

Avaliação Automática das Propriedades Mecânicas de Aços *Maraging* Através de Técnicas de Processamento Digital de Imagens.

Angélica Alves Viana^{a,*}, Savio Lopes Rabelo^a, José Daniel de Alencar Santos^a, Venceslau Xavier de Lima Filho^a, Pedro Pedrosa Rebouças Filho^a

^a*Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)
Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC)
Campus Fortaleza – CE – Brasil*

Abstract

Os aços *Maraging* por apresentarem uma característica de alta resistência são amplamente utilizados em inúmeras aplicações, como na indústria nuclear, aeroespacial e aeronáutica. No entanto, para avaliar as propriedades mecânicas desses materiais são necessárias realizações de inúmeros ensaios laboriosos e extremamente custosos, com o intuito de avaliar essas propriedades de maneira muito mais simplificada, nesse artigo são aplicadas técnicas de Processamento Digital de Imagens em imagens do Aço *Maraging* 18Ni C300 com o objetivo final de determinar o valor de uma propriedade mecânica recorrente na avaliação de resistência, a tenacidade.

Keywords: maraging, tenacidade, resistência

1. Introdução

O aço *Maraging* é uma classe de aço que apresenta uma boa combinação de resistência mecânica e tenacidade, sendo considerado um aço de ultra-alta-resistência com propriedades particulares de não deformidade durante o endurecimento por envelhecimento, boa soldabilidade e outras características que o tornam ideal em inúmeras aplicações, como na indústria de transporte, nuclear, aeronáutica e aeroespacial [1]. Este tipo de aço é resultante da criação das ligas metálicas contendo níquel (Ni) como elemento base, constituído por uma percentual de Ni que varia de 10% a 30% e são apresentados nas classes 200, 250, 300 e 350, em que essas numerações representam o limite de resistência das ligas na unidade Ksi [2].

*I am corresponding author

Email addresses: angelicaalvesviana@gmail.com (Angélica Alves Viana), savio.rabelo@ppgcc.ifce.edu.br (Savio Lopes Rabelo), jdaniel@ifce.edu.br (José Daniel de Alencar Santos), vxlfilho@gmail.com (Venceslau Xavier de Lima Filho), pedropedrosa@lapisco.ifce.edu.br (Pedro Pedrosa Rebouças Filho)

Devido a importante aplicabilidade desse tipo de aço, muitos estudos já foram desenvolvidos com o intuito de estudar as propriedades mecânicas desse material e a partir da submissão do mesmos a testes, avaliar ou aprimorar suas características de resistência e tenacidade. Em [1] amostras do aço *Maraging* 18Ni classe 300 são submetidas a diferentes temperaturas de solubilização e ao procedimento de envelhecimento visando avaliar as propriedades mecânicas desse material mediante a aplicação desses testes e encontrar uma combinação desses tratamentos térmicos que melhore a sua tenacidade.

A tenacidade é tida como a resistência que o material oferece a nucleação ou propagação de uma trinca. Em suma, é toda energia que ele armazena do momento inicial em que é aplicada as tensões até o momento em que ele sofre a fratura. Existem dois ensaios básicos de se medir a tenacidade, ambos com características dinâmicas, ou seja, são aplicadas cargas sobre os materiais em um espaço de tempo muito curto. Um deles é o ensaio Charpy, em que uma barra prismática com um entalhe no meio é colocada em um equipamento conhecido como martelo, ele apresenta um braço articulado e na ponta do braço um peso, que será lançado contra o corpo de prova, o martelo então irá transferir energia para o corpo de prova, que será acumulada na forma de deformação antes de fraturar.

