



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

**ATA DA SEGUNDA REUNIÃO EXTRAORDINÁRIA DE
2018 NO CONSELHO DE CENTRO NO CENTRO
MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS DA
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO.**

Aos vinte e sete dias de março de dois mil e dezoito, às catorze horas, o professor **Ricardo Paulo Fonseca Melo**, Diretor no Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA dá início à Segunda Reunião Extraordinária de 2018 no Conselho de Centro no Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros – CMPF/UFERSA. Presentes os coordenadores de curso: **Ádller de Oliveira Guimarães, Alex Pinheiro Feitosa, Antonio Carlos Leite Barbosa, Otávio Paulino Lavor, Wesley de Oliveira Santos**, os representantes docentes: **Lauro Cesar Bezerra Nogueira - DCSAH, Shirlene Kelly Santos Carmo - DECEN, Ernano Arrais Júnior - DETEC**, a representante técnico-administrativa: **Maria Jucione da Silva Nasser**, a representante discente: **Rafaela Duarte de Almeida**. Ausência justificada: *Eduardo Raimundo Dias Nunes*. **PAUTA: primeiro ponto** Apreciação e deliberação sobre o horário do componente curricular: Sistema de Abastecimento de Água para o semestre 2018.1. Constatado o *quórum* o Professor **Ricardo Paulo Fonseca Melo** saúda a todos, e, passa a ler a justificativa de ausência, essa é aprovada com três abstenções. Continuando o professor **Ricardo Paulo Fonseca Melo** lê a pauta e a coloca em discussão. A secretária executiva **Maria Jucione da Silva Nasser** propõe a retirada do ponto da pauta e que seja colocado na pauta da próxima reunião ordinária no Conselho de Centro CMPF/UFERSA, o professor **Otávio Paulino Lavor** propõe a manutenção do ponto. Com seis votos favoráveis, dois contrários e uma abstenção a pauta é aprovada com o ponto mantido. No **primeiro ponto** o professor **Ricardo Paulo Fonseca Melo** apresenta o ponto, alguns apontamentos a favor e contra são colocados por discentes presentes, bem como pelos conselheiros e é aprovado o horário como se encontra, com sete votos favoráveis e três contrários, a saber: 1. Manter a turma do componente curricular ofertada em dia de sábado. Concluída a pauta, o Presidente, professor **Ricardo Paulo Fonseca Melo** agradece a presença de todos e declara encerrada a reunião. E eu, **Jonas Firmino Filho**, Secretário Executivo, lavro a presente ata, que dato e assino, após ser lida, aprovada e assinada pelo Presidente dessa Reunião, o professor **Ricardo Paulo Fonseca Melo** e os demais conselheiros do Conselho de Centro no Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros da UFERSA.

Presidente: Ricardo Paulo Fonseca Melo _____

Coordenadores de Curso: Ádller de Oliveira Guimarães _____

Alex Pinheiro Feitosa _____

Antonio Carlos Leite Barbosa _____

Marco Diego Aurélio Mesquita _____

Otávio Paulino Lavor _____

Wesley de Oliveira Santos _____

Representantes Docentes: DCSAH - Lauro Cesar Bezerra Nogueira _____

DECEN - Shirlene Kelly Santos Carmo _____

DETEC - Ernano Arrais Júnior _____

Representante Técnico-administrativa: Maria Jucione da Silva Nasser _____

Representante discente suplente: Rafaela Duarte de Almeida _____

Secretário Executivo: Jonas Firmino Filho _____

Pau dos Ferros-RN, terça-feira, vinte e sete de março de dois mil e dezoito (27.03.2018).



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

50 **Coordenadores de Curso:** Ádller de Oliveira Guimarães _____
51 Antonio Carlos Leite Barbosa _____
52 Jorge Luis de Oliveira Pinto Filho _____
53 Marco Diego Aurélio Mesquita _____
54 Otávio Paulino Lavor _____
55 Wesley de Oliveira Santos _____
56 **Representantes Docentes:** DCSAH - Eduardo Raimundo Dias Nunes _____
57 DECEN - Shirlene Kelly Santos Carmo _____
58 DETEC - Ernano Arrais Júnior _____
59 **Representante Técnico-administrativa:** Maria Jucione da Silva Nasser _____
60 **Representante discente suplente:** Rafaela Duarte de Almeida _____
61 **Secretário Executivo:** Jonas Firmino Filho _____
62 Pau dos Ferros-RN, terça-feira, treze de março de dois mil e dezoito (13.03.2018).



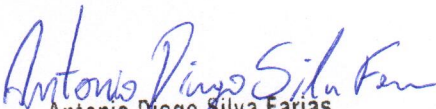
**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA
CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS E HUMANAS**

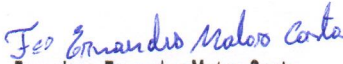
Ao Senhor
Ricardo Paulo Fonseca Melo
Diretor do Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros

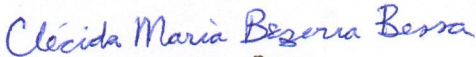
Os chefes dos Departamentos de Engenharias e Tecnologia (DETEC), Ciências Exatas e Naturais (DECEN) e Ciências Sociais Aplicadas e Humanas (DCSAH) do Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros (CMPF), solicitam inclusão na próxima reunião do Conselho de Centro do seguinte ponto:

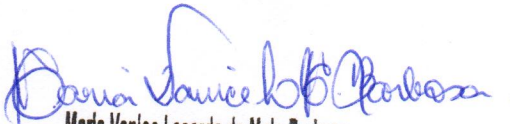
Discussão sobre as Funções Gratificadas das Chefias de Departamento.

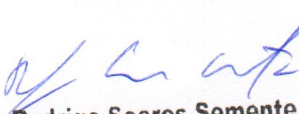
Pau dos ferros, 28 de março de 2018


Antonio Diego Silva Farias
Chefe do DECEN / CMPF
Mat. SIAPE 1940164


Francisco Ernandes Matos Costa
Vice-Chefe do DECEN / CMPF
Mat. SIAPE 1692519


Clécida Maria Bezerra Bessa
Chefe do DCSAH / CMPF
Mat. SIAPE 1815470


Maria Vanice Lacerda de Melo Barbosa
Vice-Chefe do DCSAH / CMPF
Mat. SIAPE 2300292


Rodrigo Soares Semente
Professor do Magistério Superior
Mat. SIAPE 1960364


MATHEUS FERNANDES DE A. SILVA
SIAPE: 2341734



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

RELATORIO DE ATIVIDADES

Relatório de atividades do Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, apresentado à Gestão da Universidade com base no que estabelece o Regimento da Universidade.

Pau dos Ferros-RN - 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

Organização/Gestão da Unidade

Ricardo Paulo Fonseca Melo
Diretor do Centro

José Flávio Timoteo Júnior
Vice Diretor do Centro

Kyteria Sabina Lopes de Figueredo
Coordenação de Graduação

Cláwsio Rogério Cruz de Sousa
Coordenação de Extensão e Cultura

Lenardo Chaves e Silva
Coordenação de Pesquisa e Pós-Graduação

Sanderlir Silva Dias
Coordenação de Assuntos Estudantis

Emerson Fabio da Silva Araújo
Coordenação de Planejamento e Administração

Departamentos Acadêmicos

Antonio Diego Silva Farias
Chefe do Departamento de Ciências Exatas e Naturais

Rodrigo Soares Semente
Chefe do Departamento de Engenharias e Tecnologia

Clecida Maria Bezerra Bessa
Chefe do Departamento de Ciências Sociais Aplicadas e Humanas



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta as atividades e desempenho do campus da UFERSA em Pau dos Ferros, inserindo num único documento todas as ações desenvolvidas nas atividades administrativas e nos seus três departamentos e seis cursos de graduação existentes, que recebem 200 alunos ingressantes semestralmente.

O relatório de atividades apresenta resultados do trabalho desenvolvido na UFERSA – *campus* Pau dos Ferros, sendo dividido nos seguintes pontos: recursos humanos, recursos orçamentários, infraestrutura, atividades de ensino, atividades de pesquisa, atividades de extensão, indicadores de desempenho, execução das ações planejadas para o exercício e ações planejadas para o próximo exercício.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

2 RECURSOS HUMANOS DA UNIDADE

A UFERSA Campus Pau dos Ferros tem quadro de servidores docentes e técnicos administrativos que atendem à demanda da unidade. O Campus ainda está em fase de implantação e o quadro de servidores deverá evoluir ainda ao longo dos próximos anos, especialmente o número de docentes e de técnicos para laboratórios.

Quadro 1 - Informações sobre docentes

Nº	A – Docentes Efetivos			
	Titulação		Regime de trabalho	
1	Graduação	-	20 horas	-
2	Especialização	-	40 horas	-
3	Mestrado	37	Dedicação exclusiva	76
4	Doutorado	39		
5	Subtotal 1	76		
	B – Docentes Substitutos			
	Titulação		Regime de trabalho	
6	Graduação	4	20 horas	
7	Especialização	2	40 horas	8
8	Mestrado	-		
9	Doutorado	1		
10	Subtotal 2	7		
11	Total (1+2)	83		

Notas: 1 – Considerar a situação em 31/12 do ano em referência, para relatório anual, ou 30/06, no caso de relatório semestral.

2 – Considerar o total de docentes, inclusive os que se encontrem afastados, por qualquer motivo.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

Quadro 2 - Informações sobre servidores técnico-administrativos

Nº	Titulação		Regime de trabalho	
1	Nível Fundamental	-	20 horas	-
2	Nível Médio	5	30 horas	11
3	Graduação	13	40 horas	30
4	Especialização	18		
5	Mestrado	5		
6	Doutorado	-		
7	Total	41		

Nota: Considerar a situação em 31/12 do ano em referência, para relatório anual, ou 30/06, no caso de relatório semestral

Quadro 3 - Servidores afastados para qualificação – Art. 96A da Lei 8.112/90

Nº	Docentes		Técnico-Administrativos	
1	Mestrado	-	Mestrado	-
2	Doutorado	10	Doutorado	-
3	Pós-Doutorado	-	Pós-Doutorado	-
4	Total	10	Total	0

Nota: Considerar a situação em 31/12 do ano em referência, para relatório anual, ou 30/06, no caso de relatório semestral.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

Quadro 4 - Servidores afastados por motivo de licenças (Exceto qualificação) ou cessão

Nº	Motivo	Docentes	Técnico-Administrativos
1	Licenças previstas nos inciso I a VII* do Art. 81 da Lei 8.112/90	-	-
2	Licença Trat. Saúde (Art. 202 da Lei 8.112/90)	-	-
3	Licença maternidade (Lei 5.810/94)	-	1
4	Licença Gestante/Adotante (Art. 207 ou 210 da Lei 8.112/90)	-	-
5	Licença Acidente (Art 211 da Lei 8.112/90)	-	-
6	Cedidos a outros órgãos do poder público	-	-
7	Total	-	1

*Incisos: I-Doença em pessoa da família; II-Afastamento do cônjuge; III-Serviço militar; IV-Atividade política; V-Capacitação; VI-Tratar de interesses particulares e VII-Mandato classista

Quadro 5 - Servidores Estudantes - Art. 98 da Lei 8.112/90

Nº	Docentes		Técnico-Administrativos	
1	Especialização	-	Ensino Básico	-
2	Mestrado	-	Graduação	6
3	Doutorado	8	Especialização	-
4	Pós-Doutorado	-	Mestrado	1
5			Doutorado	1
6			Pós-Doutorado	-
7	Total	8	Total	8



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

3 RECURSOS ORÇAMENTÁRIOS

Apresentamos nos quadros 6 e 7 as informações contidas no Relatório do ano de 2017 dos recursos orçamentários descentralizados e realizados.

Quadro 6 - Recursos descentralizados para a unidade

Nº	Finalidade	Valor Descentralizado* (R\$)	Despesas Realizadas (R\$)	Saldo (R\$)
1	Cota de Custeio	210.317,00	209.033,36	1.283,64
2	Serviço de Transporte		128.151,44**	-
3	Diárias e Passagens	73.598,00	48.676,89	24.921,11
4	Auxílio Financeiro a Estudante	22.080,00	23.555,00	-1.475,00
5	Subtotal 1	305.995,00	281.265,25	24.729,75
6	Cota de Capital	30.063,33	37.490,00	-7.426,67
7	Subtotal 2	30.063,33	37.490,00	-7.426,67
8	Total (1+2)	336.058,33	318.755,25	-17.303,08

* devem ser considerados os valores originalmente descentralizados, ou seja, desconsiderando remanejamentos posteriores entre as cotas

**valor estimado, aguardando prestação de contas das viagens de táxi. Inserido no quadro apenas por informação.

Quadro 7 – Outros recursos descentralizados para a unidade

Nº	Finalidade	Valor Descentralizado* (R\$)	Despesas Realizadas (R\$)	Saldo (R\$)
1	Contratos de Serviços Continuados (Câmpus/SIAFI)	1.106.833,05	1.011.476,27	95.356,78
2	Dispensas de Licitação (Câmpus/SIAFI)	278.879,42	274.653,50	4.225,92
3	Assistência Estudantil- Bolsas PROAC (Câmpus/SIAFI)	747.031,07	578.460,00	168.571,07
4	Total	2.132.743,54	1.864.589,77	268.153,77

* devem ser considerados os valores originalmente descentralizados, ou seja, desconsiderando remanejamentos posteriores entre as cotas

Foi descentralizado o total de recursos no valor de R\$ **2.468.801,87** (dois milhões quatrocentos e sessenta e oito mil oitocentos e um e oitenta e sete centavos),



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

sendo remanejado para realização de despesas com material de consumo um valor de R\$ 8.529,55 (oito mil quinhentos e vinte e nove e cinquenta e cinco centavos), e R\$ 250,00 (duzentos e cinquenta reais) para participação e inscrição de servidores em congressos e eventos. A despesa realizada com capital foi superior ao valor descentralizado devido a um reforço no orçamento cedido pela reitoria acima da cota prevista para o campus.

Dentre as despesas realizadas com contratos continuados inclui-se a contratação através de dispensa de licitação, para apoio administrativo, técnico e operacional (serviços de limpeza), no valor de R\$ 270.619,42 (duzentos e setenta mil seiscentos e dezenove e quarenta e dois centavos).

4 INFRAESTRUTURA

O Câmpus Pau dos Ferros atualmente conta com estrutura física composta pelos blocos administrativo, bloco de sala de aula térreo, bloco de sala de aula dois pavimentos, um bloco de laboratórios, bloco de professores, centro de convivência, biblioteca, residências universitárias, Almoxarifado, Patrimônio e Garagem.

Quadro 8 - Infraestrutura da unidade

Nº	INFRAESTRUTURA	
	Tipologia	Quantidade
1	Salas para docentes	35
2	Laboratórios	10
3	Prédio Administrativo	01
4	Complexo Almoxarifado e Patrimônio	01
5	Garagem	01
6	Centro de Convivência (auditório)	01
7	Biblioteca	01
8	Residência universitária	02



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

* Infraestrutura de apoio às atividades acadêmicas que não se enquadram nas definições anteriores. Ex: Setor de Bovinocultura.

Essa estrutura está sendo reforçada com mais 5 obras, estando o restaurante universitário em fase de conclusão, com previsão de entrega em janeiro de 2018 e funcionamento em maio, o bloco dos professores e dos laboratórios existe a previsão de retomada da licitação em março de 2018 e o Laboratório de Tecnologia da Informação e a usina solar encontram-se com os recursos empenhados.

Essa estrutura tem atendido às necessidades imediatas do Campus, no entanto é de extrema importância que as obras em andamento sejam finalizadas, tendo em vista o aumento da população acadêmica, atualmente o Campus conta com 1.108 discentes matriculados, 76 docentes e 41 Técnicos Administrativos, existem 06 professores que não estão alocados no respectivo bloco por falta de espaço, além da necessidade de lugar para o Laboratório de Engenharia Ambiental e para o Laboratório de Estudos da Cidade, Urbanismo e Território, são exemplos da crescente demanda por ambientes adequados para o desenvolvimento das atividades de ensino, pesquisa e extensão.

Durante o ano de 2017, foram finalizadas e recebidas as obras da biblioteca, residência universitária e do auditório do centro de convivência, contribuindo de forma significativa para a melhoria no cumprimento da missão do Campus nos aspectos de conforto ambiental e adequação ao uso. Outra mudança relevante foi a instalação de 2 laboratórios de informática no bloco de salas de aulas II (B) em um total de 62 computadores disponíveis para utilização, tal situação foi possível em virtude de um acordo de cooperação entre a UFERSA e o Instituto Metrópole Digital (IMD/UFRN) para a implantação de Cursos Técnicos em Tecnologia da Informação.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

5 ATIVIDADES DE ENSINO

Quadro 9 – Cursos de graduação vinculados à unidade – Semestre 2017.2

Nº	Curso	Período*	Carga horária do curso (h)	Alunos Matriculados	Conceito Preliminar dos Cursos – CPC**
1	Arquitetura & Urbanismo	M. V.	4035	172	
2	BCT	M. V.	2400	141	4
3	BCT	N.	2400	376	4
4	Eng. Ambiental	N.	3930	22	
5	Eng. Civil	M. V.	3970	103	4
6	Eng. Comp.	M. V.	3850	13	
7	BTI	M. V.	2370	279	
9	Total		22.955	1.106	4

* Indicar se o curso é (I) integral, (M) matutino, (V) vespertino, (N) noturno.

** Obter conceitos em <http://portal.inep.gov.br/educação/educacao-superior/indicadores/cpc>

(Indicar, se houver, entre os cursos relacionados no quadro anterior, quais são autofinanciados)

Quadro 10 - Cursos de pós-graduação vinculados à unidade

Nº	Curso	Nível*	Conceito Capes	Alunos Matriculados
1				
2				
3				
4	Total			

* Indicar: (E) especialização, (M) mestrado acadêmico, (MP) mestrado profissional ou (D) doutorado.

(Indicar, se houver, entre os cursos relacionados no quadro anterior, quais são autofinanciados)



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

Quadro 11 – Parâmetros da atividade docente no ensino

Nº	Parâmetro	Graduação	Pós-Graduação
1	Carga horária semestral docente ¹	13095	48
2	Número de docentes em atividade ²	73	7
3	Total de alunos matriculados em turmas de graduação oferecidas pela unidade ³	1106	

1-Informar a carga horária total referente ao último semestre letivo do período em análise, considerando apenas as turmas ofertadas pelo centro. Excluir carga horária dedicada a disciplinas de cursos autofinanciáveis, pelos quais o docente receba remuneração específica.

2-Considerar docentes efetivos e substitutos em atividade. (quant. informada no quadro 1 menos as quantidades informadas nos quadros 3 e 4)

3-Considerar total de turmas oferecidas pela unidade em cursos vinculados e não vinculados à unidade.

4- Considerar a carga horária de cursos de pós-graduação vinculados e não vinculados à unidade

5- Considerar o número de docentes em cursos de pós-graduação vinculados e não vinculados à unidade

Os quadros 9.1 e 9.2 apresentam um aumento de 106 estudantes matriculados no campus entre os semestres 2016.2 e 2017.1, que continuou aumentando no semestre 2017.2. Isto é consequência do crescimento dos cursos existentes no campus que não ofertaram todos os componentes curriculares previstos na carga horária total dos seus respectivos Projetos Pedagógicos dos Cursos, uma vez que no campus há cursos que se encontram, atualmente, no quinto período.

