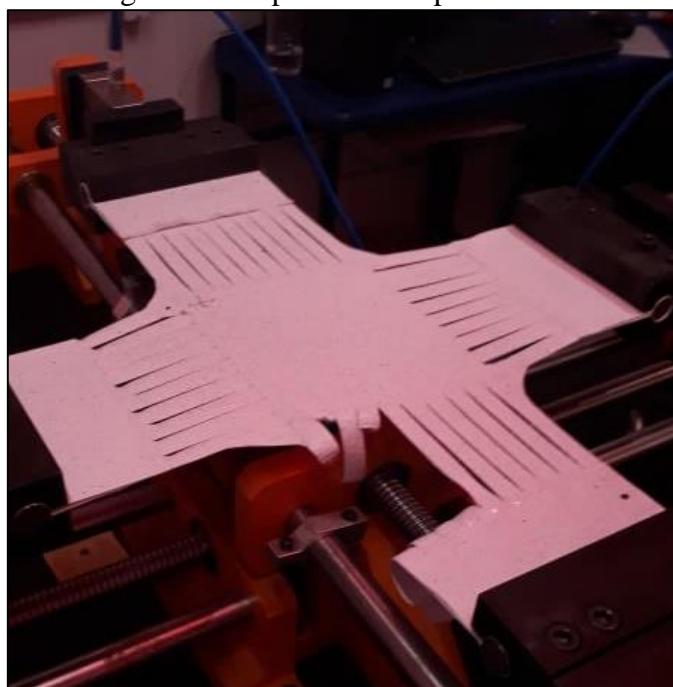
ensaiado um corpo-de-prova, submetendo-o a ciclos até sua ruptura ou deformação máxima permitida pelo equipamento, apresentadas nas Figuras 21 e 22.

Avaliando os materiais e o funcionamento do equipamento de tração, foi definida a pré-tensão sendo 100 N. Para os ensaios com o Material 1, em cada ciclo aumentava-se em 100 N as cargas, de acordo com a razão de carregamento. Para o Material 2, aumentava-se em 20 N.

A velocidade do carregamento do corpo-de-prova foi de 10 mm/min.

A temperatura durante os ensaios variou entre 25,2 °C e 28,1 °C.

Figura 21: Ruptura do Corpo-de-Prova



Fonte: A autora (2018).

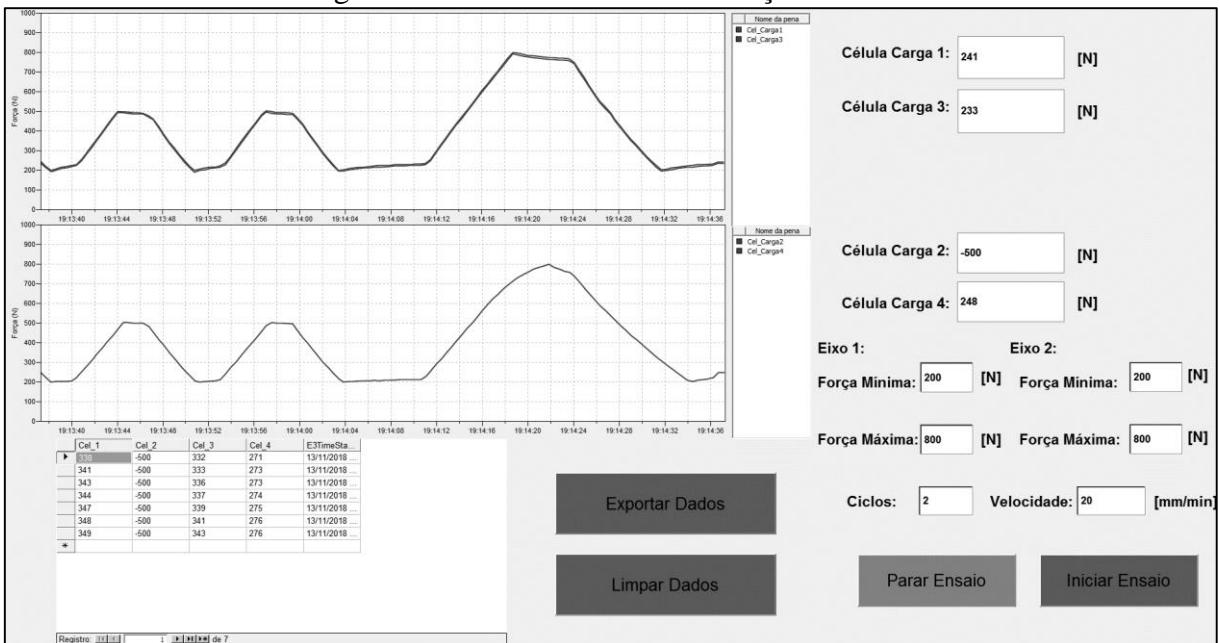
Figura 22: Deformação Máxima do Equipamento



Fonte: A autora (2018).

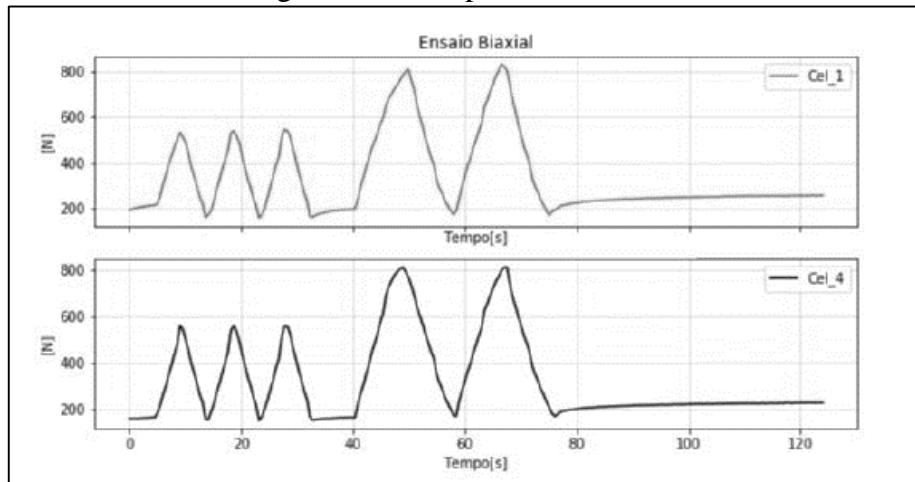
Foi utilizado um software de controle durante o teste, este desenvolvido no Laboratório de Estruturas da UDESC. Neste software, é possível configurar os dados que serão utilizados no ensaio, como a velocidade de movimentação linear das membranas, as forças mínimas e máximas de cada eixo em cada ciclo e o número de ciclos em cada carregamento. Todos os dados são salvos em um banco de dados e podem ser exportados em uma planilha do Excel (COSTA, 2018). A tela do software durante o ensaio, exemplos dos gráficos e da planilha gerados podem ser visualizados nas Figuras 23, 24 e 25.

Figura 23: Tela do Software de Tração Biaxial



Fonte: A autora (2018).

Figura 24: Exemplo dos Gráficos



Fonte: A autora (2018).

Figura 25: Exemplo Planilha de Dados

	A	B	C	D	E
1	Cel_1	Cel_2	Cel_3	Cel_4	Timestamp
2	194	-500	176	160	17:49:21
3	198	-500	181	160	17:49:22
4	201	-500	184	161	17:49:22
5	204	-500	186	160	17:49:23
6	206	-500	189	162	17:49:23
7	208	-500	191	162	17:49:24
8	210	-500	191	163	17:49:24
9	211	-500	195	163	17:49:25
10	213	-500	195	165	17:49:25
11	215	-500	198	165	17:49:26
12	221	-500	203	184	17:49:26
13	255	-500	237	219	17:49:27
14	308	-500	291	265	17:49:27
15	348	-500	331	303	17:49:28

Fonte: A autora (2018).

Para medir as deformações do material, foi utilizado um equipamento *Digital Image Correlation* (DIC), com software Instra 4D, da empresa Dantec Dynamics, modelo Q-400, conforme Figura 26.

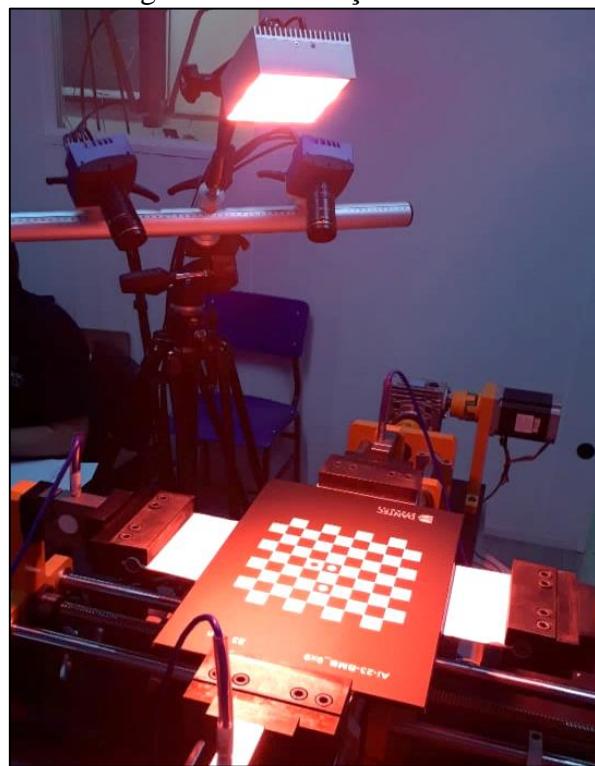
Foi realizada a calibração do sistema DIC. Esta calibração é feita utilizando uma placa com dimensões semelhantes às da área de interesse, como pode ser observado na Figura 27. A placa foi posicionada em frente à câmera onde foi colocado o corpo-de-prova. A placa é rotacionada e são obtidas imagens em diferentes ângulos.

Figura 26: Equipamento DIC



Fonte: A autora (2018).

Figura 27: Calibração do DIC

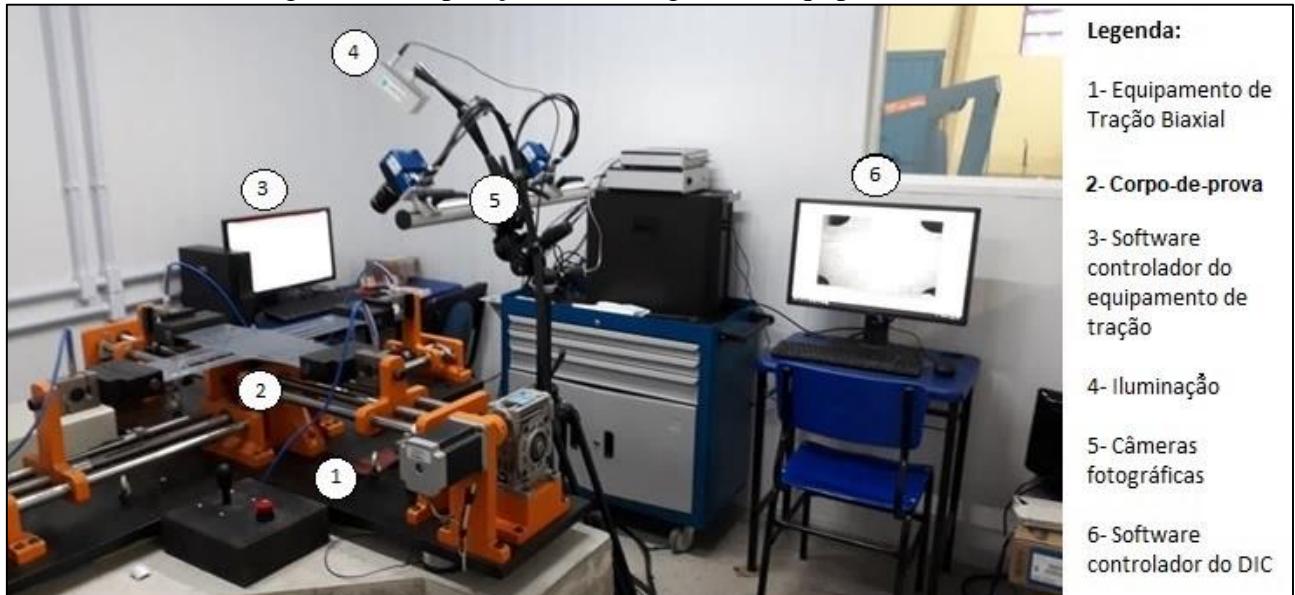


Fonte: A autora (2018).

Ambos os materiais dos corpos-de-prova tinham cor sólida, sendo o Material 1 da cor branca e o Material 2 da cor cinza. Para o DIC identificar as deformações foi necessário pintar os corpos-de-prova com tinta spray preta para plásticos e acrílicos. Esta pintura foi feita com padrão aleatório, tamanho dos grãos semelhantes e bastante contraste, conforme explícito no Apêndice A.

Reunindo-se então todo o equipamento, foi necessário montá-lo de maneira eficaz e organizada. Na Figura 28 pode-se observar a montagem que foi utilizada durante os ensaios. O computador à esquerda na imagem (indicado pelo nº3) contém o software para controlar a máquina de tração biaxial e o computador à direita (indicado pelo nº6) contém o software de controle do DIC.

Figura 28: Disposição da montagem dos equipamentos



Fonte: A autora (2018).

3.3 Análise Numérica

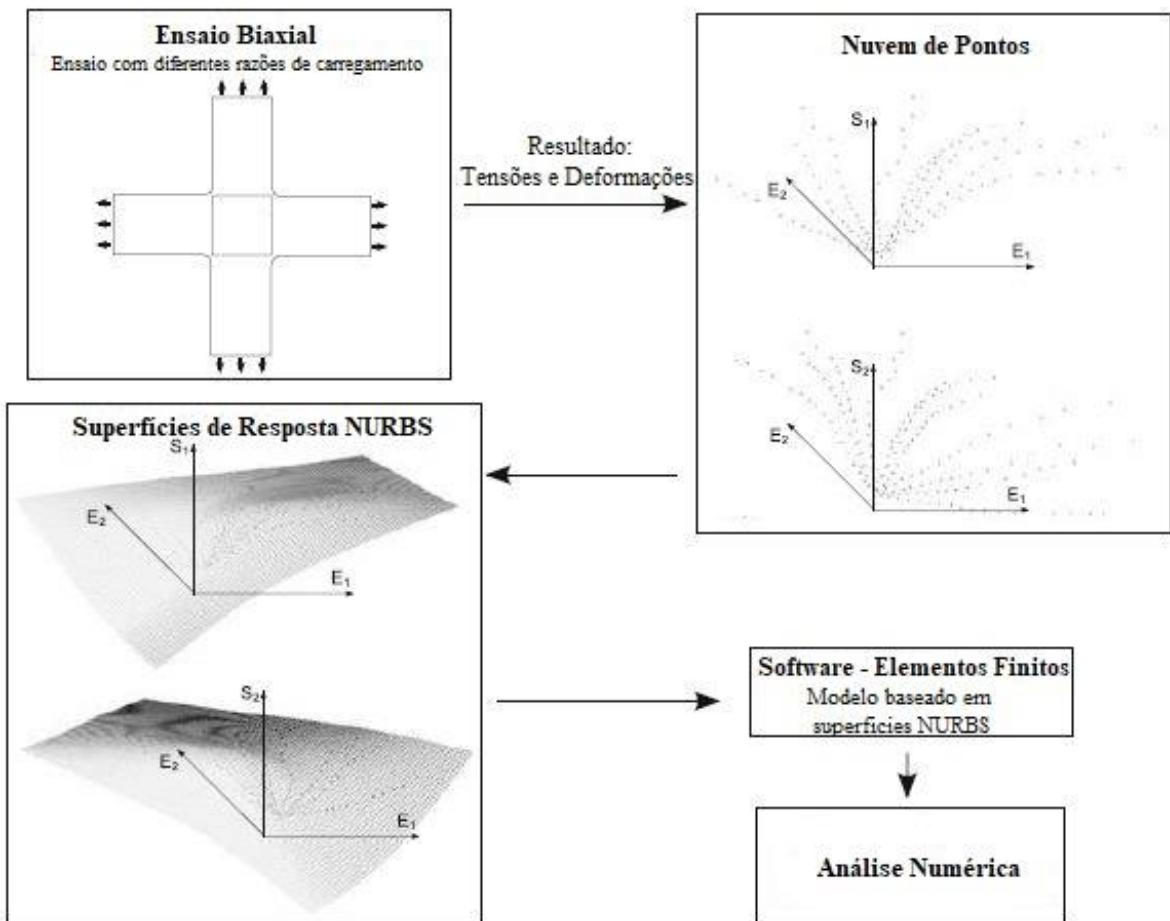
Para análise numérica, as etapas realizadas podem ser visualizadas na Figura 29, na qual está a representação esquemática da modelagem proposta em superfícies NURBS.

Na aplicação da metodologia, as Superfícies de Resposta NURBS são determinadas com base em uma nuvem de pontos geradas utilizando o Programa Rhinoceros 5, de acordo com o User Guide (ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES, 2016). Esse programa permite, com grande facilidade, operar superfícies NURBS.

Para gerar essa nuvem de pontos foram selecionados os pontos máximos de cada curva do Material 1, ou seja, os pontos máximos de cada ciclo de carregamento ao qual o corpo-de-

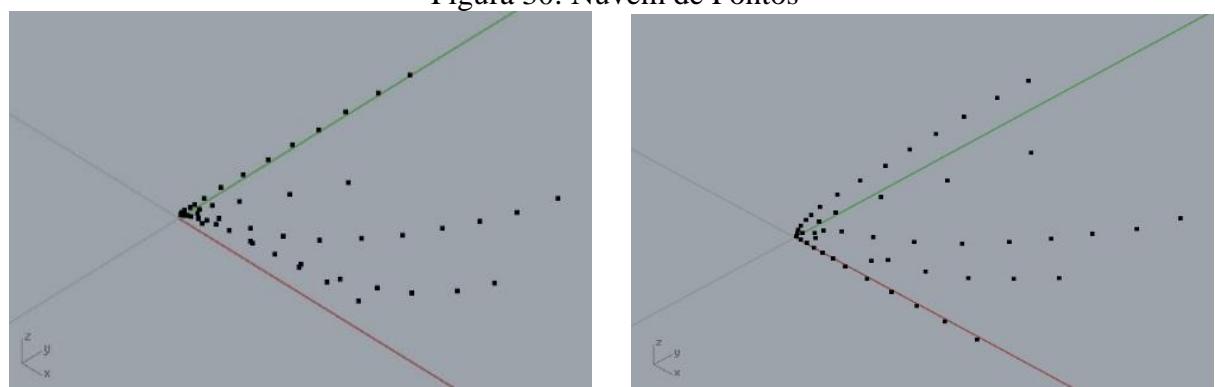
prova foi submetido, como pode-se observar na Figura 30. Foram utilizados o segundo tensor de Piola-Kirchhoff e o tensor de deformação de Green-Lagrange.

Figura 29: Representação Esquemática da Modelagem em Superfícies NURBS



Fonte: A autora, adaptado de Coelho *et al.*(2016).