Outro maneira de se calcular a tenacidade é a partir do ensaio de K_{Ic} , em que é utilizado um corpo de prova muito semelhante ao utilizado no Charpy, uma barra prismática com um entalhe no meio, então é promovido um ciclo de fadiga, uma máquina fica flutuando em flexão esse corpo de prova e por conta da movimentação será gerada uma trinca que irá propagar até um determinado comprimento. Em seguida, na mesma máquina mas com outra configuração o corpo de prova apoiado em dois pontos e um terceiro ponto de apoio flexiona esse corpo de prova. Essa flexão irá fornecer energia já com a trinca nucleada. A quantidade de energia que o corpo de prova absorver nessa segunda etapa do ensaio, será a tenacidade à fratura. Esse ensaio é bastante complexo, pois existem uma série de requisitos que ele deve obedecer para ser um ensaio válido e por isso a probabilidade de falha é muito grande,

Um fator importante a se destacar, é que as deformidades resultantes da submissão das amostras de um determinado material a esses ensaios, promove a formação de vazios ou microcavidades conhecidas como *dimples*. Esses vazios significam que durante os ensaios um microvazio foi formado e então separado após o processo de fratura [3]. O diâmetro médio dessas microcavidades é associado ao cálculo da tenacidade por alguns autores, isso pode ser visto em [4] por exemplo.

Diante do exposto, é possível perceber que embora a tenacidade seja uma propriedade mecânica muito importante na avaliação de resistência de um material, as maneiras existentes até o momento para calculá-la envolvem a realização desses ensaios que além de apresentarem um custo elevado, são bastante complexos e há um alto risco da ocorrência de falhas. Dada a relevância dessa propriedade mecânica na avaliação do Aço *Maraging* 18Ni C300, este artigo tem como objetivo utilizar técnicas de Processamento Digital de Imagens sobre as imagens obtidas nos experimentos de [1] para extrair os diâmetros médios dos *dimples* e posteriormente encontrar os valores de tenacidade de uma forma simples, menos laboriosa e bem mais barata.

2. Microestruturas dos Aços *Maraging*

O termo *maraging* provém da junção das duas palavras inglesas **mar**tesine e **aging**, que significam respectivamente martensita e envelhecimento, ou seja, martensita envelhecida. O termo já sugere quais os tratamentos térmicos utilizados nesse tipo de aço.

O aço *Maraging* apresenta um teor de Ni entre 10 e 30%. Sendo comuns os empregos de teores de 13%Ni na série 400 e de 18%Ni nas séries de 200, 250, 300 e 350. Neste artigo, será utilizado o aço *Maraging* com teor de 18%Ni da série 300. Nestes tipos de aço a concentração de carbono é muito baixa, e durante o resfriamento ocorre a transformação austenita \rightarrow martensita. Sendo esta última conhecida como martensita de Ni e apresenta uma elevada densidade de discordâncias e um alto teor de elementos de liga em solução sólida, favorecendo a precipitação de compostos intermetálicos ao redor das discordâncias ocasionando o endurecimento do material [5].

Com o intuito de se avaliar a resistência mecânica, ductilidade e tenacidade de um tipo de aço, muitos estudiosos já realizaram alguns ensaios com amostras do material, como ensaios de dureza, tração, tenacidade ao impacto Charpy, tenacidade à fratura, sensibilidade ao entalhe em tração. E a partir da análise das microestruturas visualizadas por microscopia óptica e eletrônica, alguns desses estudos buscaram estabelecer uma relação entre elas e as propriedades mecânicas dos materiais. Esse é exatamente o objetivo do trabalho de [6], em que é analisada a influência da microestrutura na tenacidade à fratura dinâmica aparente do aço ABNT 4340 a partir de um ensaio de impacto Charpy convencional e é concluído que para diferentes tratamentos térmicos essas microestruturas apresentam características distintas.

Um outro trabalho ainda mais relevante com respeito a análise da relação entre as microestruturas e as propriedades mecânicas dos materiais é o de [4], em que a relação dada entre a tensão de resistência (σ), o módulo de elasticidade (E), o diâmetro médio dos *dimples* (d) e a tenacidade (K_{IC}) é dada por meio da fórmula abaixo

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{\sigma d E}{2}}. \quad (1)$$

E as propriedades do aço *Maraging* 300 associadas a cada temperatura de ensaio feito em [1] são apresentadas na Tabela 1.