O Quadro 11 mostra que a relação de carga horária/docente é 179,38. Esta informação foi obtida considerando a carga horária total de turmas para o semestre 2017.2 em conformidade com o total de docentes ativos em 31/12/2017. Assim, para acompanhar o crescimento dos cursos e de carga horária no decorrer dos demais semestres será necessário a contratação de novos docentes. Embora não exista programa de pós-graduação vinculado à unidade, foram elaborados duas propostas de criação de mestrado na área de ciências ambientais e computação, que fortalecerá o campus e apoiará a consolidação dos cursos de graduação.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

6 ATIVIDADES DE PESQUISA

Quadro 12 - Atividades de pesquisa da unidade

Nº	Atividades de pesquisa		
1	Produção intelectual dos docentes	Artigos Publicados em revistas conceito Qualis*	Pedidos de Patentes
2		7	0
3	Projetos internos	Financiados	Não Financiados
4		4	29
5	Projetos externos	Financiados	Não Financiados
6		1	0

*Considerar apenas publicações A1, A2, B1

(comentar sobre a produção científica da unidade e os projetos de pesquisa em andamento no período, citando fatores que contribuíram para a captação de recursos, a realização das atividades e os fatores que dificultam o alcance de resultados mais expressivos)

O Quadro 12 resume as ações de pesquisa executadas no campus Pau dos Ferros. Os resultados ainda não são tão expressivos, entretanto mostra avanço em relação ao ano de 2016. O número de projetos internos financiados aumentou de 2 (dois) para 4 (quatro) e os não financiados aumentaram de 21 (vinte e um) para 29 (vinte e nove). Dados extraídos do SIGAA mostram que somando os projetos internos em execução e os pendentes de revisão é alcançado 41 projetos internos de pesquisa.

Um fator que interfere no desempenho das atividades de pesquisa do campus é o número de docentes afastados para qualificação. Do total de 76 docentes efetivos tem-se 10 afastados para qualificação, que poderão contribuir mais com a pesquisa quando se aproximar da conclusão do curso e no retorno as atividades de trabalho. Além disso, no último semestre de 2017, o campus recebeu 7 (sete) novos docentes, que ainda estão em fase de adaptação no campus. Portanto, tem-se um total de 59 docentes “úteis”, que dividem os 41 projetos de pesquisa do campus.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

Quadro 13 - Bolsas de pesquisa concedidas

Nº	Total de Bolsas		
	Doutorado*	Mestrado*	Iniciação Científica **
1	0	0	12

*vinculadas aos programas de Pós-Graduação da unidade

** Concedidas por meio de edital PICI

7 ATIVIDADES DE EXTENSÃO

O Quadro 14 apresenta as ações e projetos de extensão realizadas durante o ano de 2017.

Quadro 14 - Atividades de extensão da unidade acadêmica

Nº	Atividades de extensão		
1		Cursos	Eventos
2			1) Código: EV029-2017 - Título: 1º CIVIL SOLIDÁRIO - Coordenação: ROGERIO DE JESUS SANTOS 2) Código: EV143-2017 - Título: Arquitetando 2017.2 - Coordenação: EDUARDO RAIMUNDO DIAS NUNES 3) Código: EV144-2017 - Título: Cinema de Rua - Coordenação: CLARA OVIDIO DE MEDEIROS RODRIGUES 4) Código: EV145-2017 - Título: Conversa com arquiteto - Coordenação: CLARA OVIDIO DE MEDEIROS RODRIGUES 5) Código: EV076-2017 - Título: Desenhadores de Rua – Pau dos Ferros/RN - Coordenação: MONIQUE LESSA VIEIRA 6) Código: EV123-2017 - Título: Encontro com Arquiteto: palestra com o arquiteto Lucyvan Sérgio - Coordenação: TRICIA CAROLINE DA SILVA



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

			SANTANA RAMALHO 7) Código: EV107-2017 - Título: II ENCONTRO DE COMPUTAÇÃO DO OESTE POTIGUAR - Coordenação: FRANCISCO CARLOS GURGEL DA SILVA SEGUNDO 8) Código: EV133-2017 - Título: II OLIMPÍADA DE CÁLCULO DA UFERSA - Coordenação: HIDALYN THEODORY CLEMENTE MATTOS DE SOUZA 9) Código: EV071-2017 - Título: I Webinar em Teoria da Computação, Lógica e Matemática Fuzzy - Coordenação: PATRICK CESAR ALVES TERREMATTE 10) Código: EV094-2017 - Título: I Workshop Interdisciplinar do Semiárido Potiguar: Ciência em terra árida – Pesquisa e extensão das IES no Alto Oeste Potiguar - Coordenação: JOEL MEDEIROS BEZERRA 11) Código: CR028-2017 - Título: Laboratório de Gramática - Coordenação: MARIA VANICE LACERDA DE MELO BARBOSA 12) Código: PJxxx-2017 - Título: Matemática e Pedagogia Fortalecendo o Ensino Fundamental da Educação Básica na Cidade de Pau dos Ferros - Coordenação: GLAYDSON FRANCISCO BARROS DE OLIVEIRA 13) Código: CR050-2017 - Título: Minicurso de desenho em grafite - Coordenação: TRICIA CAROLINE DA SILVA SANTANA RAMALHO 14) Código: EV095-2017 - Título: Palestras sobre Conforto Ambiental - Coordenação: EDUARDO RAIMUNDO
--	--	--	--



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

			DIAS NUNES 15) Código: CR058-2017 - Título: Processos Criativos - Coordenação: CLARA OVIDIO DE MEDEIROS RODRIGUES
3		Financiados	Não Financiados
4	Projetos internos	1) Smart Cities: aplicação de atividades extensionistas como instrumento potencializador do desenvolvimento econômico no semiárido – coordenação: ALMIR MARIANO DE SOUSA JUNIOR 2) Laboratório de Física: Interligando Saberes na sala de Aula utilizando materiais de baixo custo – coordenação: GLAYDSON FRANCISCO BARROS DE OLIVEIRA 3) Residência técnica em arquitetura e urbanismo: promoção e assistência técnica pública gratuita em arquitetura e urbanismo para a população de baixa renda no “Alto Oeste” potiguar. coordenação: ANTONIO CARLOS LEITE BARBOSA	1) Levantamento da geração dos resíduos sólidos da feira livre em Pau dos Ferros/RN – coordenação: JANAINA CORTEZ DE OLIVEIRA 2) Empreendedorismo Social e Negócios de Impacto Social – Coordenação: CLAWSIO ROGERIO CRUZ DE SOUSA 3) Produção multitextual: uma proposta de multiletramento na graduação. – coordenação: HORTENCIA PESSOA REGO GOMES 4) Mais Saber – coordenação: THATYARA FREIRE DE SOUZA 5) 1 minuto de ética – coordenação: WILDOBERTO BATISTA GURGEL
5	Projetos externos	Financiados	Não Financiados
6		Acesso à Terra Urbanizada	

Quadro 15 – Bolsas de Extensão



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

Número de Bolsas de Extensão*	19
--------------------------------------	-----------

* Considerar apenas bolsas concedidas em projetos aprovados pelos editais PROEC/PIBEX ou PROEXT.

Como observado no Quadro 14, o campus tem realizado muitas atividades no campo da extensão. As ações de extensão têm contribuído para o trabalho conjunto dos docentes, técnicos-administrativos e discentes. Em 2017, as atividades de extensão tiveram participação de 65 docentes, 35 técnicos-administrativos e 138 discentes. Este trabalho proporcionou ao campus conseguir oportunidades de estágio para os alunos nas prefeituras da região, totalizando 19 vagas. A consequência deste trabalho é percebida pelo reconhecimento da comunidade externa da participação ativa do campus na sociedade.

8 INDICADORES DE DESEMPENHO

Quadro 16 – Indicadores de Desempenho

	INDICADOR	VALOR
I	Custeio/Aluno-turma de Graduação	276,67
II	Aluno-turma de Graduação/Docente	15,15
III	Aluno-turma de Graduação/Técnico Administrativo	27,65
	Aluno-Curso/Docente	15,15
IV	Carga Horária Média Docente na Graduação	179,38
V	Conceito Preliminar Médio dos cursos de Graduação	4
VI	Carga Horária Média Docente na Pós-Graduação	6,85
VII	Conceito Capes Médio da Pós-Graduação	-
VIII	Artigos Qualis publicados/Docente	0,10
IX	Projetos de Pesquisa/Docente	0,46
X	Projetos de Extensão/Docente	0,12



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

XI	Relação bolsas/Aluno-curso	0,03
----	----------------------------	------

9 EXECUÇÃO DAS AÇÕES PLANEJADAS PARA O EXERCÍCIO

(Preencher o quadro 17, apresentando as ações planejadas pela Unidade para o período de abrangência do relatório, conforme planejamento anterior, indicando a situação de execução de cada ação e os motivos que levaram a essa situação)

Ordem	Ação	Situação da Execução		Meta(s) do PDI relacionadas
		Status*	Observação	
1	Consolidar o quadro de servidores da unidade	E	Foram obtidas mais dois códigos de vagas para docente.	1.1.2
2	Implantar gestão voltada à saúde, e qualidade de vida dos servidores	E	Foi realizada a ação do mês do servidor, celebração do dia dos pais, confraternização de fim de ano	1.2.1
3	Qualificar o corpo docente do câmpus	E	Pouco mais da metade dos docentes são doutores.	2.14.1
4	Criar grupos de pesquisa no câmpus	E	O aumento do número de doutores favoreceu a criação de grupos de pesquisa, que culminou com a elaboração de duas propostas de programas de mestrado.	2.14.2
5	Consolidar e ampliar a Extensão no câmpus	E	Atitudes proativas de docentes contribuíram para o aumento do número de projetos de extensão no campus, principalmente, no trabalho com prefeituras da região.	3.1.2; 3.1.1; 3.2.2
6	Criação de uma revista do câmpus	P	Pendente de execução. Esta ação será retomada em 2018.	3.4.2; 3.5.1
7	Consolidar a infraestrutura física do câmpus	E	A estrutura predial foi aumentada com a entrega da biblioteca e residência.	2.12.1; 6.1.1; 6.1.2
8	Consolidar a infraestrutura	E	A videoconferência passou a ser um espaço frequentemente	4.1.1; 4.1.2



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

	lógica do câmpus		usado, reduzindo as viagens a sede.	
--	------------------	--	-------------------------------------	--

10 AÇÕES PLANEJADAS PARA O PRÓXIMO EXERCÍCIO
(PREENCHER ESTE ITEM APENAS NO RELATÓRIO ANUAL CONSOLIDADO)

(Apresentar as ações planejadas pela Unidade para o exercício seguinte, tentando vinculá-las ao PDI e às funções próprias da unidade)

Quadro 18 – Ações para o Próximo Exercício

Ordem	Ação	Meta(s) do PDI relacionadas
	Consolidar o mapeamento e formalização dos processos organizacionais por meio dos fluxogramas como ferramenta de gestão para melhoria das rotinas dos setores	2.3 Mecanismo de controle e gestão
	Solicitar a contratação de Empresa de Manutenção Predial com o objetivo de melhorar a conservação do Campus.	
	Criar uma Comissão de Eficiência Energética com o objetivo de discutir ideias e soluções para minimizar o consumo de energia elétrica, assim como estimular a pesquisa e ações efetivas para o uso de energia renovável.	
	Criar uma Comissão de Uso Racional da Água com o objetivo de discutir ideias e soluções para o aproveitamento da água consumida no Campus.	
	Consolidar o Plano Urbanístico do Campus com ampliação das áreas verdes e de convivência.	
	Implementar ações que visem à promoção da saúde, segurança e qualidade de vida dos servidores .	2.2 Organização e gestão de pessoal
	Implementar ações que auxiliem nos processos de capacitação e aperfeiçoamento de pessoal.	2.2 Organização e gestão de pessoal
	Criar uma Assessoria de Comunicação no Campus com o objetivo de sistematizar o fluxo de informações junto ao público interno e externo.	4.5 Estratégias e meios para comunicação interna e externa
	Aprimorar a utilização da infraestrutura	4.3.1 Infraestrutura de



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

	de informática à disposição da comunidade acadêmica, com a priorização da utilização da sala de vídeoconferência.	informática
	Aprimorar a utilização do serviço de transporte com ações que visem a economicidade e segurança para o Campus.	4.4 Transporte e Segurança
	Aprimorar o serviço de segurança patrimonial por meio de ações que melhorem o controle de entrada e saída de visitantes e prestadores de serviços	4.4 Transporte e Segurança
	Aprimorar a gestão patrimonial do Campus, por meio de ações que auxiliem no controle e responsabilidade dos materiais distribuídos nos diversos setores.	
	Incentivar o desenvolvimento de projetos de extensão que possibilitem a inclusão social e aproximação com a comunidade.	1.1.7 Responsabilidade social da UFERSA

11 OUTRAS CONSIDERAÇÕES

(Espaço livre para a unidade inserir informações que considere relevantes, como: necessidades da unidade que, de que de alguma forma, dependem de ações da gestão central para se efetivarem)

Pau dos Ferros 2018

Ricardo Paulo Fonseca Melo
Diretor

ANEXO 01 - Fórmulas de cálculos dos indicadores das unidades

INDICADOR	DEFINIÇÃO
------------------	------------------



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

I	Custeio/Aluno -turma - Expressa a relação entre custeio descentralizado para a unidade no exercício pelo número de alunos matriculados em turmas vinculadas à unidade
	$\text{Custeio/Aluno - turma} = \frac{\text{Subtotal 1 de recursos de custeio descentralizados para a unidade (quadro 6, linha 5)}}{\text{Nº Alunos matriculados em turmas de graduação oferecidas pela unidade (quadro 11, linha 3)}}$
II	Relação aluno-turma/docente – Relação entre o número de alunos matriculados em turmas oferecidas pela unidade e o número de docentes vinculados à mesma.
	$\text{Aluno-turma/Docente} = \frac{\text{Nº de alunos matriculados em turmas oferecidas pela unidade (quadro 11, linha 3)}}{\text{Nº de docentes de graduação (quadro 11, linha 2)}}$
III	Aluno-turma/Técnico Administrativo - Relação entre o número de alunos por turmas ofertadas pela unidade e o número de técnico-administrativos da respectiva unidade
	$\text{Aluno-turma/Técnico-administrativo} = \frac{\text{Nº de alunos matriculados em turmas oferecidas pela unidade (quadro 11, linha 3)}}{\text{Nº total de técnico-administrativos (quadro 2, linha 7) - (quadro 3, linha 4) - (quadro 4, linha 7)}}$
IV	Relação aluno-curso/docente – Expressa a relação entre o número de alunos matriculados em cursos de graduação oferecidos pela unidade e o número de docentes da unidade.
	$\text{Aluno-curso/Docente} = \frac{\text{Nº de alunos matriculados em cursos oferecidos pela unidade (quadro 9, linha 9)}}{\text{Nº de docentes de graduação (quadro 11, linha 2)}}$
V	Carga Horária Média Docente - Relação entre a carga horária total ofertada na graduação pela unidade e o número de docentes vinculados à mesma
	$\text{Carga Horária Média Docente na Graduação} = \frac{\text{Carga horária total da unidade na graduação (quadro 11, linha 1)}}{\text{Nº de docentes de graduação da unidade (quadro 11, linha 2)}}$
VI	Conceito Preliminar Médio da Graduação - Expressa a média dos conceitos dos cursos de graduação oferecidos pela unidade no exercício. Obter os conceitos dos cursos de graduação em http://portal.inep.gov.br/educacao-superior/indicadores/cpc



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

	$\text{Conceito Preliminar Médio dos cursos de Graduação} = \frac{\text{Somatório dos conceitos de cada curso de graduação oferecido pela unidade (quadro 9, coluna 6)}}{\text{Nº de cursos de graduação da unidade (quadro 9, coluna 2)}}$
VII	Carga Horária Média Docente na Pós-Graduação – Expressa a relação entre a carga horária docente em cursos de pós-graduação e o número de docentes envolvidos com pós-graduação. $\text{Carga Horária Média Docente na Pós-Graduação} = \frac{\text{Carga horária docente na pós-graduação (quadro 11, linha 1)}}{\text{Nº de docentes com atividades em cursos de pós-graduação (quadro 11, linha 2)}}$
VIII	Conceito Capes Médio da Pós-Graduação - Conceito obtido da média dos conceitos dos cursos de pós-graduação da unidade, junto à plataforma Sucupira da CAPES - https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites&srcid=Y2FwZXMuZ292LmJyfHRyaWVuYWwtMjAxM3xneDo0ZjdhZjNlMTEyNDNlMzIw (utilizar filtro e escolher UFERSA) $\text{Conceito Capes Médio da Pós-Graduação} = \frac{\text{Somatório dos conceitos de cada curso de pós-graduação oferecido pela unidade (Quadro 10, coluna 4)}}{\text{Nº de cursos de pós-graduação da unidade (quadro 10, coluna 2)}}$
IX	Artigos Qualis publicados/Docente - É quociente entre o número de artigos A1, A2 e B1 publicados pelos docentes da unidade e o número total de docentes da unidade. $\text{Artigos Qualis publicados/Docente} = \frac{\text{Total de artigos publicados (quadro 12, linha 2)}}{\text{Nº de docentes de graduação (quadro 11, linha 2)}}$
X	Projetos de Pesquisa/Docente - Expressa a relação entre o número de projetos de pesquisa da unidade, cadastrados junto a PROPPG e o total de docentes da unidade. $\text{Projetos de Pesquisa/Docente} = \frac{\text{Nº de Projetos de pesquisa financiados + Não financiados (Quadro 12, linhas 4 e 6)}}{\text{Nº de docentes de graduação (quadro 11, linha 2)}}$
XI	Projetos de Extensão/Docente - Expressa a relação entre o número de projetos de extensão cadastrados na PROEC e o número de docentes vinculados à unidade.



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE PAU DOS FERROS

	$\text{Projetos de Extensão/Docente} = \frac{\text{Nº de projetos de extensão financiados + não financiados (quadro 14, linha 4 e 6)}}{\text{Nº de docentes de graduação (quadro 11, linha 2)}}$
XII	Relação bolsas/aluno-curso - Expressa a relação entre o número de bolsas concedidas para alunos de cursos de graduação vinculados à unidade pelo número de alunos matriculados em cursos de graduação da unidade $\text{Relação bolsas/aluno-curso} = \frac{\text{Nº de bolsas concedidas IC + Extensão (quadro 13, linha 1 e quadro 15)}}{\text{Nº de alunos matriculados em cursos de graduação oferecidos pela unidade (quadro 9, linha 9)}}$



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

Check-List – Afastamento para qualificação

Nome do solicitante: Paulo Henrique Araújo Bezerra	
Tipo de afastamento:	
☐ Inicial ☒ Renovação	
Solicitante:	
☒ Docente ☐ Técnico administrativo	
Local de capacitação:	
☒ No País ☐ No exterior	
Período de afastamento: 25 / 07 / 2018 a 24 / 07 / 2019	
Documentos Anexados – Processo Inicial	Número da página (Preenchido pela PROPPG):
I – Formulário de requerimento do afastamento (Página da PROPPG)	
II – Justificativa para o Afastamento (Anexo I - Página da PROPPG)	
III – Plano de Trabalho, contendo o anteprojeto de pesquisa. (Anexo VIII - Página da PROPPG)	
IV – Comprovante de aprovação/classificação ou matrícula no programa em que o(a) servidor(a) foi aprovado(a) (Anexo V - Página da PROPPG) e histórico do curso (quando couber)	
V – Plano de Qualificação e Formação Docente da sua unidade acadêmica de lotação	
VI – Termo de Declaração e Compromisso (Anexo IIA ou IIB - Página da PROPPG)	
VII – Declaração de licenças e afastamento em assentamento funcional, emitida pela Pró-Reitoria de Gestão de Pessoas – PROGEPE	
VIII – Documentação que formalize a substituição do(a) interessado: ☐ Termo de Compromisso dos docentes que assumirão as disciplinas ☐ Utilização de vaga ou disponibilidade de professor substituto a ser contratado(a)	
Documentos Anexados – Processo de Renovação:	Número da página (Preenchido pela PROPPG):
I – Formulário de requerimento de renovação do afastamento (Página da PROPPG)	
II – Justificativa de renovação, assinada também pelo orientador (Anexo I - Página da PROPPG)	
III – Relatório Semestral de Acompanhamento (Anexo IV - Página da PROPPG)	
IV – Documentação que formalize a substituição do(a) interessado: ☒ Utilização de vaga ou disponibilidade de professor substituto a ser contratado(a) ☐ Termo de Compromisso dos docentes que assumirão as disciplinas	
V – Declaração de Matrícula (Anexo V - Página da PROPPG)	
VI – Histórico Escolar – Atualizado (Anexo VII - Página da PROPPG)	

Normativo: Resolução CONSUNI/UFERSA N° 009/2013, de 08 de novembro de 2013.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br

REQUERIMENTO PARA RENOVAÇÃO DE AFASTAMENTO PARA TREINAMENTO DE DOCENTES E TÉCNICO-ADMINISTRATIVOS EM NÍVEL DE PÓS-GRADUAÇÃO

1. PREENCHIDO PELO REQUERENTE

Nome (completo sem abreviaturas): Paulo Henrique Araújo Bezerra
Identidade: 1832520 **Órgão Emissor:** SSP **UF:** RN **Data de emissão:** 14 / 05 / 2008
CPF: 013.981.174-55 **Data de Nascimento:** 18 / 06 / 1987 **Tel.:** (84) 994062424
E-mail: paulo.araujo@ufersa.edu.br **Departamento/Setor:** Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros
Categoria Funcional: **Docente:** (☒) **Técnico-Administrativo:** (☐)
Tipo de Afastamento: **Integral:** (☒) **Parcial:** (☐)
Tempo de Serviço Averbado para Aposentadoria: (☐) Anos
Início de Exercício no Cargo: 31/07/2013 **Total:** 04 ano(s) 7 mês(es) (Anexar Declaração do PRORH).