Figura 30: Nuvem de Pontos

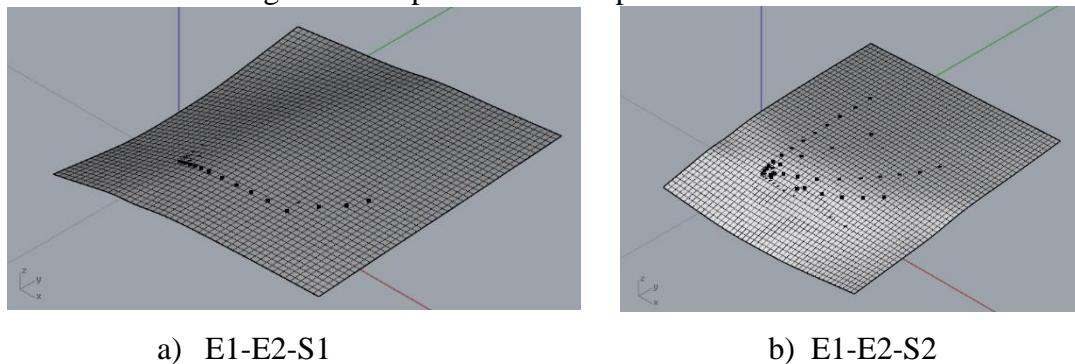


Fonte: A autora (2019).

O grau das superfícies NURBS é 3 ($p=3$ e $q=3$). Malha com pontos de controle 50(u) x 50(v). Essas superfícies são apresentadas na Figura 31.

As superfícies de resposta baseadas em NURBS correspondem a dois eixos de deformação (E1 e E2) e um eixo de tensão (S1 ou S2). Nesse trabalho, considerou-se o comportamento do material isotrópico, utilizando as informações da trama. Portanto uma superfície é o espelhamento da outra.

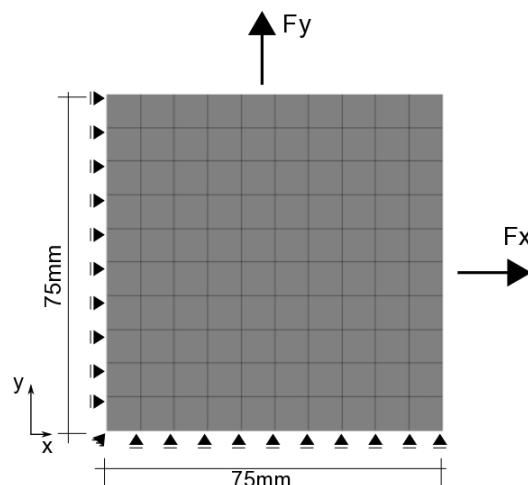
Figura 31: Superfícies de Resposta NURBS



Fonte: A autora (2019).

Uma membrana retangular foi tracionada nas duas direções no plano. A malha, geometria e condições de contorno são mostradas na Figura 32. A malha é composta por 121 nós e 100 elementos de membrana com discretização linear e integração gaussiana 2×2 . Esta malha já havia sido determinada no estudo de Coelho *et al.* (2016), sendo apenas adaptada para as dimensões dos corpos-de-prova deste estudo.

Figura 32: Malha, Geometria e Condições de Contorno da Membrana



Fonte: A autora (2019).

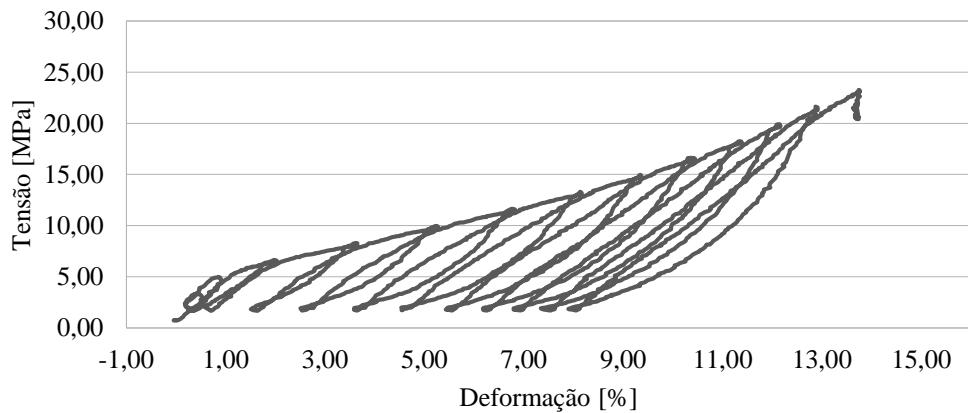
Foi utilizado o programa *Computer Aided Research Analysis Tool* (CARAT++) para a análise numérica. O modelo de material baseado em superfícies NURBS já estava implementado no CARAT++.

4 RESULTADOS

4.1 Ensaio de Tração Biaxial

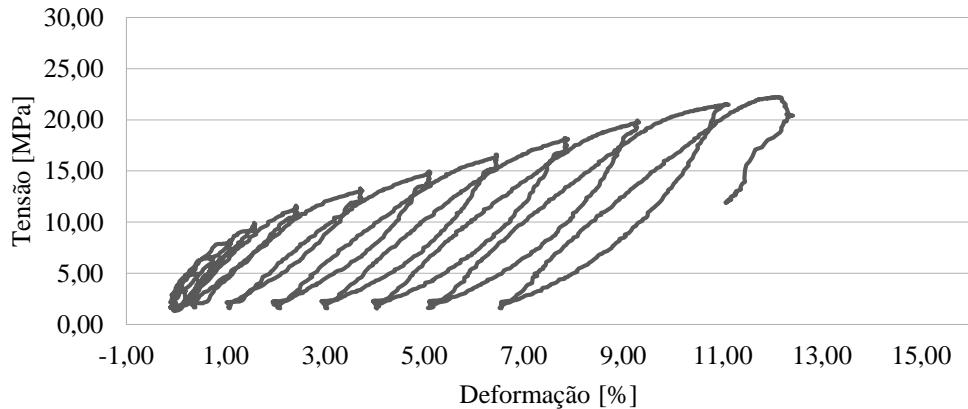
A partir dos resultados dos ensaios de tração biaxial foi possível traçar curvas de tensão versus deformação. Os perfis de carga utilizados para cada razão de carregamento destes ensaios podem ser visualizados no Apêndice B. Os gráficos dos ensaios realizados com o Material 1 são apresentados nas Figuras 33 a 46.

Figura 33: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:1



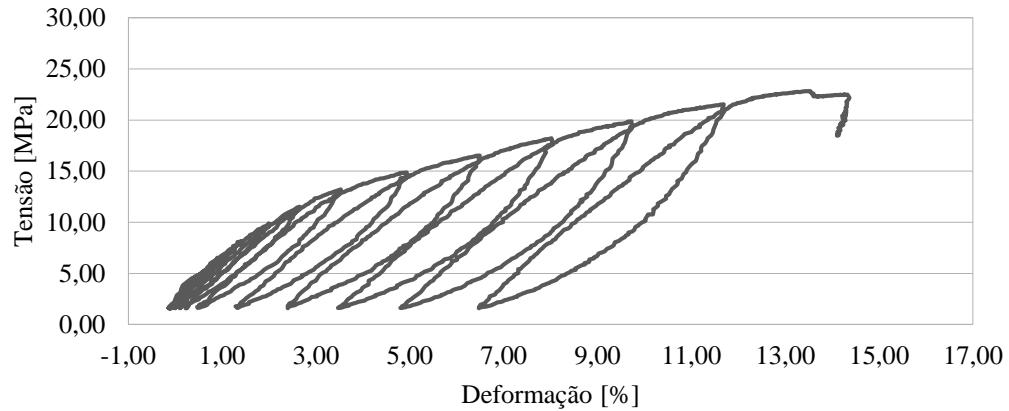
Fonte: A autora (2019).

Figura 34: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:1



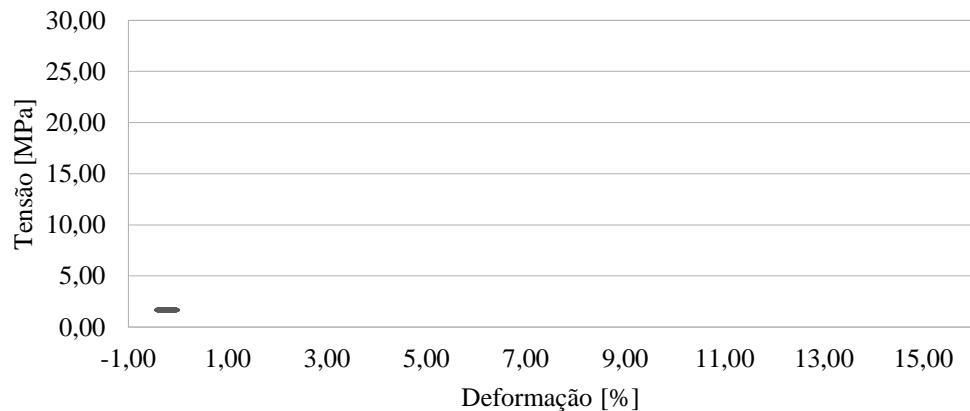
Fonte: A autora (2019).

Figura 35: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão



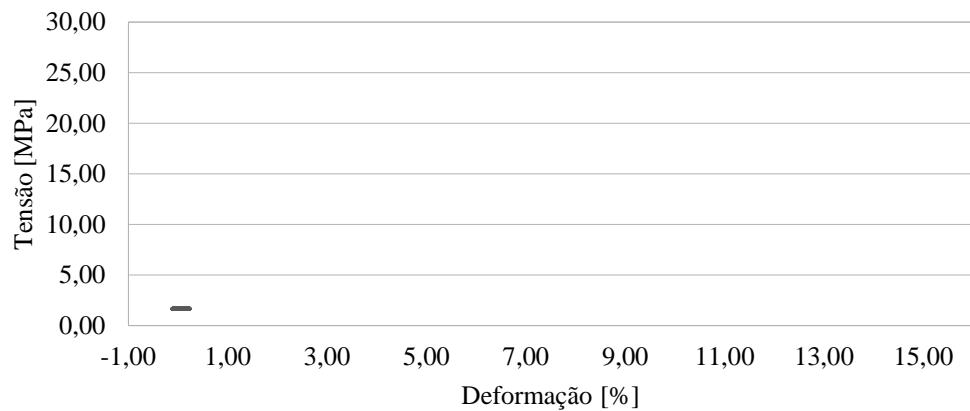
Fonte: A autora (2019).

Figura 36: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão



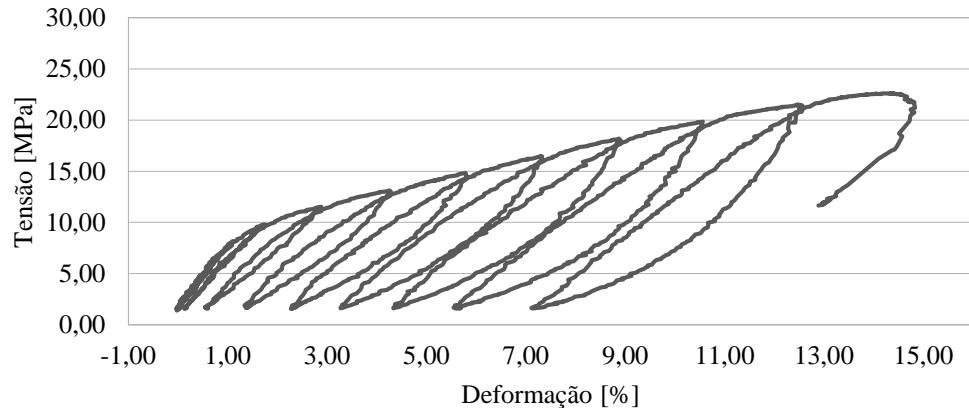
Fonte: A autora (2019).

Figura 37: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova pré-tensão:1



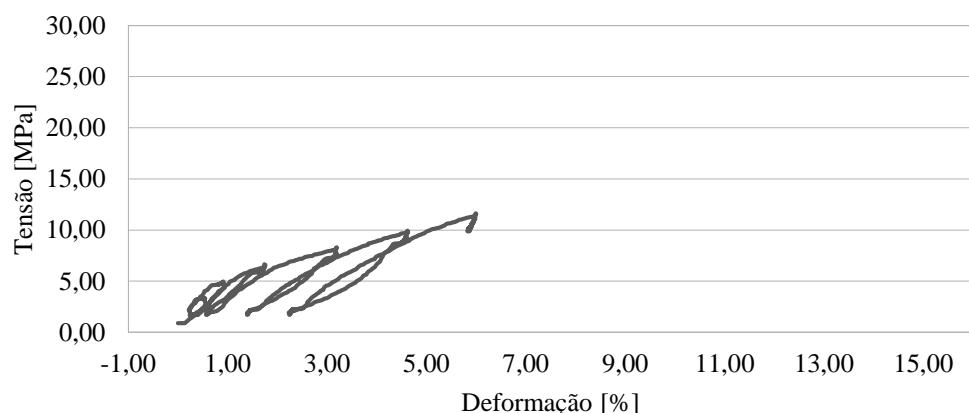
Fonte: A autora (2019).

Figura 38: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova pré-tensão:1



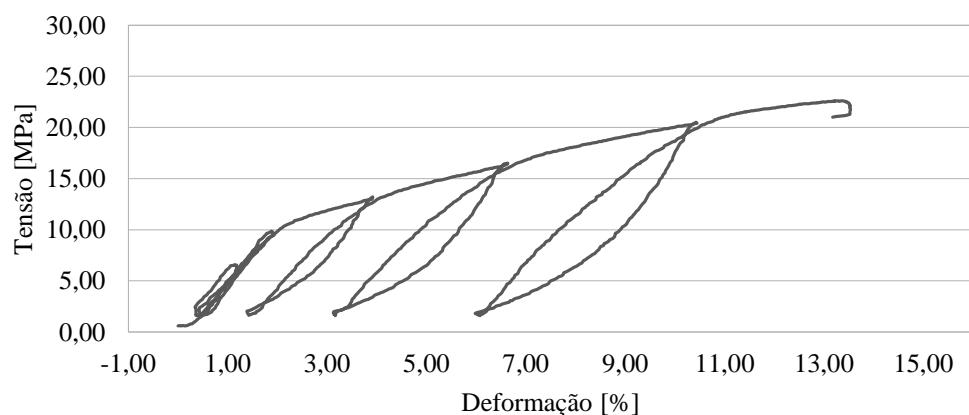
Fonte: A autora (2019).

Figura 39: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:2



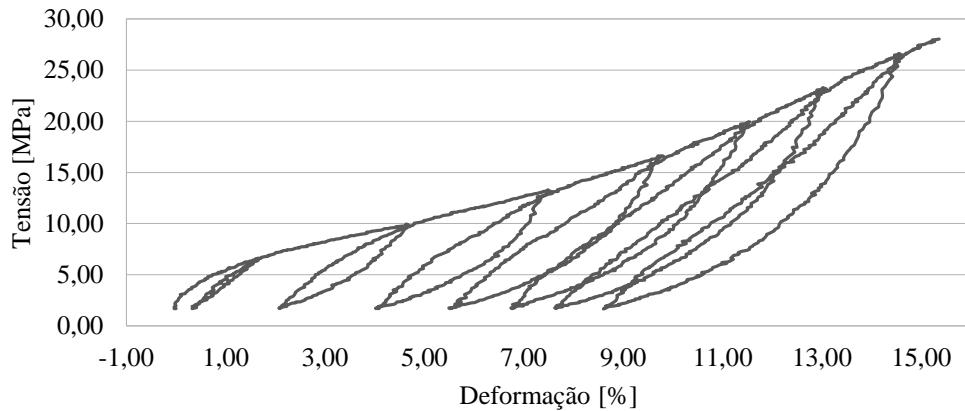
Fonte: A autora (2019).

Figura 40: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:2



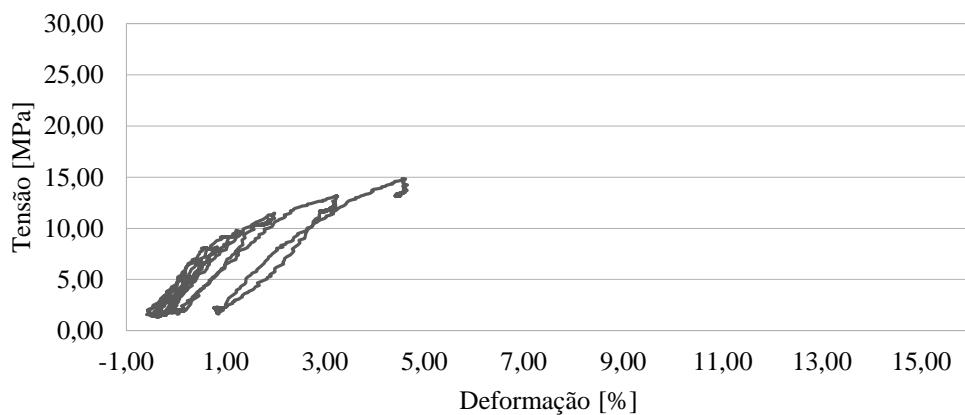
Fonte: A autora (2019).

Figura 41: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 2:1



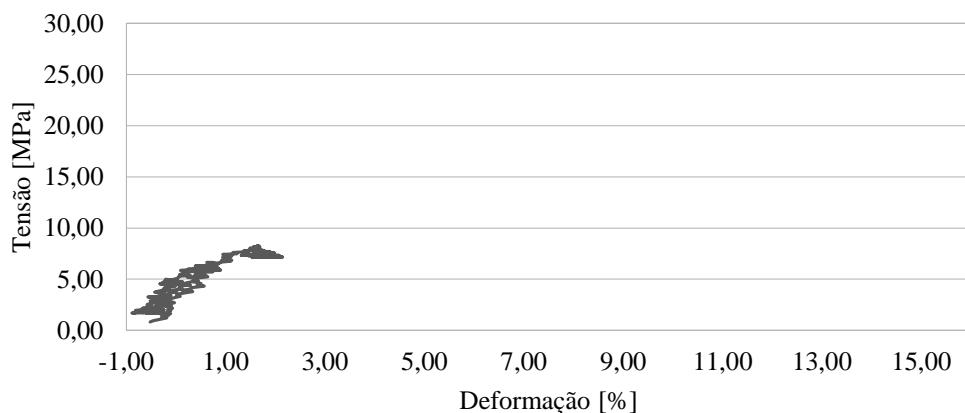
Fonte: A autora (2019).

Figura 42: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 2:1



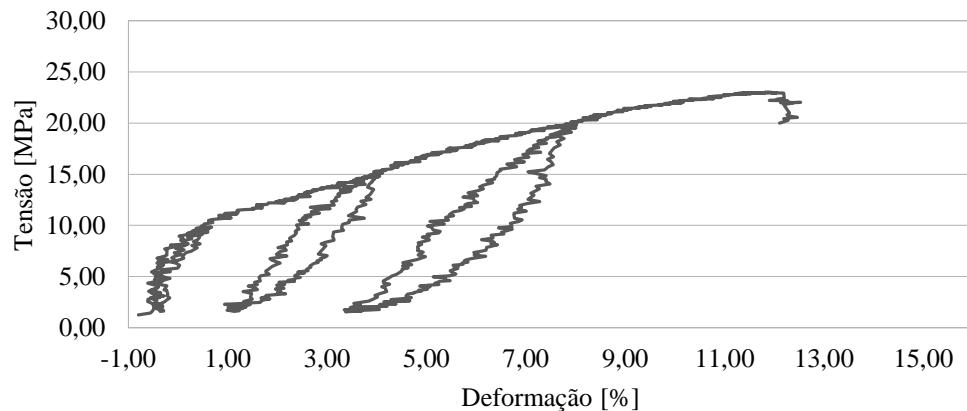
Fonte: A autora (2019).