Solution Temperature	Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Necking	Strain Hardening Coef.	Charpy	K_{Ic}	Hardness
820	2067 \pm 31.6	2052 \pm 28.8	9.2 \pm 1.07	13.1 \pm 2.92	0.18 \pm 0.06	15.5	60	54.8
860	1994 \pm 75.3	1981 \pm 73.75	9.7 \pm 0.60	16.2 \pm 1.20	0.21 \pm 0.05	17.67	65	55.7
1000	1994 \pm 75.3	1912 \pm 62.4	10.4 \pm 0.92	17.5 \pm 2.50	0.18 \pm 0.03	22.67	76	55.3
1050	1994 \pm 75.3	1808 \pm 42.6	10.4 \pm 0.79	17.8 \pm 1.27	0.22 \pm 0.02	11	78	55.5
1100	1802 \pm 86.0	1776 \pm 89.7	9.0 \pm 0.44	14.7 \pm 1.92	0.21 \pm 0.02	14	83	52.1

Tabela 1: Propriedades Mecânicas do Aço *Maraging* [1].

Unindo essas duas importantes informações é possível determinar em que faixa se encontra o diâmetro médio dos *dimples* para cada uma das cinco temperaturas de ensaio, apenas

isolando a variável d na Equação 1 e utilizando o módulo de elasticidade E presente na equação como 200 *GPa* associado ao aço *Maraging* 18Ni C300. Isso é utilizado neste artigo como parâmetro de avaliação das técnicas de processamento digital de imagens utilizadas para calcular o diâmetro médio dos *dimples* em cada uma das imagens obtidas e fornecidas pelo Prof. Venceslau Xavier de Lima Filho em sua tese de doutorado.

3. Técnicas de Processamento Digital de Imagens

A seguir serão apresentados alguns conceitos de Processamento Digital de Imagens utilizados neste artigo.

3.1. Watershed

A transformada de *Watershed* [7] é um método de segmentação baseado em morfologia matemática. Nesse método uma imagem é considerada uma paisagem topográfica com picos e vales. A elevação de água na paisagem é representada pelo nível de cinza ou pela magnitude do gradiente. Essa transformação decompõe a imagem em bacias hidrográficas (regiões). Para cada mínimo local, uma bacia hidrográfica compreende todos os pontos cuja trajetória de descida mais íngreme termina nesse mínimo. Uma das abordagens de implementação desse algoritmo foi proposta por [8].

3.2. Conectividade

Em uma imagem digital, dois *pixels* são considerados vizinhos se obedecem alguma das duas conectividades bi-dimensionais, 4-conectados ou 8-conectados. Ou seja, se pertencem ao mesmo objeto na imagem estando conectados na vertical/horizontal ou estando conectados na vertical/horizontal/diagonal respectivamente. As imagens a seguir ilustram esses dois tipos de conectividades.

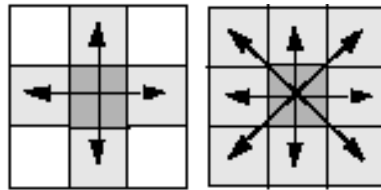


Figura 1: *Pixels* 4-conectados e 8-conectados respectivamente [9].

Estando definido o conceito de conectividade entre os *pixels* de uma imagem, uma região da imagem é dita conexa se todos os *pixels* da região estão conectados utilizando alguma das duas conectividades bi-dimensionais.

3.3. Transformação de Mínimos Estendida

A Transformação de Mínimos Estendida [10, 11] é uma transformação que encontra grupos de *pixels* mais brilhantes na imagem que formam componentes conectadas cujos níveis de cinza são iguais. Os marcadores centrais sobrepõem as localizações dos mínimos

com regiões pretas na imagem original. Essa função requer a passagem de uma imagem invertida (I_n) e um limiar H como parâmetros, como pode ser visto na Equação 2.

$$m_i = f_{imextendedmin}(I_n, H). \quad (2)$$

Esse limiar H consiste em um fator que está diretamente associado com a quantidade de regiões de mínimos na imagem.