2. PREENCHIDO PELO REQUERENTE

CURSO: Engenharia Mecânica
Nível: **Especialização** (☐) **Mestrado** (☐) **Doutorado** (☒) **Pós-Doutorado** (☐)
Área de concentração: Tecnologia de Materiais
Liberação inicial: **Início** 25 / 07 / 2016 **Término:** 24 / 07 / 2019
Período solicitado para liberação: **Início** 25 / 07 / 2018 **Término:** 24 / 07 / 2019
Período concedido: **Início** 25 / 07 / 2016 **Término:** 24 / 07 / 2018
Síntese da justificativa do requerimento de renovação: Atualmente, além de estar matriculado na componente curricular obrigatória Exame de Qualificação de Doutorado, estou elaborando a revisão sistemática da literatura e realizando a implementação do código computacional objeto de minha pesquisa. Após essas etapas, serão realizadas a validação do referido código e, em seguida, as simulações, que tratam de aplicações do Método de Otimização Estrutural Topológica de Microestrutura que estou desenvolvendo. Os resultados das simulações serão abordados tanto na tese quanto em artigos de periódicos (pré-requisito de conclusão), cujo processo de publicação, entre submissão e aceite final, demandará alguns meses. Pelos motivos explicados e considerando também que meu afastamento utiliza uma vaga de substituto (conforme edital para qualificação docente 2016, anexado a meu processo de afastamento 23091.004146/2016-04), solicito renovação de afastamento para conclusão das atividades de meu doutorado.

ANEXAR

I – Justificativa de requerimento assinada também pelo Orientador (Anexo I) - (Disponível na Página da PROPPG)

II – Justificativa para nova liberação do(a) requerente: (Anexo III) (Disponível na Página da PROPPG)

III- Relatório semestral de acompanhamento (Anexo IV) (Disponível na Página da PROPPG) (quando se tratar do relatório referente ao 3º semestre (mestrado) e 5º semestre (doutorado), deverá ser acompanhado do projeto de dissertação/Tese)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br

IV - Declaração de matrícula (Local da pós-graduação) (Anexo V) (Disponível na Página da PROPPG)

V- Relatório de avaliação de desempenho (Anexo VI) (Disponível na Página da PROPPG)

VI- Histórico Escolar (Anexo VII) (Disponível na Página da PROPPG)

Data: 16 / 03 / 2018


Paulo Henrique Araújo Bezerra
SIAPE: 1859840



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br

3. PARECERES

CPPTA (Técnico-Administrativo):

APROVO: () **NÃO APROVO:** ()

Data: / /

Presidente

CPPD (Docente):

APROVO: () **NÃO APROVO:** ()

Data: / /

Presidente

PROPPG (Docente e Técnico-Administrativo):

APROVO: () **NÃO APROVO:** ()

Data: / /

Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação

ANEXAR ESTES DOCUMENTES (obrigatório)

- 1. JUSTIFICATIVA PARA NOVA LIBERAÇÃO DO(A) REQUERENTE: (Anexo III)** (Disponível na Página da PROPPG)
- 2. DECLARAÇÃO DE MATRÍCULA (Local da pós-graduação) (Anexo V)** (Disponível na Página da PROPPG)
- 3. RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO (Anexo VI)** (Disponível na Página da PROPPG)

OBSERVAÇÃO:



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - Ufersa
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br



PROPPG



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br

JUSTIFICATIVA PARA RENOVAÇÃO DO AFASTAMENTO

Eu, Paulo Henrique Araújo Bezerra, CPF 013.981.174-55, RG 1832520 SSP-RN, Matrícula SIAPE 1859840, professor do curso de Engenharia Civil do Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros – CMPF da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, venho, através deste, solicitar renovação do afastamento integral das minhas atividades, com remuneração, para continuação do Doutorado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), do qual sou aluno regular.

Durante o período inicial do afastamento, me dediquei a: cursar disciplinas; iniciar a revisão da literatura; realizar os Exames de Proficiência nas duas línguas estrangeiras; estudar a implementação do código computacional objeto de minha pesquisa de doutorado, cuja formulação numérica é baseada no método de otimização topológica de microestruturas que atualmente desenvolvo; e elaborar a versão preliminar da tese para apresentação no Exame de Qualificação. Além disso, me dediquei a escrever dois artigos para publicação em congressos internacionais, os quais resultam de uma parte inicial de minha pesquisa e são baseados em trabalhos realizados na mesma plataforma de programação à qual será vinculado o código em elaboração.

Atualmente, estou matriculado na componente curricular obrigatória “Exame de Qualificação de Doutorado”, em razão da qual fui aprovado pela respectiva banca examinadora e estou realizando as correções, propostas pelos examinadores, na versão preliminar da tese apresentada. Além disso, estou continuando a revisão sistemática da literatura e as implementações no código computacional que desenvolvo, ambas atividades relativas ao método de otimização topológica tema de minha pesquisa de doutorado.

Após essa etapa, o código implementado será validado e, em seguida, serão executadas as simulações numéricas relativas às aplicações do método mencionado. Os resultados obtidos das simulações serão abordados tanto na tese de doutorado, cuja defesa está prevista para o semestre 2019.1, quanto em artigos científicos, cuja redação já foi iniciada e a publicação será feita tanto em eventos internacionais quanto em periódicos (processo que demandará meses, entre as etapas de submissão, revisões e aceite).



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 – Tel.: (84)3317-8296/8295 – E-mail: proppg@ufersa.edu.br

Nesse contexto, e considerando também que meu afastamento utiliza uma vaga de substituto (conforme edital para qualificação docente 2016, anexado a meu processo de afastamento 23091.004146/2016-04), necessito de permanecer afastado para continuar as atividades de minha pesquisa, sendo esta a justificativa de minha solicitação de renovação de afastamento por mais 1 ano.

Data: 16 de Março de 2018

Paulo Henrique Araújo Bezerra
SIAPE: 1859840

Professor Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRN



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br

RELATÓRIO DE ATIVIDADES ACADÊMICAS
SEMESTRES 2017.2 E 2018.1

DOUTORADO EM ENGENHARIA MECÂNICA (PPGEM – UFRN)

SEMESTRE 2017.2

- Continuação da revisão da literatura, a partir da leitura de teses e artigos científicos;
- Implementações na plataforma de programação, as quais são parte do código computacional cuja formulação numérica é objeto da pesquisa de tese;
- Elaboração do resumo e expandido e redação da versão completa do artigo *Strain energy and smart mesh refinement in topology optimization of composite microstructures*, ambas submetidas no ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2017;
- Elaboração do resumo e expandido e redação da versão completa do artigo *Topology optimization of bi-dimensional composite structures under thermomechanical loads*, ambas submetidas no ABCM International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2017;
- Elaboração da versão preliminar da tese para apresentação no Exame de Qualificação.

SEMESTRE 2018.1

- Continuação da revisão da literatura, na forma de Revisão Sistemática da Literatura;
- Realização do Exame de Qualificação de Doutorado, tendo sido fui aprovado pela respectiva banca examinadora;



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E-mail: proppg@ufersa.edu.br

- Realização de correções na versão preliminar da tese apresentada no Exame de Qualificação de Doutorado, propostas pela banca examinadora;
- Continuação das implementações na plataforma de programação, incluindo a atualização de classes a serem utilizadas no código desenvolvido na pesquisa de tese;
- Elaboração de artigos científicos, com base na pesquisa de doutorado, a serem publicados em periódicos e eventos internacionais;
- Continuação da redação da tese de doutorado, cuja defesa está prevista para o semestre 2019.1;

Data: 16 de Março de 2018

Paulo Henrique Araújo Bezerra

Paulo Henrique Araújo Bezerra
SIAPE: 1859840

Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior

Professor Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRN

**PROJETO DE TESE – CONFORME SOLICITADO
NO REQUERIMENTO PARA RENOVAÇÃO DE
AFASTAMENTO NO CASO DE RELATÓRIO A
PARTIR DO 5º SEMESTRE DE DOUTORADO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MÉTODO PARA PROJETO DE MICROESTRUTURAS
ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E DE
FORMA INTEGRADAS

PAULO HENRIQUE ARAÚJO BEZERRA
NATAL- RN, 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MÉTODO PARA PROJETO DE MICROESTRUTURAS ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E DE FORMA INTEGRADAS

PAULO HENRIQUE ARAÚJO BEZERRA

Projeto de Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOCTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**, orientado pelo Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior.

NATAL – RN
2018

Resumo

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um método para projeto de microestruturas otimizadas através da integração das técnicas de otimização topológica e de forma. O referido método se subdivide em 3 etapas: 1) otimização topológica do domínio de projeto, com formulação baseada no Método da Energia de Deformação; 2) pré-processamento da resposta obtida, com regularização da imagem e algoritmo de reconhecimento de formato furos; 3) otimização de forma, com formulação baseada em curvas *B-spline*. Assim, por meio desse processo, cada furo (vazio ou fase de material diferente) da microestrutura obtida pela otimização topológica terá seu formato identificado e será modelado por curvas *B-spline* antes do processo de otimização de forma. Problemas da literatura serão analisados, para validação do código e outras estruturas serão projetadas para demonstração do desempenho do método.

Palavras-chave: Otimização Topológica, Otimização de Forma, Método de Otimização Integrado, Otimização de Microestrutura, Compósitos

Abstract

This work approaches the development of a method to design optimum microstructures by integrating both topology and shape optimization techniques. The method is divided in 3 steps: 1) topology optimization of design domain, using Strain Energy Method-based formulation; 2) preprocessing of topological result, with image regularization and hole interpretation algorithm; 3) shape optimization, with B-spline curves-based formulation. Therefore, through that process, each hole (void or different material phase) of the microstructure by topology optimization will have its format identified and will be modeled by B-spline curves before shape optimization. Literature problems will be analysed, in order to validate the computational code, and other structures will be designed to prove the method's performance.

Keywords: Topology Optimization, Shape Optimization, Integrated Optimization Method, Microstructure Optimization, Composite Materials

Lista de Ilustrações

Figura 3.1 - Pixels sólidos ruidosos em imagem binária de macroestrutura	16
Figura 3.2 - Pixels vazios ruidosos em imagem binária de macroestrutura	16
Figura 3.3 - Furos numerados	17
Figura 3.4 – Resultado do escaneamento e numeração de pontos do contorno	18
Figura 3.5 – Possíveis vértices após análise de ângulos	18
Figura 3.6 – Possíveis vértices após adaptação de elementos adjacentes	19
Figura 3.7 – Possíveis vértices após segunda análise de ângulos	19
Figura 3.8 – Resultado da interpretação do formato dos furos	19
Figura 3.9 – Descrição do problema	23
Figura 3.10 – Elemento Finito Triangular Tri6	27
Figura 3.11 – Transformação do Domínio do Elemento Triangular	29

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Justificativa.....	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo geral.....	3
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.3	Organização do trabalho	4
2	Revisão Bibliográfica	5
2.1	Introdução	5
2.2	Otimização Topológica.....	5
2.2.1	Otimização topológica de microestruturas	6
2.3	Otimização de Forma utilizando curvas <i>B-spline</i>	6
2.4	Otimização Topológica e de Forma	8
2.4.1	Integração Automática entre Otimização Topológica e de Forma ...	9
3	Formulação Numérica	12
3.1	Estratégia de integração entre Otimização Topológica e de Forma	12
3.2	Otimização Topológica.....	12
3.2.1	Método da Energia de Deformação	12
3.2.2	Modelo de Material	13
3.2.3	Análise da Sensibilidade.....	13
3.2.4	Formulação discreta do problema de otimização.....	14
3.3	Pré-processamento da topologia ótima.....	15
3.3.1	Ajuste da topologia ótima.....	15
3.3.2	Reconhecimento do contorno dos furos	17
3.4	Otimização de forma	20
3.5	Otimização de forma proposta em Chao e Lin (2009).....	20

3.5.1	Variáveis da otimização de forma	20
3.5.2	Problema de otimização	21
3.6	Otimização de Forma proposta nesta pesquisa	22
3.6.1	Formulação do Problema.....	23
3.6.1.1	Elasticidade Linear.....	25
3.6.1.2	Equação de Equilíbrio	26
3.6.2	Formulação Discreta – Método dos Elementos Finitos	27
3.6.3	Modelo de Aproximação do Problema de Otimização	33
3.6.4	Análise da Sensibilidade	36
3.6.4.1	Sensibilidade de $\mathbf{EA}$	36
3.6.4.2	Sensibilidade da função restrição global em relação à variável de projeto.....	38
3.6.4.3	Sensibilidade da função restrição local em relação à variável de projeto.....	39
3.6.4.4	Sensibilidade do vetor tensão em relação à variável de projeto .	40
3.6.4.5	Sensibilidade da matriz de rigidez K em relação à variável de projeto.....	40
3.6.4.6	Sensibilidade da função restrição global em relação ao vetor de deslocamento.....	41
3.6.5	Estratégia da Qualidade da Malha do Elemento Finito	44
4	Continuação do desenvolvimento da pesquisa – Plano de Trabalho .	45
5	Referências	46

1 Introdução

A Otimização Topológica é um processo de projeto que trata da distribuição de material em um domínio prescrito, para se obter o melhor desempenho estrutural. Em outras palavras, é a determinação da conectividade, formato e localização de furos (vazio ou fase diferente de material) no domínio, de modo a minimizar um dado funcional e satisfazer um conjunto de restrições. A referida técnica permite maior liberdade de projeto quando comparada à Otimização de Parâmetro e à Otimização de Forma, as quais lidam com configurações estruturais pré-definidas.

O conceito de otimização topológica foi inicialmente aplicado a problemas de projeto mecânico, mas se expandiu para outras áreas - como fluidos, acústica, ótica e eletromagnetismo - e, nas duas últimas décadas, a Otimização Topológica tem sido a área de pesquisa mais ativa em otimização estrutural e multidisciplinar; devido tanto à consolidação de técnicas clássicas quanto ao desenvolvimento de novos métodos promissores (ALEXANDERSEN, LAZAROV, 2015; DEATON, GRANDHI, 2013; SIGMUND, MAUTE, 2013).

Entretanto, o resultado da otimização topológica nem sempre é fabricável, sendo necessário, em alguns casos, adaptá-lo para viabilizar sua execução; processo que pode comprometer a resposta ótima. Exemplos de imperfeições oriundas da otimização topológica são as respostas com densidade intermediária (resposta níveis de cinza), principalmente prejudiciais em projetos de microescala, e furos ou contornos com aspectos irregulares ou complexos. Além disso, malhas de elementos finitos podem gerar contornos irregulares, sendo necessário suavizá-los para definir a configuração final da estrutura, com parâmetros de forma, para que esta possa ser reproduzida em um ambiente CAD (computer aided design).

Para reduzir ou eliminar esses problemas, pode-se realizar uma subsequente otimização de forma, a fim de realizar um ajuste final na configuração da estrutura - regularizando e suavizando contornos -, mantendo-se o atendimento às restrições de projeto. Assim, nas últimas décadas, diversos trabalhos têm buscado integrar esses dois processos de otimização, conforme se evidencia em Papalambros e Chirehdast (1990), Lin e Chao (2000), Ansola et al. (2002), Luo et al. (2008), Chou e Lin (2009), Luo et al. (2011), Hassani et al. (2013), Wang et al. (2015) e Jiang e Chen (2017). Além da integração entre os métodos, outras

abordagens ainda são encontradas, como o trabalho de Zhang et al. (2017), em que se busca controlar a complexidade estrutural na otimização topológica, atendendo a requisitos de manufatura; limitando o tamanho mínimo e a quantidade de furos estruturais.

Porém, os trabalhos encontrados na literatura nem sempre abordam a otimização de forma propriamente dita, ou não revelam os detalhes técnicos da integração das duas técnicas de otimização, além de se referirem essencialmente a macroestruturas. Desse modo, este trabalho propõe a aplicação da otimização topológica em conjunto com a de forma (propriamente dita), com clara definição do método empregado, para projetar microestruturas de compósitos.

1.1 Justificativa

Na literatura de Otimização Estrutural, os trabalhos relevantes (alto número de citações ou avaliação pelo sistema Qualis Capes) que abordam a integração dos métodos de otimização topológica e de forma, frequentemente, não se referem à otimização de forma propriamente dita ou não revelam os detalhes técnicos da integração dos métodos, além de apresentarem aplicações apenas para projeto de macroestruturas.

No que se refere à não aplicação da otimização de forma propriamente dita, nas abordagens de *level-set method*, como em Kwak et al. (2005), Luo et al. (2008), Luo, Tong e Kang (2009), Li et al. (2015), Wang et al. (2016) Jiang e Chen (2017), desenvolve-se a otimização topológica e, através de esquemas de suavização, obtém-se a regularização dos contornos dos furos, não sendo empregada uma técnica separada para otimizar a forma - em Wang et al. (2014), comenta-se sobre a terminologia para os diversos tipos do método level-set. Em Luo et al. (2008), por exemplo, aplica-se um filtro para remoção da máxima densidade de energia de deformação, suavizando-se o contorno dos furos, mas sem a aplicação de um processo próprio de otimização de forma; a rotação, posição e tamanho dos furos não são modificados e a suavização resulta incompleta.

Em relação aos detalhes técnicos da otimização de forma, trabalhos como os de Lin e Lin (2005), Lin e Chou (2008) e Chou e Lin (2009) não revelam com clareza a abordagem de análise isogeométrica empregada durante o processamento.

Além desses aspectos, uma pequena quantidade de trabalhos aplica a otimização topológica e de forma ao projeto de microestruturas. Na revisão da literatura realizada desta pesquisa, foram identificados apenas os trabalhos de Wang et al. (2014), Wang et al. (2016) e Gao et al. (2018) com essa abordagem, entretanto, todos são baseados em *level-set*.

Dessa maneira, este trabalho propõe o desenvolvimento de um método para integrar, automaticamente, a otimização topológica à de forma (propriamente dita), visando a projetar microestruturas de compósitos. A otimização topológica terá formulação baseada no Método da Energia de Deformação e a Otimização de Forma utilizará formulação baseada em curvas *B-spline*.