Figura 43: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:3



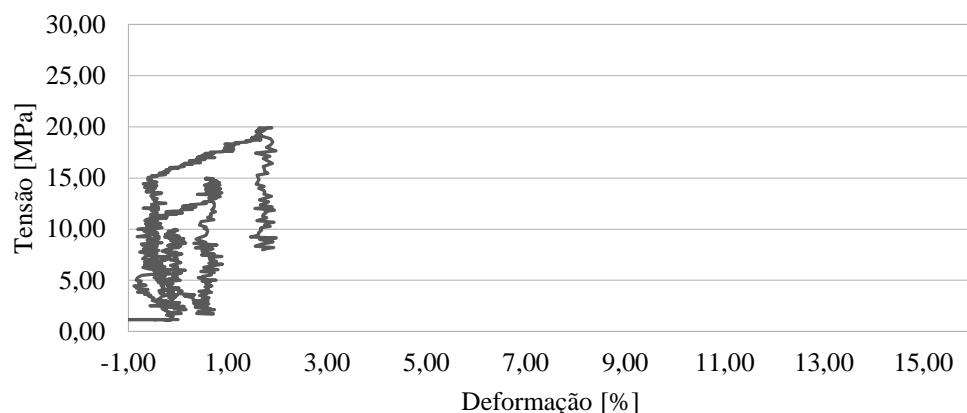
Fonte: A autora (2019).

Figura 44: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:3



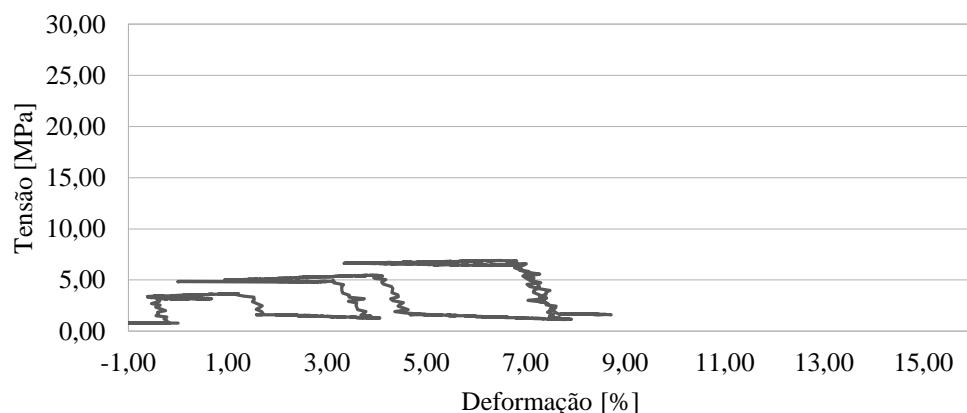
Fonte: A autora (2019).

Figura 45: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 3:1



Fonte: A autora (2019).

Figura 46: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 3:1



Fonte: A autora (2019).

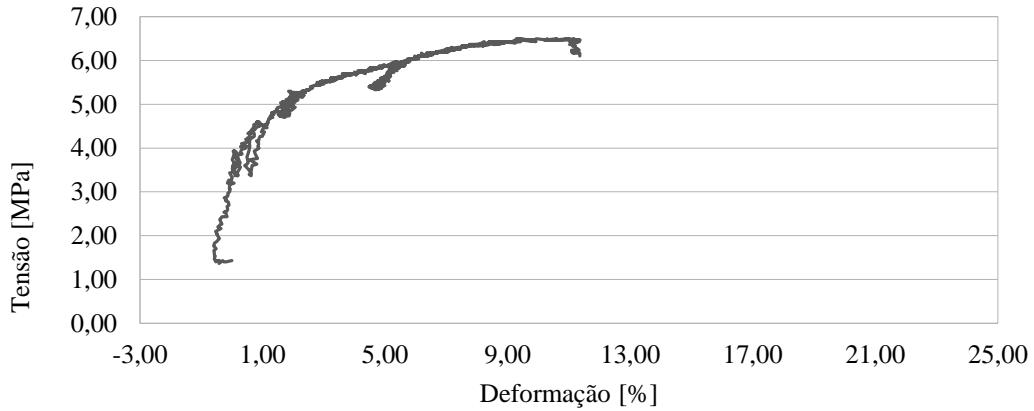
É possível observar nas Figuras 33 e 34, com razão de carregamento 1:1, que nos primeiros ciclos de carregamento o material apresenta um comportamento elástico linear, e após começa a apresentar comportamento elastoplástico, sendo o comportamento elástico menos linear em cada ciclo. Esse comportamento se repete nas razões de carregamento 1: pré-tensão, pré-tensão:1 e 1:2, como pode-se observar nas Figuras 35 a 40.

Na razão de carregamento 2:1 (Figuras 41 e 42), nota-se que no primeiro ciclo o urdume já apresenta um comportamento elastoplástico linear, se tornando não linear nos demais ciclos. Já a trama apresentou comportamento elástico linear no primeiro ciclo, e nos demais elastoplástico não linear.

Como pode-se observar nas Figuras 43 a 46, nas razões de carregamento 1:3 e 3:1 não foi possível caracterizar o comportamento do material.

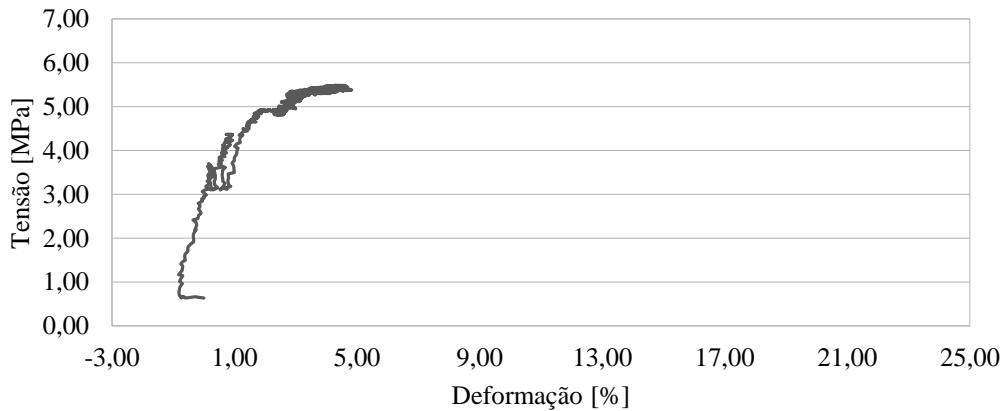
Os gráficos com curvas de tensão versus deformação dos ensaios realizados com o Material 2 são apresentados nas Figuras 47 a 60. Os perfis de carga utilizados nestes ensaios podem ser visualizados no Apêndice C.

Figura 47: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:1



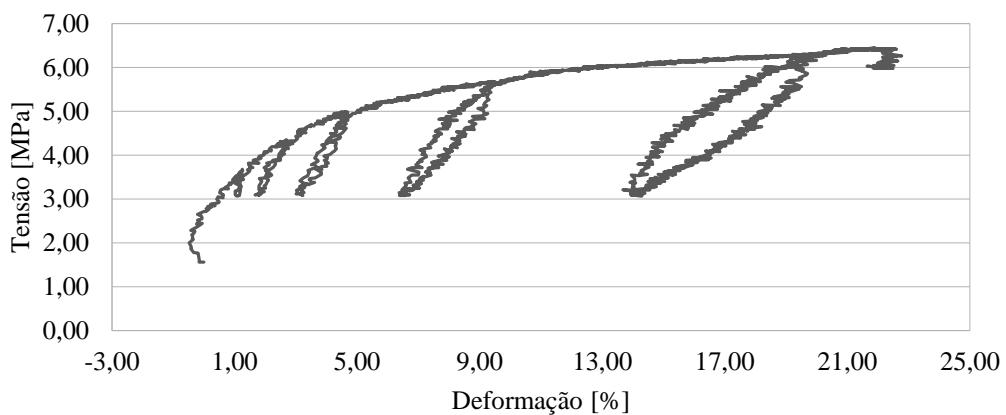
Fonte: A autora (2019).

Figura 48: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:1



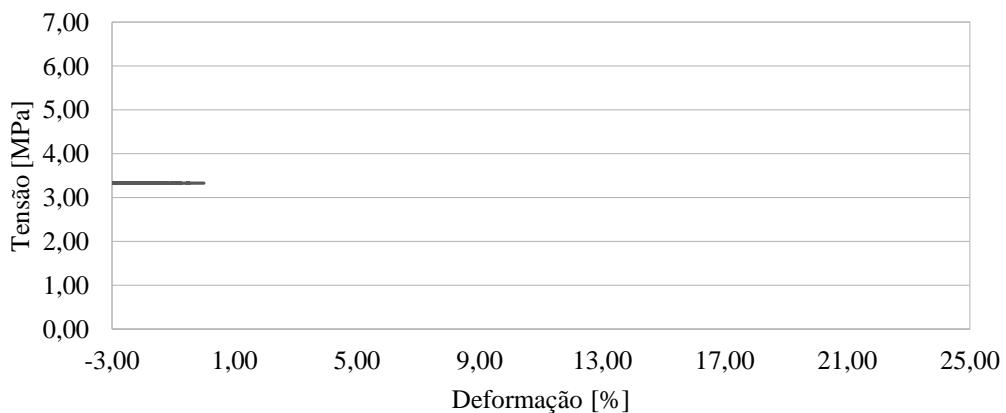
Fonte: A autora (2019).

Figura 49: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão



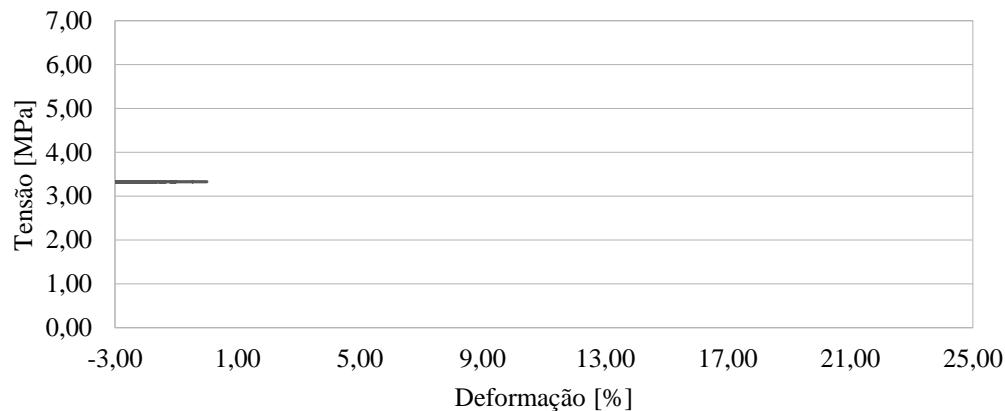
Fonte: A autora (2019).

Figura 50: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:pré-tensão



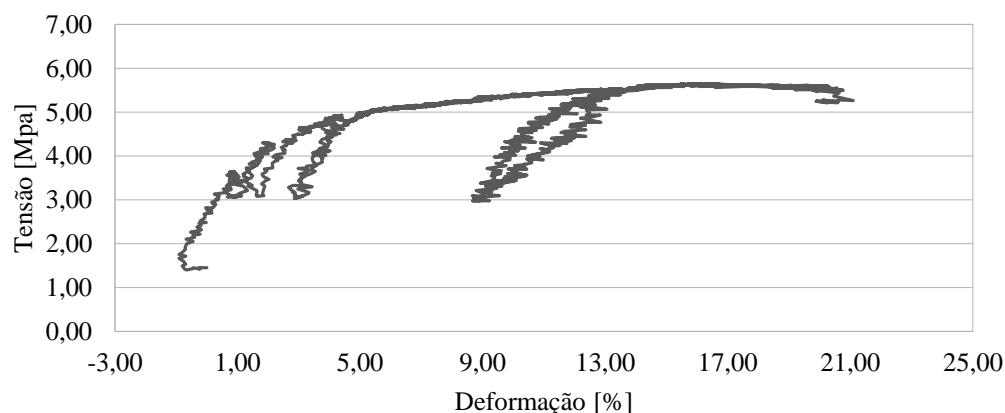
Fonte: A autora (2019).

Figura 51: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova pré-tensão:1



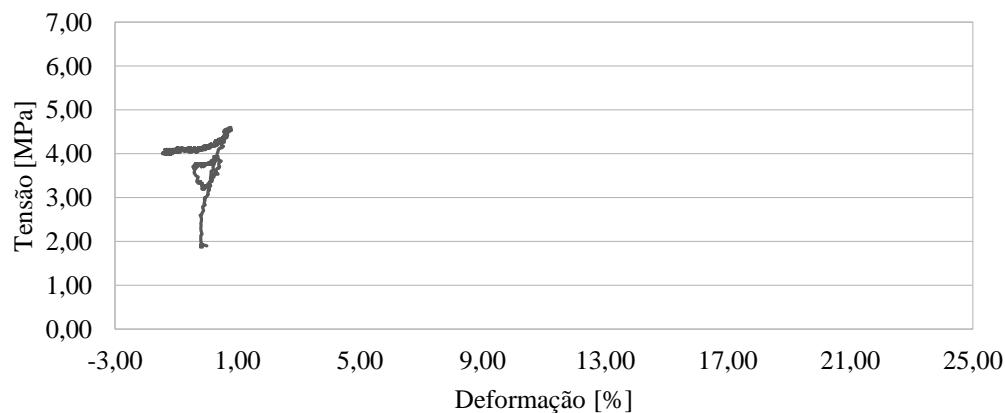
Fonte: A autora (2019).

Figura 52: Curva Tensão versus Deformação das Trama no Corpo-de-Prova pré-tensão:1



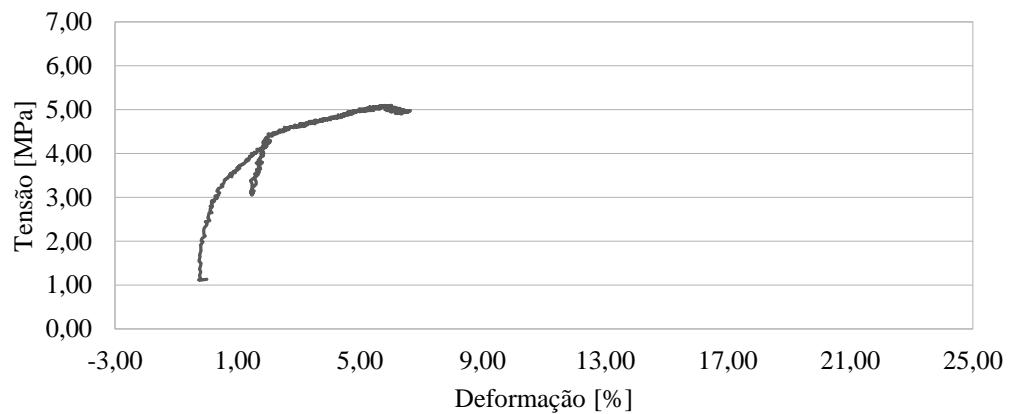
Fonte: A autora (2019).

Figura 53: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:2



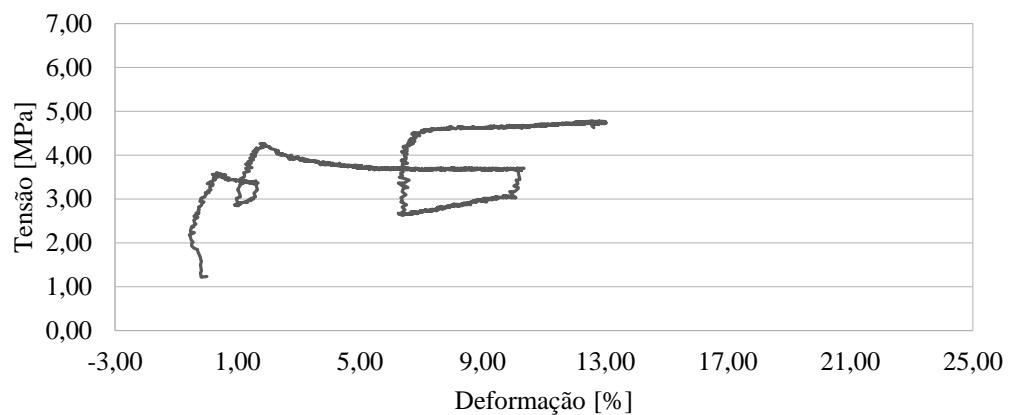
Fonte: A autora (2019).

Figura 54: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:2



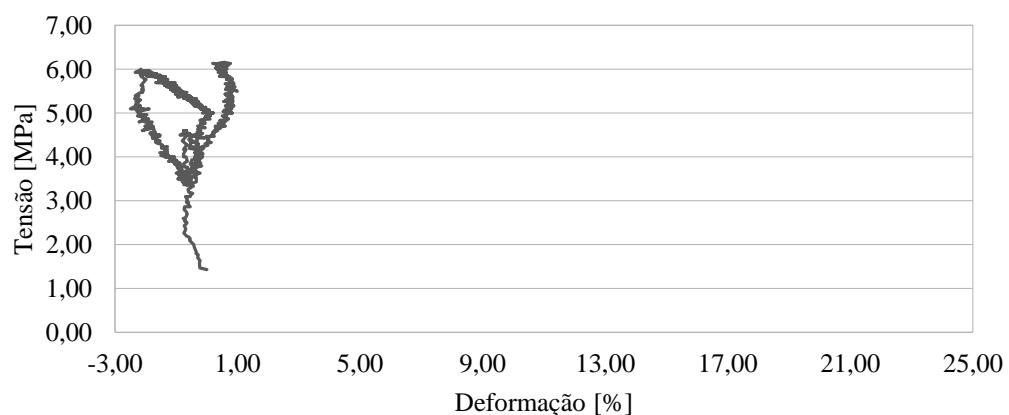
Fonte: A autora (2019).

Figura 55: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 2:1



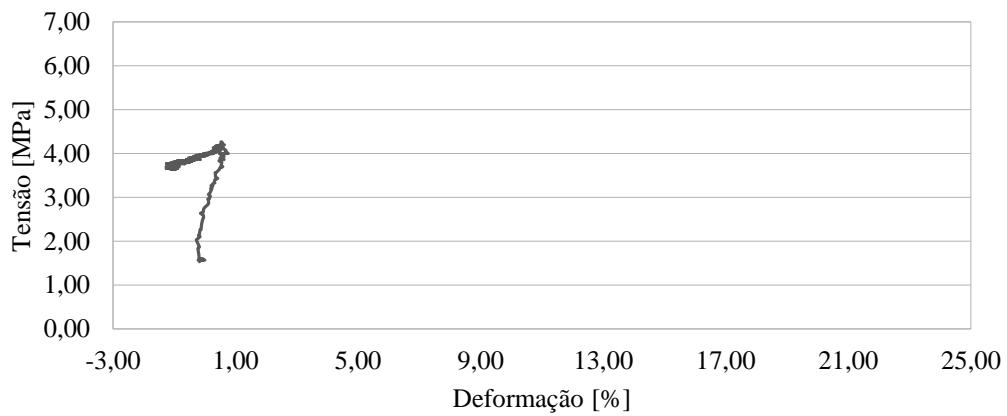
Fonte: A autora (2019).

Figura 56: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 2:1



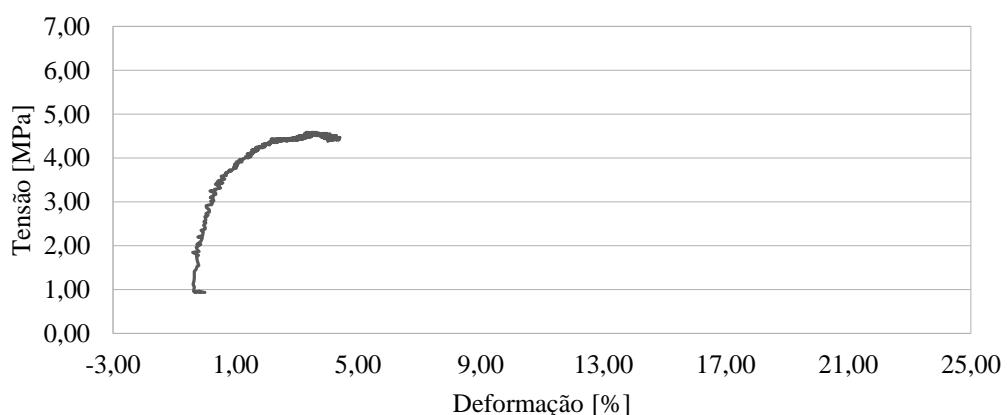
Fonte: A autora (2019).