4. Materiais e Métodos

Nesta seção serão apresentadas as ferramentas utilizadas e os passos de implementação realizados até a obtenção do diâmetro médio dos *dimples* associados a cada imagem da base de dados de [1] contendo 121 imagens em tons de cinza de tamanho $712 \text{ pixels} \times 484 \text{ pixels}$. Algumas imagens dessa base são apresentadas na Figura 2. Para todos os experimentos, foi utilizado um computador com a seguinte configuração: processador Intel(R) Core(TM) i7-6500U a 2.5 GHz com 8 GB de RAM e executando Windows 10. Além disso, foi usado o MATLAB 2017a (desenvolvido por MathWorks) para implementação.

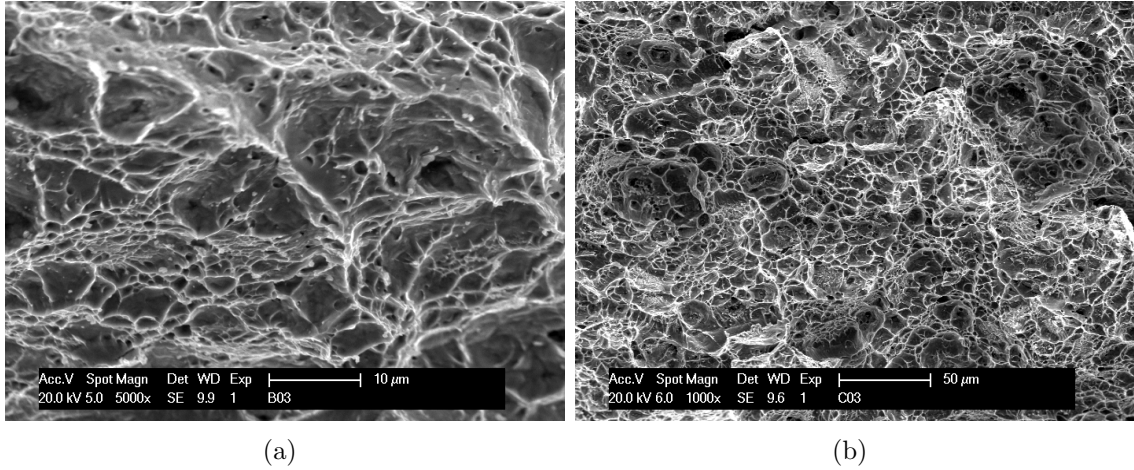


Figura 2: Imagens da base de dados de [1]. (a) Imagem de ensaio à temperatura de 860°C ampliada 5000x. (b) Imagem de ensaio à temperatura de 1000°C ampliada 1000x.

O passo inicial da implementação consistiu da remoção da tarja preta na imagem, desse modo as imagens tratadas para a obtenção do diâmetro médio dos *dimples* têm tamanho $712 \text{ pixels} \times 423 \text{ pixels}$. Em seguida, foram encontrados os mínimos locais da imagem original a partir da aplicação de uma transformação de mínimos estendida, essa transformação consiste no mínimo regional da transformada H e o resultado de sua aplicação é uma imagem binária em que os *pixels* frontais da imagem determinam os mínimos locais. Para cada imagem foram testados os valores 70, 80, 90, 92, 95 e 100 para esse limiar associado a quantidade de mínimos que se deseja encontrar.

Uma vez que os mínimos locais foram encontrados, o passo seguinte consistiu da aplicação da transformada *watershed*, que permitiu a obtenção de uma imagem binária com as microcavidades (*dimples*) bem delimitadas. Em seguida, foram encontradas as componentes conexas dessa nova imagem juntamente com os seus centroides.

Com os centroides representantes de cada microcavidade da imagem, a etapa seguinte foi o cálculo dos raios de cada uma dessas regiões, esse procedimento foi realizado a partir do cálculo da distância euclidiana dos centroides a algumas amostras das bordas dessas componentes conectadas e da escolha do valor médio dessas distâncias. Com o cálculo do raio médio de cada uma dessas regiões, foi calculado o raio médio total e posteriormente o diâmetro médio. A Equação 3 expressa matematicamente o cálculo do raio de cada *dimple* i .

$$R_i = \frac{1}{S} \sum_{j=1}^S \sqrt{(x_j - C_i.x)^2 + (y_j - C_i.y)^2}, \quad (3)$$

em que S é o número de amostras selecionadas e $C_i.x$ e $C_i.y$ são as coordenadas x e y do centroide i respectivamente.