Apesar da aplicação integrada de otimização topológica e de forma a microestruturas, a principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de uma técnica de otimização de forma aplicada a furos de formato identificado. Em outras palavras, após a otimização topológica, cada furo da microestrutura (vazio ou fase de material diferente) terá seu formato identificado, será modelado por curvas *B-spline* e passará pelo processo de otimização de forma.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um método de projeto de microestruturas de compósitos, o qual integre otimização topológica e de forma em processo automático.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos incluem:

1) implementação de formulação numérica de otimização topológica, baseado no Método da Energia de Deformação, conforme Silva Júnior (2015);

2) desenvolvimento e implementação de algoritmo de pré-processamento para otimização de forma, o qual regulariza a resposta da otimização topológica (converte em imagem binária) e identifica o formato dos furos (vazio ou segunda fase de material);

3) desenvolvimento e implementação de formulação numérica de otimização de forma, para projetar tamanho, posição e formato do contorno de furos (vazio ou segunda fase de material), além de suavizar seus contornos;

4) validação do código desenvolvido, através de comparação com exemplos clássicos da literatura;

5) aplicação do método a outros problemas de otimização de microestruturas de compósitos;

1.3 Organização do trabalho

A tese se subdividirá em: 1) Introdução; 2) Revisão da Literatura; 3) Formulação Numérica; 4) Resultados e Discussão; 5) Considerações Finais; e 6) Referências.

Entretanto, para o Exame de Qualificação, ainda não serão apresentados resultados, de modo que este documento se restringe às seguintes seções: 1) Introdução; 2) Revisão da Literatura; 3) Metodologia, contendo a Formulação Numérica e o Plano de Trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

Esta seção trata de um breve histórico e estado da arte sobre otimização topológica e otimização de forma.

2.1 Otimização Topológica

A otimização topológica de um domínio de material trata da determinação da conectividade, formato e localização de regiões de furo (vazio ou de fase de material com propriedades distintas), minimizando-se um funcional e satisfazendo-se um conjunto de restrições.

Conforme relatado em Sigmund e Maute (2013), desde o trabalho pioneiro sobre otimização topológica numérica de Bendsoe e Kikuchi (1988), abordando o método de homogeneização, o conceito recebeu diferentes tratamentos, os quais podem se basear em: densidade (BENDSOE, 1989; ZHOU, ROZVANY, 1991; MLEJNEK, 1992); *level-set* (ALLAIRE et al., 2002, 2004; WANG et al., 2003); derivada topológica (SOKOŁOWSKI; ZOCHOWSKI, 1999); campos de fase (BOURDIN; CHAMBOLLE, 2003); abordagens evolucionárias (XIE; STEVEN, 1993); dentre outras, como as abordagens híbridas que tem surgido ultimamente.

Além dos tipos de tratamento do problema, outras classificações podem ser aplicadas aos métodos de otimização topológica. Em Zhang et al. (2014), por exemplo, os métodos são divididos segundo um critério que leva em conta sua abrangência (ou alcance) e, dessa forma, apresenta-se o estado da arte da otimização topológica simultânea, a qual pode abranger: microestrutura e macroestrutura (extensão multiescala), estrutura e apoios, estrutura e cargas dependentes de projeto, estrutura e locação de componentes incorporados.

Levando em conta esses conceitos, diferentes abordagens podem se aplicar a uma mesma extensão e alcance. Nos últimos anos, por exemplo, diversos trabalhos têm aplicado a abordagem de *level-set* na otimização topológica de macro e microestruturas (abrangência multiescala), como Dunning, Brampton e Kim (2015), Sivapuram, Dunning e Kim (2016) e Wang, Chen e Wang (2017).

Mantendo-se tanto a abordagem quanto o alcance da otimização topológica, essa ainda pode ser combinada com outros tipos de otimização estrutural,

originando ainda um terceiro tipo de classificação. Assim, como exemplo, citam-se os trabalhos de Kwak e Cho (2005), Luo et al. (2008), Li et al. (2015), Jiang e Chen (2017), que tratam da abordagem *level-set*, abrangem apenas a macroescala e propõem a integração entre otimização topológica e de forma.

Levando em conta todos esses aspectos, o trabalho desta pesquisa propõe o desenvolvimento de um método de otimização topológica com as seguintes classificações: 1) abordagem baseada em densidade; 2) abrangência apenas da microescala; e 3) integração entre otimização topológica e de forma. Os próximos subitens contextualizam o trabalho aqui proposto com base nesses critérios de classificação e outros aspectos pertinentes.

2.1.1 Otimização topológica de microestruturas

A homogeneização inversa (SIGMUND, 1994), que combina otimização topológica e método da homogeneização, tem sido amplamente estudada e aplicada nas últimas décadas. Nesse processo, uma microestrutura periódica é considerada uniformemente distribuída no domínio e se comporta como um material, devido a sua escala ser muito menor do que a do corpo macroscópico. Assim, as propriedades efetivas podem ser avaliadas pelo Método da Homogeneização e a geometria de uma única célula base é determinada, via otimização topológica, para se atingir a característica desejada.

Uma alternativa para determinação das propriedades efetivas do material é a utilização do Método da Energia de Deformação (ZHANG et al., 2007a, 2007b; SILVA JÚNIOR, 2015), de menor custo computacional e implementação mais simplificada que o Método da Homogeneização. Este método será, portanto, empregado na formulação numérica da pesquisa apresentada neste trabalho.

2.2 Otimização de Forma utilizando curvas B-spline

Conforme Lins (2009), o marco inicial da modelagem geométrica moderna começou na década de 50, com os trabalhos de que visavam a representar matematicamente a modelagem de curvas não racionais e superfícies de forma livre utilizando funções de interpolação polinomiais. Dentre eles se destacam os dos engenheiros da indústria automobilística e aeroespacial Steven Anson Coons (na Ford), James Ferguson (na Boeing), Paul Casteljau (na Citroën) e Pierre Bézier (na

Renault). Eles buscaram formas de curvas e superfícies que eram fáceis de modificar e compatíveis com a análise e os processos industriais; assim, tendo como destaque a superfície de Coons e Ferguson e a formulação de Bézier e Boor, implementou-se o algoritmo para as curvas *B-spline*. Os trabalhos desses engenheiros proporcionaram um grande avanço na área da modelagem geométrica, base de formulação dos mais diversos trabalhos científicos e, principalmente, dos programas de modelagem gráfica da engenharia aeroespacial, automobilística e náutica como os programas de CAD e da programação de controle numérico.

Na tese de Sienz (1994), sobre Otimização de Forma e Análise Adaptativa Integrada à Modelagem Estrutural, desenvolveu-se um sistema computacional que integra os métodos de Otimização Topológica e de Forma para estrutura bidimensional com os conceitos de projeto assistido por computador, de maneira que a modelagem da estrutura é realizada por curvas *B-spline*, com gerador de malha não estruturadas e refino adaptativo em combinação com o estimador de erro. A análise do estado plano de tensão é feita pelo Método dos Elementos Finitos e a Otimização Topológica e de Forma são módulos separados que integram o sistema computacional, de modo que a análise da sensibilidade pode ser realizada pelos métodos semianalíticos ou pelo método de diferença finita. A programação matemática para otimização de forma utiliza a Programação Seqüencial Quadrática.

Pourazady e Fu (1996) propõem a Integração do Método Otimização de Forma aproximado pelo Método dos Elementos Finitos combinado com Análise da Sensibilidade obtida diretamente pelas diferenças finitas das equações, sendo que, na representação da modelagem geométrica, usam-se as curvas *B-spline* através do algoritmo de Boor (1972)] para obter a forma “ótima”. O problema de otimização é de programação matemática não-linear, resolvido através da linearização da série de Taylor, e propõe uma estratégia para geração de malha automática.

No artigo Cerrolaza, Annicchiarico e Martinez (2000) propõe-se o conceito de otimização de forma usando o Método dos Elementos de Contorno combinado com a técnica do Algoritmo Genético, onde as curvas *B-spline* modelam o contorno do domínio. No trabalho, descreve-se ainda como usar operadores genéticos para movimentar o contorno e efetuar a geração de malha adaptativa no contorno que possa atender aos critérios das restrições sem violá-las.

Parente Jr. (2000) propõe uma metodologia para a otimização de forma de estruturas geometricamente não-lineares que visa evitar os problemas de instabilidade apresentados por estruturas otimizadas de acordo com a formulação clássica. Utiliza os conceitos de modelagem geométrica de curvas paramétricas *B-spline* para definir a forma da estrutura e, para realizar a geração de malha, são implementados diferentes algoritmos de malhas estruturadas e não estruturadas. O Método de Newton-Raphson é utilizado para determinar a configuração de equilíbrio e para análise da sensibilidade utiliza-se a técnica analítica e semianalítica.

Steffens (2005) propõe um procedimento numérico integrado para problemas de otimização de forma aplicada ao escoamento de fluidos. A definição do problema de otimização é formulada pela equação de Navier-Stokes, com objetivo de reduzir a dissipação viscosa, e aproximado pelo MEF. O modelo geométrico é representado por segmentos de curvas paramétricas *B-spline* cúbicas, de modo que as variáveis de projeto são as coordenadas dos pontos-chave, os quais descrevem o contorno do domínio. A resolução do problema de otimização se dá por meio do Método Lagrangiano Aumentado submetida às restrições de volume e dimensão geométrica.

Em Qian (2010), apresenta-se uma abordagem para computação analítica das sensibilidades de posições e pesos de pontos de controle de NURBS (*B-spline* racional não-uniforme) em otimização de forma. A formulação analítica permite o cálculo da sensibilidade com acurácia e foi aplicada à otimização de forma baseada em gradiente. Como aplicações da formulação que proporcionam bom desempenho, podem-se citar as formas ótimas cônicas - elipses e círculos em 2D e cilindros, elipsóides e esferas em 3D -, as quais não seriam possíveis sem os pesos como variáveis de projeto.

2.3 Otimização Topológica e de Forma

Diversos trabalhos têm buscado integrar a otimização topológica e a de forma nas últimas décadas, mais especificamente, buscando desenvolver um sistema que opere de maneira automática.

Nos métodos baseados em *level-set*, como em Kwak et al. (2005), Luo et al. (2008), Wang et al. (2016) Jiang e Chen (2017), a aplicação distinta de otimização

topológica e de forma otimização não é explícita, levando alguns autores a considerarem apenas como otimização topológica, conforme comentado em Wang et al. (2014). Nesses trabalhos, utilizam-se, por exemplo, filtros para remoção da máxima densidade de energia de deformação, o que suaviza (não completamente) o contorno dos furos sem a aplicação de um processo próprio de otimização de forma.

Outras abordagens aplicam os dois processos de otimização integrados, mas com clara distinção entre eles. No trabalho de Ansola et al. (2002), em que se aborda a otimização estrutural de cascas, o algoritmo realiza a otimização de forma e, em seguida, a topológica, verificando posteriormente a convergência global. Em Hassani et al. (2013), onde se projetam cascas, propõe-se a realização da otimização topológica e de forma simultaneamente, minimizando-se um mesmo funcional e sendo parâmetros de forma e topológicos as variáveis de projeto. Há ainda trabalhos que abordam a realização da otimização topológica inicialmente, com subsequentes pré-processamento e otimização de forma, como em Lin e Chao (2000), Lin e Lin (2005), Lin e Chou (2008) e Chou e Lin (2009).

Dentre os artigos mencionados neste subtópico, apenas Wang et al. (2014) aborda a otimização topológica e de forma aplicada a microestruturas; contudo, não é consenso se ocorre otimização de forma de fato e utiliza-se método de *leve-set*. Na proposta de tese apresentada neste Exame de Qualificação, será desenvolvido um método para otimização topológica e de forma para projeto de microestruturas, com as duas técnicas integradas, porém sendo processos distintos.

Será utilizada a seguinte sequência: otimização topológica; pré-processamento da topologia ótima (conversão em imagem binária e identificação dos furos); e otimização de forma. Por esse motivo, serão considerados mais detalhadamente nessa revisão apenas os trabalhos que seguem a mesma sequência de projeto, como Chou e Lin (2009), a qual será denominada Integração Automática entre Otimização Topológica e de Forma.

2.3.1 Integração Automática entre Otimização Topológica e de Forma

Papalambros e Chirehdast (1990) propõem um sistema para a integração automática de otimização topológica e de forma, a qual não é obtida totalmente devido às dificuldades de se realizar um processo inteiramente automático de

identificação periferias e formatos de furos arbitrários e de estabelecer modelos de elementos finitos apropriados para otimização de forma direta; apenas ideias gerais são reveladas, em vez de detalhes operacionais para as técnicas de interpretação automática de imagens. Bremicker et al. (1991), obtiveram progresso na integração da otimização topológica e de forma, propondo um processo totalmente automatizado para o projeto de configuração integrado, porém direcionado apenas a treliças. Chirehdast et al. (1994) propuseram procedimentos inteiramente automatizados para a otimização integrada de estruturas sólidas bidimensionais e resolveram vários problemas de projeto práticos; cada contorno interior (furo) ou externo da estrutura, representada em níveis de cinza, é determinada conectando-se pontos chave com *B-spline*, entretanto, o procedimento de detecção de extremidades não é apresentado. Além disso, curvas *B-spline* construíram contornos (externos e internos) que não são sempre as melhores soluções para definir um bom modelo estrutural para otimização de forma (LIN E CHAO, 2000).

Outros trabalhos seguem a mesma ideia de otimização topológica e de forma em sequência, mas usando diferentes técnicas de identificação de formato de furos. No próprio trabalho de Lin e Chao (2000), busca-se associar os furos a formas geométricas através de dois parâmetros de forma, média e desvio padrão dos raios *L* no gráfico de perfil; cada furo é identificado comparando-se seu gráfico de perfil e o das formas geométricas pré-definidas. Segundo os autores, em muitos casos, formatos geométricos simples (triângulos, círculos e retângulos) podem melhor se adaptar a formatos de furos do que contornos de curvas *B-spline* com muitos pontos na extremidade, pois são definidos por menos parâmetros de forma, o que implica em menos variáveis de projeto e menor chance de conflitar pontos chave no modelo de elementos finitos. Além disso, eles apontam que é uma vantagem econômica manufaturar a estrutura com contornos e furos definidos por formatos geométricos padronizados. Entretanto, o número de possíveis formatos de furo é restrito, fazendo com que os muito irregulares não sejam atendidos ou a resposta ótima seja comprometida.

Em Lin e Lin (2005), segue-se a mesma integração entre otimização topológica e de forma, entretanto, o formato dos furos é identificado através de redes neurais, novamente com base em formas pré-definidas. Entretanto, o algoritmo de identificação de furos não leva em conta figuras geométricas não convexas, o que

limita a associação de furos complexos aos modelos preestabelecidos. Além disso, conforme o próprio autor menciona, usando o processo de identificação proposto, a automática formulação do problema e determinação de variáveis de projeto para otimização de forma são muito complicadas e não foram esclarecidas no artigo.

No trabalho de Lin e Chou (2008), utiliza-se a mesma técnica de interpretação de furos apresentada em Lin e Chao (2000), porém com introdução de técnicas de adaptação dos furos identificados, denominadas de análise de interferência, melhorando o pré-processamento para a subsequente otimização de forma. Entretanto, o algoritmo de reconhecimento do formato dos de furos é limitado, pois apenas quatro formas geométricas pré-definidas podem ser identificadas, além de não englobar figuras não-convexas. Assim, formatos mais complexos não podem ser modelados corretamente; as técnicas de modelagem automática da otimização de forma também são afetadas. Ocorrem, ainda, limitações na análise de interferência.

Chou e Lin (2009) apresentam uma técnica de identificação de furos com base nos vértices, o que permite a abordagem de figuras geométricas não-convexas. Porém, não se esclarecem detalhes do pré-processamento antes da otimização de forma, como a adaptação da imagem reconhecida por curvas *B-spline*, o que pode comprometer a resposta ótima da otimização topológica.

Além disso, todos esses trabalhos se restringem ao projeto de macroestruturas. Desse modo, esse trabalho pretende abordar o projeto de microestruturas ótimas utilizando um método que integre a otimização topológica (baseada em densidade) e a de forma, com eficiente algoritmo de identificação de furos.

3 Formulação Numérica

Nesta seção, apresenta-se a formulação numérica empregada na elaboração do código computacional.

3.1 Estratégia de integração entre Otimização Topológica e de Forma

O procedimento descrito neste subtópico é baseado nas técnicas apresentadas em Chou e Lin (2009), em que se constrói um sistema de projeto automatizado para integrar a otimização topológica e a de forma.

A estratégia para integração da otimização de topológica e a de forma compreende as seguintes etapas: otimização topológica; pré-processamento da topologia ótima, com regularização da imagem e identificação do formato dos furos; otimização de forma. Os próximos itens abordam os procedimentos e as respectivas formulações numéricas de cada etapa.

3.2 Otimização Topológica

A formulação aqui apresentada é baseada no Método da Energia de Deformação, conforme Zhang et al. (2007a, 2007b) e Silva Júnior (2015), sendo usada como alternativa à homogeneização inversa.

3.2.1 Método da Energia de Deformação

Conforme Zhang et al. (2007a), as propriedades efetivas de materiais compósitos periódicos podem ser caracterizadas pelo elemento representativo de volume, nos quais a microestrutura periódica é substituída por meio homogêneo equivalente, de mesmo volume em nível macroscópico. Os tensores de tensão, σ , e de deformação, ϵ , do meio homogêneo correspondem à tensão e deformação médias da microestrutura, com:

$$\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \sigma d\Omega = \bar{\sigma} \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \epsilon d\Omega = \bar{\epsilon} \quad (3.2)$$

Sendo Ω a área (problema 2D) do elemento representativo de volume. A tensão e deformação médias do meio homogêneo obedecem à Lei de Hooke:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{D}^H \bar{\epsilon} \quad (3.3)$$

Na qual $\mathbf{D}^H$ é o tensor de elasticidade efetivo do material. Para materiais ortotrópicos 2D, pode-se escrever:

$$\mathbf{D}^H = \begin{bmatrix} D_{1111}^H & D_{1122}^H & 0 \\ D_{1122}^H & D_{2222}^H & 0 \\ 0 & 0 & D_{1212}^H \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

As energias de deformação armazenadas na microestrutura, $E(\epsilon)$, e no meio homogêneo, $E(\bar{\epsilon})$, devem ser iguais. Portanto, conforme Zhang et al. (2007a):

$$E(\epsilon) = \frac{1}{2\Omega} \int_{\Omega} (\sigma_{11}\epsilon_{11} + \sigma_{22}\epsilon_{22} + \sigma_{12}\epsilon_{12}) d\Omega = \frac{1}{2} (\bar{\sigma}_{11}\bar{\epsilon}_{11} + \bar{\sigma}_{22}\bar{\epsilon}_{22} + \bar{\sigma}_{12}\bar{\epsilon}_{12}) = E(\bar{\epsilon}) \quad (3.5)$$

A partir das equações (3), (4) e (5), pode-se obter, substituindo-se as condições de contorno:

$$\mathbf{D}^H = \begin{bmatrix} 2\bar{E}^{(1)} & \bar{E}^{(4)} - \bar{E}^{(2)} - E^{(1)} & 0 \\ \text{simétrico} & 2\bar{E}^{(2)} & 0 \\ & & 2\bar{E}^{(3)} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.2.2 Modelo de Material

O modelo de material empregado é o SIMP, *Solid Isotropic Material with Penalty*. Neste modelo, a matriz de rigidez é definida em termos da densidade relativa ρ :

$$\mathbf{K}(\rho_e) = \rho_e^\eta \mathbf{K}_o \quad (3.7)$$

Sendo $\mathbf{K}(\rho_e)$ a matriz de rigidez do material sólido, e o número total de elementos e η o parâmetro de penalidade da microestrutura SIMP.

3.2.3 Análise da Sensibilidade

O problema de elementos finitos é representado por:

$$\mathbf{K}(\rho) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{K}(\rho) = \sum_e \mathbf{K}_e(\rho_e) \quad (3.9)$$

$$\mathbf{K}_e(\rho_e) = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{D}^H(\rho_e) \mathbf{B}^T d\Omega \quad (3.10)$$

Sendo $\mathbf{K}$ a matriz de rigidez global da microestrutura a qual a célula unitária representa e $\mathbf{F}$ o vetor de forças nodais equivalente ao campo de deformações teste $\bar{\epsilon}$. A solução da equação (3.8) é representada pelo vetor de deslocamentos nodais $\mathbf{u}$.