Figura 57: Curva Tensão versus Deformação do Urdume no Corpo-de-Prova 1:3



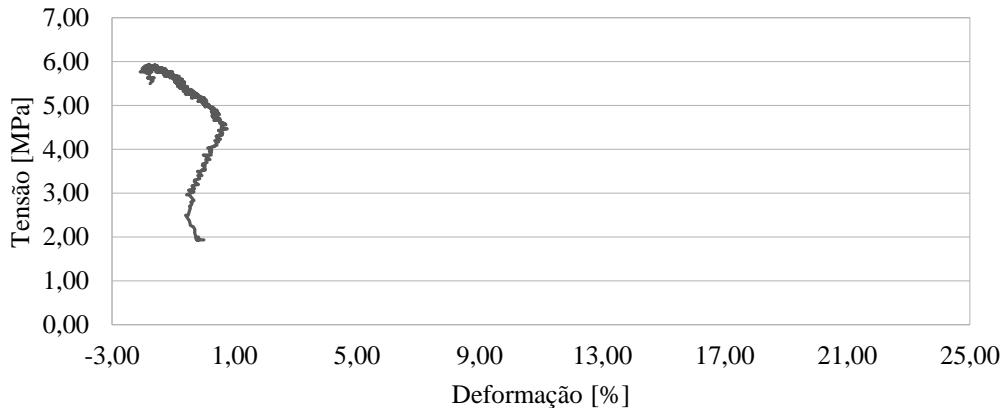
Fonte: A autora (2019).

Figura 58: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 1:3



Fonte: A autora (2019).

Figura 60: Curva Tensão versus Deformação da Trama no Corpo-de-Prova 3:1



Fonte: A autora (2019).

Nas razões de carregamento 1:1, 1: pré-tensão, pré-tensão:1, figuras 47 a 52, é possível verificar que o material apresenta um pequeno comportamento elástico e essencialmente um comportamento plástico.

Nas razões de carregamento 1:2, 2:1, 1:3 e 3:1, figuras 53 a 60, não foi possível caracterizar o comportamento do material. Para isto, seriam necessários ensaios com outras taxas de carregamento intermediárias.

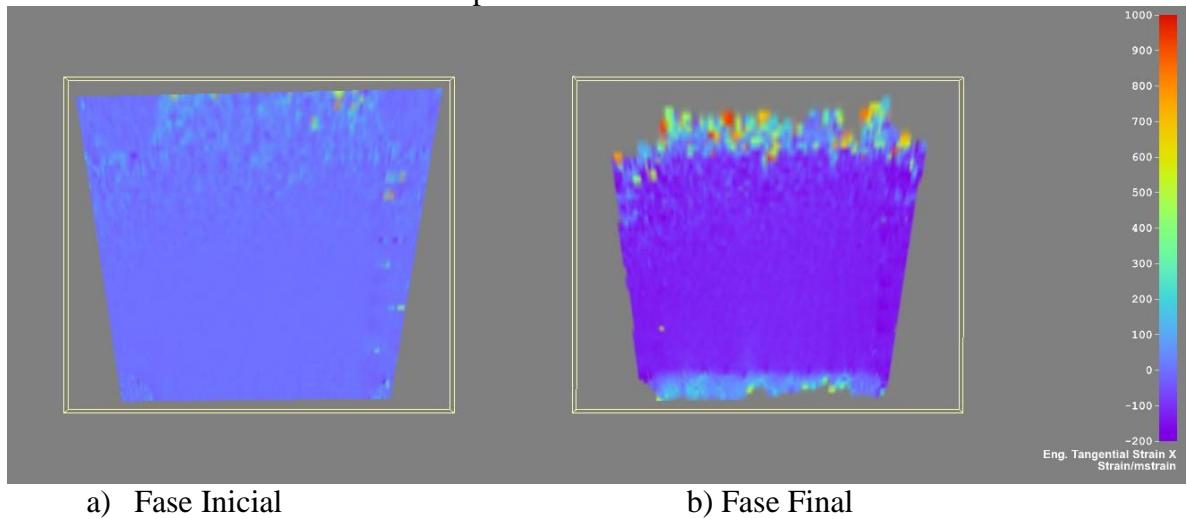
4.2 Análise do Campo de Deformações

Com o objetivo de visualizar as deformações, escolheu-se duas fotografias, uma da fase inicial e outra da fase final dos ensaios para acompanhar o desenvolvimento dos campos de deformação.

Como era esperado, analisando as Figuras 61 a 64, as deformações são máximas nas extremidades do corpo-de-prova e mais baixas no seu interior, isto é, na área de interesse.

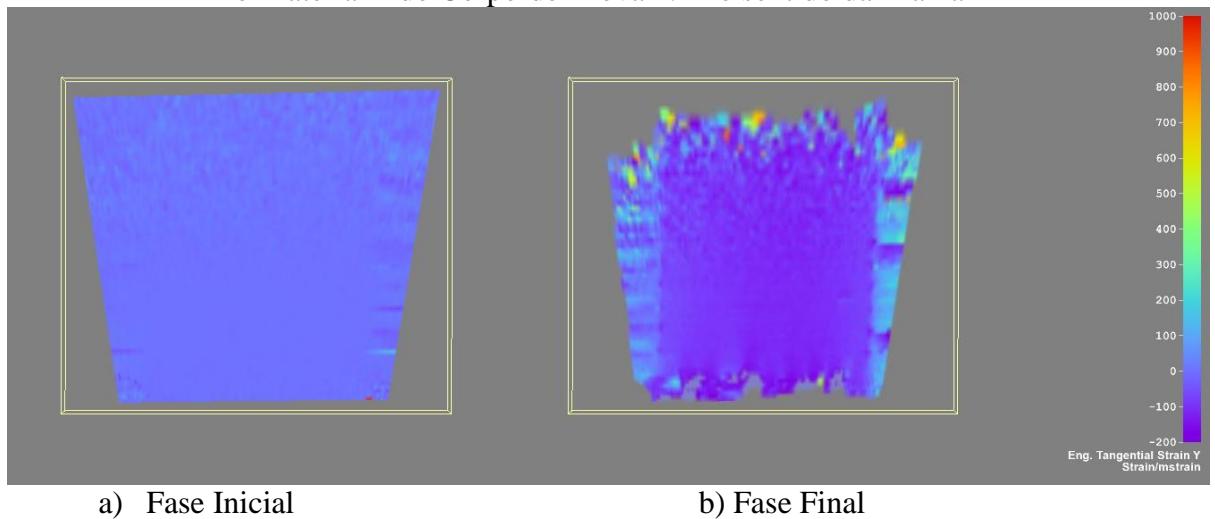
Esse comportamento repetiu-se em todos os ensaios. Nas Figuras 61 a 64 são apresentados os campos de deformações para as razões de carregamento 1:1 para ambos os materiais.

Figura 61: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 1 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido do Urdume



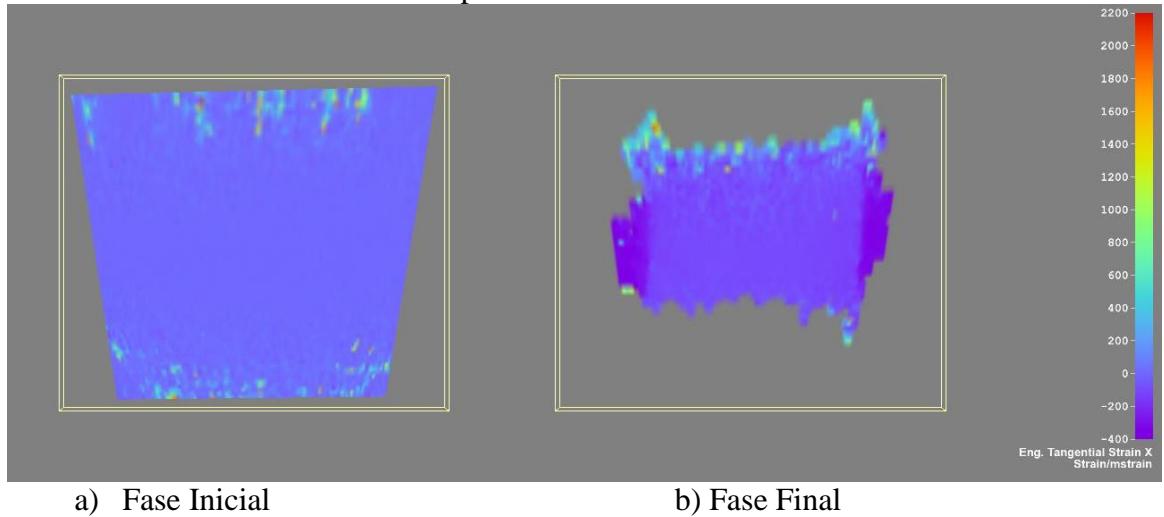
Fonte: A autora (2019).

Figura 62: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 1 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido da Trama



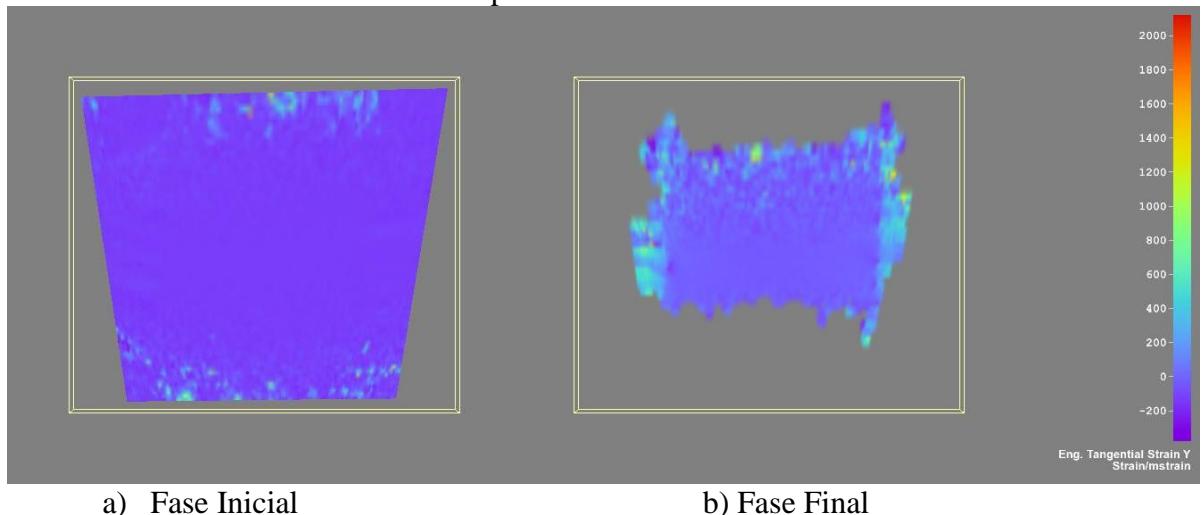
Fonte: A autora (2019).

Figura 63: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 2 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido do Urdume



Fonte: A autora (2019).

Figura 64: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 2 do Corpo-de-Prova 1:1 no sentido da Trama



Fonte: A autora (2019).

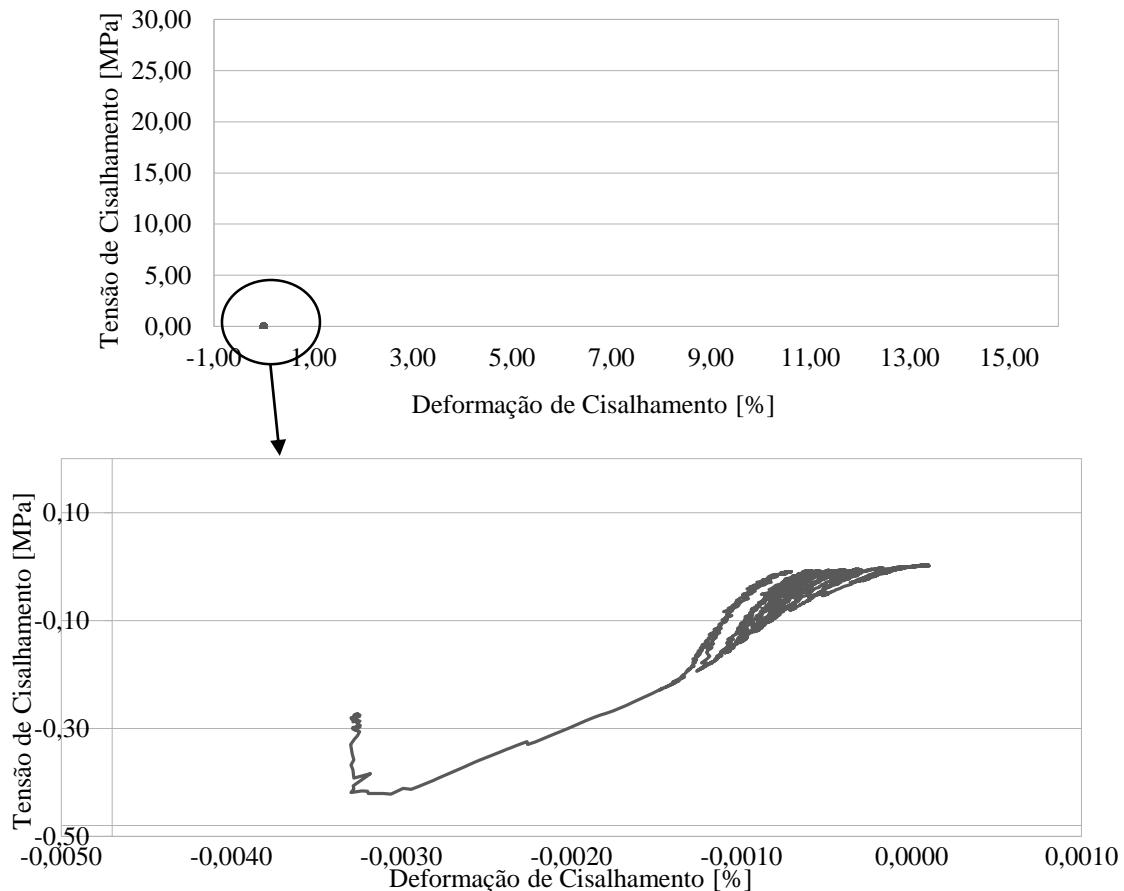
4.3 Cisalhamento

É possível observar que o valor do cisalhamento foi muito baixo, quando comparado aos valores de tensão e deformação dos ensaios, então pode-se considerar que não houve cisalhamento no ensaio, apenas próximo ao momento da ruptura, pois o material já apresentava deformações que levaram a distorções das fibras. Isso pode ser observado nas curvas de tensão de cisalhamento versus deformação de cisalhamento, Figuras 65 e 67, e nas fotografias do DIC,

Figuras 66 e 68, que mostram que as tensões de cisalhamento ficaram sempre próximas a zero para ambos os materiais.

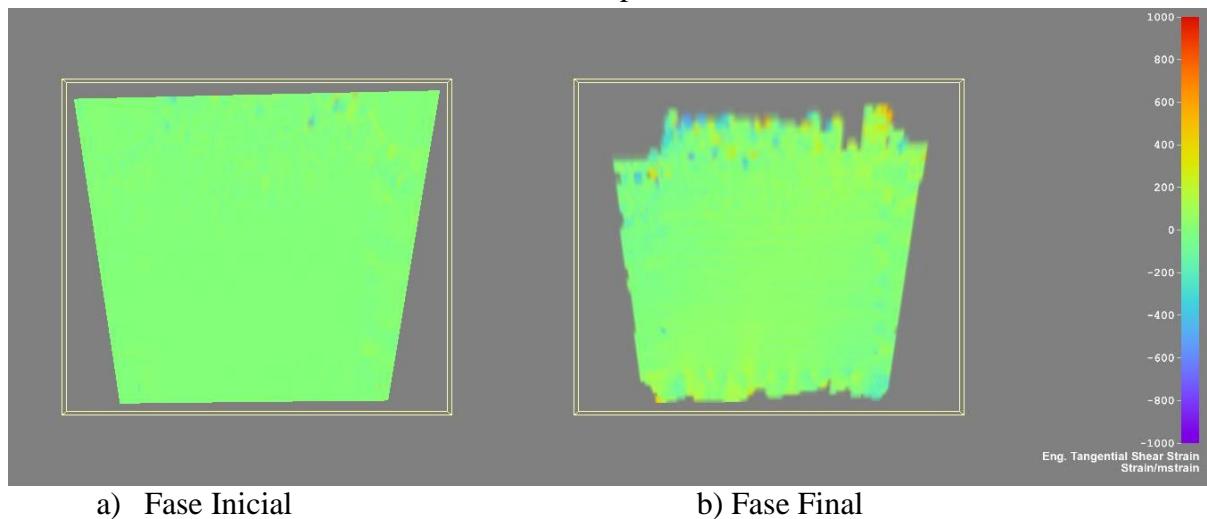
Esse comportamento repetiu-se em todos os ensaios, portanto são apresentados apenas os resultados dos ensaios com razões de carregamento 1:1.

Figura 65: Curva Tensão de Cisalhamento versus Deformação de Cisalhamento do Material 1 no Corpo-de-Prova 1:1



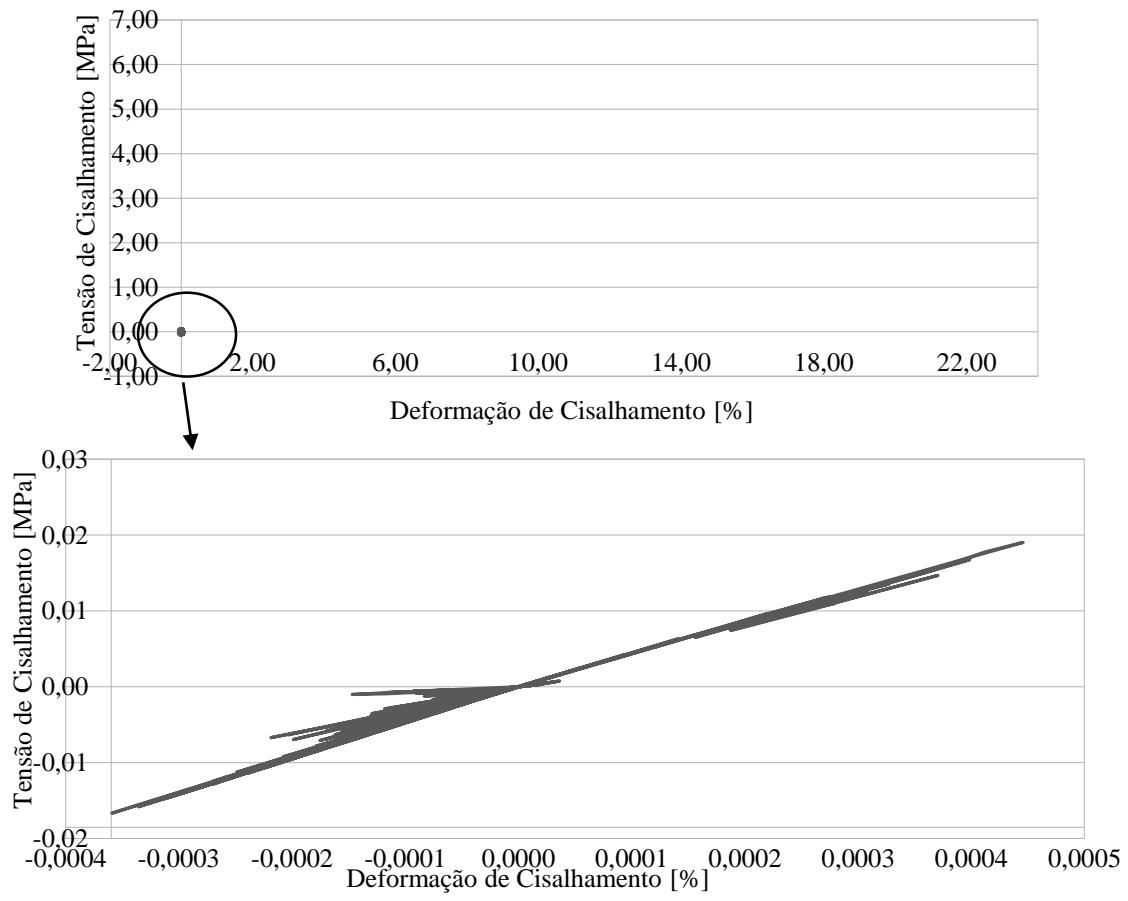
Fonte: A autora (2019).