Com o cálculo do raio de cada região, o diâmetro médio em *pixels* é dado por

$$DM = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N R_i, \quad (4)$$

em que N corresponde a quantidade de regiões ou centroides da imagem. A Figura 3 resume os passos descritos anteriormente através de um fluxograma simplificado.

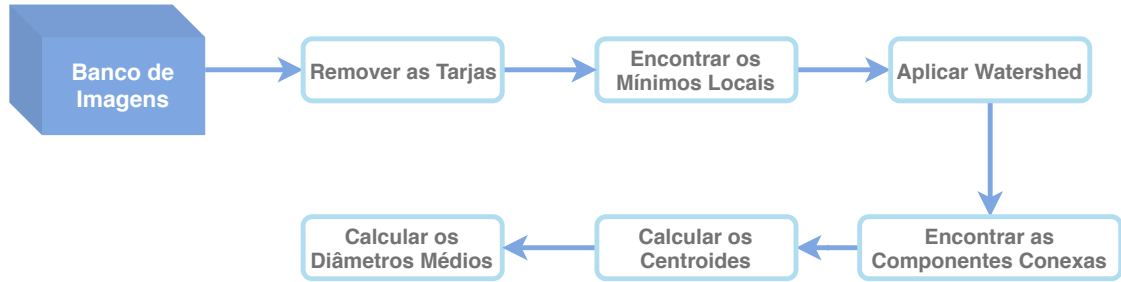


Figura 3: Fluxograma ilustrando as etapas seguidas até a obtenção do cálculo do diâmetro médio dos *dimples* em μm .

A Figura 4 ilustra os resultados parciais encontrados até a obtenção do diâmetro médio dos *dimples* para uma imagem ampliada 1000x e referente a um ensaio de temperatura de $1100^{\circ}C$.