Dessa forma, a sensibilidade do tensor de elasticidade efetivo $\mathbf{D}^H$ pode ser expressa por:

$$\frac{\partial \mathbf{D}^H}{\partial \rho_e} = \frac{\eta}{\rho_e} \begin{bmatrix} 2\bar{E}_e^{(1)} & \bar{E}_e^{(4)} - \bar{E}_e^{(2)} - \bar{E}_e^{(1)} & 0 \\ & 2\bar{E}_e^{(2)} & 0 \\ \text{simétrico} & & 2\bar{E}_e^{(3)} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

3.2.4 Formulação discreta do problema de otimização

Empregando SIMP como modelo material, o problema de otimização pode ser escrito como:

$$\min f(\rho) = w_1 D_{1111}^H + w_2 D_{2222}^H + w_3 D_{1122}^H + w_4 D_{1212}^H \quad (3.12)$$

Sendo w_1, w_2, w_3 e w_4 os pesos inseridos pelo usuário.

O problema é sujeito às restrições:

$$g_1(\rho) = \int_{\Omega} \rho d\Omega - \bar{A}\Omega \leq 0 \quad (3.13)$$

$$g_2(\rho)_e = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_e^2 - (C_x^e)^2 \leq 0 \quad (3.14)$$

$$g_3(\rho)_e = \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \right)_e^2 - (C_y^e)^2 \leq 0 \quad (3.15)$$

$$g_4(\rho)_i = \rho_{inf} - \rho(\mathbf{x})_i \leq 0, \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (3.16)$$

$$g_5(\rho)_i = \rho(\mathbf{x})_i - \rho_{sup} \leq 0, \forall \mathbf{x} \in \Omega \quad (3.17)$$

Para $e = 1, \dots, N$ (número de elementos) e $i = 1, \dots, M$ (número de pontos nodais). Sendo: ρ a densidade relativa; $\bar{A}$ a superfície de material prescrita; C_x e C_y os limites de contorno para os componentes do gradiente de densidade relativa; ρ_{inf} e ρ_{sup} os valores ínfimos e supremos da densidade relativa.

As restrições g_2 e g_3 previnem as instabilidades de tabuleiro de xadrez (BENDSOE, 1995) e as sensibilidades da função objetivo são dadas por:

$$\frac{\partial f(\boldsymbol{\rho})}{\partial \boldsymbol{\rho}} = w_1 \frac{\partial D_{1111}^H}{\partial \boldsymbol{\rho}} + w_2 \frac{\partial D_{2222}^H}{\partial \boldsymbol{\rho}} + w_3 \frac{\partial D_{1122}^H}{\partial \boldsymbol{\rho}} + w_4 \frac{\partial D_{1212}^H}{\partial \boldsymbol{\rho}} \quad (3.18)$$

O problema de otimização será resolvido como irrestrito, usando o Método do Lagrangeano Aumentado com Penalidade. O Método do Gradiente Espectral Projetado (BIRGIN; MARTÍNEZ, 2002) também será empregado.

3.3 Pré-processamento da topologia ótima

O pré-processamento compreende as etapas de ajuste da topologia ótima; identificação do formato dos furos e seguirão, com as devidas adaptações, os procedimentos descritos em Chao e Lin (2009).

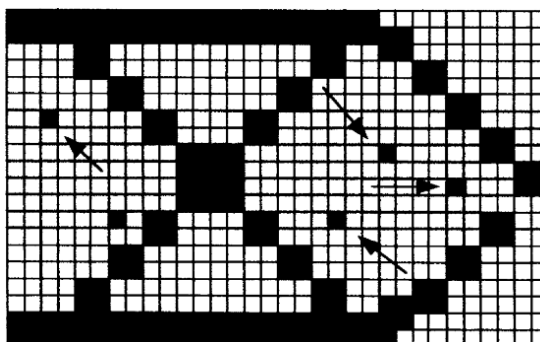
3.3.1 Ajuste da topologia ótima

O processo aqui descrito, conforme apresentado em Chou e Lin (2009), visa a converter o resultado da otimização topológica (níveis de cinza) em uma imagem binária (apenas densidades 0 ou 1), preparando-o para a etapa de reconhecimento de furos. Utiliza-se uma técnica de limitação, com posterior reparo de imagens.

Para converter a imagem da topologia ótima, em níveis de cinza, na sua equivalente binária, será utilizado o valor de limitação 0,5; outros valores podem ser empregados, conforme detalhado em Lin e Chao (2000). Assim, se a densidade do elemento for maior ou igual a 0,5, sua densidade é ajustada para 1 (sólido), caso contrário, para 0 (vazio). Esse valor de limitação foi escolhido e considerado seguro, pois o método SIMP (na otimização topológica), ao aplicar um parâmetro de penalidade, faz com que a maioria das densidades dos elementos sejam próximas de 0 ou 1, reduzindo o número de elementos em níveis cinza.

Entretanto, esse processo pode deixar pontos (pixels) ruidosos na forma de elementos sólidos isolados em regiões sem material, conforme destacado por setas na Figura 3.1.

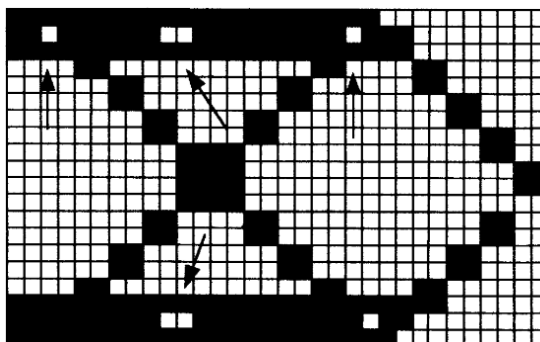
Figura 3.1 - Pixels sólidos ruidosos em imagem binária de macroestrutura



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Pode haver ainda pixels ruidosos na forma de elementos vazios embutidos em regiões maciças, conforme indicado por setas na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Pixels vazios ruidosos em imagem binária de macroestrutura



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Para eliminá-los, será implementada uma técnica de ajuste da imagem que leva em conta as densidades no entorno do ponto. Assim, se um elemento finito for sólido e a média das densidades dos n elementos ao seu redor for menor que $n/2$, ele será convertido em um pixel vazio. Por outro lado, se um elemento vazio estiver envolto por n elementos cuja média de densidade seja superior a $n/2$, este será convertido em pixel sólido. O processo de reparo de imagem é realizado em todos os elementos do domínio, sendo repetido pelo menos uma vez para aumentar a efetividade.

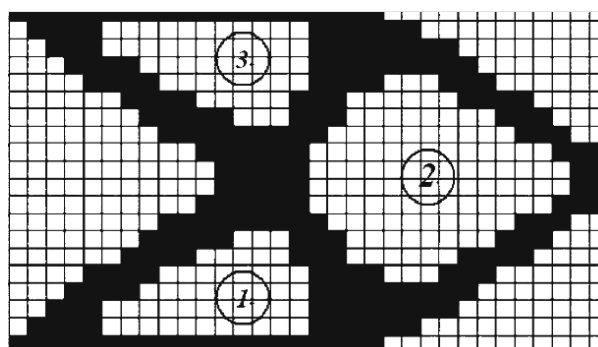
3.3.2 Reconhecimento do contorno dos furos

Após a regularização da imagem da topologia ótima, é feito o reconhecimento do formato de seus furos, os quais serão modelados como sendo polígonos. Esse procedimento, apresentado em Chou e Lin (2009), realiza o escaneamento dos elementos finitos de cada furo e localiza os pontos apropriados para serem os vértices, os quais serão conectados, originando o polígono que representa o furo.

O procedimento de identificação é explicado a seguir, estando ilustrado para o caso de uma macroestrutura apresentada em Chou and Lin (2009):

Etapa 1 – Escaneiam-se todos os elementos no domínio de projeto e numeram-se os furos internos, conforme a Figura 3.3.

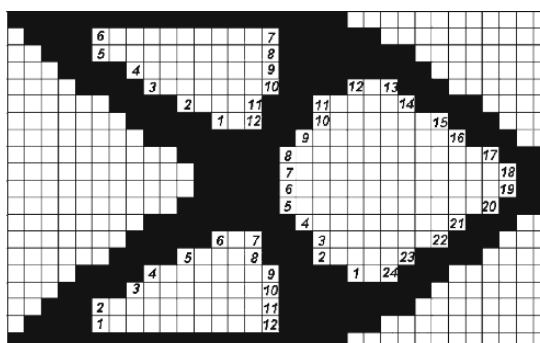
Figura 3.3 - Furos numerados



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Etapa 2 – Dentro de cada furo, escaneia-se horizontalmente cada linha, da esquerda para a direita, começando pelo canto inferior esquerdo. Em cada linha, ao se alcançar o último elemento (que compõe o contorno do furo), este é numerado e passa-se para a linha superior (próxima a ser escaneada). Depois de se percorrer todas as linhas, reinicia-se o escaneamento a partir do canto superior direito, sendo a verificação, horizontalmente, da direita para a esquerda. Novamente, ao se chegar ao último elemento de cada linha, este será numerado e inicia-se o escaneamento da próxima linha (inferior); o processo é repetido até que todas sejam verificadas. Um exemplo de resultado de escaneamento e numeração é ilustrado na Figura 3.4.

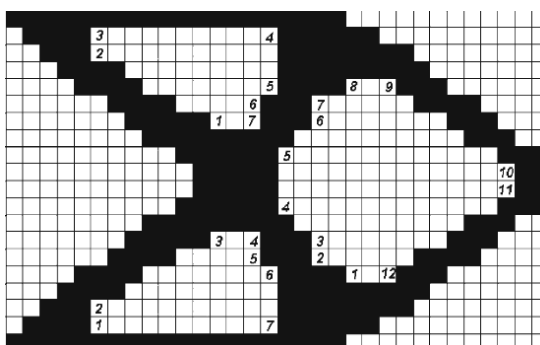
Figura 3.4 – Resultado do escaneamento e numeração de pontos do contorno



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Etapa 3 - Para cada pixel numerado, traçam-se retas de seu centro aos dos elementos vizinhos. Se, para pelo menos um elemento vizinho, o ângulo entre a reta que liga os centros e a direção vertical (ou horizontal) for menor que 160° , o pixel numerado será considerado um possível vértice. Caso os ângulos de todas as retas entre os centros sejam maiores que 160° , o pixel numerado é desconsiderado e aqueles considerados possíveis vértices são renumerados. O procedimento é mantido até que se determinem as coordenadas dos centros de todos os possíveis vértices. O resultado da verificação dos ângulos é mostrado na Figura 3.5.

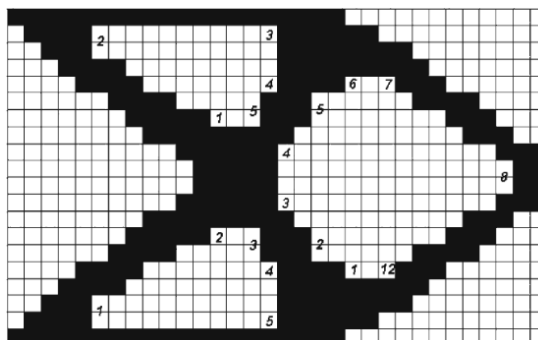
Figura 3.5 – Possíveis vértices após análise de ângulos



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Etapa 4 – Se dois dos possíveis vértices restantes forem adjacentes, estes serão desconsiderados e substituídos pelo ponto médio entre eles. Assim, calculam-se as coordenadas dos pontos médios e renumeram-se os possíveis vértices remanescentes. O resultado da substituição dos elementos adjacentes é mostrado na Figura 3.6.

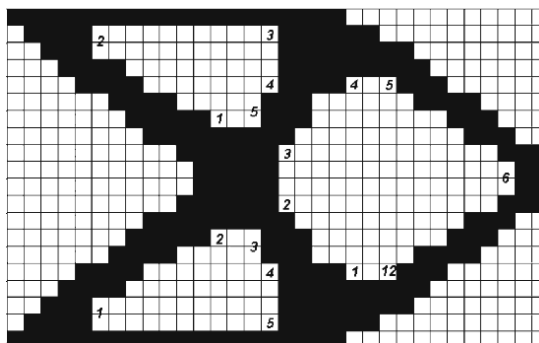
Figura 3.6 – Possíveis vértices após adaptação de elementos adjacentes



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Etapa 5 - Repete-se a Etapa 3, realizando-se novamente a análise de ângulos. O resultado após a segunda análise de ângulos é mostrado na Figura 3.7.

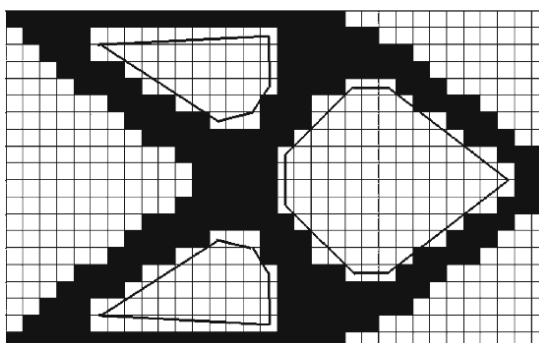
Figura 3.7 – Possíveis vértices após segunda análise de ângulos



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

Etapa 6 - Depois de executar as etapas 1 a 5, os pixels numerados remanescentes são considerados os reais vértices. O polígono formado pela conexão deles é o resultado da interpretação do formato de cada furo da imagem. O resultado do exemplo em questão é apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 – Resultado da interpretação do formato dos furos



Fonte: Adaptado de Chou e Lin (2009)

O exemplo ilustrado nas figuras anteriores, obtido de Chao e Lin (2009), se refere a uma macroestrutura com malha estruturada. Entretanto, a pesquisa proposta neste trabalho abordará microestruturas de compósitos e empregará malhas não estruturadas. Dessa forma, o conceito de furo será generalizado para região de segunda fase material, a qual pode ser composta de vazio ou de material com propriedades diferentes do domínio sólido principal. Além disso, serão realizadas adaptações para que o algoritmo possa identificar o polígono modelador em malhas não estruturadas.

3.4 Otimização de forma

Após o processo de identificação do formato dos furos, determinam-se as variáveis de projeto para a subsequente otimização de forma. No trabalho de Chao e Lin (2009), as referidas variáveis são vetores (segmentos de reta entre o centro do furo e seus vértices), enquanto na pesquisa deste trabalho, serão coordenadas dos pontos de controle de curvas *B-spline*.

Essa diferença de tipos de variáveis de projeto está diretamente relacionada a uma das contribuições científicas desta pesquisa, que é o desenvolvimento de uma técnica de otimização de forma baseada em curvas *B-spline* aplicada a furos de formato identificado.

Os subtópicos seguintes abordam as duas técnicas de otimização de forma mencionadas.

3.5 Otimização de forma proposta em Chao e Lin (2009)

3.5.1 Variáveis da otimização de forma

Para definirem-se as variáveis de projeto para a otimização de forma, inicialmente modelam-se os furos com base na etapa anterior de interpretação da imagem. Dessa forma, para cada furo, a partir das coordenadas dos vértices do polígono que os representa, determinam-se: as coordenadas dos centroides; os vetores partindo do centroide até os vértices; e as equações lineares dos lados do polígono mencionado.

Em seguida, o comprimento (módulo) do vetor, do centroide até cada vértice, será tratado como variável de projeto para a subsequente otimização de forma. Para

determinar automaticamente as restrições laterais das referidas variáveis, serão utilizadas as técnicas de 1) estratégia de expansão de furo e 2) análise de interferência, apresentadas em Lin e Chou (2008)

O procedimento de modelagem dos furos para a otimização de forma é descrito a seguir:

Etapa 1 – Alongam-se todos os vetores, radialmente e para fora (sentido centroide-vértice), de maneira simultânea e na mesma velocidade;

Etapa 2 – Verifica-se se o vetor intercepta o contorno do furo. Se sim, interrompe-se, senão, continua-se o alongamento;

Etapa 3 – Verifica-se se o vetor intercepta outros vetores. Se sim, interrompe-se o alongamento de ambos vetores e a intersecção entre eles é o ponto final de ambos. Caso contrário, continua-se o alongamento;

Etapa 4 – Verifica-se se o vetor intercepta algum lado de outros furos. Se sim, para-se o alongamento do vetor, sendo a intersecção com o lado do outro furo o seu ponto final; nos furos com lado interceptado, os vetores que o controlam também têm seu alongamento finalizado. Caso não haja interceptação, continua-se o alongamento.

Etapa 5 – Quando todos os vetores tiverem seu alongamento interrompido, os seus comprimentos máximos estarão determinados. Os comprimentos máximos são, finalmente, usados como bases para os limites superiores das variáveis de projeto que modelam os furos poligonais.

3.5.2 Problema de otimização

A otimização de forma adota: como variáveis de projeto, os comprimentos de cada vetor (do centroide de cada furo até seus vértices); como função objetivo, o volume de material; e como restrição de projeto, a tensão (e/ou o deslocamento) admissível.

Assim, o problema de otimização é definido como:

$$\min \varphi = V_{total}(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.19)$$

sujeito às restrições

$$g_1 = \sigma_{max} - \sigma_{allow} \leq 0 \quad (3.20)$$

$$g_2 = d_{max} - d_{allow} \leq 0 \quad (3.21)$$

Em que:

φ é a função objetivo; V_{total} é o volume total; $x_1, x_2, \dots, x_n$ são as variáveis de projeto (comprimento dos vetores); σ_{max} e σ_{allow} são as tensões máxima e admissível, respectivamente; d_{max} e d_{allow} são os deslocamentos máximo e admissível, respectivamente.

Para suavizar o formato do modelo e reduzir a concentração de tensões, curvas *B-spline* são usadas para conectar vértices e representar cada furo (particularidades da implementação não foram reveladas pelos autores). Os valores iniciais de cada variável de projeto são definidos como 0,75 vezes o máximo comprimento do vetor, o máximo valor de cada variável de projeto é definido como 0.95 vezes o comprimento máximo do vetor a ela associado e o mínimo é um valor próximo de zero.

A resolução do problema de otimização emprega o software ANSYS (versão 11.0) para o cálculo do máximo valor de tensão, do máximo valor de deslocamento e do volume de material; além disso, o referido programa utiliza do método das direções viáveis modificado, do software de otimização DOT (versão 4.0), para resolver o problema de ótimo. Devido aos padrões de tolerância do software DOT, o projeto ótimo viola, em pequena proporção, restrições de projeto.

3.6 Otimização de Forma proposta nesta pesquisa

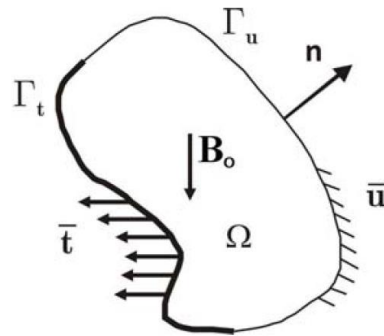
Neste subtópico, aborda-se a técnica de otimização de forma utilizada para resolução do problema de minimização da massa estrutural submetida a um critério de tensão, conforme apresentado em Lins (2009). Inicialmente, apresentam-se a formulação do modelo de elasticidade linear sob a hipótese de pequenas deformações e deslocamentos, além da aproximação pelo MEF. Em seguida, desenvolve-se a formulação do problema de otimização, com a análise de

sensibilidade do processo, e apresenta-se a estratégia adotada para geração de malhas automáticas.

3.6.1 Formulação do Problema

Conforme apresentado em Lins (2009), de modo geral, pode-se definir um problema de estruturas sob carregamento mecânico conforme a ilustração da Figura 3.9.