Figura 66: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 1 do Corpo-de-Prova 1:1



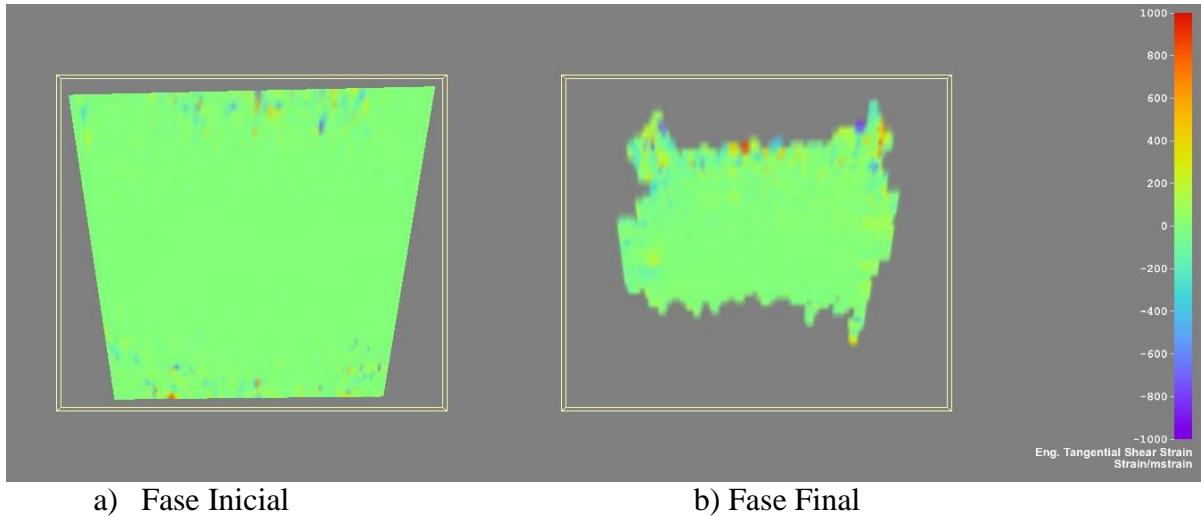
Fonte: A autora (2019).

Figura 67: Curva Tensão de Cisalhamento versus Deformação de Cisalhamento do Material 2 no Corpo-de-Prova 1:1



Fonte: A autora (2019).

Figura 68: Fotografias da configuração inicial a) e da configuração final b) do Ensaio com o Material 2 do Corpo-de-Prova 1:1



Fonte: A autora (2019).

4.2 Comparativos

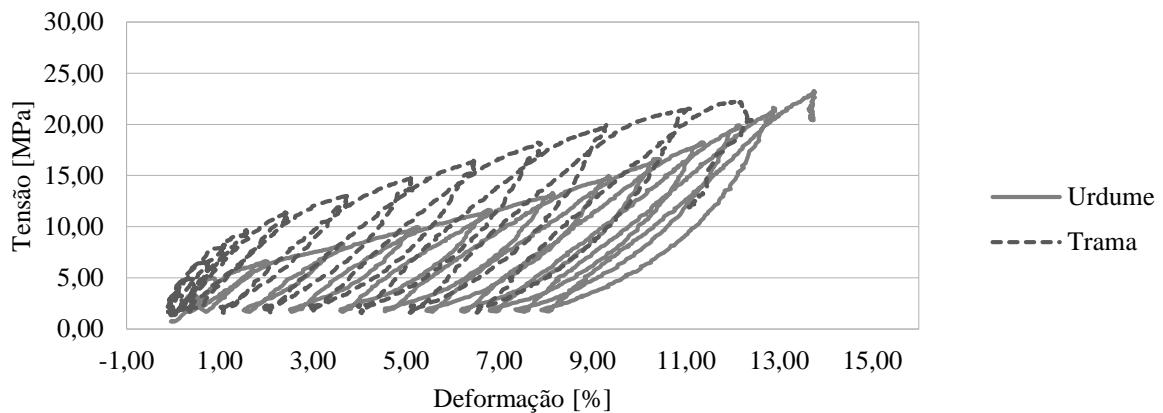
Fazendo o comparativo das curvas de tração versus deformação, do urdume e trama sendo submetidos a mesma razão de carregamento podemos observar o distinto comportamento do urdume e da trama.

Nos ensaios realizados com o Material 1, comparou-se das seguintes razões de carregamento: urdume (1:1) : trama (1:1), urdume (2:1) : trama (1:2) e urdume (1: pré-tensão) : trama (pré-tensão:1). Seguem os resultados nas Figuras 69, 70 e 71.

Pode- se observar nas Figuras 69 e 70 que o material apresentou resultados de tensão versus deformação diferentes para o comportamento do material no urdume e na trama, o que comprova não ser um material isotrópico.

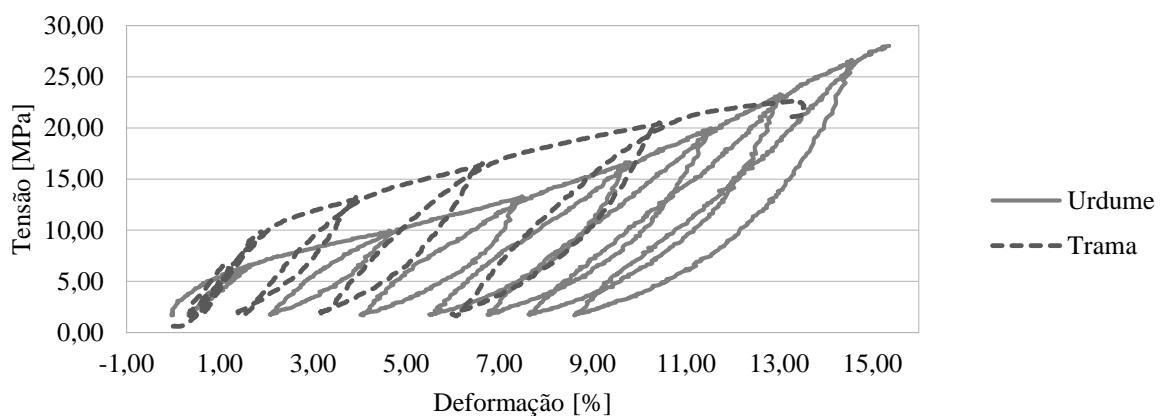
Porém quando se analisa a Figura 71, podem-se observar resultados mais próximos para o comportamento do urdume e da trama. Sendo esse ensaio com valores de pré-tensão, isto é, uma direção do material não recebia esforços de tração além dos valores de pré-tensão, que nesse caso eram 100 N. Esse ensaio é semelhante ao ensaio uniaxial. Avaliando os resultados percebe-se que realizar somente ensaios uniaxiais para esse material não fornece o real comportamento do material quando solicitado à esforços de tração biaxial, que é o caso das estruturas de membrana.

Figura 69: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:1 x Trama 1:1



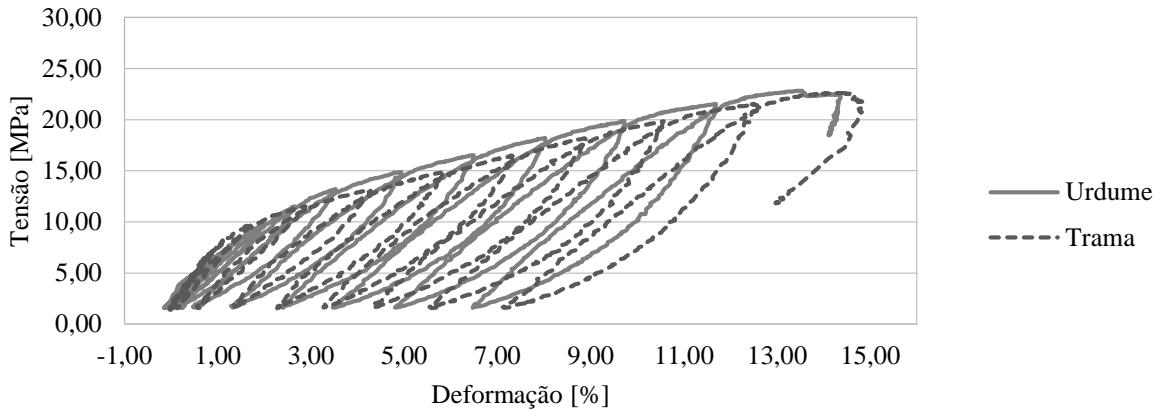
Fonte: A autora (2019).

Figura 70: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 2:1 x Trama 1:2



Fonte: A autora (2019).

Figura 71: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:pré-tensão x Trama pré-tensão:1

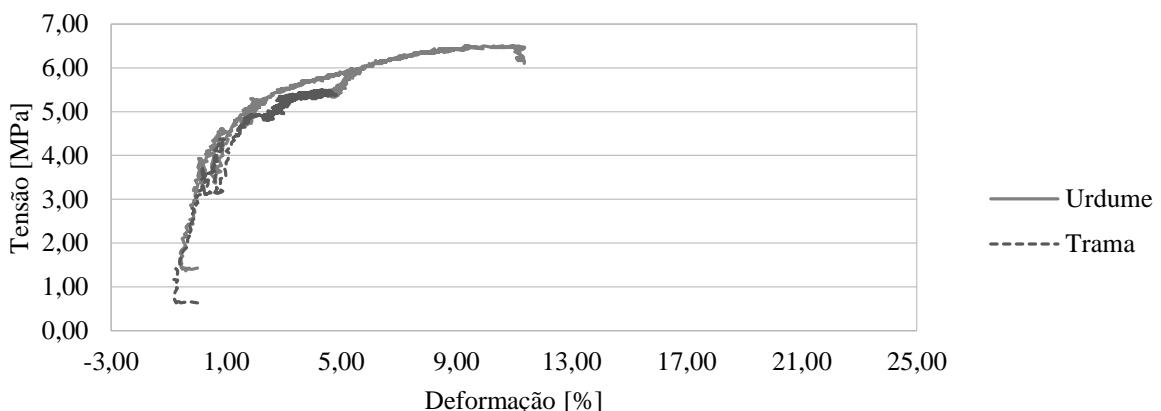


Fonte: A autora (2019).

No ensaios realizados com o Material 2, comparou-se as seguintes razões de carregamento: urdume (1:1) : trama (1:1), urdume (1: pré-tensão) : trama (pré-tensão:1). Seguem os resultados nas Figuras 72 e 73.

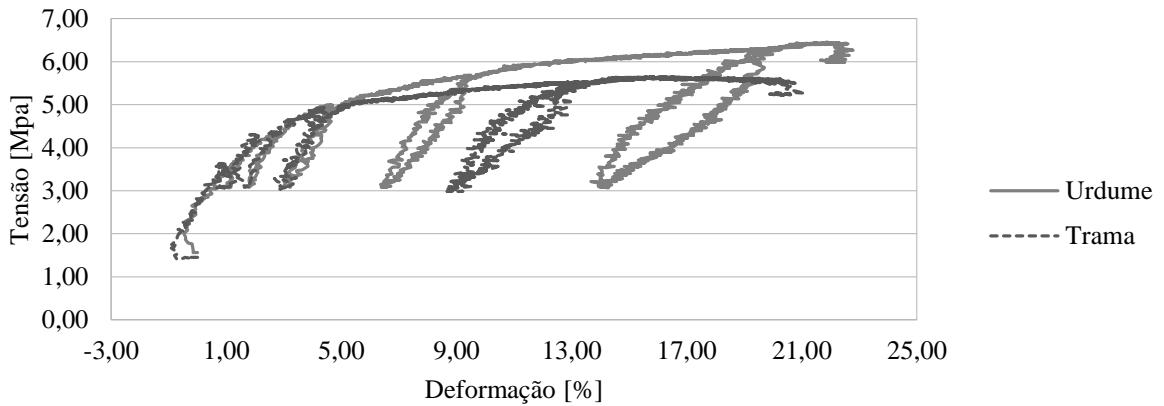
No Material 2 pode-se observar um comportamento semelhante ao do Material 1. Os resultados do comparativo da Figura 72 mostram resultados distintos para o comportamento do material no urdume e na trama. Já na Figura 73 os resultados são semelhantes, o que mostra que somente realizar os ensaios uniaxiais também não é indicado neste material.

Figura 72: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:1 x Trama 1:1



Fonte: A autora (2019).

Figura 73: Curvas Tensão versus Deformação Comparativo Urdume 1:pré-tensão x Trama pré-tensão:1



Fonte: A autora (2019).

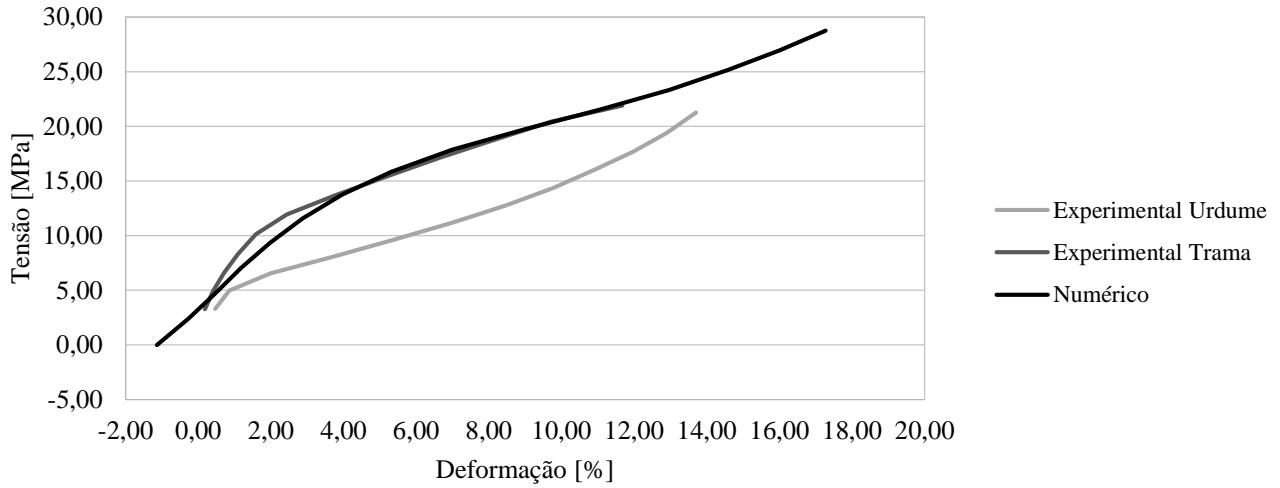
4.4 Simulação Numérica

Os resultados obtidos com as superfícies NURBS são comparadas com os resultados experimentais dos ensaios de tração biaxial, como pode ser observado nas Figuras 74 a 79.

Pela análise das curvas podemos observar que as modelagens numéricas que mais se aproximaram dos resultados experimentais foram os comparativos dos valores experimentais da trama e valores numéricos com razão de carregamento 1:1, valores experimentais do urdume e valores numéricos com razão de carregamento 1:pré-tensão, valores experimentais da trama e valores numéricos com razão de carregamento pré-tensão:1 e valores experimentais da trama e valores numéricos com razão de carregamento 1:2.

Na razão de carregamento 1:1, a análise não linear foi realizada em 15 passos com controle de força até 1000 N. Foram utilizados os dados da trama.

Figura 74: Comparativo Experimental Urdume, Experimental Trama e Numérico 1:1

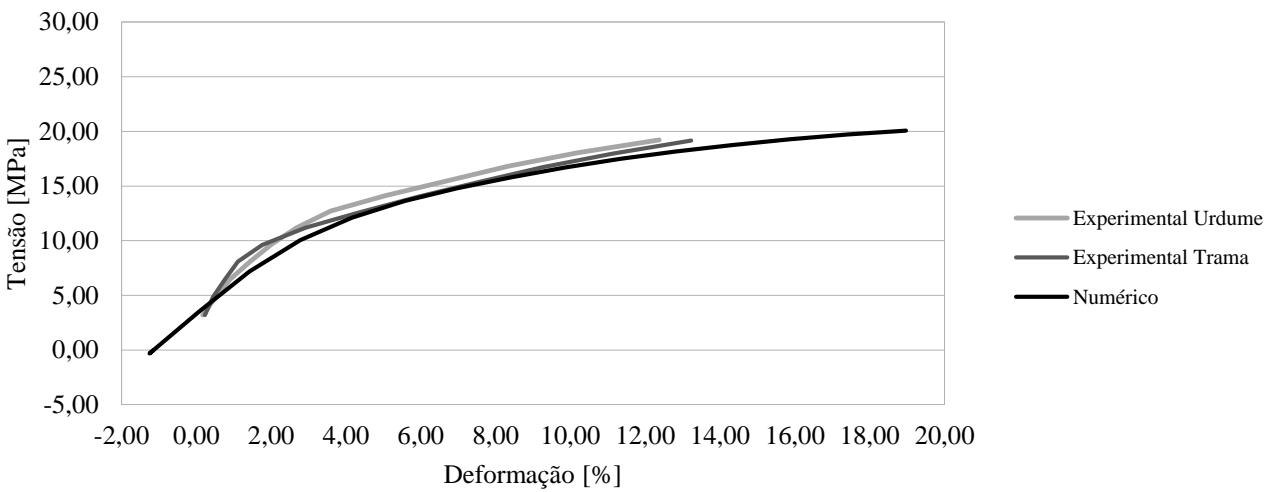


Fonte: A autora (2019).

Na razão de carregamento 1: pré-tensão a análise não linear foi realizada em 15 passos com controle de força até 700 N. Na razão de carregamento 1: pré-tensão a análise não linear foi realizada em 16 passos com controle de força até 700 N. Foram utilizados os dados da trama.

Na Figura 75 podemos analisar que o resultado numérico é o mesmo para as razões de carregamento 1:pré-tensão e pré-tensão:1, visto que foi considerado comportamento isotrópico.