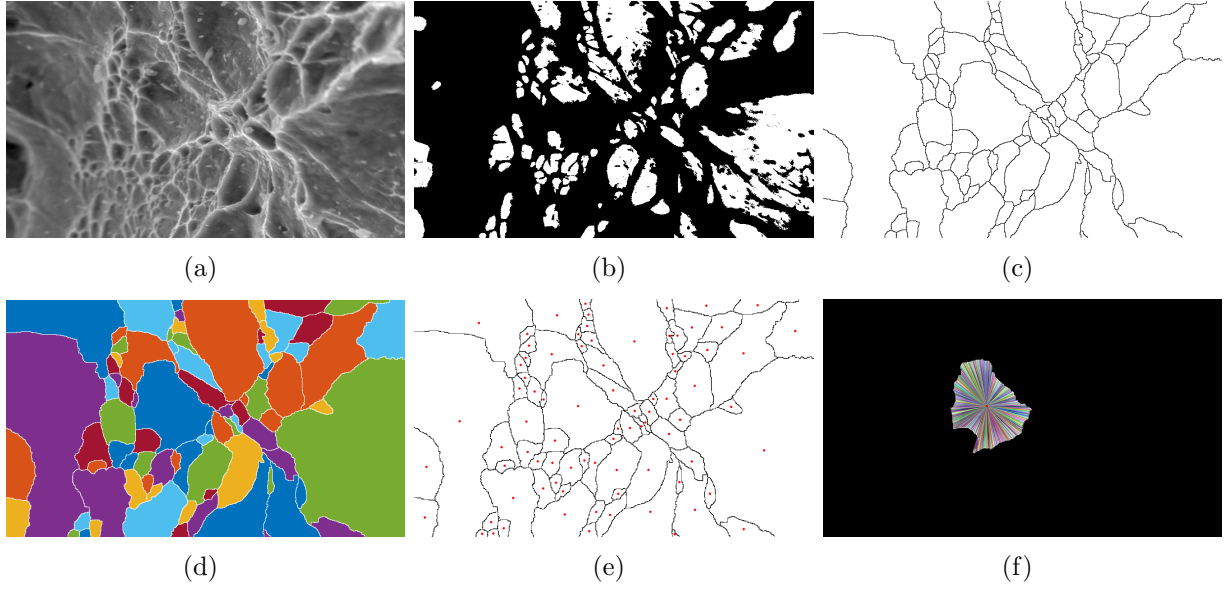


Figura 4: Passo a passo de obtenção do diâmetro médio dos *dimples* para uma imagem. (a) Imagem Original. (b) Encontro de Mínimos Locais. (c) Resultado do Watershed. (d) Componentes Conexas. (e) Cálculo dos Centroides. (f) Cálculo dos raios a partir do centro de uma determinada região.

Após todos os procedimentos realizados para encontrar o diâmetro médio dos *dimples* em *pixels*, foi feita a conversão desse valor para μm . Essa conversão foi realizada a partir da contagem da quantidade de *pixels* da régua definida na tarja preta da imagem original e da obtenção do valor de um *pixel* em μm . A Equação 5 descreve a relação entre uma distância em *pixels* e uma distância em micrômetros.

$$dm_{\mu} = dm_p \left(\frac{r_{\mu}}{r_p} \right). \quad (5)$$

Em que dm_{μ} e dm_p são os valores dos diâmetros médios dos *dimples* em μm e em *pixels* respectivamente, r_{μ} e r_p são os valores da régua em μm e em *pixels* respectivamente. Para validar o valor encontrado, o mesmo foi então comparado aos diâmetros médios associados a cada uma das temperaturas de ensaio cujos valores estão representados na tabela a seguir, que foi gerada a partir da Equação 1 e da utilização dos valores das propriedades mecânicas do aço *Maraging* apresentadas na Tabela 1.

Temperatura ($^{\circ}C$)	Diâmetro Médio (μm)	Margem (μm)
820	17,42	0,27
860	21,22	0,80
1000	29,99	1,02
1050	33,29	1,49
1100	38,32	1,83

Tabela 2: Faixas de diâmetros médios dos *dimples* para cada temperatura de ensaio.

5. Resultados e Discussões

Os resultados obtidos de diâmetros médios dos *dimples* a partir da variação do limiar na Transformada Extendida de Mínimos são apresentados na Tabela 3.

Temperatura ($^{\circ}C$)	Diâmetros Médios (μm)					
	Limiar 70	Limiar 80	Limiar 90	Limiar 92	Limiar 95	Limiar 100
820	8,29	11,36	17,03	17,15	20,68	29,44
860	6,39	7,89	11,23	12,03	20,14	20,67
1000	13,50	24,22	34,66	38,85	46,62	59,66
1050	12,41	18,41	31,83	36,66	45,78	51,77
1100	9,83	13,21	19,61	21,02	21,04	23,48

Tabela 3: Valores médios dos diâmetros médios dos *dimples* para cada temperatura de ensaio.

É possível perceber a partir de um comparativo com a Tabela de referência 2 que para as temperaturas de ensaio de 820°, 860° e 1050° os valores de diâmetro médio encontrados para os limiares 92, 100 e 90 se aproximam bastante do esperado. Já para as temperaturas de 1000° e 1100° para nenhum dos limiares utilizados houve uma boa aproximação desses resultados, para a temperatura de ensaio de 1000° o valor ideal é significativamente maior que o valor encontrado com o limiar 80 e muito menor que o valor encontrado com o limiar 90, o que sugere que para essa temperatura o valor ideal se encontra entre esses dois limiares. Já para a temperatura de 1100° todos os valores de diâmetros médios encontrados são inferiores ao valor desejado, o que permite concluir que um valor ideal para o limiar é superior a 100.

Um fator importante a se observar é que a medida que os valores de limiares vão sendo aumentados, os valores médios dos diâmetros vão sendo aumentados conjuntamente, descrevendo um comportamento monotônico para as funções que relacionam os limiares com os valores dos diâmetros médios dos *dimples*. É esse aspecto que permite fazer a análise acima de escolha do limiar ideal.