Figura 3.9 – Descrição do problema



Fonte: Adaptado de Lins (2009)

Em que:

Ω é o domínio genérico do projeto; $\partial\Omega$ é o contorno do domínio, tal que $\partial\Omega = \Gamma_u \cup \Gamma_t$ e $\Gamma_u \cap \Gamma_t = \emptyset$; Γ_u é a parte do contorno sujeito a deslocamento prescrito, também denominada condição de contorno de Dirichlet, isto é, $\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}}$; Γ_t é a parte do contorno sob tração prescrita, também denominada condição de contorno de Neumann, isto é, $\mathbf{t} = \bar{\mathbf{t}}$; $\mathbf{B}_o$ representa o vetor de força de corpo por unidade de volume.

O vetor de força resultante $\mathbf{B}_o$ é a soma de todas as forças de corpo atuantes em um volume finito Ω , a qual é dada pela integral sobre o volume:

$$\mathbf{B}_o = \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} d\Omega \quad (3.22)$$

A força de corpo por unidade de massa atuante em um volume infinitesimal $d\Omega$ do corpo é denotado pelo vetor $\mathbf{b}$. A força de corpo no volume $d\Omega$ é $\rho \mathbf{b} d\Omega$, sendo ρ a massa por unidade de volume.

Na presente formulação, o objetivo será utilizar o Método de Otimização de Forma para minimizar a massa de estruturas 2D (resultantes da otimização topológica) atendendo a um critério de tensão. Para tanto, utilizam-se curvas *B-spline* para descrever o contorno dos furos a serem otimizados. Essas curvas possuem pontos de controle, os quais determinam segmentos das curvas através dos pontos-chave. Desta maneira, ao se alterar os valores dos pontos-chave, implicitamente modificam-se os valores dos pontos de controle e a curva será modificada localmente.

Uma vez escolhida a curva e os pontos-chave como variáveis de projeto, o problema de otimização visa a determinar $\mathbf{s}$, vetor dos pontos-chave das curvas do contorno, e pode ser formulado como:

$$\min \int_{\Omega} \rho(\mathbf{s}) d\Omega \quad (3.23)$$

sujeito às restrições

$$\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_y} - 1 \leq 0 \quad (3.24)$$

$$\mathbf{s} \in \Omega_s \quad (3.25)$$

Sendo:

$$\Omega_s = \left\{ \mathbf{s} \in \mathbb{R}^{n_s} \mid s_i^{inf} \leq s_i \leq s_i^{sup}; i = 1, \dots, n_s \right\} \quad (3.26)$$

em que:

ρ é a densidade do material; σ_{ef} é a tensão efetiva de von Mises; σ_y é a tensão de escoamento do material; n_s é o número de pontos-chave da microestrutura. A tensão de von Mises efetiva para o caso bidimensional é definida da seguinte forma:

$$\sigma_{ef}^{2D} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy} + 3\sigma_{xy}^2} \quad (3.27)$$

Escrita na forma de matriz reduzida como:

$$(\sigma_{ef})^2 = \mathbb{H} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (3.281)$$

A representação de $\mathbb{H}$ para o caso 2D é:

$$\mathbb{H}^{2D} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

3.6.1.1 Elasticidade Linear

Conforme a Lei de Hooke, a equação que relaciona tensão com a deformação, a qual é válida na região elástica linear, é dada por:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbb{D} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3.30)$$

em que:

$\boldsymbol{\sigma}$ é o tensor de tensões, $\boldsymbol{\varepsilon}$ é o tensor de deformações e $\mathbb{D}$ o tensor constitutivo do material. Os tensores $\boldsymbol{\sigma}$ e $\boldsymbol{\varepsilon}$ para o caso 2D são dados, na forma de vetores, por:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

No caso particular 2D, o tensor constitutivo do estado plano de tensões toma a seguinte forma:

$$\mathbb{D} = \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 - 2\nu \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$\sigma_{ef} = \sigma_{ef}(\mathbf{u}(\mathbf{x}))$ representa uma medida de tensão (critério de tensão) paramétrica, isto é, deve-se garantir a condição de tensão para todo ponto $\mathbf{x}$ pertencente ao domínio de projeto Ω .

3.6.1.2 Equação de Equilíbrio

O sólido está sujeito à força superficial $\mathbf{t}$ e à força de corpo $\rho \mathbf{b}$. Para que o sólido esteja em equilíbrio, é necessário que:

$$\int_{\Gamma_t} \mathbf{t} d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} d\Omega = 0 \quad (3.34)$$

Sendo o carregamento mecânico $\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \mathbf{t}$, denotado por $\mathbf{n}$, o vetor normal, tem-se:

$$\int_{\Gamma_t} \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} d\Gamma + \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} d\Omega = 0 \quad (3.35)$$

Aplicando o teorema da divergência ao campo tensorial da equação (3.35), sabendo-se que o tensor é simétrico, obtém-se:

$$\int_{\Omega} \text{div } \boldsymbol{\sigma} d\Omega + \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} d\Omega = \int_{\Omega} (\text{div } \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}) d\Omega = 0 \quad (3.36)$$

Analisando a equação (3.36), deduz-se a equação de equilíbrio de forças dada por:

$$\text{div } \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = 0 \quad (3.37)$$

A formulação forte do problema propõe a determinação de $\mathbf{u}$ na equação de equilíbrio

$$\text{div } \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b} = 0 \quad \text{em } \Omega \quad (3.38)$$

sob carregamento mecânico, escrito de acordo com a equação de Cauchy:

$$\boldsymbol{\sigma}\mathbf{n} = \mathbf{t} \text{ em } \Gamma_t \quad (3.39)$$

A deformação e o deslocamento devem satisfazer às condições de geometria:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{ij} + u_{ji}) \quad (3.40)$$

sendo $u_i = \bar{u}_i$ em Γ_u

Pela formulação forte, chega-se ao problema de determinação do campo de deslocamento $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, tal que $\mathbf{v} \in H$ é a solução de

$$\int_{\Omega} \mathbb{D}\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) d\Omega = \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{v} d\Gamma = 0, \quad \forall \mathbf{v} \in H_o \quad (3.41)$$

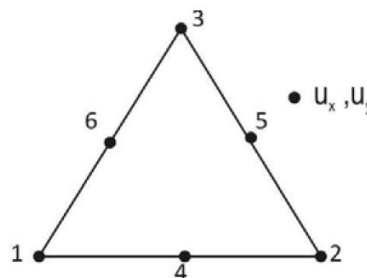
sendo:

$\mathbf{v}(\mathbf{x})$ é um deslocamento arbitrário; H_o é o conjunto das variações dos deslocamentos admissíveis; $\bar{\mathbf{t}} = \boldsymbol{\sigma}\mathbf{n}$ é o carregamento mecânico prescrito.

3.6.2 Formulação Discreta – Método dos Elementos Finitos

O Método dos Elementos Finitos de Galerkin será utilizado para determinar o campo de deslocamentos $\mathbf{u}(\mathbf{x})$, de modo que, para aproximação do problema do EPT, será empregado o elemento finito Tri6 (Figura 3.10), o qual interpola as variáveis do campo de deslocamentos $((\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y))$.

Figura 3.10 – Elemento Finito Triangular Tri6



Fonte: Adaptado de Lins (2009)

Pela teoria do MEF, sabe-se que os graus de liberdade de um elemento finito relacionam-se com as componentes dos deslocamentos nodais da seguinte forma:

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbb{N}\mathbf{q}_e \quad (3.42)$$

em que: $\mathbf{u}(\mathbf{x})$ é o vetor do campo de deslocamento de cada elemento da malha; $\mathbb{N}$ é a matriz das funções de interpolação do elemento; e $\mathbf{q}_e$ é o vetor de deslocamentos nodais do elemento Tri6.

Para os deslocamentos virtuais:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \mathbb{N}\hat{\mathbf{q}}_e \quad (3.43)$$

O vetor deformação pode ser expresso como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial y} & \frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \mathbb{N}\mathbf{q}_e = \partial\mathbb{N}\mathbf{q}_e = \mathbb{B}\mathbf{q}_e \quad (3.44)$$

sendo ∂ um operador diferencial adequado, conforme considerações geométricas, e $\mathbb{B}$ a matriz deformação-deslocamento, dada por:

$$\mathbb{B} = \partial\mathbb{N} \quad (3.45)$$

Substituindo-se as equações (3.42), (3.43), e (3.44) na expressão de (3.41), obtém-se a matriz de rigidez:

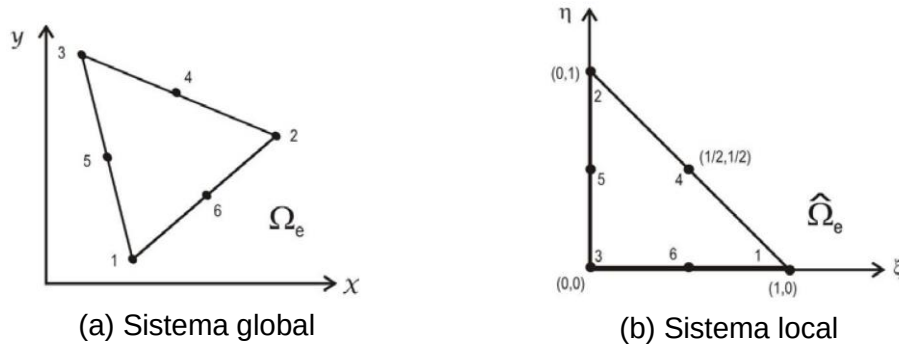
$$\mathbb{K}_e = \int_{\Omega} \mathbb{B}^T \mathbb{D} \mathbb{B} d\Omega \quad (3.46)$$

e o vetor de carga do elemento:

$$\mathbb{K}_e = \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \rho \mathbf{b} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{t}} d\Gamma \quad (3.47)$$

A transformação de um domínio discreto elementar Ω_e qualquer, para um domínio elementar padrão $\hat{\Omega}_e$, é necessária para calcular a derivada das integrais sobre o domínio, caso contrário os cálculos mudariam de elemento para elemento da malha. Além disso, o cálculo das matrizes $\mathbb{K}_e$ dos elementos seria complicado de ser realizado diretamente em termos das coordenadas (x, y) . Portanto, há necessidade da transformação do domínio para que seja possível transformar as operações de Ω_e em $\hat{\Omega}_e$, de uma maneira simples e genérica, conforme ilustrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Transformação do Domínio do Elemento Triangular



Fonte: Adaptado de Lins (2009)

A construção da transformação utiliza funções de interpolação $\mathbf{N}$ do elemento, sendo a mudança das coordenadas definida como:

$$\mathbf{x}(x, y) = \varphi(x, y) \cong \varphi(\xi, \eta) \begin{cases} x(\xi, \eta) = x_i \mathbf{N}_i^{te}(\xi, \eta) \\ y(\xi, \eta) = y_i \mathbf{N}_i^{te}(\xi, \eta) \end{cases} \quad (3.48)$$

em que:

$\mathbf{x}(x, y)$ são as coordenadas globais do elemento no domínio Ω_e , $\varphi(\xi, \eta)$ são as coordenadas padrão do domínio $\hat{\Omega}_e$, i é o índice do número dos nós do elemento e te é o tipo de elemento. A Figura 3.11 mostra o elemento Tri6, daí $te = 6T$, com dois graus de liberdade por nó, correspondentes aos deslocamentos em $x - y$.

Considere φ como sendo uma função sob coordenada $\mathbf{x}$ a ser representada pelas funções do elemento finito Tri6, que obedece ao triângulo de monômios de Pascal de ordem 2:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \varphi(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 x^2 + \alpha_4 xy + \alpha_5 y^2 \quad (3.49)$$

Substituindo as coordenadas em cada um dos nós ($j = 1, 2, \dots, 6$) do elemento Tri6:

$$\varphi(\mathbf{x}_j) = \varphi(x, y) = \alpha_0 + \alpha_1 x_j + \alpha_2 y_j + \alpha_3 x_j^2 + \alpha_4 x_j y_j + \alpha_5 y_j^2 \quad (3.50)$$

Reescrevendo na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \varphi(\mathbf{x}_1) \\ \varphi(\mathbf{x}_2) \\ \varphi(\mathbf{x}_3) \\ \varphi(\mathbf{x}_4) \\ \varphi(\mathbf{x}_5) \\ \varphi(\mathbf{x}_6) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 \\ 1 & x_3 & y_3 & x_3^2 & x_3 y_3 & y_3^2 \\ 1 & x_4 & y_4 & x_4^2 & x_4 y_4 & y_4^2 \\ 1 & x_5 & y_5 & x_5^2 & x_5 y_5 & y_5^2 \\ 1 & x_6 & y_6 & x_6^2 & x_6 y_6 & y_6^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

Cuja forma compacta é:

$$\varphi = \mathbf{A}\alpha \quad (3.52)$$

sendo a inversa da matriz $\mathbf{A}$ definida por:

$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\det \mathbf{A}} \text{adj } \mathbf{A} = \frac{1}{2A_e} \text{adj } \mathbf{A} \quad (3.53)$$

sendo A_e a área do elemento em consideração.

As funções de interpolação são determinadas por:

$$\mathbf{N}_i^{6T} = \frac{1}{2A_e} [1 \quad x \quad y \quad x^2 \quad xy \quad y^2] [\mathbf{A}]^{-1} \quad i = 1, \dots, n_n \quad (3.54)$$

Substituindo (3.53) em (3.54), tem-se as funções de interpolação de um elemento Tri6 com n_n nós:

$$\mathbb{N}_i^{6T} = \frac{1}{2A_e} [1 \quad x_i \quad y_i \quad x_i^2 \quad x_i y_i \quad y_i^2] \text{adj } \mathbf{A} \quad i = 1, \dots, n_n \quad (3.55)$$

No sistema de coordenadas locais, a variável φ pode ser escrita como:

$$\varphi(x(\xi, \eta), y(\xi, \eta)) = \mathbb{N}_j^{6T}(\xi, \eta) \varphi_{ij} \quad (3.56)$$

Sendo as funções de interpolação Lagrangianas do elemento de base natural Tri6 definidas por:

$$\begin{aligned} \mathbb{N}_1^{6T}(\xi, \eta) &= -\xi(1 - 2\xi) \\ \mathbb{N}_2^{6T}(\xi, \eta) &= -\eta(1 - 2\eta) \\ \mathbb{N}_3^{6T}(\xi, \eta) &= -\lambda(1 - 2\lambda) \\ \mathbb{N}_4^{6T}(\xi, \eta) &= 4\xi\eta \\ \mathbb{N}_5^{6T}(\xi, \eta) &= 4\eta\lambda \\ \mathbb{N}_6^{6T}(\xi, \eta) &= 4\xi\lambda \end{aligned} \quad (3.57)$$

em que $\lambda = 1 - \xi - \eta$

Observa-se ainda que as funções de interpolação de base padrão (natural) dadas pelas equações (3.57) correspondem ao sistema de equações (3.56) escritas em relação às coordenadas global (físicas).

Para obter as derivadas das funções de forma com relação às coordenadas naturais utiliza-se a regra da cadeia:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial y} \end{bmatrix} = \mathbf{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

em que $\mathbf{J}$ é a matriz Jacobiana do elemento

Sabendo-se que o mapeamento do elemento original para o elemento padrão é dado pelas equações (3.48), substituindo na definição de $\mathbf{J}$ obtém-se

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}_i^{te}}{\partial \xi} x_i & \frac{\partial \mathbf{N}_i^{te}}{\partial \xi} y_i \\ \frac{\partial \mathbf{N}_i^{te}}{\partial \eta} x_i & \frac{\partial \mathbf{N}_i^{te}}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

Para o caso particular em que $te = 6T$:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{N}_1^6}{\partial \xi} & \frac{\partial \mathbf{N}_2^6}{\partial \xi} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{N}_6^6}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \mathbf{N}_1^6}{\partial \eta} & \frac{\partial \mathbf{N}_2^6}{\partial \eta} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{N}_6^6}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_6 & y_6 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Portanto, é possível escrever o elemento diferencial de área em $d\Omega = dx dy$ em termos de elementos $d\xi$ e $d\eta$ da seguinte forma:

$$A_e(\mathbf{x}) \int_{A_e} dx dy = \det \mathbf{J} \int_0^1 \int_0^{1-\xi} d\eta d\xi \quad (3.61)$$

Resolvendo a parcela da integração:

$$\int_0^1 \int_0^{1-\xi} d\eta d\xi = \int_0^1 (1 - \xi) d\xi = \frac{1}{2} \quad (3.62)$$

Substituindo-se em (3.61), obtém-se:

$$\det \mathbf{J} = 2A_e(\mathbf{x}) \quad (3.63)$$

A equação (3.60) pode ser reescrita na forma:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & N_5 & N_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_6 & y_6 \end{bmatrix} = \mathbb{G} \mathbf{N}^{6T} \mathbf{X} \quad (3.64)$$

sendo $\mathbb{G}$ o operador gradiente com relação ao sistema de coordenada natural, $\mathbf{N}^{6T}$ a matriz de funções de interpolação e $\mathbf{X}$ a matriz de coordenadas nodais do elemento.

As derivadas das funções de forma com relação às coordenadas físicas podem ser obtidas ainda reescrevendo a equação (3.58) da seguinte forma:

$$\nabla \mathbb{N}_i^{6T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial y} \end{bmatrix} = \mathbf{J}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \mathbb{N}_i^{6T}}{\partial \eta} \end{bmatrix} \Rightarrow \nabla \mathbb{N}_i^{6T} = \mathbf{J}^{-1} \mathbb{G} \mathbb{N}_i^{6T} \quad (3.65)$$

A matriz $\mathbb{B}$, também denominada matriz deformação-deslocamento, é definida para o elemento Tri6 por:.

$$\mathbb{B}^{6T} = \partial \mathbb{N}_u^{6T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y} & \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 & N_4 & 0 & N_5 & 0 & N_6 \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Para o caso geral de um elemento com n_n número de nós, pode-se definir a matriz $\mathbb{B}$ como:

$$\mathbb{B} = [\mathbf{b}_1 \quad \mathbf{b}_2 \quad \dots \quad \mathbf{b}_i \quad \dots \quad \mathbf{b}_{n_n}] \quad (3.67)$$

Sendo $\mathbf{b}_i$ uma submatriz, que está associada ao ponto nodal i do elemento finito, e que tem a forma:

$$\mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbb{N}_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial \mathbb{N}_i}{\partial y} \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \mathbb{N}_i}{\partial y} & \frac{1}{2} \frac{\partial \mathbb{N}_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

3.6.3 Modelo de Aproximação do Problema de Otimização

O problema de otimização tem por objetivo minimizar a massa estrutural, sendo a função objetivo definida como:

$$\min \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) d\Omega \quad (3.69)$$

a qual pode ser escrita de forma discreta, utilizado-se o Método dos Elementos Finitos.

Considerando $\rho(\mathbf{x}) = \text{cte}$, $\forall \mathbf{x} \in \Omega$, a função objetivo pode ser reescrita, de modo adimensional, da seguinte forma:

$$\min \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}) d\Omega \quad (3.70)$$

sendo Ω o volume de toda a estrutura. O domínio Ω é “aproximadamente” particionado em elementos Ω_e , daí:

$$\min \frac{1}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} d\Omega \quad (3.71)$$

sendo n_e o número total de elementos da malha.

A restrição de tensão deve ser atendida $\forall \mathbf{x} \in \Omega$, caracterizando um problema de restrições paramétricas. Um método efetivo para contornar o problema de restrições paramétricas consiste na relaxação pontual (critério local) através da consideração de uma restrição integrada, isto é, da utilização de um critério global. Portanto, a condição pontual

$$g_e(\mathbf{x}) = \left[\frac{\sigma_{ef}(\mathbf{x})}{\sigma_y} - 1 \right] \leq 0 \quad (3.72)$$

será substituída pelo seguinte critério global

$$\bar{g}(\mathbf{u}(\mathbf{x})) = \left\{ \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} \langle g_e(\mathbf{x}) \rangle^p d\Omega \right\}^{\frac{1}{p}} \leq 0 \quad (3.73)$$

sendo definido que $\langle g_e(\mathbf{x}) \rangle = \max\{0, g_e(\mathbf{x})\}$, representando a parte positiva de $g_e(\mathbf{x})$.