Figura 75: Comparativo Experimental Urdume, Experimental Trama e Numérico 1:pré-tensão e pré-tensão: 1

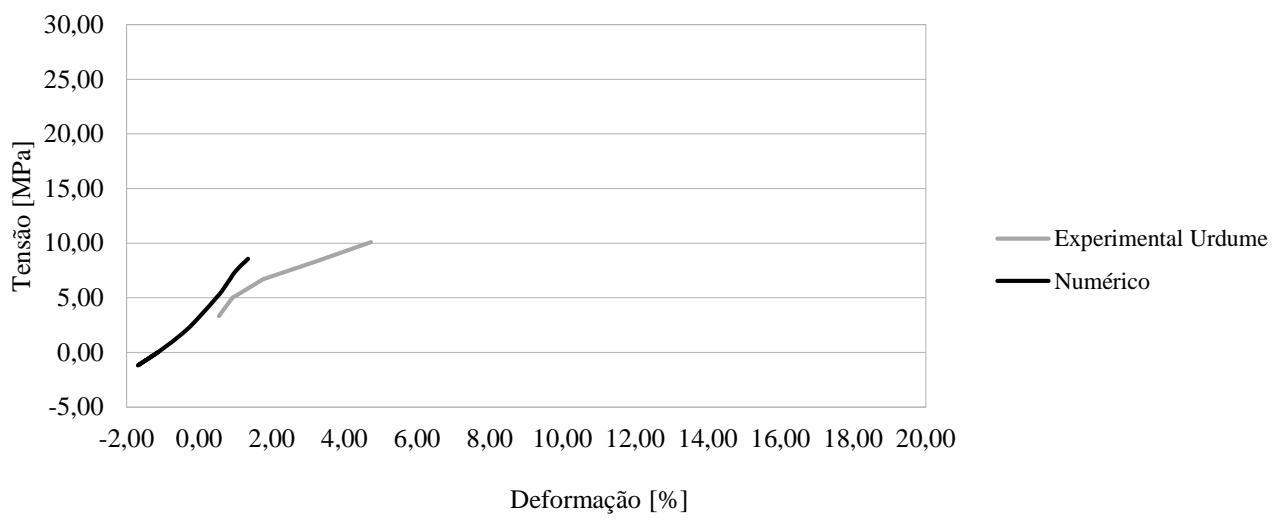


Fonte: A autora (2019).

Na razão de carregamento 1:2, a análise não linear foi realizada em 22 passos com controle de força até 260 N. Foram utilizados os dados da trama.

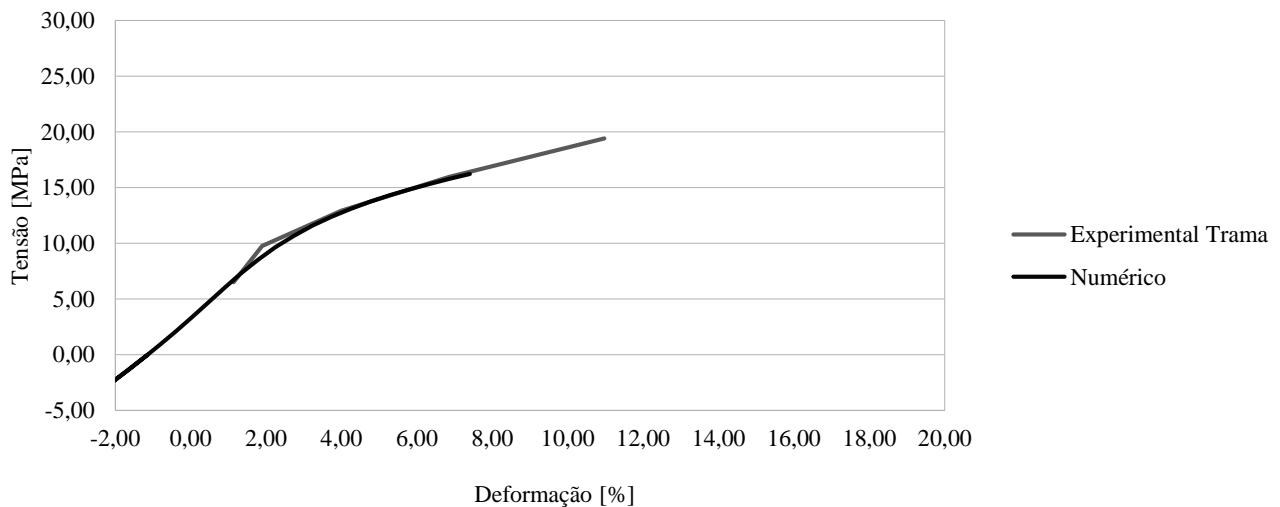
Analizando as Figuras 76 a 79, referentes as razões de carregamento 1:2 e 2:1, podemos verificar que os resultados numéricos ficaram próximos aos resultados experimentais apenas na Figura 76. Isto ocorreu pois foram utilizados dados da trama. O ideal para as demais situações seria considerar uma superfície para cada direção.

Figura 76: Comparativo Experimental Urdume e Numérico 1:2



Fonte: A autora (2019).

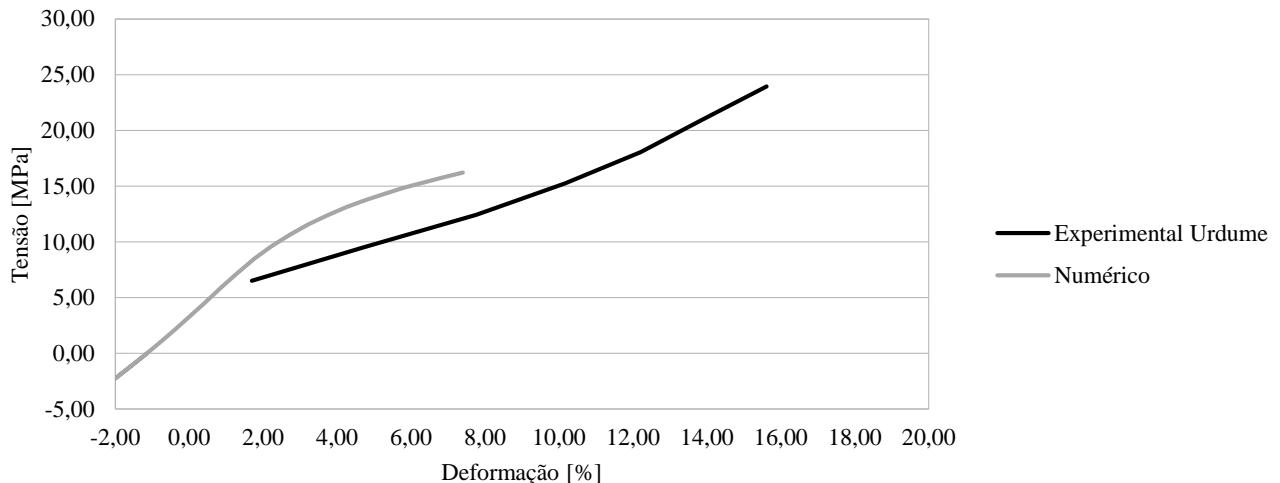
Figura 77: Comparativo Experimental Trama e Numérico 1:2



Fonte: A autora (2019).

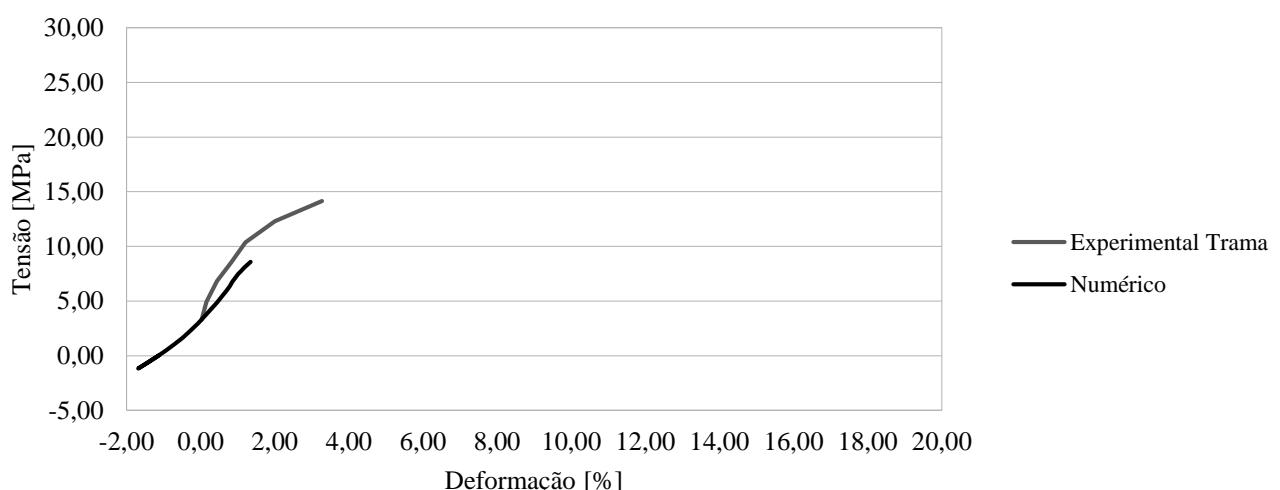
Na razão de carregamento 2:1, a análise não linear foi realizada em 22 passos com controle de força até 260 N. Foram utilizados os dados da trama.

Figura 78: Comparativo Experimental Urdume e Numérico 2:1



Fonte: A autora (2019).

Figura 79: Comparativo Experimental Trama e Numérico 2:1



Fonte: A autora (2019).

5 CONCLUSÕES

Com base em estudos de publicações no meio científico e ensaios de tração biaxial, este trabalho apresentou um estudo sobre o comportamento mecânico de membranas sob diferentes razões de carregamento.

A parte inicial do trabalho buscou apresentar uma contextualização do tema, as utilizações e características dos materiais e o emprego em estruturas. Notou-se a importância desta contextualização para incentivar o estudo dessa tecnologia no Brasil.

Neste trabalho, foram ensaiados dois tipos de materiais, sendo o Material 1 o tecido de fibra de poliéster e o Material 2 a lona de polietileno.

Com os resultados dos ensaios nos Materiais 1 e 2, foi possível perceber que ambos os materiais não são isotrópicos, atestando assim a necessidade dos ensaios biaxiais.

Foi possível concluir que o Material 1 apresenta inicialmente um comportamento elástico linear e conforme aumenta-se o carregamento nos ciclos e consequentemente as deformações, ele apresenta um comportamento elastoplástico não linear. Já o Material 2 apresenta um comportamento principalmente plástico.

Nos ensaios realizados com o Material 1 com as razões de carregamento 1:3 e 3:1 e no Material 2 com as razões de carregamento 1:2, 2:1, 1:3 e 3:1 não foi possível caracterizar o comportamento mecânico do material, desta forma recomenda-se a utilização, para ambos os materiais, de taxas intermediárias em próximas análises, tais como, 1:0,25, 0,25:1, 1:05, 0,5:1, 1:0,75 e 0,75: 1.

Com os resultados dos ensaios com razões de carregamento 1:pré-tensão e pré-tensão:1, em ambos os materiais, foi possível avaliar que estas razões de carregamento não produzem resultados que representam o comportamento real do material quando solicitado biaxialmente.

Conclui-se também que a lona de polietileno não é indicada para utilização em estruturas de membrana devido sua resistência ser muito baixa e sua deformação muito alta quando comparadas aos demais materiais empregados neste tipo de estruturas.

Quanto ao cisalhamento, é possível atestar que utilizando o modelo de corpo-de-prova proposto no trabalho foi possível evitar que o mesmo ocorresse durante os ensaios biaxiais.

Com as superfícies de resposta NURBS para o Material 1, obteve-se resultados satisfatórios e que atestaram e validaram os resultados experimentais. A partir disso, foi possível realizar a modelagem do comportamento desse material e comparar os resultados

numéricos com os resultados experimentais. Essas análises também confirmaram que o modelo de material para a modelagem numérica não pode ser isotrópico. Recomenda-se em próximos trabalhos implementar um modelo anisotrópico ou ortotrópico para efetuar as análises numéricas e compará-las novamente com os dados experimentais.

Este estudo permitiu desenvolver uma melhor compreensão sobre os ensaios biaxiais e o comportamento de membranas quando submetidas à esforços de tração.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M., FANGUEIRO, R.; HONG, H. **Têxteis Técnicos: Materiais do Novo Milênio.** Braga: Williams Ltda, 2000. 1 v.
- ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais.** 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 1 v.
- BELEZA, S. C. A. **Medição de deformações através da técnica de Correlação Digital de Imagem.** 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.
- BLENKINSOP, A. J. **MASYS - Guide to Testing Structural Fabrics.** Newcastle, 2015.
- BORGES FILHO, J. P. **Projeto de Tensoestruturas em Membrana com Aplicação de Programação Não-Linear.** 2006. 254 f. Tese (Doutorado em Estruturas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2008. 1 v.
- CHIVANTE, M. R. P. **Avaliação Experimental das Relações Tensão-Deformação de um Tecido de Fibra de Vidro Recoberto com PTFE.** 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- COELHO, M. A. O. **Analysis of Pneumatic Structures Considering Nonlinear Material Models and Pressure-volume Coupling.** 2012. 142 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- COELHO, M. A. O.; ROEHL, D.; BLETZINGER, K. **Material Model Based on Response Surfaces of NURBS Applied to Isotropic and Orthotropic Materials.** In: P.A. Muñoz-Rojas. (Org.). Computational Modeling, Optimization and Manufacturing Simulation of Advanced Engineering Materials. 1ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2016, p. 353-373.

COSTA, V. H. P. **Máquina para Ensaios de Tração Biaxial de Membranas: aprimoramento da instrumentação e automação.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2018.

COMPARINI, A.; PASSOS, G.; GRAZIADEI, H.; SILVA, P. H. F.; LOUZADA, F. **Metodologia de superfície de resposta: Uma introdução nos softwares R e Statistica.** São Carlos: Icmc, 2009. 14 p.

EN 17117-1:2018. **Rubber or plastics-coated fabrics - Mechanical test methods under biaxial stress states. Part 1: Tensile stiffness properties.** Reino Unido, 2018.

LINDENBERG NETO, H. **Ensinando a história da engenharia de estruturas a alunos de engenharia civil.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA, 30°, 2002, São Paulo. *Anais...*São Paulo: COBENGE, 2002, [CD-ROM].

MINETTO, C. F. **Um Estudo sobre Curvas NURBS.** 2003. 111 f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MYERS, R. H.; KHURI, A. I.; CARTER JR.; W.H. **Response surface methodology: 1966-1988.** Technometrics, v.31, n.2, p. 137-157, 1989.

MSAJ/M-02-1995, **Testing Method for Elastic Constants of Membrane Materials.** Standard of the Membrane Structures Association of Japan, Tokyo, Japão, 1995.

NETO, F.L.; PARDINI, L.C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2006. 1 v.

OBATA, S. H. **Condicionantes projetuais e tecnológicos: arquiteturas têxteis e tensoestruturas complexas.** 2010. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2010.

OLIVEIRA, M. B. **Estudo das Estruturas de Membrana: uma abordagem integrada no sistema construtivo, do processo de projetar e dos métodos de análise.** 2001. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

OTTO, F.; TROSTEL, R. **Tensile Structures:** v. 1 – pneumatic structures, 1976, The MIT Press, Cambridge.

PARGANA, J. B.; Lloyd-Smith, D.; Izzuddin, B. A. **Advanced Material Model for Coated Fabrics used in Tensioned Fabric Strucutures.** Engineering Structures, [S.l.], v. 29, p. 1323-1336, 2007.

PASQUAL, T. C. S. **Um Estudo sobre a Ação do Vento nas Estruturas de Membrana.** 2011. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

PETERS, W. H., RANSON, W. F. (1982). **Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis.** Optical Engineering, 21(3), 427-431.

PAULETTI, R, M. O. **Anotaciones sobre el Proyecto y el Análisis de las Estructuras Tensadas.** Revista Entre Rayas (Caracas), n. 88, p. 30-41, 2011.

REINHARDT, H. W. **On The Biaxial Testing and Strength of Coated Fabrics.** 1975.

ROBERT MCNEEL & ASSOCIATES. Rhinoceros 5 Seatle: 2016.

ROBBIN, T. **Engineering a new architecture.** 1996. United States of America, Quebecor-Eussy Prees, Leominster, Massachusetts.

SILVA, C. A. B. **Modelo Computacional para Análise da Tensoestrutura de Cobertura do Centro Comunitário da Universidade de Brasília.** 2006. 92 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasilia, Brasília, 2006.

UGURAL, A. C. **Mecânica dos Materiais.** 1. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2009. 1 v.

VAN VLACK, L. H. **Princípios e Ciências dos Materiais.** 17. ed. São Paulo: Editora Blucher. 2008. 1 v.

VANDENBERG, M. **Soft Canopies.** 1996. Great Britain, Academy Editions. 64p.

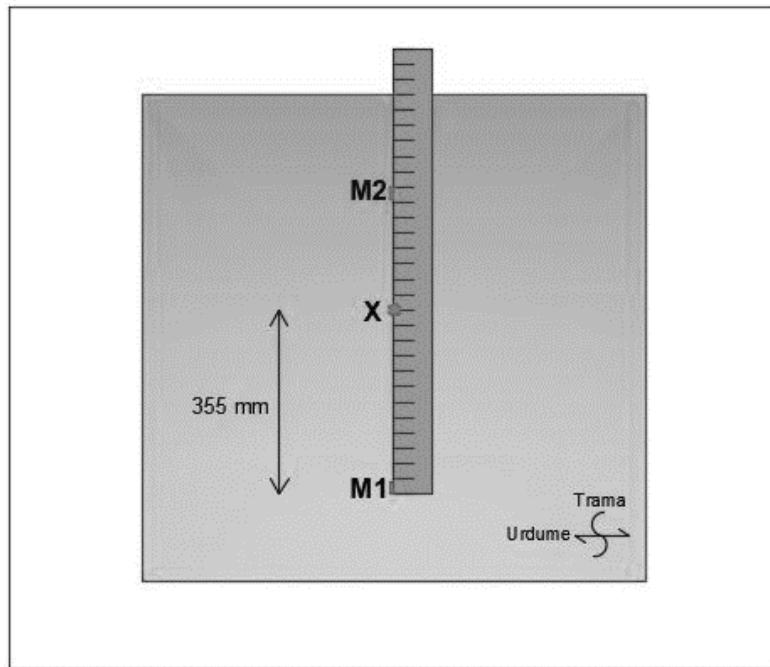
APÊNDICE A – PREPARAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA

- Demarcações

Para a preparação do corpo-de-prova foi necessário uma régua de aço, marcador permanente ou caneta esferográfica.

Usando a régua de aço e o marcador escolhido, foi marcado (M1), deixando uma borda da extremidade cortada. Em seguida, marcado (M2) a 710 mm de M1, ao longo do comprimento do rolo. Com a régua conectando M1 e M2, foi medido e marcado com uma cruz (X) 355 mm da M1. Este é o ponto central do corpo-de-prova. Para maior precisão, ao marcar esses e outros pontos, devem ser utilizadas marcas "T" ou cruzes no lugar de pontos, conforme Figura 80.

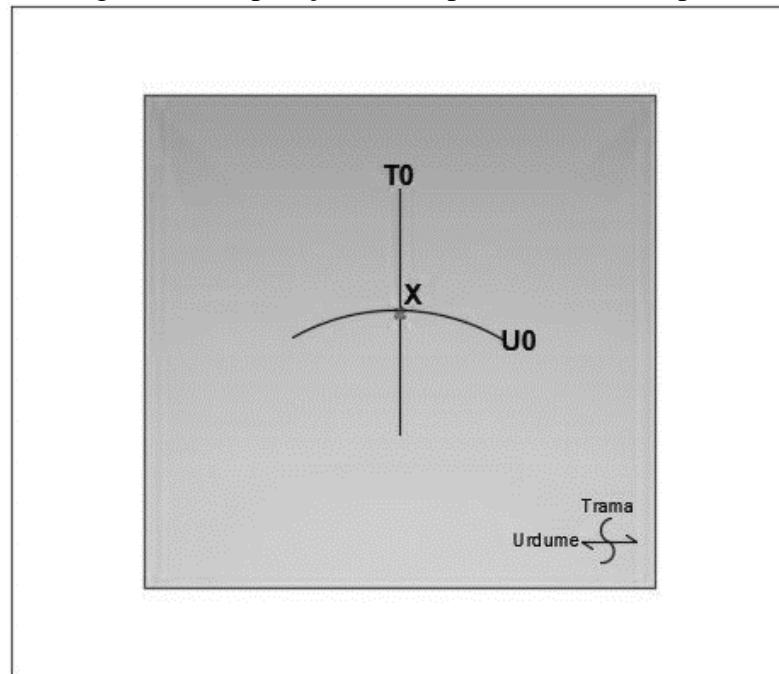
Figura 80: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 1



Fonte: A autora (2018).