Com a obtenção do valor desses diâmetros médios dos *dimples*, é possível encontrar os valores de tenacidade simplesmente aplicando esses valores na Equação 1. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Temperatura ($^{\circ}C$)	Tenacidade ($MPam^{1/2}$)					
	Limiar 70	Limiar 80	Limiar 90	Limiar 92	Limiar 95	Limiar 100
820	41,39	48,46	59,33	59,54	65,38	78,01
860	35,69	39,66	47,32	48,98	63,37	64,20
1000	51,88	69,49	83,13	88,01	96,41	109,07
1050	49,74	60,59	79,67	85,50	95,54	101,60
1100	42,09	48,79	59,44	61,54	61,57	65,05

Tabela 4: Valores médios das tenacidades obtidas.

Novamente fazendo um comparativo, só que agora com os valores de tenacidade da Tabela 1, é possível observar que os valores de tenacidade para as temperaturas 820°, 860° e 1050° são realmente próximos aos resultados de tenacidade desejados e obtidos a partir dos ensaios de tração. É importante ressaltar que resultados como esses na área de Metalurgia aplicando-se Processamento Digital de Imagens até o presente momento não estão disponíveis na literatura.

6. Conclusão

Diante dos resultados apresentados a partir dos experimentos, é possível observar que os mesmos são bastante relevantes e que embora os valores encontrados para o diâmetro médio dos *dimples* não tenham sido os ideais para todos os valores de temperatura, a problemática se encontra na faixa de valores de limiares testados, que se ampliada ou alguma técnica de Aprendizagem de Máquina for utilizada para encontrar os limiares ideais para cada imagem apresentada, certamente esse problema será solucionado. A principal contribuição deste trabalho então está em a partir da utilização de técnicas de Processamento Digital de Imagens ser possível determinar o diâmetro médio dos *dimples*, pois a partir desses valores e da Equação 1 apresentada na Seção 2, é possível obter o valor da Propriedade Mecânica de tenacidade associada ao Aço *Maraging* 18Ni C300, valor esse que é extremamente custoso de ser obtido a partir da submissão de amostras do material a ensaios.

Referências

- [1] V. X. de Lima Filho, Influência da temperatura de solubilidade nas propriedades mecânicas do aço maraging 300, PhD dissertation, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil (6 2018).
- [2] V. M. SCHMITT, Influência da temperatura de solubilização na microestrutura, tenacidade e microdureza de um aço maraging classe 300, Dissertação, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE (2014).
- [3] A. Rodrigues, H. Bernardi, K. Käfer, D. Mello, J. Otubo, Análise mecânica de um aço maraging sem adição de cobalto após tratamento térmico de envelhecimento, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.
- [4] H. Chandra-Holm, M. Bichsel, P. Uggowitzer, The fracture toughness behaviour of a 18 ni (300 grade) maraging steel in various solution treated and aged conditions, Scripta metallurgica 18 (4) (1984) 373–378.
- [5] J. C. Lopes, Os aços maraging, Ciência & Tecnologia dos Materiais 19 (1-2) (2007) 41–44.
- [6] A. Koike, R. Tokimatsu, F. Nogueira, S. Irikura, G. de Caracterização Mecânica, M. dos Materiais, A influência da microestrutura na tenacidade à fratura dinâmica aparente do aço abnt 4340, Anais do 17º CBCIMat–15 a 19.
- [7] A. N. Strahler, Quantitative analysis of watershed geomorphology, Eos, Transactions American Geophysical Union 38 (6) (1957) 913–920.
- [8] L. Vincent, P. Soille, Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations, IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence 1 (6) (1991) 583–598.
- [9] Mathworks, bwlabel, disponível em <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwlabel.html>. Acesso em dezembro de 2019. (2019).
- [10] R. C. Gonzales, R. E. Woods, Digital image processing (2002).
- [11] P. Soille, Morphological image analysis: principles and applications, Springer Science & Business Media, 2013.