Reescrevendo a equação (3.73) pela aproximação de Ω por particionamentos em elementos Ω_e e sabendo que $\mathbf{u}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}(\mathbf{x}(\mathbf{s}))$, obtém-se:

$$\bar{g}(\mathbf{s}) = \bar{g}(\mathbf{u}(\mathbf{x}(\mathbf{s}))) = \left\{ \frac{1}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} \langle g_e(\mathbf{x}(\mathbf{s})) \rangle^p d\Omega \right\}^{\frac{1}{p}} \leq 0 \quad (3.74)$$

Agora, com resultado das considerações anteriores e sabendo que $\Omega_e = \Omega_e(\mathbf{s})$, o problema pode ser aproximado como:

i. Função objetivo

$$f(\mathbf{s}) = \min_{\mathbf{s}} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} d\Omega \quad (3.75)$$

ii. Sujeito a

$$\bar{g}(\mathbf{s}) = \left\{ \frac{1}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\Omega_e} \langle g_e(\mathbf{x}(\mathbf{s})) \rangle^p d\Omega \right\}^{\frac{1}{p}} = \left\{ \frac{1}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e(\mathbf{x}(\mathbf{s})) \rangle^p |\mathbf{J}| d\hat{\Omega} \right\}^{\frac{1}{p}} = G^{\frac{1}{p}} \leq 0 \quad (3.76)$$

iii. Restrições laterais

$$s_{inf} \leq s_j \leq s_{sup}; \quad j = 1, \dots, n_s \quad (3.77)$$

sendo n_s o número total de pontos-chave de todos os segmentos de curvas B-spline.

O cálculo de $\mathbf{u}(\mathbf{x}(\mathbf{s}))$ advém da solução de

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = l(\mathbf{v}), \quad \forall \mathbf{v} \in H_o \quad (3.78)$$

sendo

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbb{D}\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) d\Omega \quad (3.79)$$

e

$$l(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \rho \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma_t} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{v} d\Gamma \quad (3.80)$$

Daí, denota-se por $\mathbf{S} = \{s \in \mathbb{R}^{n_s} | s_{inf} \leq s_j \leq s_{sup}\}$ conjunto solução

3.6.4 Análise da Sensibilidade

A análise da sensibilidade estuda o comportamento da taxa de variação do funcional em relação à variável de interesse. Aplicando o conceito à otimização de forma, é a investigação da taxa de mudança da função objetivo em relação às variáveis de projeto. Sendo assim, este subtópico tem como enfoque mostrar as técnicas utilizadas neste trabalho de forma sistemática para realizar a análise de sensibilidade baseada nos conceitos clássicos do cálculo variacional e da mecânica do contínuo.

3.6.4.1 Sensibilidade de $\mathcal{E}_A$

O cálculo da sensibilidade do Lagrangeano Aumentado, $\mathcal{E}_A$, em relação a variável de projeto s_j é expresso por:

$$\frac{d\mathcal{E}_A}{ds_j} = \frac{\partial f}{\partial s_j} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{ds_j} \quad (3.81)$$

sendo

$$\frac{d\psi}{ds_j} = \begin{cases} 2[\bar{g}(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s})) + r\lambda] \frac{d\bar{g}(\mathbf{s}, \mathbf{u}(\mathbf{s}))}{ds_j} & \text{se } \bar{g} \geq -r\lambda \\ 0 & \text{se } \bar{g} < -r\lambda \end{cases} \quad (3.82)$$

Para a sensibilidade do critério de tensão global em relação a variável de projeto s_j , tem-se:

$$\frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial s_j} + \sum_{k=1}^{2n_n} \frac{\partial \bar{g}}{\partial u_k} \frac{\partial u_k}{\partial s_j} \quad (3.83)$$

A determinação de $\partial u_k / \partial s_j$, que representa o gradiente do deslocamento nodal com relação à variável de projeto s_j , é complexo e demanda alto custo computacional, sendo inviável seu cálculo direto. Diante disso, propõe-se uma alternativa para eliminar o cálculo do termo $\partial u_k / \partial s_j$, que consiste em realizar uma operação denominada Método Adjunto.

A equação (3.83) pode ser reescrita como:

$$\frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial s_j} + \langle \nabla_{\mathbf{u}} \bar{g}, \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial s_j} \rangle \quad (3.84)$$

Da condição de equilíbrio:

$$\mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}^{ext} \quad (3.85)$$

Daí

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial s_j} \mathbf{u} + \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial s_j} = \frac{\partial \mathbf{F}^{ext}}{\partial s_j} \quad (3.86)$$

Denotando:

$$\mathbf{R}^j = \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial s_j} \quad (3.87)$$

e sendo $\partial \mathbf{F}^{ext} / \partial s_j = 0$, tem-se:

$$\mathbf{R}^j = - \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial s_j} \mathbf{u} \quad (3.88)$$

Analisando a equação (3.87), verifica-se que:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial s_j} = \mathbf{K}^{-1} \{\mathbf{R}^j\} \quad (3.89)$$

Substituindo a equação (3.89) em (3.84), obtém-se:

$$\frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial s_j} + \langle \nabla_{\mathbf{u}} \bar{g}, \mathbf{K}^{-1} \{\mathbf{R}^j\} \rangle \quad (3.90)$$

Reescrevendo a equação (3.90), obtém-se:

$$\frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial s_j} + \langle \mathbf{K}^{-T} \nabla_{\mathbf{u}} \bar{g}, \mathbf{R}^j \rangle \quad (3.91)$$

Porém, $\mathbf{K}^{-1} = \mathbf{K}^{-T}$, daí:

$$\frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial s_j} + \langle \mathbf{K}^{-1} \nabla_{\mathbf{u}} \bar{g}, \mathbf{R}^j \rangle \quad (3.92)$$

denominando

$$\mathbf{Z}^j = \mathbf{K}^{-1} \nabla_{\mathbf{u}} \bar{g} \Rightarrow \mathbf{K} \mathbf{Z}^j = \nabla_{\mathbf{u}} \bar{g} \quad (3.93)$$

então

$$\frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial s_j} + \langle \mathbf{Z}^j, \mathbf{R}^j \rangle \quad (3.94)$$

Sendo $\mathbf{Z}^j$ o vetor solução do sistema da equação (3.93).

3.6.4.2 Sensibilidade da função restrição global em relação à variável de projeto

Sendo $\bar{g}$ definida como na equação (3.76), observa-se que $\Omega = \Omega(x(s))$.

Assim, derivando em relação a s_j , tem-se

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{1}{p} (G)^{\frac{1}{p}-1} & \left[-\Omega^{-2} \frac{\partial \Omega}{\partial s_j} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e \rangle^p |\mathbf{J}| d\hat{\Omega} \right. \\ & \left. + \Omega^{-1} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} p \langle g_e \rangle^{p-1} \frac{\partial g_e}{\partial s_j} |\mathbf{J}| + \langle g_e \rangle^p \frac{\partial |\mathbf{J}|}{\partial s_j} d\hat{\Omega} \right] \end{aligned} \quad (3.95)$$

manipulando a parcela da expressão acima

$$(G)^{\frac{1}{p}-1} = (G)^{\frac{1}{p}} \cdot (G)^{-1} = (G)^{\frac{1}{p}} \cdot (G)^{-\frac{p}{p}} = \bar{g} \cdot \bar{g}^{-p} = \bar{g}^{1-p} \quad (3.96)$$

substituindo a relação da equação (3.96) na equação (3.95), obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{g}}{ds_j} = \frac{\bar{g}^{1-p}}{p\Omega} & \left[-\frac{1}{\Omega} \frac{\partial \Omega}{\partial s_j} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e \rangle^p |\mathbf{J}| d\Omega \right. \\ & \left. + \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} p \langle g_e \rangle^{p-1} \frac{\partial g_e}{\partial s_j} |\mathbf{J}| + \Omega \langle g_e \rangle^p \frac{\partial |\mathbf{J}|}{\partial s_j} d\Omega \right] \end{aligned} \quad (3.97)$$

3.6.4.3 Sensibilidade da função restrição local em relação à variável de projeto

Considerando g_e definida por (3.72) e derivando-se em relação a s_j , tem-se:

$$\frac{dg_e}{ds_j} = \frac{\partial}{\partial s_j} \left[\frac{\sigma_{ef}}{\sigma_y} - 1 \right] = \frac{1}{\sigma_y} \frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial s_j} \quad (3.98)$$

Porém,

$$\sigma_{ef}^2 = \mathbb{H} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (3.99)$$

$$\frac{\partial}{\partial s_j} [\sigma_{ef}]^2 = \frac{\partial}{\partial s_j} [\mathbb{H} \boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\sigma}] \quad (3.100)$$

$$2\sigma_{ef} \frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial s_j} = 2 \left[\mathbb{H} \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial s_j} \boldsymbol{\sigma} \right] \quad (3.101)$$

Assim, a sensibilidade é dada por:

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial s_j} = \frac{1}{\sigma_{ef}} \left[\mathbb{H} \boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\partial}{\partial s_j} \boldsymbol{\sigma} \right] \quad (3.102)$$

3.6.4.4 Sensibilidade do vetor tensão em relação à variável de projeto

$$\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial s_j} = \frac{\partial}{\partial s_j} [\mathbb{D} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})] = \mathbb{D} \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u})}{\partial s_j} \quad (3.103)$$

Assim, a sensibilidade é dada por:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial s_j} = \mathbb{D} \frac{\partial (\mathbb{B} \mathbf{q}_e)}{\partial s_j} = \mathbb{D} \left[\frac{\partial \mathbb{B}}{\partial s_j} \mathbf{q}_e + \mathbb{B} \frac{\partial \mathbf{q}_e}{\partial s_j} \right] \quad (3.104)$$

3.6.4.5 Sensibilidade da matriz de rigidez K em relação à variável de projeto

A matriz de rigidez global pode ser decomposta da seguinte forma:

$$\mathbf{K} = \sum_{e=1}^{n_e} \mathbb{K}_e \quad (3.105)$$

sendo $\mathbb{K}_e$ a matriz de rigidez elementar, definida por

$$\mathbb{K}_e = \int_{\Omega_e} \mathbb{B}^T \mathbb{D} \mathbb{B} d\Omega = \int_{\hat{\Omega}_e} \mathbb{B}^T \mathbb{D} \mathbb{B} |\mathbf{J}| d\hat{\Omega}_e \quad (3.106)$$

Calcula-se a derivada da matriz de rigidez $\mathbb{K}_e$, em relação à variável de projeto s_j , necessária para o cálculo do vetor $\mathbf{R}^j$ definido na equação (3.87), como:

$$\frac{\partial \mathbb{K}_e}{\partial s_j} = \int_{\hat{\Omega}_e} \left[\frac{\partial \mathbb{B}^T}{\partial s_j} \mathbb{D} \mathbb{B} + \mathbb{B}^T \mathbb{D} \frac{\partial \mathbb{B}}{\partial s_j} \right] |\mathbf{J}| d\hat{\Omega}_e + \int_{\hat{\Omega}_e} [\mathbb{B}^T \mathbb{D} \mathbb{B}] \frac{\partial |\mathbf{J}|}{\partial s_j} d\hat{\Omega}_e \quad (3.107)$$

Denominando-se:

$$\mathbb{B}^* = \frac{\partial \mathbb{B}}{\partial s_j} + \frac{1}{|\mathbf{J}|} \frac{\partial |\mathbf{J}|}{\partial s_j} \mathbb{B} \quad (3.108)$$

a equação (3.106) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \mathbb{K}_e}{\partial s_j} = \int_{\hat{\Omega}_e} \left[\frac{\partial \mathbb{B}^T}{\partial s_j} \mathbb{D} \mathbb{B} + \mathbb{B}^T \mathbb{D} \mathbb{B}^* \right] |\mathbf{J}| d\hat{\Omega}_e \quad (3.109)$$

que é uma maneira eficaz de calcular a sensibilidade da matriz no elemento.

3.6.4.6 Sensibilidade da função restrição global em relação ao vetor de deslocamento

Analisando a equação (3.76), pode-se deduzir que:

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\bar{g}^{(1-p)}}{\Omega} \int_{\Omega} \langle g_e \rangle^{(p-1)} \frac{\partial g_e}{\partial \mathbf{u}} d\Omega \quad (3.110)$$

Na configuração Lagrangeana, não há atualização da geometria, portanto $\Omega = \Omega(\mathbf{x}(\mathbf{s}))$ não depende da trajetória do deslocamento. Assim, a expressão acima pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial \bar{g}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\bar{g}^{(1-p)}}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e \rangle^{(p-1)} \frac{\partial g_e}{\partial \mathbf{u}_e} d\hat{\Omega}_e = \frac{\bar{g}^{(1-p)}}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e \rangle^{(p-1)} \frac{\partial g_e}{\partial \mathbf{u}_e} |\mathbf{J}| d\hat{\Omega}_e \quad (3.111)$$

Para calcular $\partial \bar{g}_{el} / \partial \mathbf{u}$, tem-se a seguinte equação para cada elemento:

$$\frac{\partial \bar{g}_{el}}{\partial \mathbf{u}} = \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e(\cdot) \rangle^{(p-1)} \frac{\partial g_e(\cdot)}{\partial \mathbf{u}_e} |\mathbf{J}| d\hat{\Omega}_e \quad (3.112)$$

A restrição da tensão de von Mises, definida pela equação (3.72), pode ser reescrita como:

$$g_e = \frac{\sigma_{ef}}{\sigma_y} - 1 \leq 0 \quad (3.113)$$

sendo:

$$\sigma_{ef}^2 = \mathbb{H}\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (3.114)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^e = \mathbb{D}\mathbb{B}\mathbf{q}_e \quad (3.115)$$

Aplicando-se o operador diferencial em relação a r -ésima componente do deslocamento nas equações (3.114) e (3.115), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial u_r} [\sigma_{ef}]^2 = \frac{\partial}{\partial u_r} [\mathbb{H}\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{\sigma}] \quad (3.116)$$

$$2\sigma_{ef} \left[\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial u_r} \right] = 2 \left[\mathbb{H}\boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial u_r} \right] \quad (3.117)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial u_r} = \frac{1}{\sigma_{ef}} \left[\mathbb{H}\boldsymbol{\sigma} \cdot \frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial u_r} \right] \quad (3.118)$$

$$\frac{\partial \boldsymbol{\sigma}}{\partial u_r} = \mathbb{D}\mathbb{B} \frac{\partial \mathbf{q}_e}{\partial u_r} \quad (3.119)$$

Substituindo-se a expressão (3.119) em (3.118), obtém-se:

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial u_r} = \frac{1}{\sigma_{ef}} \mathbb{H}\boldsymbol{\sigma} \left[\mathbb{D}\mathbb{B} \frac{\partial \mathbf{q}_e}{\partial u_r} \right] \quad (3.120)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial u_r} = \frac{\mathbb{H}\boldsymbol{\sigma}}{\sigma_{ef}} \mathbb{D}\mathbb{B}_k \quad (3.121)$$

sendo $r = l_m(k)$.

Como a matriz constitutiva do material é simétrica, isto é, $\mathbb{D} = \mathbb{D}^T$, tem-se:

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial u_r} = \frac{\mathbb{D}\mathbb{H}\boldsymbol{\sigma}}{\sigma_{ef}} \mathbb{B}_k \quad (3.122)$$

Denotando-se:

$$\bar{\mathbf{w}} = \frac{1}{\sigma_{ef}} \mathbb{D} \mathbb{H} \boldsymbol{\sigma} \quad (3.123)$$

tem-se:

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial u_r} = \bar{\mathbf{w}} \cdot \mathbb{B}_k \quad (3.124)$$

Sabendo-se que:

$$\mathbb{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_k \quad \dots \quad \mathbf{B}_{ngl}] \quad (3.125)$$

sendo ngl o número de graus de liberdade do elemento.

Assim,

$$\frac{\partial \sigma_{ef}}{\partial \mathbf{u}_e} = \mathbb{B}^T \bar{\mathbf{w}} \quad (3.126)$$

representa toda a contribuição do e -ésimo elemento.

Daí, derivando-se g_e na equação (3.113), obtém-se:

$$\frac{\partial g_e}{\partial \mathbf{u}_e} = \frac{1}{\sigma_y} \mathbb{B}^T \bar{\mathbf{w}} \quad (3.127)$$

Substituindo-se a expressão (3.127) em (3.111), obtém-se:

$$\nabla_{\mathbf{u}} \bar{g} = \frac{\partial \bar{g}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\bar{g}^{(1-p)}}{\Omega} \sum_{e=1}^{n_e} \int_{\hat{\Omega}_e} \langle g_e \rangle^{(p-1)} \frac{1}{\sigma_y} \mathbb{B}^T \bar{\mathbf{w}} d\hat{\Omega} \quad (3.128)$$

Substituindo-se o cálculo de $\nabla_{\mathbf{u}} \bar{g}$, obtido pela expressão em (3.128), na equação (3.93), determina-se o vetor $\mathbf{Z}^j$. Desse modo, é possível calcular a sensibilidade da função restrição definida pela equação (3.94):

3.6.5 Estratégia da Qualidade da Malha do Elemento Finito

A geração da malha triangular inicial consiste, basicamente, na aproximação do domínio para as condições iniciais do problema de otimização. A perturbação que o elemento finito triangular sofre a cada iteração ocasiona sua degeneração e, conseqüentemente, a perda na generalidade do modelo matemático. Para evitar a referida degeneração durante o processo, é necessário aplicar-se uma estratégia para avaliar a medida da triangulação do elemento finito, a fim de determinar o controle para a geração automática da malha.

A estratégia adotada neste trabalho é mesma utilizada por Costa Jr. (2003) e Silva (2007) para determinar o refinamento da malha, a qual consiste em medir a qualidade de cada elemento triangular de forma que os elementos se aproximem de triângulos equiláteros. Sua definição é dada pela expressão:

$$Q_e = \frac{6A_e}{\sqrt{3}L_{max}^e P_e} \quad (3.129)$$

onde:

Q_e é a medida da qualidade de elemento;

A_e é a área do elemento triangular;

L_{max}^e é o maior comprimento da aresta do elemento triangular;

P_e é a metade do perímetro do elemento triangular.

O fator de qualidade adotado para gerar uma nova malha é $Q_e \leq 0,45$.

5 Referências

ALEXANDERSEN, Joe; LAZAROV, Boyan S.. Topology optimisation of manufacturable microstructural details without length scale separation using a spectral coarse basis preconditioner. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 290, p.156-182, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2015.02.028>.

ALLAIRE, Grégoire; JOUVE, François; TOADER, Anca-maria. A level-set method for shape optimization. **Comptes Rendus Mathématique**, v. 334, n. 12, p.1125-1130, 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1631-073x\(02\)02412-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1631-073x(02)02412-3).

ALLAIRE, Grégoire; JOUVE, François; TOADER, Anca-maria. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method. **Journal Of Computational Physics**, v. 194, n. 1, p.363-393, 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcp.2003.09.032>.

ANSOLA, Rubén et al. An integrated approach for shape and topology optimization of shell structures. **Computers & Structures**, v. 80, n. 5-6, p.449-458, mar. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0045-7949\(02\)00019-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0045-7949(02)00019-6).

BENDSØE, M. P.. Optimal shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, v. 1, n. 4, p.193-202, 1989. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01650949>.

BENDSOE, Martin Philip; KIKUCHI, Noboru. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 71, n. 2, p.197-224, 1988. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2).

BIRGIN, Ernesto G.; MARTÍNEZ, José Mario. Large-Scale Active-Set Box-Constrained Optimization Method with Spectral Projected Gradients. **Computational Optimization And Applications**, v. 23, n. 1, p.101-125, 2002. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/a:1019928808826>.