Após, foram marcados com linhas tracejadas, de aproximadamente 150 mm de cada lado, um único fio do urdume (U0) cruzando o ponto central (X). Este processo foi repetido em um único fio da trama (T0), de acordo com a Figura 81. Este formato "+" definiu a linha de direção para a cruz final.

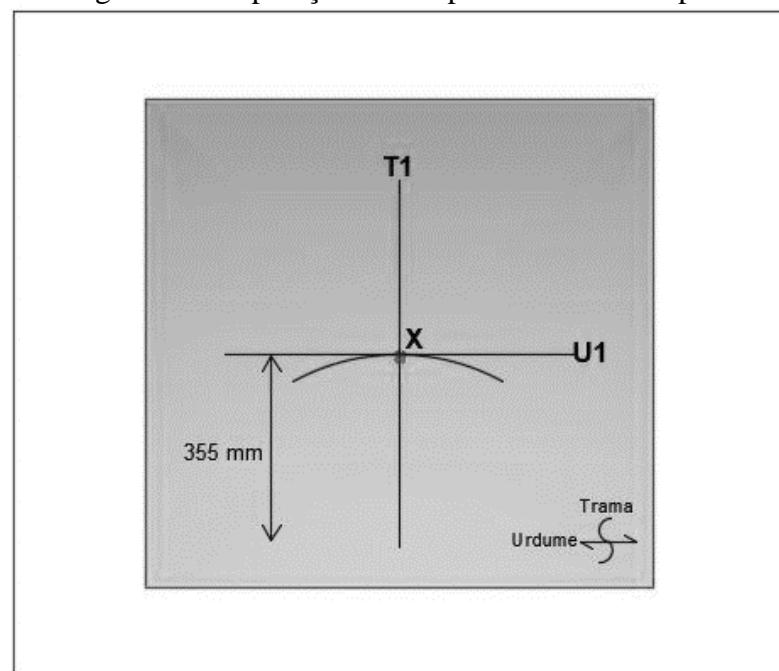
Figura 81: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 2



Fonte: A autora (2018).

Usando a régua de aço, foi desenhada uma linha tracejada conectando os pontos em cada direção (U1 / T1), de acordo com a Figura 82. Ambas as linhas foram estendidas 355mm de X em ambas as direções.

Figura 82: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 3

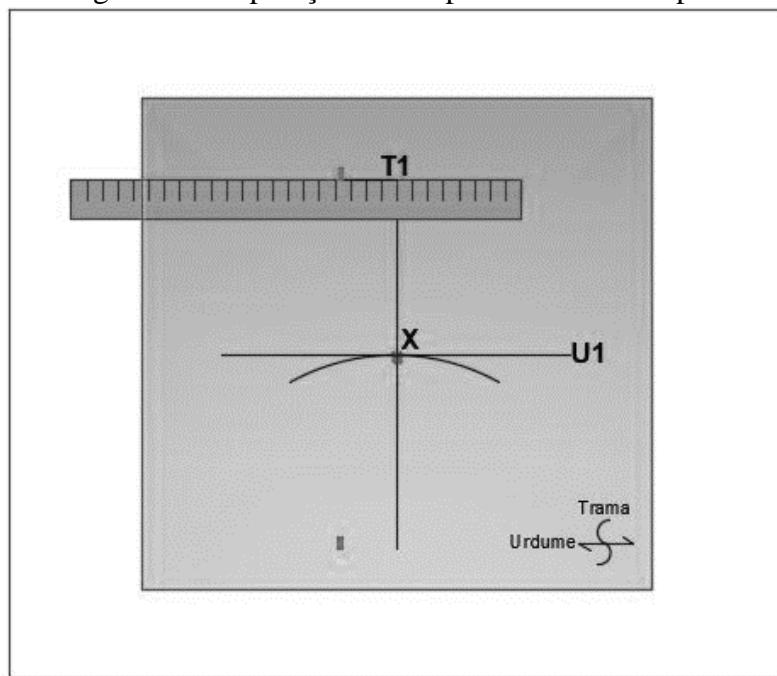


Fonte: A autora (2018).

Após marcadas as linhas centrais do corpo-de-prova, foi necessário marcar a largura dos braços. Em uma extremidade da linha T1, usando uma régua e um esquadro em T1, foi desenhado uma marca exatamente a 75mm de distância de T1 em uma linha perpendicular. Este processo foi repetido na outra extremidade do T1 e as marcas conectadas, para criar uma linha paralela com T1 (T2), conforme Figura 83.

Repetiu-se esse passo no outro lado do T1 para criar uma linha (T3) que também é a distância perpendicular de 75mm do T1, conforme Figura 84. O mesmo foi feito na direção do urdume para criar as linhas U2 e U3.

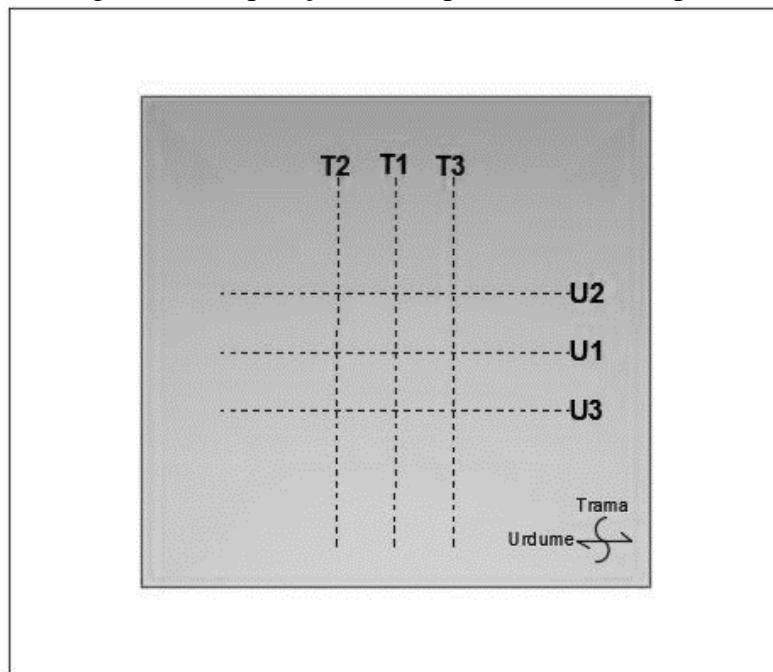
Figura 83: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 4



Fonte: A autora (2018).

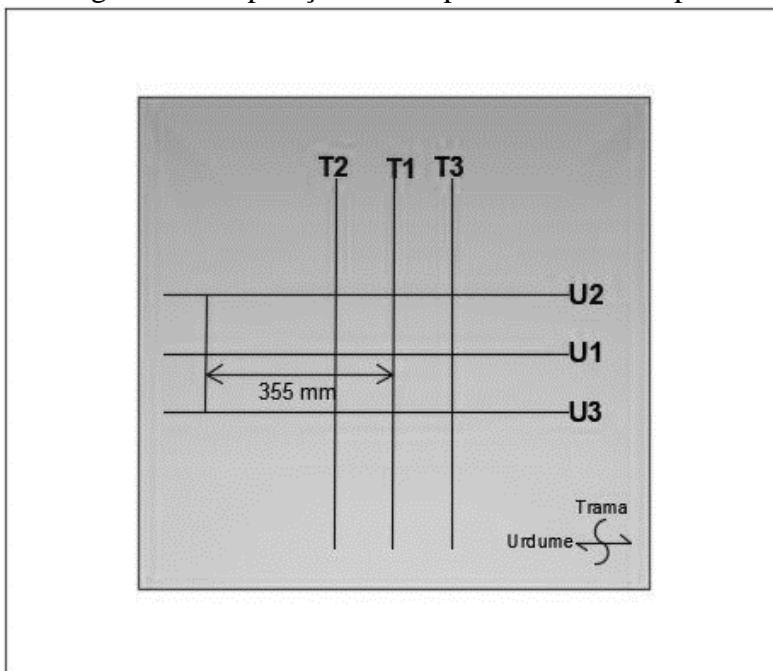
Após, foi medido 355mm ao longo das linhas centrais (U1 / T1) de X e marcado cada um dos quatro braços. Usando o esquadro, desenhado as linhas finais do braço, certificando-se de que cada uma estivesse perpendicular às linhas paralelas (U2 / U3, T2 / T3), de acordo com a Figura 85.

Figura 84: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 5



Fonte: A autora (2018).

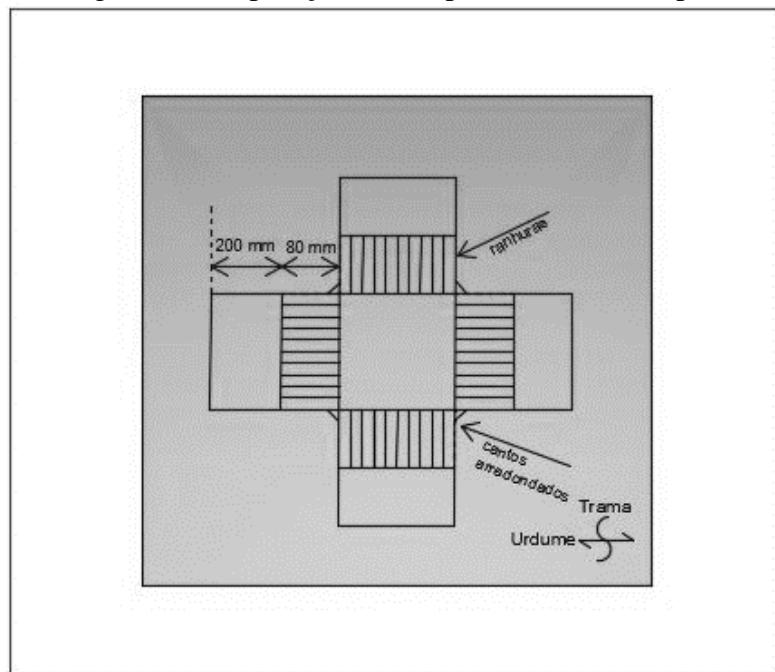
Figura 85: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 6



Fonte: A autora (2018).

Os braços foram marcados. Após, foram desenhadas as ranhuras e os raios. Para o teste biaxial padrão, as ranhuras têm 80mm de comprimento e 15mm de largura e o raio dos cantos do corpo-de-prova é de 13mm, conforme Figura 86.

Figura 86: Preparação do Corpo-de-Prova – Etapa 7



Fonte: A autora (2018).

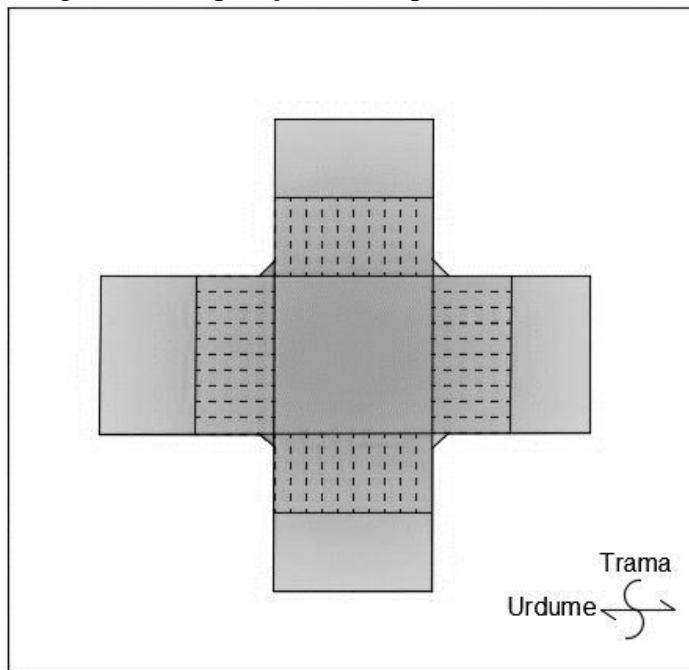
- Cortes

Para fazer o corte, foram utilizados uma régua de aço e um estilete. Podem ser utilizadas várias técnicas, porém se deve atentar para alguns detalhes, tais como:

- Certificar-se de manter uma boa pressão na régua de aço durante o corte. Isso pode ser feito colocando um peso no lado mais distante da régua no momento do corte.
- É melhor cortar o tecido diretamente ao lado da área de pressão na régua de aço, para evitar o desalinhamento da régua.
- Uma vez iniciado o corte, o estilete não deve ser removido do tecido, pois isso pode causar um corte desalinhado.
- Alguns tecidos são mais difíceis de cortar do que outros, por isso é indicado praticar antes de fazer o corte final.

Após efetuados os cortes, o corpo-de-prova está pronto, conforme Figura 87.

Figura 87: Preparação do Corpo-de-Prova - Cortes



Fonte: A autora (2018).

- **Soldas**

O método de solda pode variar dependendo do tipo de revestimento de tecido ou material, podendo ser feito com colas ou aplicação de calor. Para as soldas nos Materiais 1 e 2, foram utilizadas colas adesivas instantâneas. É indicada a utilização de luvas nesse processo.

Para ambos os materiais, a cola foi aplicada em ziguezague ao longo da área de solda mais interna com as posições das linhas de cola.

O braço foi dobrado para alinhar a sua extremidade com a linha de dobra da solda. Cuidadosamente, foram empurradas as duas superfícies da área de solda juntas. Foi utilizado um objeto plano sólido para aplicar pressão por aproximadamente 60 segundos.

Este processo foi repetido para cada braço. A solda ficou seca e pronta para testes em aproximadamente 20 minutos.

- **Pintura**

Para medir as deformações com o equipamento *Digital Image Correlation* (DIC), foi necessário pintar os corpos-de-prova, de modo que esta pintura fosse com padrão aleatório, tamanho dos grãos semelhantes e bastante contraste.

Como ambos os materiais tinham cor sólida, não foi necessário fazer uma base de tinta antes. Foram feitos então salpicos utilizando tinta spray preto fosco para plásticos e acrílicos.

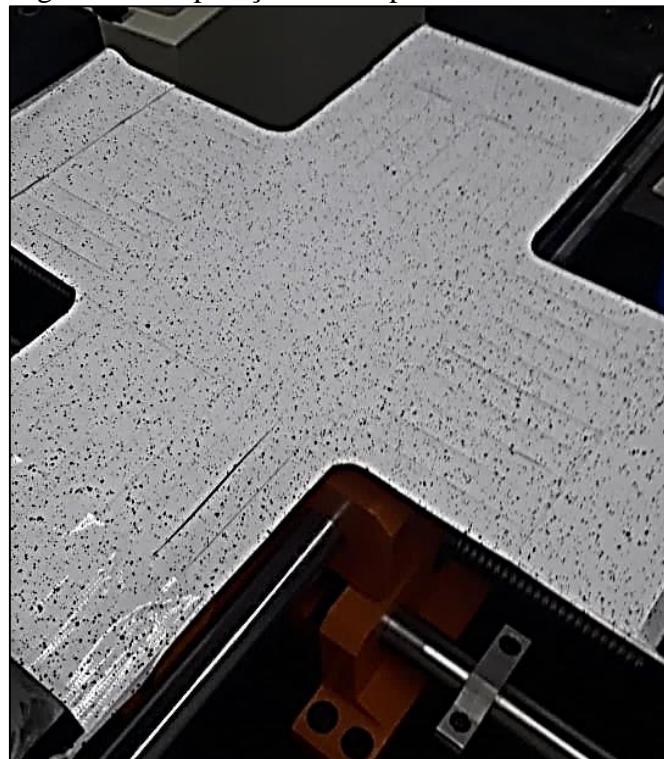
É indicada a tinta spray por sua rápida secagem.

A cor deve ser fosca para evitar reflexões de luz, as quais podem distorcer a imagem.

A pintura ficou seca e pronta para testes em aproximadamente 30 minutos.

Essa pintura pode ser verificada na Figura 88.

Figura 88: Preparação do Corpo-de-Prova - Pintura

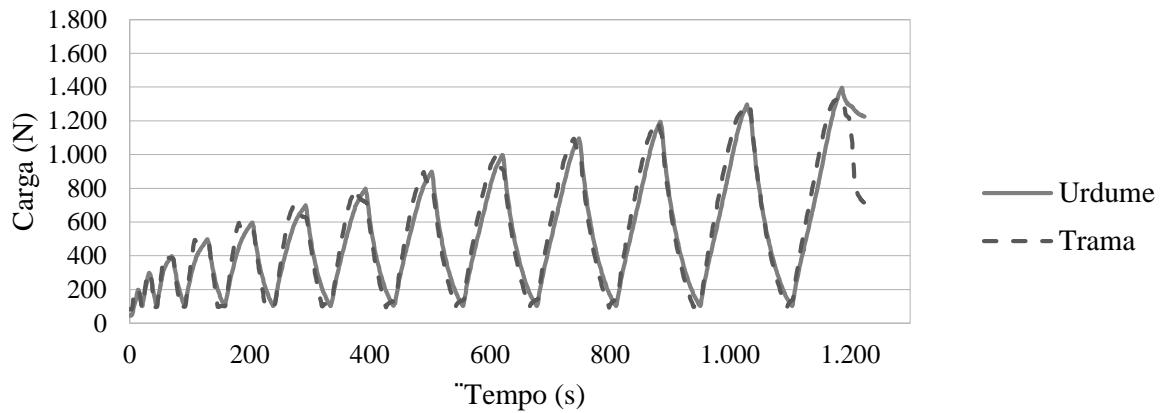


Fonte: A autora (2018).

APÊNDICE B – PERFIS DE CARGA MATERIAL 1

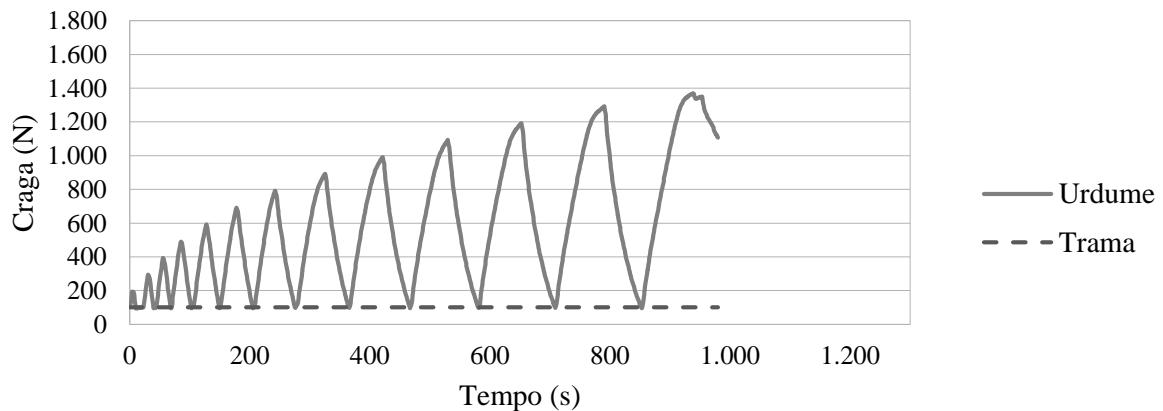
Seguem a seguir, nas Figuras 89 a 95, os perfis de carga utilizados nos ensaios de tração biaxial realizados com o **Material 1**.