BOOR, Carl de. On calculating with B-splines. **Journal Of Approximation Theory**, v. 6, n. 1, p.50-62, 1972. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9045\(72\)90080-9](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9045(72)90080-9).

BOURDIN, Blaise; CHAMBOLLE, Antonin. Design-dependent loads in topology optimization. **Esaim: Control, Optimisation and Calculus of Variations**, v. 9, p.19-48, jan. 2003. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/cocv:2002070>.

BREMICKER, M. et al. Integrated Topology and Shape Optimization in Structural Design*. **Mechanics Of Structures And Machines**, [s.l.], v. 19, n. 4, p.551-587, jan. 1991. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08905459108905156>.

CERROLAZA, M; ANNICCHIARICO, W; MARTINEZ, M. Optimization of 2D boundary element models using β -splines and genetic algorithms. **Engineering Analysis With Boundary Elements**, v. 24, n. 5, p.427-440, 2000. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0955-7997\(00\)00006-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0955-7997(00)00006-0).

CHIREHDAST, M. et al. Structural Configuration Examples of an Integrated Optimal Design Process. **Journal Of Mechanical Design**, [s.l.], v. 116, n. 4, p.997-1004, 1994. ASME International. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2919510>.

CHOU, Yu-hsin; LIN, Chyi-yeu. Improved image interpreting and modeling technique for automated structural optimization system. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, v. 40, n. 1-6, p.215-226, 2009. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-008-0352-2>.

COSTA JR., J. C. A. **Otimização topológica com Refinos H-adaptativos**. 2003. 141 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis - SC, 2003.

DEATON, Joshua D.; GRANDHI, Ramana V.. A survey of structural and multidisciplinary continuum topology optimization: post 2000. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, v. 49, n. 1, p.1-38, 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0956-z>.

DUNNING, P. D.; BRAMPTON, C. J.; KIM, H. A.. Simultaneous optimisation of structural topology and material grading using level set method. **Materials Science And Technology**, [s.l.], v. 31, n. 8, p.884-894, 14 maio 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1179/1743284715y.0000000022>.

GAO, Jie et al. Topological shape optimization of 3D micro-structured materials using energy-based homogenization method. **Advances In Engineering Software**, v. 116, p.89-102, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.12.002>.

JIANG, Long; CHEN, Shikui. Parametric structural shape & topology optimization with a variational distance-regularized level set method. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 321, p.316-336, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2017.03.044>.

KWAK, Juho et al. Topological shape optimization of geometrically nonlinear structures using level set method. **Computers & Structures**, v. 83, n. 27, p.2257-2268, out. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.03.016>.

LI, Hao et al. A level set method for topological shape optimization of 3D structures with extrusion constraints. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 283, p.615-635, jan. 2015. Elsevier BV.

LIN, C.-y.; CHAO, L.-s.. Automated image interpretation for integrated topology and shape optimization. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, v. 20, n. 2, p.125-137, 1 out. 2000. Springer Nature.

LIN, Chyi-yeu; CHOU, Yu-hsin. Automated structural optimization system for integrated topology and shape optimization. **Journal Of The Chinese Institute Of Engineers**, v. 31, n. 5, p.745-756, jul. 2008. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/02533839.2008.9671429>.

LIN, Chyi-yeu; LIN, Shin-hong. Artificial neural network based hole image interpretation techniques for integrated topology and shape optimization. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 194, n. 36-38, p.3817-3837, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2004.09.005>.

LINS, Sidney de Oliveira. **Otimização de Forma Aplicando B-splines sob Critério Integral de Tensões**. 2009. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte-UFRN, Natal-RN, 2009. Disponível em: <<ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/SidneyOL.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2018.

LUO, Z. et al. Structural shape and topology optimization using a meshless Galerkin level set method. **International Journal For Numerical Methods In Engineering**, v. 90, n. 3, p.369-389, 2 dez. 2011. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/nme.3325>.

LUO, Zhen et al. A level set-based parameterization method for structural shape and topology optimization. **International Journal For Numerical Methods In Engineering**, v. 76, n. 1, p.1-26, 1 out. 2008. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1002/nme.2092>.

LUO, Zhen; TONG, Liyong; KANG, Zhan. A level set method for structural shape and topology optimization using radial basis functions. **Computers & Structures**, v. 87, n. 7-8, p.425-434, abr. 2009. Elsevier BV.

MLEJNEK, H. P.. Some aspects of the genesis of structures. **Structural Optimization**, v. 5, n. 1-2, p.64-69, 1992. Springer Nature.

PAPALAMBROS, Panos Y.; CHIREHDAST, Mehran. An Integrated Environment for Structural Configuration Design. **Journal Of Engineering Design**, v. 1, n. 1, p.73-96, jan. 1990. Informa UK Limited.

PARENTE JR., E. **Análise de Sensibilidade e Otimização de Forma de Estruturas Geometricamente Não-Lineares**. 2000. Tese (Doutorado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro - RJ, 2000.

POURAZADY, M.; FU, Z.. An integrated approach to structural shape optimization. **Computers & Structures**, v. 60, n. 2, p.279-289, 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949\(95\)60363-8](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949(95)60363-8).

QIAN, Xiaoping. Full analytical sensitivities in NURBS based isogeometric shape optimization. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 199, n. 29-32, p.2059-2071, jun. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2010.03.005>.

SIENZ, J. **Integrated structural modelling, adaptivity analysis and shape optimization**. 1994. Tese (Doctor of Philosophy) - University of Wales, Swansea - UK, 1994.

SIGMUND, Ole; MAUTE, Kurt. Topology optimization approaches. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, v. 48, n. 6, p.1031-1055, 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>.

SILVA JÚNIOR, Dorgival Albertino da. **Desenvolvimento da célula base de microestruturas periódicas de compósitos sob otimização topológica**. 2015. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal-RN, 2015.

SILVA, P. S. R. da. **Estruturas Termoelásticas sob Otimização Topológica e H-adaptatividade**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal - RN, 2007.

SIVAPURAM, Raghavendra; DUNNING, Peter D.; KIM, H. Alicia. Simultaneous material and structural optimization by multiscale topology optimization. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, v. 54, n. 5, p.1267-1281, 2016. Springer Nature.

STEFFENS, L. M. **Desenvolvimento de uma Metodologia Integrada para Otimização de Forma de Mecânica de Fluidos**. 2005. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis-SC, 2005.

SOKOLOWSKI, J.; ZOCHOWSKI, A.. On the Topological Derivative in Shape Optimization. **Siam Journal On Control And Optimization**, v. 37, n. 4, p.1251-1272, 1999. Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM).

WANG, Michael Yu; WANG, Xiaoming; GUO, Dongming. A level set method for structural topology optimization. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 192, n. 1-2, p.227-246, 2003. Elsevier BV.

WANG, Yiqiang et al. A multi-material level set-based topology and shape optimization method. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 283, p.1570-1586, jan. 2015. Elsevier BV.

WANG, Yiqiang et al. Topological shape optimization of microstructural metamaterials using a level set method. **Computational Materials Science**, v. 87, p.178-186, maio 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.02.006>.

WANG, Yiqiang; CHEN, Feifei; WANG, Michael Yu. Concurrent design with connectable graded microstructures. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 317, p.84-101, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2016.12.007>.

WANG, Yu et al. Topological shape optimization of multifunctional tissue engineering scaffolds with level set method. **Structural And Multidisciplinary Optimization**, v. 54, n. 2, p.333-347, 4 mar. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00158-016-1409-2>.

XIE, Y.m.; STEVEN, G.p.. A simple evolutionary procedure for structural optimization. **Computers & Structures**, v. 49, n. 5, p.885-896, dez. 1993. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949\(93\)90035-c](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-c).

ZHANG, Weihong et al. Structural topology optimization: Extensibility and attainability. **Science China Technological Sciences**, v. 57, n. 7, p.1310-1321, 10 jun. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-014-5580-7>.

ZHANG, Weihong et al. Topology Optimal Design of Material Microstructures Using Strain Energy-based Method. **Chinese Journal Of Aeronautics**, v. 20, n. 4, p.320-326, 2007a. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1000-9361\(07\)60050-8](http://dx.doi.org/10.1016/s1000-9361(07)60050-8).

ZHANG, Weihong et al. Using strain energy-based prediction of effective elastic properties in topology optimization of material microstructures. **Acta Mechanica Sinica**, v. 23, n. 1, p.77-89, 2007b. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10409-006-0045-2>.

ZHANG, Weisheng et al. Explicit control of structural complexity in topology optimization. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 324, p.149-169, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2017.05.026>.

ZHOU, M.; ROZVANY, G.i.n.. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. **Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering**, v. 89, n. 1-3, p.309-336, 1991. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90046-9](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(91)90046-9).



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO

CNPJ: 24.365.710/0001-83

Campus Universitário BR-101 - Lagoa Nova - Natal/RN - CEP 59078-900

(084) 3215-3180 - Fax: (084) 3215-3192 - e-mail: ppg@reitoria.ufrn.br

DECLARAÇÃO

Declaramos, para os fins a que se fizerem necessários, que **PAULO HENRIQUE ARAUJO BEZERRA** é aluno(a) REGULAR vinculado(a) a este(a) universidade, sob o número **20151024485**, no programa de **DOUTORADO EM ENGENHARIA MECÂNICA - DOUTORADO - NATAL**.

Pro-Reitoria de Pós-Graduação do(a) Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Natal, 15 de Março de 2018.

Código de verificação:
e25eb4e1d0

Para verificar a autenticidade deste documento acesse <http://www.sigaa.ufrn.br/documentos/>, informando a matrícula, data de emissão do documento e o código de verificação.

ATENÇÃO

ESTE DOCUMENTO NÃO É VÁLIDO PARA FINS DE SOLICITAÇÃO DE VAGA EM OUTRA INSTITUIÇÃO DE ENSINO SUPERIOR. CASO SEJA NECESSÁRIO TAL DOCUMENTO, É NECESSÁRIO COMPARECER AO DAE.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO DE ATIVIDADES
ACADÊMICAS**

EMITIDO EM 15/03/2018 14:29

ATESTADO DE MATRÍCULA

Período Letivo: **2018.1** (19/02/2018 à 07/07/2018) Nível: **DOUTORADO**
Matrícula: **20151024485** Vínculo: **REGULAR**
Nome: **PAULO HENRIQUE ARAUJO BEZERRA**
Programa: **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**
Nível: **DOUTORADO**
Área de
Concentração: **TECNOLOGIA DE MATERIAIS**
Linha de Pesquisa: **CERÂMICA E COMPÓSITOS**
Orientador: **RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE JUNIOR**

TURMAS MATRICULADAS: 0**ATIVIDADES MATRICULADAS: 1**

Cód.	Componentes Curriculares/Docentes	Turma	Status	Horário
MEC0002	EXAME DE QUALIFICAÇÃO DE DOUTORADO Forma de Participação: ATIVIDADE AUTÔNOMA	--	MATRICULADO	--

ATENÇÃO

Para verificar a autenticidade deste documento acesse <https://sigaa.ufrn.br/sigaa/documentos/> informando a matrícula, a data de emissão e o código de verificação **8f2078217e**

SIGAA | Superintendência de Informática - (84) 3215-3148 | Copyright © 2006-2018 - UFRN - sigaa01-producao.info.ufrn.br.sigaa01-producao

Histórico Escolar - Emitido em: 15/03/2018 às 14:32

Dados Pessoais

Nome: **PAULO HENRIQUE ARAUJO BEZERRA** Matrícula: **20151024485**
Data de Nascimento: **18/06/1987** Local de Nascimento: **NATAL/RN**
Nome do Pai: **PAULO CÉSAR BEZERRA DE ARAUJO**
Nome da Mãe: **MARGARIDA COSTA DE ARAUJO BEZERRA**
Endereço: **RUA FRANCISCO SOUTO, 33** Bairro: **ABOLIÇÃO I**
Município: **NATAL** UF: **RN**

Dados do Vínculo do Discente

Programa: **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA** Índices Acadêmicos
Curso: **DOUTORADO EM ENGENHARIA MECÂNICA** CR: **4.4054**
(Coeficiente de Rendimento: 0.0 - 5.0)
Currículo: **02** Status: **ATIVO**
Área de Concentração: **TECNOLOGIA DE MATERIAIS**
Linha de Pesquisa: **CERÂMICA E COMPÓSITOS**
Orientador: **1338331 - RAIMUNDO CARLOS SILVERIO FREIRE JUNIOR**
Forma de Ingresso: **SELEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO**
Mês/Ano Inicial: **AGO/2015** Mês Atual: **32º**
Suspensões: **0 meses** Prazo para Conclusão **AGO/2020**
Prorrogações: **0 meses** Tipo Saída:
Mês/Ano de Saída: Data da Defesa:

Disciplinas/Atividades Cursadas/Cursando

Início	Fim	Componente Curricular	Turma	CH	Freq %	Nota	Situação
08/2015	12/2015	PEC1126 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	01	45	94,4	B	APROVADO
03/2016	03/2016	MEC0102 EXAME DE PROFICIÊNCIA EM LÍNGUA ESTRANGEIRA	--	0	--	--	APROVADO
02/2016	07/2016	PEC1001 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS MATERIAIS E DAS ESTRUTURAS	01	45	100,0	B	APROVADO
02/2016	06/2016	PEC1125 INTRODUÇÃO AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	01	45	75,9	B	APROVADO
07/2016	12/2016	EEC1205 OTIMIZAÇÃO EM SISTEMAS	01	60	100,0	B	APROVADO
03/2017	08/2017	MEC0004 EXAME DE PROFICIÊNCIA EM OUTRA LÍNGUA ESTRANGEIRA	--	0	--	--	APROVADO
02/2018	--	MEC0002 EXAME DE QUALIFICAÇÃO DE DOUTORADO	--	0	--	--	MATRICULADO
--	--	PEC1002 INTRODUÇÃO À CIÊNCIA DOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	--	45	100,0	A	CUMPRIU
--	--	PEC1003 METODOLOGIA DO TRABALHO CIENTÍFICO	--	45	100,0	A	CUMPRIU
--	--	PEC1116 CONCRETO ESTRUTURAL II	--	45	80,0	B	CUMPRIU
--	--	PEC1202 GEOLOGIA APLICADA À ENGENHARIA	--	45	100,0	A	CUMPRIU
--	--	PEC1210 DURABILIDADE DAS EDIFICAÇÕES	--	45	100,0	B	CUMPRIU
--	--	PEC1215 CONCRETOS ESPECIAIS	--	45	100,0	A	CUMPRIU
--	--	PEC1220 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL	--	45	95,6	A	CUMPRIU
--	--	PEC1302 TÓPICOS ESPECIAIS EM CONSTRUÇÃO CIVIL	--	45	100,0	B	CUMPRIU

Carga Horária Integralizada/Pendente

	Obrigatórias	Optativos	Total
Exigido	0 h	540 h	540 h
Integralizado	0 h	555 h	555 h
Pendente*	0 h	0 h	0 h

*Contabilizado com base no valor estabelecido no mínimo exigido da estrutura curricular.

Componentes Curriculares Obrigatórios Pendentes:1

Histórico Escolar - Emitido em: 15/03/2018 às 14:32

Nome: **PAULO HENRIQUE ARAUJO BEZERRA**

Matrícula: **20151024485**

Componentes Curriculares Obrigatórios Pendentes:1

Código	Componente Curricular	CH
MEC0002	EXAME DE QUALIFICAÇÃO DE DOUTORADO Matriculado	0 h

Atenção, agora o histórico possui uma verificação automática de autenticidade e consistência, sendo portanto dispensável a assinatura da coordenação do curso ou PPG. Favor, ler instruções no rodapé.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GESTÃO DE PESSOAS
DIVISÃO DE ADMINISTRAÇÃO DE PESSOAL

DECLARAÇÃO

Declaramos, para os fins que se fizerem necessários, que **Paulo Henrique Araújo Bezerra**, portador(a) do CPF nº 013.981.174-55, matrícula Siape nº 1859840, é servidor(a) do Quadro Permanente desta Universidade, admitido(a) em 31 de julho de 2013, ocupante do cargo de Professor do Magistério Superior, com lotação no(a) Departamento de Engenharias e Tecnologia - Campus Pau dos Ferros.

Eu, Laura Maria Araújo Mendes Pereira, ocupante do cargo de Assistente em Administração, digitei e conferi a presente declaração, conforme dados extraídos do Sistema Integrado de Administração de Recursos Humanos – SIAPE, nesta data.

Pau dos Ferros/RN, 15 de março de 2018.

José Flávio Tmóteo Júnior

Diretor em exercício do Câmpus Pau dos Ferros



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO - UFERSA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PROPPG

Av. Francisco Mota, 572 – C. Postal 137 – Bairro Pres. Costa e Silva – Mossoró – RN – CEP: 59.625-900 - Tel.: (84)3317-8296/8295 – E.mail: proppg@ufersa.edu.br

RELATÓRIO DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Declaro que o aluno Paulo Henrique Araújo Bezerra, devidamente matriculado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, vem desempenhando, de forma satisfatória, as atividades propostas em seu projeto de tese. Até o presente, ele tem: cursado disciplinas e cumprido componentes curriculares obrigatórias, incluindo os Exames de Proficiência (em duas línguas estrangeiras) e o Exame de Qualificação de Doutorado, no qual foi aprovado; realizado a revisão sistemática da literatura de sua tese de doutorado; iniciado implementações no código computacional cuja formulação é objeto de sua pesquisa; e elaborado artigos científicos para publicação em eventos internacionais. Na continuação, ele realizará as correções na versão preliminar de sua tese (a partir das sugestões recebidas pela banca de qualificação), concluirá a implementação do código que desenvolve e continuará a redação de artigos científicos, para submissão em periódicos e em eventos internacionais, bem como da tese de Doutorado, cuja defesa está prevista para o semestre 2019.1.

Data: 16 de Março de 20.....

Professor Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRN



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica -
PPGEM

DECLARAÇÃO

Declaramos, para os devidos fins, que a matrícula em componentes curriculares para o semestre 2018.2, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, ocorrerá no período de 23 de julho a 03 de agosto de 2018, estando, dessa forma, o discente **PAULO HENRIQUE ARAÚJO BEZERRA**, CPF 013.981.174-55, aluno regularmente matriculado sob o nº 20151024485 no curso de doutorado, apto a realizar sua respectiva matrícula em componentes curriculares no período supracitado.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em 28 de Março de 2018.


Salete Martins Alves
Coordenadora PPGEM / UFRN
SIAPE 1481705



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CÂMPUS PAU DOS FERROS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E TECNOLOGIA**

Processo nº 23091.004146/2016-04

Interessado: Paulo Henrique Araújo Amorim

Assunto: 022.121 – Aperfeiçoamento e treinamento: cursos (inclusive bolsas de estudo) promovidos por outras instituições no Brasil

PARECER FAVORÁVEL

Trata-se de requerimento de renovação de afastamento formulado pelo servidor **Paulo Henrique Araújo Amorim**, Matrícula SIAPE 1859840, pertencente ao Departamento de Engenharias e Tecnologia do Centro Multidisciplinar do Campus Pau dos Ferros, com finalidade de realizar o Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), em Natal/RNPB, no período de 25 de julho de 2018 a 24 de julho de 2019.

CONSIDERANDO a disponibilidade de código de vaga para professor substituto para ministrar as disciplinas do docente, conforme informado pela Direção do Campus.

CONSIDERANDO a documentação apresentada para o afastamento.

CONSIDERANDO o Período de renovação de afastamento **25/07/2018 a 24/07/2019** no documento Check-List – Afastamento para qualificação da PROPPG

A assembleia departamental em sua 3ª Assembleia Ordinária, realizada em 27/03/2018, foi **FAVORÁVEL** ao afastamento do professor.

Pau dos Ferros, RN, 04 de abril de 2018.

Prof. Rodrigo Soares Semente
Chefe de Departamento – DETEC
Portaria UFERSA/CMPF nº 27/2017