Figura 89: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:1



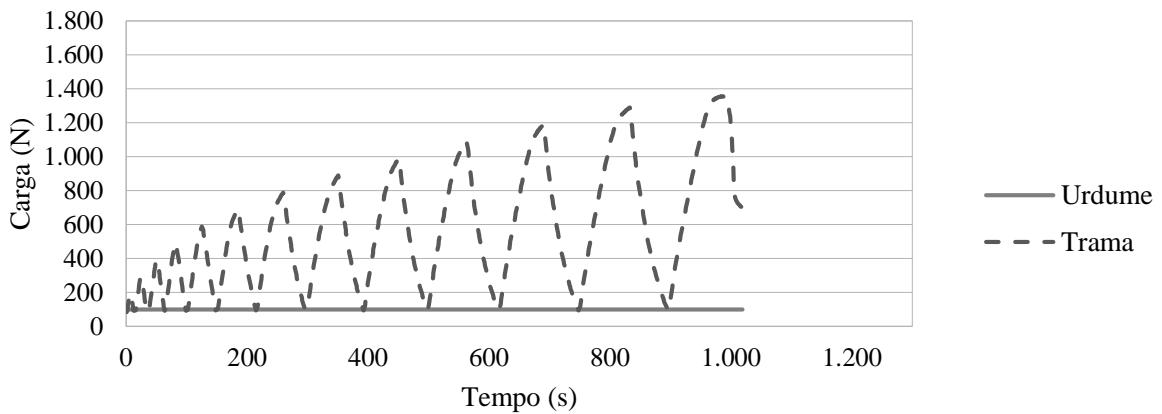
Fonte: A autora (2019).

Figura 90: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:pré-tensão



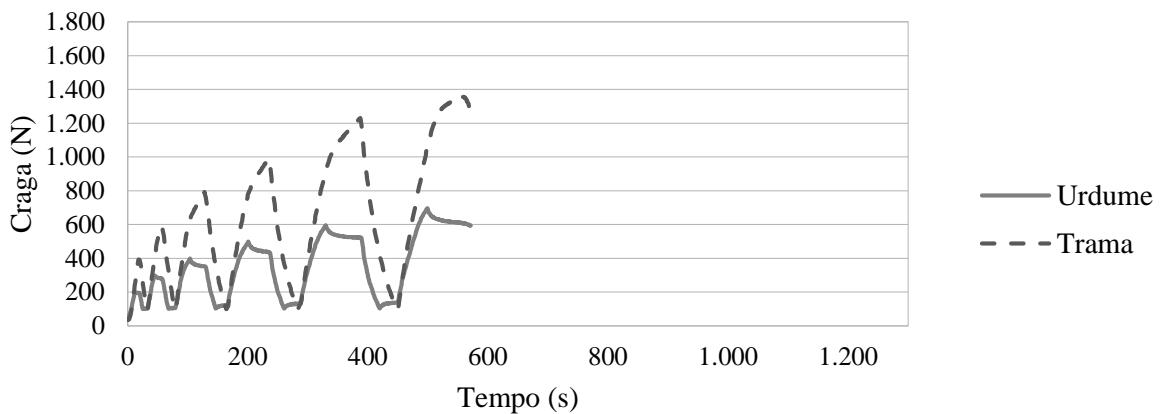
Fonte: A autora (2019).

Figura 91: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova pré-tensão:1



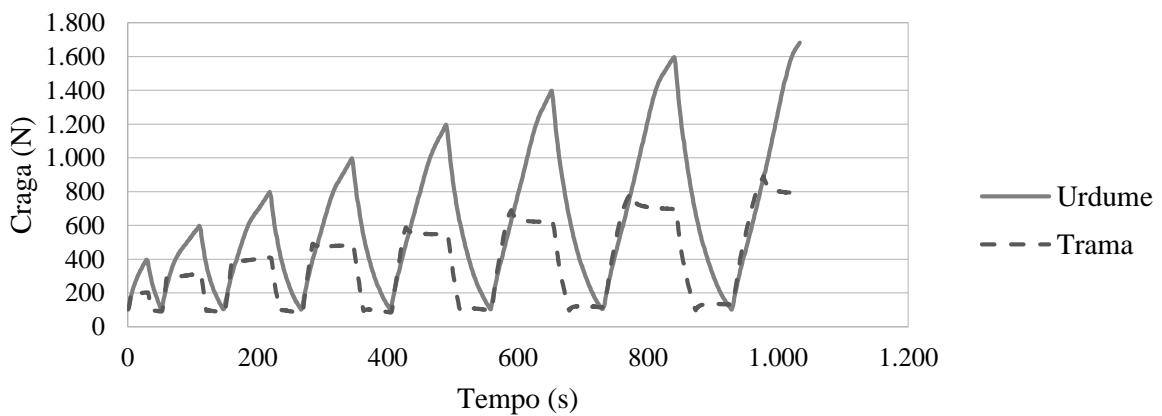
Fonte: A autora (2019).

Figura 92: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:2



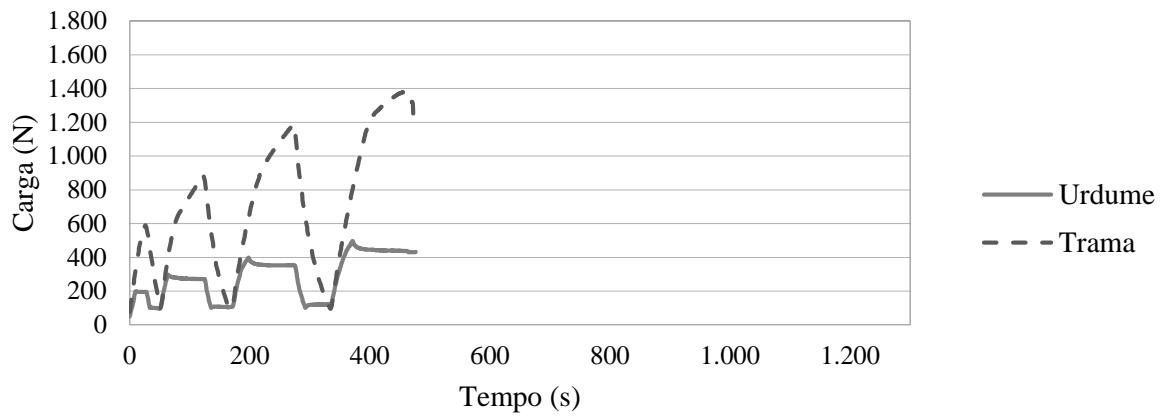
Fonte: A autora (2019).

Figura 93: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 2:1



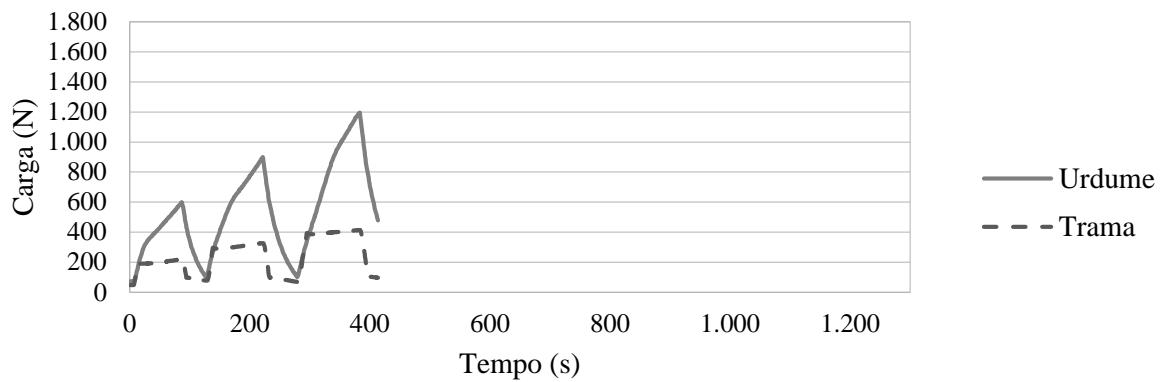
Fonte: A autora (2019).

Figura 94: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:3



Fonte: A autora (2019).

Figura 95: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 3:1

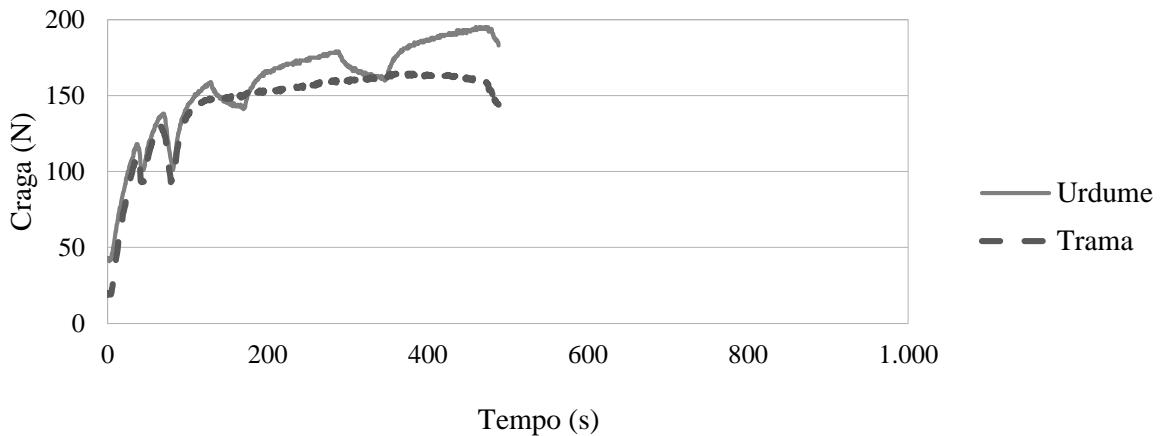


Fonte: A autora (2019).

APÊNDICE C – PERFIS DE CARGA MATERIAL 2

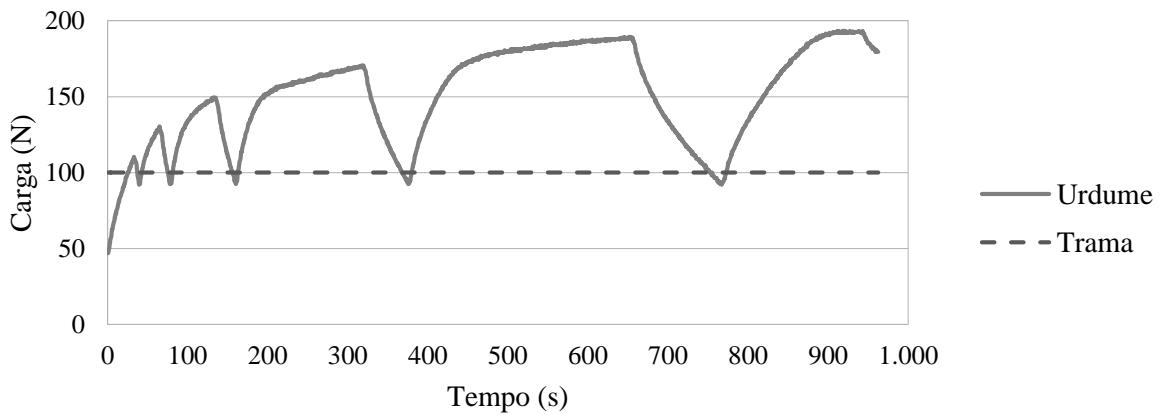
Seguem a seguir, nas Figuras 96 a 102, os perfis de carga utilizados nos ensaios de tração biaxial realizados com o **Material 2**.

Figura 96: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:1



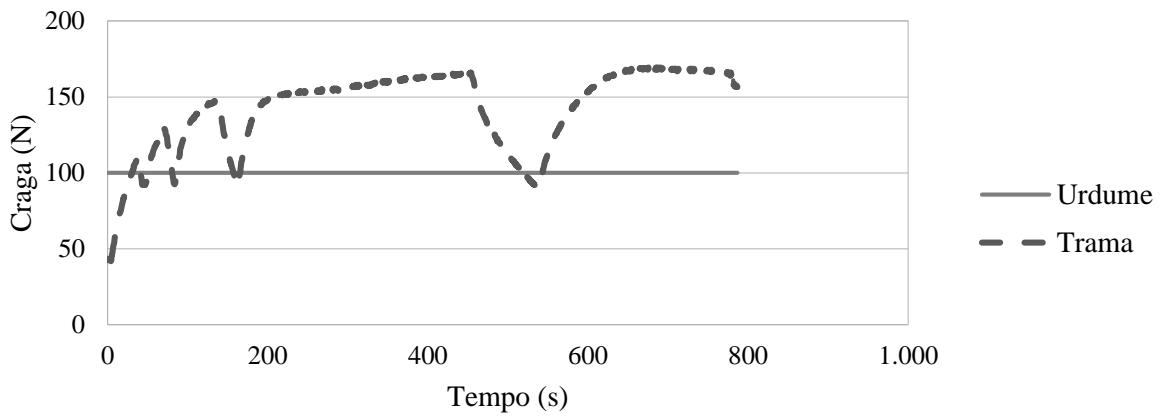
Fonte: A autora (2019).

Figura 97: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:pré-tensão



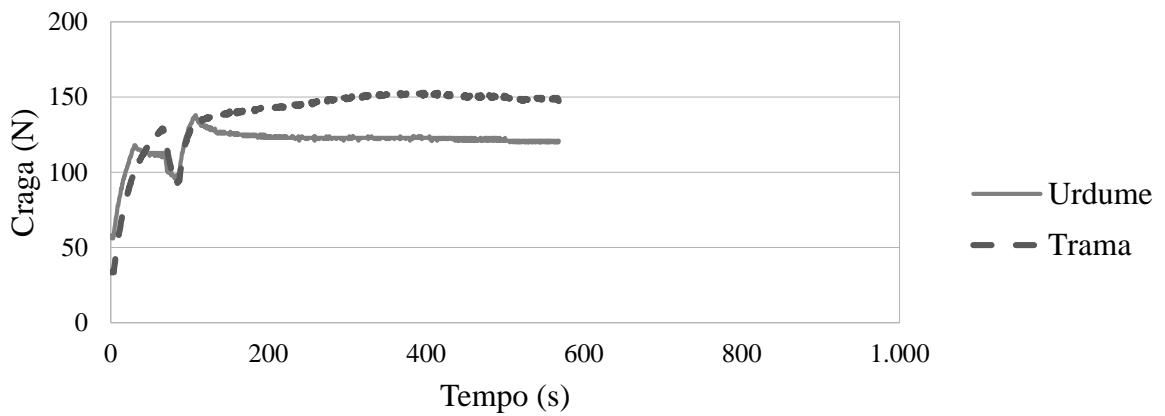
Fonte: A autora (2019).

Figura 98: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova pré-tensão:1



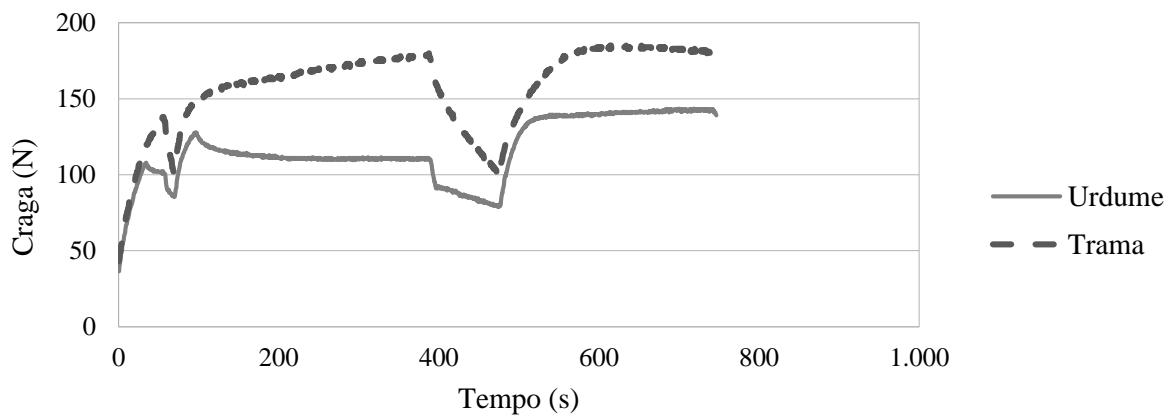
Fonte: A autora (2019).

Figura 99: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:2



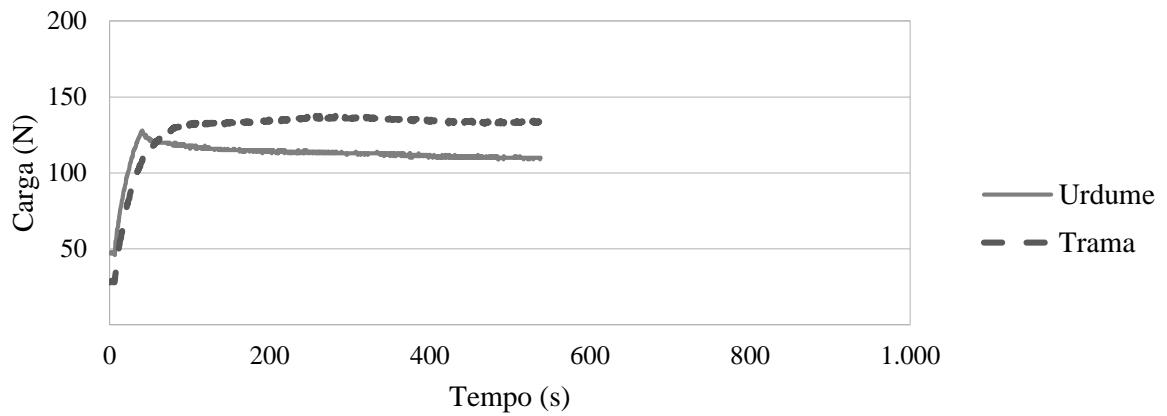
Fonte: A autora (2019).

Figura 100: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 2:1



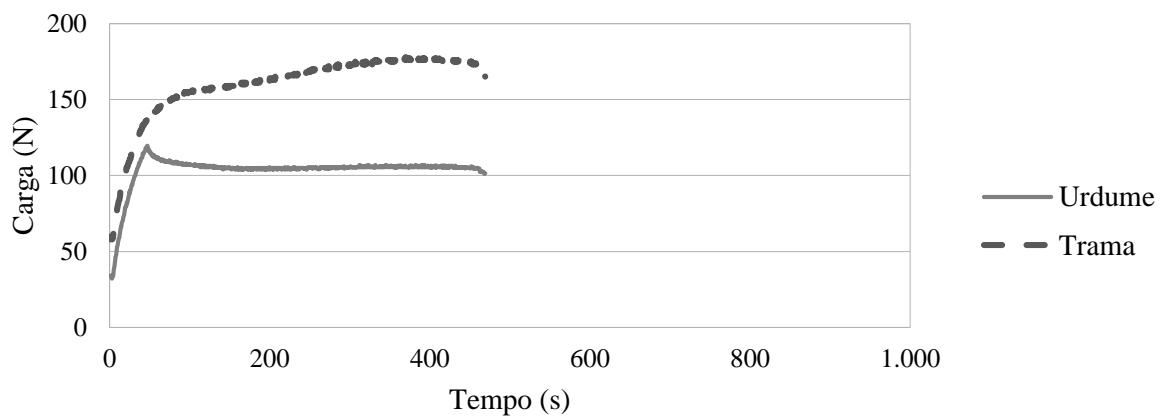
Fonte: A autora (2019).

Figura 101: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 1:3



Fonte: A autora (2019).

Figura 102: Perfil de Carga do Corpo-de-Prova 3:1



Fonte: A autora (2019).